

Università della Calabria

DOTTORATO DI RICERCA

Ambiente, Salute e Processi Ecosostenibili

Ciclo XXIII

2007 - 2010

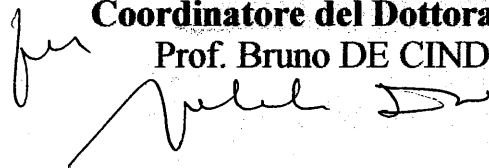
Settore scientifico disciplinare di afferenza: ING-IND/22

Titolo della Tesi

**Conglomerati cementizi a basso impatto
ambientale confezionati con materiale P.F.U.**

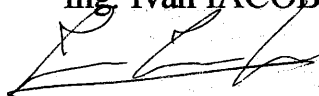
Coordinatore del Dottorato

Prof. Bruno DE CINDIO



Dottorando

Ing. Ivan IACOBINI



Supervisore

Prof. Ing. Fortunato CREA



Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 – Pneumatici a fine utilizzo (PFU)	3
1.1 Premessa	3
1.2 Dalla gomma al pneumatico	3
1.2.1 Definizione e generalità	3
1.2.2 Cenni storici	3
1.2.3 Produzione della gomma naturale	9
1.2.4 Produzione della gomma sintetica	10
1.2.5 Produzione dei manufatti in gomma	11
1.3 I pneumatici	12
1.3.1 I polimeri e la gomma: generalità	13
1.3.2 Composizione strutturale di un pneumatico	14
1.3.3 Composizione chimica di un pneumatico	14
1.3.4 Proprietà dei pneumatici	15
1.4 Il pneumatico come rifiuto	16
1.4.1 Generalità: inquinamento e riscaldamento globale	17
1.4.2 Protocollo di Kyoto	18
1.4.3 Sviluppo sostenibile	21
1.5 Il problema dei rifiuti	24
1.5.1 Problematica dei PFU	28
1.5.2 Normativa	30
1.6 Principali metodologie per il recupero della gomma	36
1.6.1 Il ciclo dei pneumatici	37
1.6.2 Riutilizzo della gomma: Riscopitura	38
1.6.3 Riutilizzo della gomma: Ricostruzione	39
1.6.4 Triturazione meccanica	39
1.6.4.1 Rimozione del tallone	40
1.6.4.2 Triturazione	40
1.6.4.3 Granulazione primaria	40
1.6.4.4 Granulazione secondaria	40
1.6.4.5 Micronizzazione	41
1.6.4.6 Prodotti di triturazione	41
1.6.5 Processi criogenici	42
1.6.6 Processi elettrotermici	43
1.6.7 La termodistruzione (combustione)	43
1.6.7.1 Co-combustione in forni industriali	44
1.6.7.2 Pirolisi	44
1.6.8 Recupero energetico	45
1.6.8.1 Industrie dei cementi e produzione di fuliggine	45
1.6.8.2 Produzione di energia elettrica	46
1.6.8.3 Produzione di vapore	46
1.6.8.4 Inceneritori di rifiuti	47
1.7 Analisi della quantità di pneumatici immessi nel mercato: la situazione italiana	47
1.7.1 Stima del quantitativo di pneumatici usati prodotti	47
1.7.2 Metodo diretto	47
1.7.3 Metodo ETRA	48
1.7.4 Metodo dei minimi quadrati	49
1.7.5 Quantitativi dei PFU e loro destinazioni	49
1.8 Impieghi principali dei PFU	53
1.8.1 Pavimentazioni antitrauma	53
1.8.2 Pannelli fono e termo-isolanti	54
1.8.3 Pavimentazioni	55
1.8.4 Superfici drenanti	55
1.8.5 Suoli sportivi	55
1.8.6 Aree di gioco	56
1.8.7 Parti di auto	56
1.8.8 Ruote	56

1.8.9 Calzature	56
1.8.10 Rivestimenti interni	56
1.8.11 Materiali per tetti	56
1.8.12 Segnaletica ed accessori stradali	56
1.8.13 Condotte idriche drenanti	56
1.8.14 Asfalti	57
1.8.15 Porti e marina	57
1.9 Impiego del materiale PFU nei conglomerati cementizi: stato dell'arte	59
Capitolo 2 - Le Malte.....	63
2.1 Premessa	63
2.2 Leganti: cenni storici	63
2.3 Costituenti delle malte	66
2.3.1 Leganti	66
2.3.1.1 Cementi	66
2.3.1.2 Calce aerea	68
2.3.1.3 Calce idraulica	69
2.3.1.4 Gesso	69
2.3.2 Sabbia	70
2.3.3 Acqua	70
2.3.4 Additivi	71
2.4 Classificazione delle malte	71
2.4.1 Classificazione in base ai componenti	71
2.4.1.1 Malte di calce aerea	71
2.4.1.2 Malte di calce idraulica	72
2.4.1.3 Malte cementizie	73
2.4.1.4 Malte composte o bastarde	75
2.4.1.5 Malte additivate	76
2.4.2 Classificazioni in base all'utilizzo	78
2.4.2.1 Malte per murature	78
2.4.2.2 Malte per intonaco	79
2.4.2.3 Malte per sottofondi	83
2.4.2.4 Malta per decorazioni	86
2.4.2.5 Malte da restauro	86
2.4.2.7 Malte a ritiro controllato	88
2.4.2.7 Malta impermeabilizzante	88
2.4.2.8 Malta espansiva	88
2.4.2.9 Malta a presa rapida	89
2.4.2.10 Malta a rapidissimo indurimento	89
2.4.2.11 Malta per incollaggio o per rivestimenti sottili	89
2.4.2.12 Malta di asfalto per massetti	89
2.4.2.13 Malta espansiva per demolizioni	89
2.4.2.14 Malte per usi speciali	89
2.5 Tecniche di confezionamento	90
2.5.1 Dosaggi	90
2.5.2 Confezionamento delle malte	90
2.5.3 Caratteristiche dell'impasto	91
2.5.4 Caratteristiche di biocompatibilità delle malte	91
2.6 Riferimenti normativi	92
Capitolo 3 - I Calcestruzzi.....	94
3.1 Cenni sul calcestruzzo ordinario	94
3.2 Generalità	94
3.3 Materiali	96
3.4 Degradazione e durabilità	104
3.4.1 Tipologie di degrado del Calcestruzzo	105
3.4.2 Cause di tipo chimico	105
3.4.2.1 Attacco da solfati	105
3.4.2.2 Attacco da acque pure ad azione dilavante	106
3.4.2.3 Reazioni alcali-aggregati	106

3.4.2.4 Carbonatazione	107
3.4.2.5 Penetrazione da cloruri	107
3.4.3 Cause di degrado di tipo fisico	108
3.4.3.1 Degrado promosso da cicli di gelo e disgelo	108
3.4.3.2 Ritiro	109
3.4.3.3 Calore di idratazione	109
3.4.3.4 Incendio	109
3.4.4 Cause di tipo meccanico	109
3.4.5 Durabilità	109
3.4.6 Approccio normativo: le classi di esposizione	110
3.5 Evoluzione del calcestruzzo ordinario: calcestruzzi innovativi	110
3.5.1 Calcestruzzo ad alta prestazione e alta resistenza	111
3.5.2 Calcestruzzo autocompattante	112
3.5.3 Calcestruzzi autocompattanti ad alte prestazioni	115
3.5.4 Calcestruzzo con aggregato riciclato	116
3.5.5 Calcestruzzo leggero strutturale	117
3.5.6 Calcestruzzo fibro-rinforzato	118
3.5.7 Calcestruzzo a ritiro compensato	118
3.5.8 Calcestruzzo proiettato	119
3.6 Normativa	119
Capitolo 4 – Strumentazioni e metodologie di prova	125
4.1 Premessa	125
4.2 Caratterizzazione dei materiali usati negli impasti	125
4.2.1 Analisi diffrattometrica ai raggi X	125
4.2.2 Microscopia elettronica a scansione (SEM)	127
4.2.3 Microanalisi a dispersione di energia (EDAX)	130
4.2.4 Analisi termica	130
4.2.5 Prove di resistenza a flessione e a compressione per la caratterizzazione meccanica dei cementi	130
4.2.6 Perdita al fuoco	132
4.2.7 Residuo insolubile	133
4.2.8 Tenore in cloruro	133
4.2.9 Tenore in solfato	134
4.2.10 Determinazione del tempo di presa e della stabilità	134
4.2.11 Analisi granulometrica	136
4.3 Caratterizzazione delle malte	138
4.3.1 Rilevazione del Peso	138
4.3.2 Prove meccaniche di resistenza a flessione e a compressione	139
4.3.3 Cicli termici	139
4.3.4 Indagine ultrasonora	140
4.4 Caratterizzazione dei calcestruzzi	141
4.4.1 Prove allo stato fresco	141
4.4.1.1 Prova al cono di Abrams	141
4.4.1.2 Slump Flow Test	143
4.4.1.3 J-Ring Test	144
4.4.1.4 V-Funnel Test	145
4.4.2 Prove allo stato indurito	148
4.4.2.1 Prova meccanica di resistenza a compressione	148
4.4.2.2 Prova di gelo-disgelo	149
4.4.2.3 Determinazione del modulo elastico secante	150
4.4.2.4 Prove non distruttive	151
4.4.2.4.1 Prova sclerometria	152
4.4.2.4.2 Prova ultrasonora	156
4.4.2.4.3 Metodo SonReb	164
4.4.2.5 Prova di ritiro	166
4.4.2.6 Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro	167
4.4.2.7 Determinazione della penetrabilità dello ione solfato	168
4.4.2.8 Prove termiche ad alte temperature	168

Capitolo 5 – Materiali	170
5.1 Premessa	170
5.2 Gomma PFU	170
5.2.1 Frazioni granulometriche	170
5.2.2 Analisi granulometriche	170
5.2.3 Microscopia e fotografia	171
5.2.4 Analisi chimica elementare	172
5.3 Cementi	172
5.3.1 Cemento CEM III/A 32.5N	172
5.3.1.1 Prove chimiche	173
5.3.1.2 Prove fisiche	173
5.3.1.3 Prove meccaniche	173
5.3.1.4 Altre prove	174
5.3.1.4.1 Microscopia	174
5.3.1.4.2 Analisi chimica elementare	174
5.3.1.4.3 Analisi diffrattometrica	175
5.3.1.4.4 Analisi termica	175
5.3.2 Cemento CEM II/A-LL 32.5R	175
5.3.2.1 Prove chimiche	176
5.3.2.2 Prove fisiche	176
5.3.2.3 Prove meccaniche	176
5.3.2.4 Altre prove	176
5.3.2.4.1 Microscopia	177
5.3.2.4.2 Analisi chimica elementare	177
5.3.2.4.3 Analisi diffrattometrica	177
5.3.2.4.4 Analisi termica	178
5.3.3 Cemento CEM II/A-S 42.5R	178
5.3.3.1 Prove chimiche	179
5.3.3.2 Prove fisiche	179
5.3.3.3 Prove meccaniche	179
5.3.3.4 Altre prove	179
5.3.2.4.1 Microscopia	179
5.3.2.4.2 Analisi chimica elementare	180
5.3.2.4.3 Analisi diffrattometrica	180
5.3.2.4.4 Analisi termica	181
5.4 Aggregati	181
5.4.1 Sabbie	181
5.4.1.1 Analisi granulometriche	182
5.4.1.2 Analisi diffrattometriche	183
5.4.2 Aggregati “Grossi”	184
5.4.2.1 Distribuzioni granulometriche	184
5.4.2.2 Analisi diffrattometriche	186
5.5 Zeolite	187
5.5.1 Microscopia	187
5.5.2 Analisi chimica elementare	188
5.5.3 Analisi diffrattometrica	189
5.5.4 Analisi termica	189
5.6 Fumo di silice	189
5.6.1 Microscopia	190
5.6.2 Analisi chimica	190
5.6.3 Analisi diffrattometrica	191
5.7 Filler Calcareo	191
5.7.1 Microscopia	192
5.7.2 Analisi diffrattometrica	192
5.8 Acqua	192
5.9 Additivi	192
5.9.1 Additivi superfluidificanti	193
5.9.2 Additivo aerante	194

Capitolo 6 - Malte sperimentali realizzate con gomma PFU e fini non convenzionali	196
--	------------

6.1 Premessa	196
6.2 Malte di prima serie	196
6.2.1 Confezionamento dei provini di malta di prima serie	196
6.2.2 Misure del peso dei provini di prima serie	197
6.2.3 Prove di resistenza meccanica a flessione sui provini di prima serie	211
6.2.4 Prove di resistenza meccanica a compressione sui provini di prima serie	220
6.3 Miscele di malta di seconda serie	230
6.3.1 "Peso" delle miscele di seconda serie	231
6.3.2 Resistenza a flessione delle miscele di seconda serie	233
6.3.3 Resistenza a compressione delle miscele di seconda serie	235
6.4 Miscele di malta di terza serie	237
6.4.1 Preparazione dei provini delle miscele di terza serie	240
6.4.2 Analisi del peso dei provini di terza serie	241
6.4.3 Resistenza a flessione malte di terza serie	243
6.4.4 Resistenza a compressione delle malte di terza serie	246
6.5 Cicli termici e prove ultrasonore sulle miscele ottimizzate	251
6.5.1 Miscele di seconda serie: prove meccaniche a 90 giorni di stagionatura	253
6.5.2 Variazione del peso medio dei provini per effetto dei cicli termici	254
6.5.3 Indagine ultrasonica sui provini di seconda serie	256
6.5.4 Prove di resistenza meccanica a flessione sui provini di seconda serie sottoposti a cicli termici	261
6.5.5 Prove di resistenza meccanica a compressione sui provini di seconda serie sottoposti a cicli termici	262
6.5.6 Curve interpolatrici tra la resistenza a compressione e la velocità ultrasonica	263

Capitolo 7 - Progettazione e caratterizzazione di calcestruzzi a basso impatto ambientale realizzati con gomma PFU e fini non convenzionali268

7.1 Premessa	268
7.2 Calcestruzzi ordinari	268
7.2.1 Calcestruzzi ordinari: campagna di indagine	268
7.2.2 Calcestruzzi ordinari: mix design delle miscele di prima approssimazione	269
7.2.3 Provini, tolleranze e dimensioni	270
7.2.4 Casseforme per calcestruzzi	270
7.2.5 Preparazione dei provini	270
7.2.6 Sformatura dei provini e stagionatura	270
7.2.7 Prove di resistenza a compressione dei provini di prima approssimazione	271
7.2.8 Prove di gelo-disgelo	273
7.2.9 Analisi dei pesi dei provini sottoposti a gelo-disgelo	273
7.2.10 Analisi delle resistenze meccaniche a compressione dei provini sottoposti a cicli di gelo-disgelo	276
7.2.11 Valutazione del danno subito dai provini a causa dei cicli di gelo-disgelo	276
7.2.12 Mix-design degli impasti di calcestruzzo ordinario definitivi	278
7.2.13 Prove di resistenza a compressione dei provini realizzati con gli impasti della seconda serie	279
7.2.14 Valutazione del modulo elastico secante	281
7.3 Calcestruzzi autocompattanti	284
7.3.1 Campagna di indagine	284
7.3.2 Calcestruzzi autocompattanti: materiali	285
7.3.3 Calcestruzzi autocompattanti: miscele di prova	285
7.3.4 Calcestruzzi autocompattanti: miscele definitive	287
7.3.5 Caratterizzazione reologica allo stato fresco	288
7.3.5.1 Slump flow test delle miscele definitive	289
7.3.5.2 J-Ring test delle miscele definitive	290
7.3.5.3 V-funnel test delle miscele definitive	291
7.3.6 Caratterizzazione meccanica delle miscele definitive di calcestruzzo autocompattante	292
7.3.7 Caratterizzazione fisico-meccanica con prove non distruttive delle miscele definitive di calcestruzzo autocompattante	293
7.3.7.1 Prove sclerometriche: fase di rilevazione	295
7.3.7.2 Prove sclerometriche: fase di stima	295

7.3.7.3 Prove sclerometriche: fase di verifica	296
7.3.7.4 Prove ultrasonore: fase di rilevazione	298
7.3.7.5 Prove ultrasonore: fase di stima	299
7.3.7.6 Prove ultrasonore: fase di verifica	299
7.3.7.7 Metodo combinato SonReb	302
7.3.7.8 Confronto resistenze	304
7.3.8 caratterizzazione chimico-fisica delle miscele di calcestruzzo autocompattante...	306
7.3.8.1 Prove di ritiro sulle miscele di calcestruzzo autocompattante	306
7.3.8.2 Valutazione del ritiro tramite normative e parametro correttivo "I"	308
7.3.8.3 Prove di durabilità sui provini realizzati con le miscele definitive di calcestruzzo autocompattante	312
7.3.8.3.1 Attacchi chimici promossi dagli ioni cloruro e solfato: peso a secco prima degli attacchi	313
7.3.8.3.2 Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro	314
7.3.8.3.3 Determinazione della penetrabilità dello ione solfato	315
7.3.8.3.4 Variazione di peso provocato dagli attacchi chimici (ioni cloruro e solfato)	317
7.3.8.3.5 Prove di gelo e disgelo sui provini realizzati con le miscele definitive di calcestruzzo autocompattante...	318
7.3.8.4 Prove termiche ad alta temperatura sui provini realizzati con le miscele definitive di calcestruzzo autocompattante	321
7.4 Ottimizzazione dei calcestruzzi autocompattanti: miscele SCC di seconda serie	324
7.5 Calcestruzzi autocompattanti ottimizzati di terza serie: uso di gomma PFU trattata termicamente	327
Conclusioni	329
Bibliografia	333

Introduzione

Negli ultimi anni, lo smaltimento dei “rifiuti in gomma” derivanti dalla periodica sostituzione dei pneumatici usurati, dagli scarti dell’industria della gomma, dalla ricostruzione di pneumatici usati e dalla rottamazione degli autoveicoli (pneumatici fuori uso, PFU), ha suscitato crescente interesse, tanto che il relativo flusso è stato inserito tra i Flussi Prioritari di Rifiuti nell’ambito Comunitario. Basti pensare che solo in Italia, ogni anno, i pneumatici fuori uso ammontano a circa 400mila e altre 95 mila provengono dalla demolizione di auto, di cui una consistente quota sfugge al circuito dello smaltimento in discarica e del riciclaggio. C’è da dire, inoltre, che la produzione di gomma incrementa di anno in anno¹. A livello nazionale, con decreto legislativo del 13 gennaio 2003 n.36, il governo italiano ha recepito la direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti, in cui è stato stabilito che, a partire dal luglio 2003, i pneumatici possono essere conferiti in discarica solo triturati, mentre, a partire dal luglio 2006, è scattato un divieto assoluto di conferimento. L’interesse in materia è giustificato dal fatto che il materiale polimerico, anche se smaltito in discarica controllata, potrebbe dar luogo ad effetti assai nocivi, come ad esempio la possibilità di incendio e di instabilità meccanica all’interno della massa di rifiuti. Essendo poi la gomma un materiale recuperabile sia sotto forma di materia che di energia, non recuperarla costituirebbe una importante perdita di risorse. Tuttavia, diverse sono le tipologie di materiale attualmente ottenibili dal trattamento dei pneumatici usati, utilizzate da diversi settori industriali ed entrate oramai nell’uso corrente in numerosi campi di applicazione. L’impiego più importante del materiale PFU è quello relativo all’utilizzo come combustibile alternativo. Per tale scopo i pneumatici sono triturati e ridotti ad una pezzatura in genere inferiore ai 100 mm e utilizzati per il recupero energetico, appunto, come combustibile nelle cementerie. Altri impieghi importanti si hanno nel campo dei manufatti. Infatti, dopo opportuni processi di triturazione e di miscelazione con appositi leganti si possono ottenere manufatti di varia tipologia da adoperare in svariati campi di applicazione. Tra i principali vi sono: manufatti per viabilità ferroviaria, manufatti per viabilità stradale, manufatti per arredo urbano, manufatti per pavimentazioni². Tutte queste tipologie di prodotti sono accomunati da caratteristiche quali un grande coefficiente di attrito, un’ottima durabilità, una facile posa e manutenzione, una elevata funzione di fonoisolanza, antivibrante e antishock per pavimentazioni. Da tutto ciò, nasce l’idea dell’utilizzo combinato del materiale polimerico con il materiale più utilizzato nel campo delle costruzioni: il cemento. Dalla letteratura scientifica in merito, emergono sia le potenzialità di utilizzo sia limitazioni. L’uso di materiale PFU nel confezionamento di malte e calcestruzzi, conferisce al manufatto allo stato indurito interessanti proprietà come una bassa densità, una elevata resistenza agli urti, migliori caratteristiche di isolamento acustico, ecc.. La limitazione più grande è caratterizzata dalla riduzione di resistenza causata sia dal basso valore di resistenza a compressione tipico del

¹ Sukontasukkul P.; Chaikaew C. (2006). Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 20, 450–457;

² Scofield L.A. (1989). The history, development, and performance of asphalt rubber at Adot. Adot, Report No. AZ-SP-8902;

Chesner W.H.; Collins R.J.; MacKay M.H. (1998). Users guidelines for waste and by-product materials in pavement construction. Commack: Chesner Engineering, P.C. Report No. FHWA-RD, 97-148.

materiale PFU, sia dalla scadente adesione tra le particelle di gomma e la matrice cementizia³. Tuttavia, sempre dalla letteratura scientifica in materia, emergono segnali incoraggianti anche sull'aspetto delle resistenze: secondo Han Zu, della Arizona State University, aggiungendo al cemento piccole quantità di gomma, ridotta in grani da 1 mm, ne può aumentare la resistenza e la durata. Come esempio, Han Zu costruì nel 1999 un marciapiede che ancora non ha dato segni di deterioramento; la ricerca ha mostrato, inoltre, che l'aggiunta di una piccola quantità di gesso può ripristinare parte della resistenza a compressione. In generale, però, ancora non è stato risolto il problema relativo alla perdita di resistenza nei manufatti confezionati con gomma PFU e l'esperimento condotto in Arizona, in realtà, non è stato ancora recepito dalla comunità scientifica come una soluzione definitiva. Ecco perché è importante ricercare delle procedure e dei materiali che permettano di eliminare l'inconveniente o quanto meno di limitarlo. Nella presente sperimentazione, che si propone come principale obiettivo proprio il tentativo di limitare il fenomeno precedentemente descritto, è stato previsto, ad esempio, l'uso innovativo di aggiunte minerali, congiuntamente all'aggiunta del materiale PFU per la realizzazione di malte e calcestruzzi. L'aggiunta di zeolite ha consentito l'ottenimento di un'interfaccia più resistente tra la matrice cementizia ed il materiale polimerico, conferendo una maggiore resistenza meccanica al conglomerato realizzato. È da sottolineare che, nella sperimentazione in esame, è stato previsto l'utilizzo di una zeolite sintetica industriale di facile reperibilità nel territorio calabrese. Inoltre, si è pensato di trattare termicamente e preventivamente il materiale polimerico al fine di conferirgli caratteristiche meccaniche superiori rispetto al materiale tal quale proveniente dalla semplice triturazione meccanica dei pneumatici. Ovviamente, il trattamento termico scelto non incide significativamente né sui costi economici per eseguire il processo stesso e né modifica in maniera sostanziale la natura e le prestazioni della gomma. Tuttavia, come si avrà modo di apprezzare nella parte sperimentale del lavoro, i risultati ottenuti con test meccanici hanno evidenziato il raggiungimento di valori di resistenza molto positivi ed incoraggianti. Per quanto riguarda le applicazioni possibili dei conglomerati realizzati con la frazione polimerica, è auspicabile l'utilizzo del materiale composito in applicazioni anche di tipo strutturale, soprattutto in ambienti aggressivi dove potrebbe superare le prestazioni dei manufatti ordinari in termini di durabilità dell'opera stessa. Per il campo dei calcestruzzi, ad esempio, il materiale granulato PFU potrebbe sostituire l'uso dell'additivo aerante, prescritto a livello normativo per la durabilità dei conglomerati posti in ambienti soggetti a ciclo di gelo/disgelo.

³ Eldin N.; Senouci A.B. (1993). Rubber-tire particles as concrete aggregate. *ASCE: J Mater Civil Eng*, 5(4), 478-96;

Huynh H.; Raghavan D.; Ferraris C. (1996). Rubber particles from recycled tires in cementitious composite materials. *NISTIR 5850 R*, 23;

Rostami H.; Lepore J.; Silverstraim T.; Zandi I. (1993). Use of recycled rubber tires in concrete. *Proceedings of the international conference on concrete 2000. UK: University of Dundee*, 391-399;

Khatib Z.K.; Bayomy F.M. (1999). Rubberized Portland cement concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*; 11 (3), 206-213;

Capitolo 1

Pneumatici a fine utilizzo (PFU)

1.1 Premessa

In questo capitolo si affronterà la tematica relativa al riutilizzo del materiale gommoso proveniente dalla triturazione di pneumatici fuori uso o a fine vita (PFU). In particolare, in una prima parte si tratterà circa l'origine e le tradizionali modalità e tecnologie di produzione delle gomme, mentre in una seconda parte, previa analisi della problematica ambientale venutasi a creare nell'ultimo ventennio a causa degli enormi quantitativi di questi materiali che risultano di scarto, si discuterà sulle possibilità di riutilizzo del granulato di gomma in diversi campi tecnologici, con particolare riferimento al riutilizzo nel settore dei conglomerati cementizi.

1.2 Dalla gomma al pneumatico

Col termine generale di polimeri si intende un vasto gruppo di sostanze chimiche aventi un peso molecolare molto elevato. In natura esistono numerose sostanze organiche formate da macromolecole e che, quindi, possono essere considerate polimeri naturali. Attualmente, l'industria chimica è in grado di preparare un gran numero di polimeri denominati genericamente materie plastiche, che trovano interessanti applicazioni per la preparazione di fibre sintetiche, gomme elastiche, oggetti stampati, tubi e fogli trasparenti, pellicole, adesivi, rivestimenti idrorepellenti, scambiatori di ioni, ecc. La gomma, insieme alla cellulosa, rappresentano, per eccellenza, i polimeri naturali.

1.2.1 Definizione e generalità

La gomma in origine era un prodotto naturale con caratteristiche di elasticità, ottenuto dalla secrezione di alcune piante. Attualmente gomma è un termine che non indica una sola sostanza, ma un'intera classe di prodotti, costituita da numerosi materiali che hanno in comune la proprietà di essere notevolmente elastici. La gomma è un materiale relativamente morbido, diverse migliaia di volte meno rigido dell'acciaio, e possiede elevate caratteristiche meccaniche di resilienza, o capacità di resistenza agli urti. Queste proprietà tipiche della gomma derivano dalla struttura chimica delle sue molecole, che è molto grande rispetto ai composti chimici semplici. La molecola della gomma è un esempio di polimero (una lunga catena costituita da decine di migliaia di unità più piccole, o monomeri, legati insieme) in cui ciascuna unità monomerica ha grandezza molecolare paragonabile a quella di sostanze semplici come lo zucchero. Le lunghe molecole della gomma sono molto flessibili e i legami incrociati che possono stabilirsi tra di esse rendono la gomma elastica. Il processo che crea questi legami si chiama vulcanizzazione.

1.2.2 Cenni storici¹

Quando lo scozzese Robert William Thomson depositò la propria invenzione all'Ufficio Brevetti di Londra il 10 giugno 1846 ("Applicazione di supporti elastici intorno alle ruote di veicoli, allo scopo di diminuire lo sforzo necessario a trainarli, rendere il loro movimento più facile e attutire il rumore che fanno

¹ <http://pneus.myblog.it/archive/2008/04/21/la-storia-del-pneumatico-prima-parte.html>;

http://museoauto.it/mambo/index2.php?option=content&do_pdf=1&id=211;

quando si muovono”), nessuno gridò al miracolo, per la semplice ragione che i “veicoli” a cui si sarebbe potuto applicare la geniale invenzione (bicicletta, motocicletta ed automobile) non erano stati a loro volta ancora inventati. All’epoca, si erano appena scoperte le qualità magiche e un po’ misteriose della gomma. Già molto tempo prima alcune tribù brasiliane avevano notato che dal tronco dell’albero “*Hevea brasiliensis*”, se inciso, scaturiva un lattice denso e vischioso al quale, lavorato, si poteva far assumere la forma che si voleva. La prima descrizione dell’*Hevea Brasiliensis* ci perviene da Charles-Marie de Condamine. Nel 1736 partì alla volta dell’Ecuador, attraverso la foresta pluviale, a capo di una missione scientifica allo scopo di misurare la lunghezza di un grado di longitudine all’equatore. Ma egli finì per trovare molto di più. Si imbatté nei Tsachali, popolo indigeno della foresta. Essi mostrarono come, tagliando superficialmente la corteccia dell’*Hevea*, ne fuoriusciva un liquido lattiginoso bianco, chiamato caoutchouc (legno che piange). Lo usavano in genere per rendere impermeabile qualunque cosa, perfino le canoe con cui risalivano il fiume. Al suo ritorno in Francia, portò alcuni campioni da studiare e sottoporre all’attenzione del mondo scientifico. Fino alla scoperta del caucciù, era mancato in Europa un materiale elastico veramente impermeabile all’acqua e all’aria. Prima, chimici e pompieri dovevano accontentarsi di manichette di cuoio, che perdevano ad ogni cucitura; stivali e abiti da pioggia non erano mai del tutto impermeabili.



Figura 1.1 – *Hevea Brasiliensis*

Il problema principale per gli europei era, a quel tempo, la difficoltà di conservare il caucciù; il lattice non si conservava a lungo e non poteva perciò essere spedito in Europa in forma liquida. Il caucciù poteva essere spedito solo dopo averlo fatto seccare: una volta secco, però, era troppo denso e duro per poterlo lavorare oltre. Tuttavia, nell’euforia generale, si incominciò subito a copiare gli usi degli indigeni americani. Si producevano elastici, con i quali venivano fabbricate bretelle e giarrettiere e soles per le scarpe. Ma i primi tentativi furono molto deludenti: tutti questi prodotti avevano due inconvenienti: primo, già a temperature normali erano appiccicosi, e lo diventavano ancora di più quando faceva caldo; secondo, quando faceva freddo diventavano sempre più rigidi e fragili. Seguirono sporadici tentativi di utilizzare la gomma dissecata, ma con scarso successo. Questa serie di fallimenti stava per distogliere l’attenzione dal prodigioso polimero, quando accadde un fatto che rinnovò lo stupore popolare: casualmente, nel 1770, il chimico e naturalista inglese Joseph Priestley scoprì che la gomma, sfregata sulla carta, ne cancellava i segni di matita. Ma il passo in avanti si ebbe subito dopo quando si osservò che la gomma risultava impermeabile ai gas e che era solubile in trementina: e così nel 1783, applicando tale soluzione ad un modulo di tela ed aspettando l’evaporazione del solvente, si

ottenne per la prima volta, con un procedimento chimico, un tessuto rivestito da una sottile ed omogenea pellicola di gomma (i fratelli Montgolfier ne seppero fare buon uso). Questa piccola scoperta fu un vero e proprio boom per il commercio; Nel frattempo, un chimico francese, Macquer si occupò della produzione di tubi di gomma, spalmando la soluzione di gomma su forme di cera. Un altro francese, Grossart, tentò di fare lo stesso, avvolgendo su forme di vetro tonde strisce di gomma rese molli dalla trementina. Infine, nel 1803, fu fondata a Parigi la prima fabbrica di gomma. Poco dopo un industriale di Glasgow, Charles Macintosh, cercando di ottenere profitto anche dagli scarti di lavorazione della sua industria (produceva ammoniaca dal catrame di carbone) scoprì che la nafta era un solvente decisamente superiore alla trementina, e insieme ad Thomas Hancock fondò uno stabilimento per la produzione di impermeabili. Il problema della resistenza alle alte e basse temperature non era però ancora risolto, ma, tuttavia, la produzione di oggetti gommati o in gomma prendeva sempre più passo e la richiesta di gomma grezza cominciava a superare l'effettiva disponibilità. Thomas Hancock pensò di poter riciclare la gomma e così ideò e realizzò il "masticator", macchina stridente gigante che divorando vecchi impermeabili rotti produceva grandi blocchi di gomma che poteva così essere riutilizzata piuttosto che buttata via. Nel 1834 un commerciante all'ingrosso in bancarotta, Charles Goodyear, si presentò nel magazzino di vendita al dettaglio di New York del Roxbury India Rubber Co., il primo produttore di gomma in America. Era lì per mostrare una nuova valvola che egli aveva ideato. Il direttore scosse tristemente la testa: la società non era nel mercato delle valvole; anzi, ancora un po', e non sarebbe rimasta in affari affatto. E gli mostrò il perché: su una rastrelliera nel retro del negozio, tonnellate di merce di gomma erano ridotte dal tempo torrido a colla maleodorante. Gli confidò che migliaia di articoli di gomma fusa venivano restituiti da clienti oltraggiati. I direttori si erano incontrati nel cuore della notte per bruciare in una fossa 20.000 dollari di scarti puzzolenti. La "febbre della gomma" del 1830 sembrava volgere al termine. Dapprima tutti avevano voluto oggetti della nuova gomma impermeabile dal Brasile e le fabbriche erano nate per soddisfare la domanda. Ma il pubblico si era bruscamente stufato: non una delle società di gomma era sopravvissuta più di cinque anni. Gli investitori avevano perso milioni. Goodyear deluso, intascò la valvola, ma fu in questa occasione che decise di dedicare il resto della vita al perfezionamento della gomma. Dopo cinque anni di futili tentativi, Goodyear era sull'orlo del precipizio, viveva di elemosina mentre i suoi figli morivano di fame. La grande scoperta avvenne nell'inverno del 1839. Goodyear adesso utilizzava zolfo nei suoi esperimenti, riuscendo ad ottenere una gomma più resistente ma non tanto diversa da quella non trattata. L'uno febbraio si presentò nel magazzino generale di Woburn per sottolineare la sua ultima formula "gum and sulphur". Ma reso eccitato dalla dimostrazione, il campione di gomma gli volò dalle mani, atterrando su una stufa calda. Fu allora che le cose cambiarono: quando si piegò per raschiarlo, invece di una melassa tenera, trovò dei frammenti carbonizzati. E intorno all'area carbonizzata, un orlo marrone asciutto e perfettamente elastico. Aveva, del tutto inconsapevolmente, scoperto quello che oggi è a noi noto come processo di vulcanizzazione. Non bastava mescolare zolfo alla gomma ma bisognava anche fornire calore. In effetti, Goodyear cercava solo delle polveri che ne assorbissero la viscosità ed era del tutto ignaro, come il resto della comunità scientifica del tempo, del processo chimico che vi sta alla base. Ma Goodyear e Thomson non erano destinati alla notorietà. Goodyear, morto nel 1860, non solo non ebbe mano nella fondazione dell'impresa statunitense che

porta, in suo omaggio, il suo nome, ma addirittura morì poverissimo, in quanto il suo brevetto di “vulcanizzazione” fu copiato da tutti senza che egli riuscisse a far valere i propri diritti. Nel 1889 lo statunitense Frank Seiberling diede il nome dell’inventore alla sua società: la Goodyear Tire and Rubber Company per rendergli il giusto onore. Né Thomson fu molto più fortunato: morì nel 1873, a cinquantuno anni, unico proprietario al mondo di una carrozza che montasse ruote con pneumatici, e la sua “ruota aerea” fu completamente dimenticata per molti anni. Nel suo brevetto invece già era contenuta in embrione l’intera invenzione del pneumatico: la realizzazione della camera d’aria con una foglia di gomma oppure in tela impregnata di gomma o di guttaperca; un rivestimento di cuoio, atto a sopportare il peso e le torsioni della ruota; la vulcanizzazione della gomma tramite immersione nello zolfo; la valvola attraverso cui gonfiare d’aria il pneumatico, ossia l’idea base su cui si basa la genialità del brevetto, e che costituisce il principio fondamentale dell’invenzione. Thomson, infatti, riteneva l’aria il mezzo migliore, “così che durante la sua rivoluzione la ruota avrebbe sempre presentato verso la strada, il binario, la carreggiata, un cuscino d’aria”, e il fatto stesso che accennasse al binario dimostra che aveva intuito le enormi potenzialità d’uso del suo ritrovato. Si era spinto fino ad ipotizzare eventuali altre sostanze solide che, in combinazione con l’aria, rendessero la gomma più resistente alle forature (si basa su un principio non molto dissimile la schiuma sintetica che viene oggi utilizzata in caso di foratura). Aveva previsto persino la camera d’aria multipla. Non restava che la dimostrazione pratica, organizzata al Regents Park di Londra l’anno dopo, con una carrozza a cavalli. I risultati di questa prova furono pubblicati sulla rivista “The Mechanic’s Magazine”, nel 1849, e le cifre a commento erano significative. Sul selciato a macadam (cioè pavimentato con pietrisco e bitume, dal nome dell’inventore che aveva istruito efficacemente gli operai dicendo “non scegliete alcuna pietra più grossa di quella che vi starebbe in bocca”) si registrò una riduzione del 40% della forza necessaria a trainare la carrozza. Inoltre, il silenzio, il maggiore comfort, la facile manovrabilità stupirono tutti gli astanti. E nessun altro. L’esperimento non ebbe seguito. Nessuno si presentò a sviluppare industrialmente l’idea, e tantomeno ad iniziare una produzione basata su questi rivoluzionari principi. Tutto sfumò nell’oblio. In Francia nel 1868 Clement Ader applicò per la prima volta una fasciatura di gomma piena alle ruote di un "biciclo" nemmeno dieci anni dopo tutti i bicikli adottavano questa soluzione. L’uomo che inventò il pneumatico per la seconda volta fu John Boyd Dunlop, nato in Scozia nel 1840. A quarantaquattro anni, nel 1888, si trovò a cercare una soluzione per il figlioletto decenne che si lamentava di un triciclo troppo lento e troppo pesante da guidare. Come è noto, i cuori dei padri sono ingegnosi, e Dunlop pensò ad una gomma vuota riempita d’aria, in modo da dare alla ruota una sezione adeguata senza un peso eccessivo, come invece succedeva con le ruote piene. C’è una fotografia curiosa, che ritrae Dunlop durante il test a cui sottopose i due tipi di ruote. La foto lo fissa mentre ne lancia una verso il muro di casa, distante alcune decine di metri, per vedere come si comporta. La ruota piena perse la propria energia dopo pochi metri, e cadde su se stessa. Lanciata con lo stesso gesto e la stessa forza, quella pneumatica attraversò tutto il cortile, urtò contro la parete e rimbalzò, con ancora dell’energia motrice. Era fatta: il brevetto fu depositato il 23 luglio dello stesso anno. Si faceva esplicito riferimento all’utilità del ritrovato per veicoli leggeri, biciclette e carrozzelle; e come equipaggiamento per biciclette il successo fu subito formidabile. 1889, il pneumatico fu applicato alla bicicletta di William Hume, un ciclista definito niente di più che mediocre, per le competizioni

del Queen's College Sports, a Belfast. Vinse tutte e tre le gare a cui si iscrisse, e con tale scioltezza che la ditta di Belfast Edlin & Co. vendette nel giro di pochi giorni ben cinquanta biciclette equipaggiate con le nuove ruote. A Dublino, alla fine dell'anno, si costituì la Pneumatic Tyre and Booth's Cycle Agency Limited, con un capitale di 25.000 sterline. La Edlin fu subito incorporata. Il Presidente della Società, Harvey du Cros, era entusiasta: "Le vibrazioni, con il conseguente esaurimento nervoso che pesa di più sul pilota nel corso di un lungo viaggio della stessa fatica fisica, sono praticamente ridotte a zero [...] Questo, in aggiunta alla migliore tenuta di strada, rende le vetture dotate di simili ruote ben superiori a qualsiasi concorrenza". Nel giugno del 1890, ad un funzionario dell'Ufficio Brevetti di Londra capitò sotto gli occhi una pubblicazione di tre anni prima che riportava una lista di "Ruote elastiche", scelte tra ottanta brevetti depositati dal 1772 al 1887. Tra i quattro considerati più interessanti, vi era la ruota aerea di Thomson, con relativi disegni. Il funzionario avvertì un amico di Dunlop, allora Direttore Generale della società, ed egli, coraggiosamente, ne parlò in Consiglio di Amministrazione, l'11 Settembre. Per la fine del mese, tutto il mondo industriale inglese sapeva del brevetto Thomson, di quasi cinquant'anni prima. L'opinione pubblica fu unanime nel riconoscere l'assoluta correttezza di Dunlop, il quale, del tutto ignaro del lavoro del suo predecessore scozzese, era ripartito da zero mostrando almeno altrettanta genialità nell'arrivare alle stesse conclusioni. Ma questo non impedì all'Ufficio Brevetti di invalidare la priorità di Dunlop. E per di più rimanevano da risolvere grandi problemi: il fissaggio del pneumatico al cerchione, in primo luogo, che le frequentissime forature, costringendo ad un pesante lavoro di smontaggio e rimontaggio, rendevano quanto mai attuale. La prima risposta venne da un ingegnere del Middlesex, Charles Kingston Welch. Escogitò il "tallone", ossia un cerchione, non più piatto come quello dei carri ma con un alveo centrale in cui accogliere la camera d'aria, con rialzi laterali vagamente somiglianti ad una tenaglia, in grado cioè di artigliare ed avvolgere le parti del copertone che andavano a collocarvi. Il pneumatico a tallone presentava a sua volta un ispessimento sui lati che, da una parte e dall'altra, andavano ad incunearsi nell'alveo del cerchione. La cosa funzionava bene finché il pneumatico era in pressione; ma bastava un leggero aumento della velocità del veicolo per provocare drammatiche fuoriuscite del copertone dalla sua sede. Brevettata il 16 settembre 1890, questa soluzione fu immediatamente acquistata dalla Pneumatic Tyre Company, che poté, a cinque giorni soli dalla "rivelazione", già contare su un accorgimento pienamente commerciabile. Trentasei giorni dopo arrivò un altro inventore, l'americano William Erskine Bartlett, trapiantato in Scozia già da venti anni. Egli ideò un copertone lungo cui correvano, per l'intera circonferenza, alle due estremità, due cavi d'acciaio ad anello, i cosiddetti cerchietti. Essi andavano ad incastrarsi nella parte incavata del cerchione: e da lì non potevano certo più muoversi, e con loro l'intero pneumatico, in quanto di diametro inferiore a quello necessario a fuoriuscire dalla sede. La Pneumatic Tyre Company si rese conto che in questi due accorgimenti risiedeva la possibilità di ritentare la scalata al mercato, perché permettevano di offrire un prodotto concorrenziale di cui si detenevano i pieni diritti. E così, dopo le cinquemila sterline sborsate per Welch, ne furono sborsate altre 200.000 per Bartlett. Non la pensava così Dunlop, il quale aveva reagito alla scoperta dell'invalidità del suo brevetto concentrandosi su come progettare un ciclo dotato di maggior confort. Nell'ottobre presentò una bicicletta con ruote piene e telaio costituito interamente da molle a balestra. Ma il suo destino era quello di essere sempre spiazzato: perché, di fronte alla possibilità

offerta da Welch e Bartlett di tornare alla ruota pneumatica, ormai universalmente ritenuta vincente, nessuno si soffermò più di tanto sulla sua invenzione. Passarono alcuni anni di dignitoso declino del suo ruolo all'interno dell'azienda, finché nel marzo 1895 rassegnò le dimissioni da direttore. Gli anni che seguirono furono fecondi di invenzioni. Ciò non deve stupire, perché, come osserva acutamente Eric Tompkins, autore di "The History of the Pneumatic Tyre" (Dunlop Archive Project, 1981) da cui sono tratte molte delle informazioni contenute in questo articolo, in assenza dei moderni passatempo quali televisione, partite di calcio e playstation, gli inventori si contavano a milioni. Non tutti geniali: per esempio ben seicento brevetti riguardarono l'adozione di una banda d'acciaio in cui racchiudere il battistrada, per renderlo impermeabile alle forature. Lo scopo era sicuramente raggiunto, ma l'effetto finale si rivelò sempre, com'è facile immaginare, poco soddisfacente. Un altro gruppo di inventori si impegnò invece, con ben altri risultati, a superare il problema del surriscaldamento del pneumatico. Succedeva, infatti, nei primi tipi, che lo sfregamento tra i fili di ordito e i fili di trama delle tele comuni di cui era costituita la carcassa del copertone producesse un attrito tale da portarli ben presto all'usura e alla rottura. Venne escogitato, per esempio da David Moseley, un tessuto senza trama, chiamato "Flexifort", costituito da una striscia di fili paralleli, annegati in gomma e disposti in tele sovrapposte e incrociate in modo che i fili degli strati successivi formassero un certo angolo tra loro e con il piano di simmetria del pneumatico (perfezionamento di Welch, brevetti del 1888, 1894, 1895). La data del deposito del brevetto neanche stavolta, però, corrispose all'avvio dell'utilizzo commerciale. Tale tessuto senza trama, chiamato anche "cord", cominciò ad essere impiegato in grande scala soltanto a partire dal 1914. Anche il perfezionamento del battistrada fu un campo su cui si esercitarono a lungo le menti fertili degli inventori di fine secolo. Il battistrada era spesso in cuoio, in quanto vi si potevano collocare i chiodi, e migliorare così l'aderenza. Ovviamente però, nell'affrontare le asperità del terreno, la gomma biancastra degli inizi si usurava molto rapidamente. Dal 1912 circa alcuni pneumatici americani si fecero neri: non per una questione di moda, ma per l'aggiunta di nerofumo che, si era scoperto, se miscelato alla gomma ne aumentava la resistenza all'usura. La novità impiegò alcuni anni ad arrivare in Europa, e si coniugò al declino dell'utilizzo del cuoio, a favore di un battistrada scolpito in gomma. Su come scolpirlo, alcuni ebbero la brillante idea di incidervi il nome dell'azienda produttrice, in modo da lasciare, sulle strade allora non asfaltate ma piene di polvere, chiara traccia del passaggio. Alla fine del secolo non circolavano più soltanto biciclette bensì anche automobili, e dunque si apriva per le ruote pneumatiche un altro, ben più vasto ed insondato, mercato potenziale. E' curioso notare come, nel trasferire conoscenze ed esperienze dal campo della bicicletta a quello dell'automobile, si ripartì da zero o quasi. Nel 1896 la bicicletta montava normalmente pneumatici cord, a battistrada scolpito anti-skid; mentre le vetture ancora disponevano di copertoni con carcassa in tela normale, e battistrada liscio. A complicare la situazione provvide la complessa ragnatela dei brevetti, che proibiva in Francia ciò che da anni si sperimentava con successo in Inghilterra, e viceversa. In Francia, per esempio, si affermarono i pneumatici a tallone: i diritti di brevetto acquisiti dalla Pneumatic Tyre Company non erano infranti finché si restava in terra francese. Non appena però la si varcava, si contravveniva alla legge, perciò coloro che dovevano sostituire un pneumatico ad una vettura d'oltremania dovevano far ricorso ad una gomma a cerchi, e il tentativo di adattamento provocava più imprecazioni che durante una seduta

plenaria di miscredenti. Nel 1904 i brevetti Welch scadettero. La Dunlop Rubber Company (che nel 1896 era succeduta alla Pneumatic Tyre Agency) tenne un pranzo di celebrazione durante il quale vennero simbolicamente bruciati i brevetti di Bartlett e di Welch. Pionieri dell'applicazione della ruota pneumatica alla vettura automobile furono i due fratelli Michelin, André ed Edouard. Forti della loro esperienza nel campo della bicicletta (adottarono per la prima volta un pneumatico nella Parigi – Brest – Parigi del 1891, e fecero arrivare il loro pilota primo, con sole cinque forature), decisero di osare nella gara automobilistica Parigi – Bordeaux, nel 1895, con una Daimler 4 CV. Non vinsero, e neanche risultarono iscritti, non si sa per quale disguido dell'organizzazione. Ma arrivarono al traguardo, anche se l'intero treno di ventiquattro camere d'aria fu utilizzato, e ne derivarono l'incrollabile convinzione che il pneumatico fosse la ruota del futuro questi sono anche gli anni in cui nascono le principali case costruttrici che ancora oggi ci accompagnano: Pirelli (1872), Continental (1871), Firestone (1900). Oggi il mercato del pneumatico è quanto mai competitivo, la produzione è esorbitante in funzione alle vetture che circolano nelle strade di tutto il mondo, anche il processo industriale di produzione e la ricerca sempre più avanzata nel fornire pneumatici ad alte prestazioni che riducano i consumi o che abbiano una più lunga durata ha subito un forte incremento anche, e soprattutto, legato alle competizioni sportive quali Formula Uno, Moto Mondiale ecc.

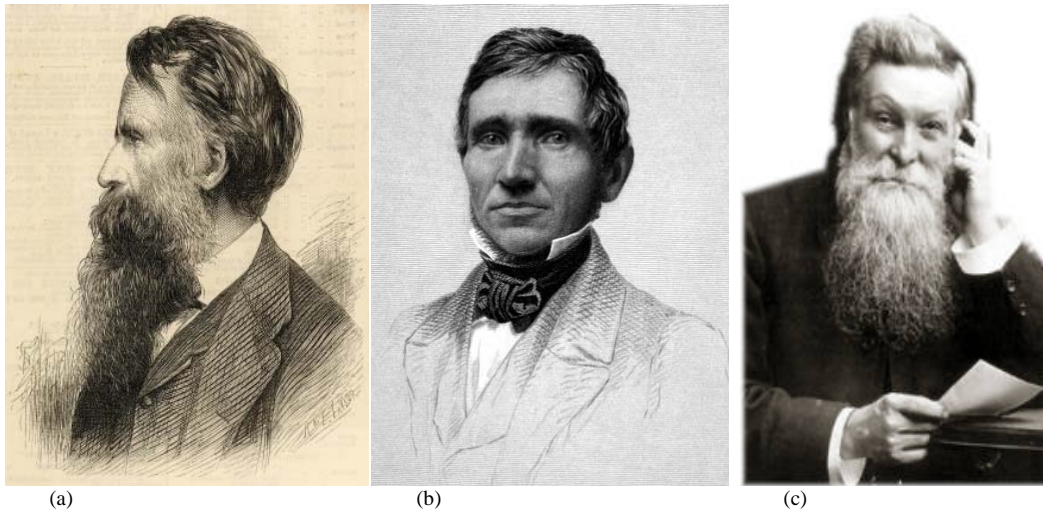


Figura 1.2 – (a) Robert William Thomson; (b) Charles Goodyear; (c) John Boyd Dunlop

1.2.3 Produzione della gomma naturale

La gomma naturale è secreta dalla pianta come lattice, un liquido bianco lattiginoso che contiene il 30% circa di gomma sotto forma di particelle molto piccole, in sospensione nella parte acquosa. Il lattice viene estratto dagli alberi mediante procedimento di spillatura. Dopo essere stato raccolto tramite tazze e fatto coagulare per mezzo di un acido, essa viene essiccata esponendone dei fogli sottili a fumi caldissimi. Una tecnica più recente prevede il taglio del blocco di gomma in piccoli frammenti per ottenere un'essiccazione veloce in un essiccatore a petrolio. La gomma prosciugata viene, quindi, compattata in balle pronte per l'esportazione. Una piccola parte è esportata sotto forma di lattice, dal quale, per risparmiare sui costi del trasporto e per maggiore praticità, viene eliminata la parte liquida mediante centrifugazione.

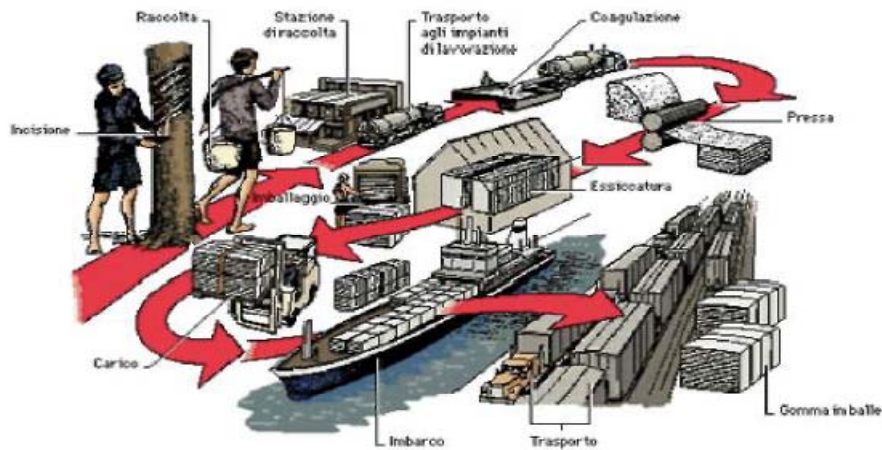


Figura 1.3 - Ciclo di produzione della gomma naturale

1.2.4 Produzione della gomma sintetica

Nel 1826 Michael Faraday, sebbene non conoscesse le proprietà della classe di molecole oggi note come polimeri, scoprì che la gomma naturale è composta da unità di un composto chimico, isoprene. Successivamente, nel corso del sec. XIX, chimici francesi e tedeschi mostrarono come l'isoprene potesse essere convertito in gomma. Tuttavia, non vennero realizzati metodi pratici per produrre la gomma sintetica fino a che la Germania, dopo la prima guerra mondiale, ne iniziò la produzione di una limitata quantità. Nel 1945 gli impianti americani erano in grado di produrre circa un milione di tonnellate di gomma sintetica all'anno. Negli anni Cinquanta e Sessanta molte altre nazioni ne iniziarono la produzione, tanto che oggi la gomma sintetica è diventata un prodotto disponibile universalmente. La gomma sintetica realizzata durante la seconda guerra mondiale non riproduceva esattamente la gomma naturale, ma era sintetizzata a partire da due monomeri, lo stirene e il butadiene, molto più facilmente disponibili dell'isoprene. Attualmente questi monomeri, e tutti gli altri impiegati per la produzione della gomma sintetica, vengono ottenuti dal petrolio (prodotti petrolchimici). L'aggiunta di opportuni catalizzatori ai monomeri ne provoca la polimerizzazione, cioè li fa unire insieme per formare le necessarie, lunghe catene molecolari. La polimerizzazione ha luogo spesso in acqua saponata e la gomma si forma come un lattice, sul tipo di quello che sgorga dagli alberi nel caso della gomma naturale. La gomma sintetica viene fatta coagulare e confezionata in balle come quella naturale. La gomma stirene-butadiene è tuttora la più importante gomma sintetica prodotta. Le tecniche per imitare esattamente la gomma naturale (fatta di poli-isoprene) per polimerizzazione dell'isoprene fallirono fino agli anni Cinquanta. Il poli-isoprene sintetico rimane comunque più costoso di quanto lo sia la gomma stirene-butadiene.

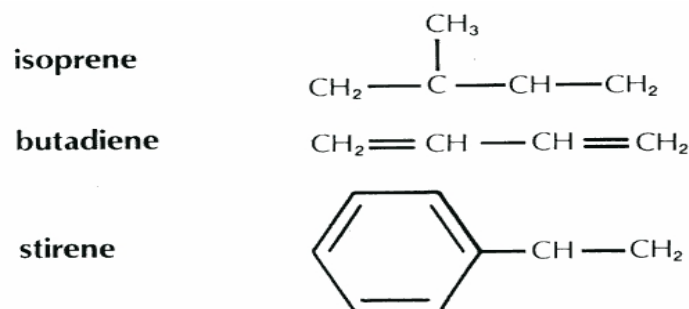


Figura 1.4 - Principali catene polimeriche

1.2.5 Produzione dei manufatti in gomma

Per ottenere dei manufatti in gomma, sia essi artificiali (sintetici) che naturali, bisogna eseguire determinati procedimenti che vanno a modificare chimicamente e fisicamente il composto naturale. I principali processi sono:

- **Masticazione.** Operazione nella quale il prodotto allo stato greggio viene, attraverso un trattamento a caldo, sminuzzato al fine di rendere agevole l'introduzione di altri componenti; viene detta anche fase preparatoria del polimero.
- **Preparazione della mescola.** Nell'industria della gomma, viene detta mescola il prodotto ottenuto dall'unione del polimero (la gomma propriamente detta) con i vari agenti chimici destinati a stabilizzarla, colorarla e a conferirle le proprietà merceologiche desiderate (le cosiddette "cariche"). La mescola viene preparata in un apposito miscelatore a pale riscaldato, il "Banbury", che ammorbidisce ed amalgama il polimero agli altri componenti. Il processo avviene generalmente ad una temperatura che in partenza si aggira intorno ai 50 °C (varia in base al tipo di polimero) fino ad arrivare a circa 130 °C che di solito risulta essere la temperatura massima di scarico (ma può variare in funzione dei componenti della mescola). Nel processo si vanno aggiungendo nell'ordine e nelle quantità prestabilite i vari additivi quali cariche, rinforzanti, stabilizzanti, protettivi, antiossidanti, plastificanti, l'agente vulcanizzante e i relativi acceleranti. Nel frattempo si procede con la masticazione per ottenere una massa omogenea.
- **Formatura.** È l'operazione che permette di dare delle forme prestabilite alla mescola, ovvero, in cui il prodotto mescolato viene lavorato in estrusori o per trafilatura o calandratura.
- **Stampaggio.** Serve per dare forma a pezzi di particolare geometria. Lo stampaggio può essere a compressione, a trasferimento o ad iniezione. Nell'operazione di stampaggio la formatura è contemporanea alla vulcanizzazione.
- **Vulcanizzazione.** La vulcanizzazione provoca una modificazione della conformazione molecolare del polimero alla quale è dovuto l'aumento di elasticità e resistenza a trazione, la soppressione di proprietà negative quali l'abrasività e l'appiccicosità oltre che una maggiore resistenza agli effetti dell'ossigeno atmosferico e a molte sostanze chimiche². La vulcanizzazione è un processo per mezzo del quale vengono resi utilizzabili i materiali elastomerici; consiste nella formazione di una rete di legami trasversali o crosslinks fra catene di macromolecole indipendenti. Il prodotto di questa reticolazione, la gomma vulcanizzata, ha caratteristiche reologiche molto diverse dall'elastomero da cui deriva, quella più evidente è un aumento dell'elasticità, ossia la capacità di ritornare alle condizioni di forma originarie dopo aver subito una deformazione meccanica. Il grado di reticolazione influenza notevolmente le proprietà del vulcanizzato, in particolare aumentano resilienza e modulo, mentre diminuiscono allungamento a rottura ed isteresi. Parametri critici relativi al processo di vulcanizzazione sono la velocità, l'estensione e lo scorch time o scorch resistance, ossia il tempo trascorso prima dell'inizio della vulcanizzazione. L'utilizzo nella produzione degli pneumatici di elastomeri quali la gomma

² <http://it.wikipedia.org/wiki/Gomma>;

naturale (NR), il polibutadiene (BR) e la gomma stirene-butadiene (SBR) permette di usare come agente vulcanizzante lo zolfo, allo stato elementare o in composti organici detti donatori di zolfo. I primissimi processi di vulcanizzazione del primo elastomero commerciale, la gomma naturale (NR), erano realizzati per mezzo della miscelazione di 8 parti di zolfo per 100 parti di gomma, e richiedevano 6 ore a 142°C. L'aggiunta di ossido di zinco ridusse il tempo a 3 ore. Oggi l'uso di acceleranti in concentrazioni basse ha ridotto il tempo a pochi minuti (2-5 min)³.

E' quest'ultima la fase più importante della lavorazione della gomma, basata appunto sull'impiego di composti come zolfo, derivati organici contenenti zolfo, ossidi metallici e perossidi organici, che hanno la funzione di determinare l'unione in alcuni punti delle catene polimeriche della gomma diminuendone la flessibilità ma trasformandola in un prodotto elastico, con elevata capacità di recupero all'allungamento e costanza delle caratteristiche nel tempo. Nel caso oggetto del nostro interesse, cioè nella produzione dei pneumatici, la costruzione ha inizio dai fianchi. Diversi tipi di gomma, che rispondono alle diverse caratteristiche possedute dalle varie parti, sono riuniti a formare strisce fianco – battistrada – fianco. I talloni sono fatti di fili d'acciaio attorcigliati e ricoperti di gomma. Il tessuto in fibra sintetica o in fili di acciaio viene ricoperto di gomma e tagliato obliquamente o parallelamente alle fibre a seconda del tipo di copertone. Tutti questi materiali sono poi posizionati, per essere sistemati manualmente, sopra un supporto girevole e pieghevole, a forma di tamburo. L'operatore allinea con estrema cura il tessuto di rinforzo sopra una camicia di gomma. Successivamente vengono aggiunti i talloni e le strisce fianco-battistrada, così da ottenere un copertone grezzo (acerbo). Una pressa riscaldata modella il disegno del battistrada e vulcanizza la gomma.

1.3 I pneumatici⁴

Il pneumatico, anche detto gomma, è essenzialmente l'elemento che viene montato sulle ruote e permette l'aderenza del veicolo sulla strada. Esistono diversi tipi di pneumatici:

- con camera d'aria (tube type), dove la camera d'aria racchiude l'aria compressa per ottenere un effetto di adattamento e sospensione del veicolo dal terreno. La copertura fatta di gomma (in passato naturale, ora sintetica) serve a trasmettere e ricevere gli attriti radenti e volventi che si generano con il movimento. Infine abbiamo le tele di fibra o di metallo.
- Senza camera d'aria (tubeless), dove la copertura, fatta di gomma (anche qui, in passato naturale ed ora sintetica) e tele di fibra o di metallo, è costruita in modo da trasmettere e ricevere gli attriti radenti e volventi che si generano con il movimento. Essa funge anche da camera d'aria.
- Pieno (NPT Non pneumatic tires) che sono dei pneumatici che invece d'essere gonfiati ad aria sono riempiti di plastica e si auto sostengono dato che hanno una struttura piena. Venivano usati sui trattori degli anni '30-'50, così come oggi sui pattini a rotelle e via dicendo. Una derivazione di questi pneumatici sono i TWEEL che però ancora non hanno molte applicazioni.

³ Giuseppe Di Florio, Il processo di vulcanizzazione nelle gomme stirene-butadiene: meccanismi di reazione, coinvolgimento di additivi e loro processi di migrazione, sito: http://www.fedoa.unina.it/3856/1/Di_Florio.pdf;

⁴ <http://www.tufanogomme.com>;

Il battistrada è caratterizzato da molti elementi, tra cui il profilo. Il profilo dello pneumatico è studiato a seconda delle esigenze a cui deve rispondere e al mezzo a cui va applicato; può essere essenzialmente di due tipi:

- Normale/Turistico, studiato in modo da offrire la migliore guidabilità. Nel caso degli pneumatici automobilistici, questi avranno un'unione arrotondata tra spalla e battistrada. Nel caso degli pneumatici motociclistici si ha il profilo del battistrada arrotondato.
- Sportivo, studiato in modo da offrire la migliore tenuta. Nel caso degli pneumatici automobilistici, questi avranno un'unione netta tra spalla e battistrada, in modo da massimizzare l'impronta a terra, anche se, come punto a sfavore, l'inserimento in curva risulta meno lineare/graduale. Nel caso degli pneumatici motociclistici si ha un profilo del battistrada con arrotondamento più marcato, sì da poter godere di maggiore superficie di contatto in piega. In entrambi i casi, la miscela più morbida consente al pneumatico sportivo una più rapida ascesa alla temperatura ottimale, e, quindi, una migliore aderenza.

Nei paragrafi successivi sono trattati in dettaglio le caratteristiche principali dei pneumatici.

1.3.1 I polimeri e la gomma: generalità

I polimeri sono sostanze composte da macromolecole, cioè molecole molto grandi formate dalla ripetizione di un piccolo gruppo molecolare, caratterizzato dal polimero stesso. La maggior parte dei materiali polimerici oggi utilizzati è ottenuta per via sintetica a partire da molecole di basso peso molecolare derivante dal petrolio (polimeri sintetici). Solo una minima parte è derivata da sostanze naturali attraverso trasformazioni chimiche (polimeri semisintetici). Tra i materiali polimerici rientrano:

- i materiali termoplastici (materie plastiche) che sono flessibili e resistenti a temperatura ambiente, ma rammolliscono ad alta temperatura;
- i materiali termoindurenti (resine) che a un certo stadio del loro processo di ottenimento modificano la loro struttura per azione della temperatura e divengono, in genere, più rigidi e più resistenti dei termoplastici;
- gli elastomeri (gomme) che possono subire grandi allungamenti (fino a 10 volte la lunghezza iniziale) e poi riprendere la forma originale.

I principali vantaggi di questi materiali sono: leggerezza, inerzia chimica in ambienti acidi e basici, ottenimento di prodotti finiti a costi bassi, facilità di ottenimento di prodotti finiti. Tra gli aspetti negativi ci sono: scarsa resistenza al fuoco, tossicità dei prodotti di combustione, ridotta resistenza ai solventi organici. La gomma, come sopra accennato, è un elastomero, ovvero un polimero caratterizzato da grandi deformazioni in campo elastico e assenza pratica di deformazioni plastiche. Si osserva che per un ampio tratto sono sufficienti sforzi modesti per ottenere deformazioni elevate. In seguito alla rimozione del carico l'elastomero recupera istantaneamente la forma iniziale. Se si procede con la deformazione oltre il limite di elasticità del polimero, la curva mostra un tratto molto ripido, in quanto è necessario imporre delle sollecitazioni più elevate per avere ulteriori minime deformazioni. E' un materiale relativamente morbido, migliaia di volte meno rigido dell'acciaio, e possiede elevate caratteristiche meccaniche di resilienza, o capacità di resistenza agli urti. Queste proprietà tipiche della gomma derivano dalla struttura chimica delle sue molecole, che è molto grande rispetto ai composti chimici semplici. Le lunghe molecole della gomma

sono molto flessibili e i legami incrociati che possono stabilirsi tra di esse la rendono elastica (vulcanizzazione). Questo processo avviene a temperature comprese tra 120 e 180°C. In presenza di zolfo, questi processi detti di reticolazione non sono reversibili, per cui una volta vulcanizzato, l'elastomero non può più essere modificato per via termica⁵.

1.3.2 Composizione strutturale di un pneumatico

La composizione strutturale di un pneumatico è sommariamente costituita dai seguenti elementi:

- il battistrada (Tread) è la parte del pneumatico destinato al contatto con il terreno per assicurare l'attrito. La prima parte del battistrada, che viene a contatto con la superficie bagnata, serve ad allontanare l'acqua per poi permettere alla restante parte di fornire attrito sulla superficie drenata. I pneumatici invernali hanno una composizione più morbida e una profondità del battistrada tale da permettere una maggiore trazione;
- la carcassa (Casing) è la parte strutturale del pneumatico (comprendente la parte laterale) su cui è vulcanizzato il battistrada. La carcassa di un pneumatico da autovettura include la componente tessile, non presente invece nei pneumatici per autocarri. Questi ultimi inglobano una percentuale maggiore di acciaio;
- la spalla (Sidewall) è la parte laterale della carcassa, assolve due opposti obiettivi: è flessibile in senso verticale per minimizzare il trasferimento delle irregolarità del terreno sul veicolo, mentre è relativamente rigido orizzontalmente per trasferire sul terreno i carichi dovuti a sottosterzo, frenata e accelerazione;
- le tele (Belts) formano è uno o più piani di materiale messo in posizione centrale tra la carcassa e il battistrada⁶.



Un pneumatico si compone dei seguenti semilavorati:

- 1. Uno strato di gomma sintetica.** Questo strato a perfetta tenuta d'aria si trova all'interno del pneumatico e funge da camera d'aria.
- 2. La tela della carcassa.** Questa carcassa si compone di sottili fili in fibra tessile disposti ad arco dritto e incollati alla gomma. Questi fili gli permettono di resistere alla pressione.
- 3. Un'imbottitura nella zona bassa.** Ha il ruolo di trasmettere la coppia motrice e la coppia frenante dal cerchio all'area di contatto con il suolo.
- 4. I cerchietti.** Servono a fissare il pneumatico sulla ruota. Possono sopportare fino a 1800 kg di peso senza rischio di rottura.
- 5. I fianchi.** In gomma flessibile proteggono i pneumatici dagli urti che possono danneggiare la carcassa.
- 6. Le tele della sommità.** Armate con fili in acciaio molto sottili ma estremamente resistenti, sono incrociate obliquamente e sono incollate una sull'altra. L'incrocio dei loro fili con quelli della carcassa forma dei triangoli indeformabili che assicurano l'irrigidimento della sommità.
- 7. Il battistrada.** Viene posto sopra la tela della sommità. Questa parte del pneumatico sarà a contatto con la strada. Nell'area di contatto con il suolo, il battistrada deve poter resistere a notevolissimi sforzi e assolvere a diverse funzioni⁷.

Figura 1.5 Struttura tipica di un pneumatico da autovettura

1.3.3 Composizione chimica di un pneumatico

Un pneumatico è composto da idrocarburi (carbonio e idrogeno), nero fumo (carbonio), che conferisce il colore nero al pneumatico stesso, da molecole azotate (antiossidanti), che rallentano l'azione ossidante dovuta all'ossigeno, all'ozono e

⁵ Luca Bertolini: Materiali da Costruzioni, Volume 1, Città Studi, Novara (2006), p. 353, p. 375

⁶ Arch. Adriano Magliocco: Principi di Ecodesign, Il riciclo, la Gomma

⁷ <http://www.tufanogomme.com/pneumatico.aspx>

alla degradazione in servizio, causata dal calore che si sviluppa durante il rotolamento, rallentandone l'invecchiamento e aumentandone la durata. Gli acceleranti e lo zolfo servono essenzialmente per completare la vulcanizzazione, nel confezionamento del pneumatico. Alcuni utilizzano anche la silice. La composizione dei pneumatici da autovettura è diversa da quella dei pneumatici da autocarro. Queste differenze non si esprimono solo in termini di dimensioni, di acciaio o tessile inclusi nella loro struttura, ma anche nei tipi e nelle proporzioni degli ingredienti usati nelle mescole di base. In particolare, dette proporzioni sono date dal rapporto tra gomma naturale e gomma sintetica, la cui componente elastomerica è costituita dal copolimero di Stirene-Butadiene (SBR), nonché dal tipo di nerofumo o di silicio che sono richiesti per ottenere differenti proprietà del pneumatico.

Materiale	Autoveicolo	Autocarro
Gomma/elastomeri	48%	43%
Nero fumo	22%	21%
Acciaio	15%	27%
Tessile	5%	-
Ossido di zinco	1%	2%
Zolfo	1%	1%
Altri additivi chimici	8%	6%

Tabella 1.1 - Composizioni tipiche di pneumatici da autoveicolo e pneumatici da autocarro

1.3.4 Proprietà dei pneumatici

Le diverse tipologie di pneumatico, come accennato, possono essere riunite in due categorie principali individuate come settore autovetture e settore autocarri. Una più dettagliata classificazione riferita al peso del singolo pneumatico è riassunta nella tabella 1.2. La composizione, per i due settori autovetture ed autocarri, è determinata principalmente da gomma naturale e sintetica, la cui componente elastomerica è costituita dal copolimero di stirene – butadiene (SBR). Ciascun ingrediente della mescola contribuisce a dare al pneumatico delle specifiche caratteristiche, al fine di favorirne una maggiore “vita”. Una gomma non trattata è relativamente debole, morbida, molto flessibile e non solubile in acqua, alcali, e acidi deboli, mentre è solubile nel benzene, gasolio, idrocarburi clorurati e nel composto carbonio-zolfo. Per attribuire alla gomma cruda delle caratteristiche di robustezza ed elasticità occorre sottoporla a processi che diano origine a legami tra le molecole che la compongono. Tali processi prendono il nome di vulcanizzazione. Una volta vulcanizzata, la gomma diviene resistente alle abrasioni, impermeabile ai gas, alle azioni chimiche, al calore ed all'elettricità. Oltre alla resistenza ai traumi i pneumatici sono resistenti a molte sostanze, grazie al processo di vulcanizzazione, e anche all'attacco da parte dei microrganismi. Poiché in genere dei pneumatici per autoveicolo durano 35-40.000 km tale prodotto risulta essere molto impattante come rifiuto. La composizione e le proprietà generali dei pneumatici nuovi determinano i trattamenti che possono essere fatti al termine del suo ciclo di vita "su strada", e le possibili applicazioni dei prodotti che si ottengono. Tuttavia, non bisogna dimenticare che le forme di riciclaggio e di trattamento non dipendono unicamente da fattori tecnici, sono anche funzione delle politiche nazionali, così come dell'economia e del mercato potenziale dei prodotti recuperati.

PESO		
Tipo di veicolo	Peso (Kg)	N _i Pneumatici per ton
Auto utilitaria	7,5 / 8,5	150
Grande Cilindrata	11	91
Camion	50	20
Semirimorchio	55 / 80	12 - 18
Veicolo Agrario	100	10

Tabella 1.2 – Classificazione in peso dei pneumatici

Le caratteristiche intrinseche del pneumatico ne determinano:

- il reimpiego come combustibile non convenzionale (il suo potere calorifico varia tra i 6,800 – 7,800 Kcal/kg);
- il recupero di gomma di ottima qualità sotto forma di granuli e polveri (materia prima secondaria);
- il recupero di acciaio e di fibre tessili.

La composizione dei pneumatici da autovettura, come già accennato, è diversa da quella di pneumatici da autocarro. Queste differenze non si esprimono solo in termini di dimensioni, di acciaio o tessile inclusi nella loro struttura, ma anche nei tipi e nelle proporzioni degli ingredienti usati nelle mescole di base. In particolare, dette proporzioni sono date dal rapporto tra gomma naturale e sintetica nonché dal tipo di nerofumo o di silicio che sono richiesti per ottenere differenti proprietà del pneumatico. I pneumatici hanno una buona resistenza ai traumi subiti durante la guida dei veicoli e sono progettati per avere la maggiore durata possibile; ne consegue che, una delle loro peculiarità sia l'elevata resistenza all'azione dei microrganismi, che impiegano più di cento anni prima di riuscire a distruggerli. Sebbene queste proprietà da un lato permettano al pneumatico nuovo di allungarne il ciclo di vita, dall'altro determinano un feedback negativo quando esso diventa rifiuto. Le diverse tipologie di pneumatico possono essere riunite in due categorie principali ed individuate nel settore autovetture e nel settore autocarri. La composizione, per i due settori autovetture ed autocarri, è determinata principalmente da gomma naturale e sintetica, la cui componente elastomerica è costituita dal copolimero di Stirene-Butadiene (SBR). Ciascun ingrediente della mescola (gomma/elastomeri, nerofumo, acciaio, tessile, ossido di zinco, zolfo e additivi chimici) contribuisce a dar al pneumatico delle caratteristiche specifiche, al fine di favorirne una maggiore vita. Una gomma non trattata è relativamente debole, morbida, molto flessibile e non solubile in acqua, alcali ed acidi deboli, mentre è solubile nel benzene, gasolio, idrocarburi clorurati e nei composti carbonio-zolfo⁸.

1.4 Il pneumatico come rifiuto

I pneumatici fuori uso si generano allorquando ad un automezzo si sostituiscono i pneumatici usurati, oppure quando tale automezzo viene demolito. Questi due eventi dipendono dall'intensità di utilizzo che viene fatta degli automezzi circolanti in generale. E' abbastanza verosimile che nel periodo attuale sia possibile pensare ad una maggiore circolazione di merci e persone, e, quindi,

⁸ <http://www.arch.unige.it/did/11/diseignoind/terzo0506/ecodesign/materialeid/gomma.pdf>

tendenzialmente una maggiore generazione di pneumatici fuori uso. Tuttavia, le quantità ed il trend dello smaltimento dei pneumatici fuori uso, è oggi giorno, soprattutto nei paesi sviluppati come l'Italia e l'Europa, abbastanza stabile, indipendentemente dai cicli economici. Da quando il pneumatico è nato, come già espresso in precedenza, il concetto del prodotto, è rimasto praticamente lo stesso, mentre hanno avuto una forte innovazione la struttura, i materiali impiegati, ed il loro accoppiamento, al fine di mettere a punto un prodotto sempre più resistente, affidabile e duraturo. Proprio queste caratteristiche fanno oggi del pneumatico usato un rifiuto ingombrante, indistruttibile, non degradabile, non compattabile ed altamente divellente. Tali caratteristiche fanno sì che i costi di raccolta, trasporto e trattamento siano tra i più alti in assoluto rispetto a quelli di altre tipologie di rifiuti. Inoltre, la familiarità che tutti hanno con il prodotto nuovo, e la sua relativa somiglianza con quello usato, fanno sì che in molti casi possa risultare difficile individuare il momento di ingresso del bene usato nel circuito del rifiuto, con il conseguente assoggettamento alla normativa, ai controlli ed alle garanzie che tale disciplina comporta. Al contrario risulta ancora troppo facile la distrazione di flussi di pneumatici verso destinazioni incerte, ed ancora troppo accessibile lo smaltimento in discarica, anche in quei bacini laddove la presenza di centri di trattamento ne garantirebbe il completo riciclaggio.

1.4.1 Generalità: inquinamento e riscaldamento globale

Per inquinamento possiamo intendere tutto ciò che è nocivo per la vita o tutto ciò che altera in maniera significativa le caratteristiche fisico-chimiche dell'acqua, del suolo o dell'aria, tale da cambiarne la struttura e l'abbondanza delle associazioni degli organismi viventi o dei flussi di energia o anche tutto ciò che non viene compensato da una reazione naturale o antropica adeguata che ne annulli gli effetti negativi totali. Esistono molti tipi di inquinamento, suddivisi a seconda del tipo di inquinamento (ad esempio inquinamento dell'aria, acqua, suolo, chimico, acustico, elettromagnetico, luminoso, termico, genetico o nucleare) o della causa dell'inquinamento (ad esempio inquinamento naturale, domestico, architettonico, urbano, agricolo, industriale o biologico). Benché possano esistere cause naturali che possono provocare alterazioni ambientali sfavorevoli alla vita, il termine "inquinamento" si riferisce in genere alle attività antropiche, di fatti tutte le attività svolte dall'uomo nell'ambiente naturale costituiscono inquinamento in quanto, interagendo con lo stesso, va a mutarne la conformazione originaria o naturale. Riscaldamento globale è un'espressione usata per indicare, relativamente alla storia climatica della Terra, le fasi di aumento della temperatura media dell'atmosfera terrestre e degli oceani dovute a cause naturali (cicli solari, moti della Terra, variazioni dei gas atmosferici, ecc). Molto spesso l'espressione viene usata impropriamente come sinonimo di surriscaldamento climatico che indica il contributo antropico al riscaldamento del clima. Spesso le due espressioni sono utilizzate in relazione ai mutamenti climatici ovvero alle variazioni a livello globale del clima della Terra (cambiamento dei valori medi o delle variazioni rispetto la media). Essi si producono a diverse scale temporali su tutti i parametri meteorologici: temperature (media, massima e minima) precipitazioni, nuvolosità, temperature degli oceani. Sono imputabili a cause naturali e, negli ultimi 150 anni, si ritiene anche all'azione dell'uomo. Si utilizza questo termine, in modo poco appropriato, per riferirsi anche soltanto ai cambiamenti climatici che avvengono nel presente, utilizzandolo, quindi, come sinonimo di riscaldamento globale. La Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici

(United Nations Framework Convention on Climate Change o UNFCCC) utilizza il termine mutamenti climatici solo per riferirsi ai cambiamenti climatici prodotti dall'uomo e quello di variabilità climatica per quello generato da cause naturali. In alcuni casi, per riferirsi ai mutamenti climatici di origine umana si utilizza l'espressione mutamenti climatici antropogenici. L'uomo è il più recente degli agenti climatici importanti, influenzandolo da relativamente poco tempo. La sua influenza iniziò con la deforestazione dei boschi per convertirli in terre coltivabili e in pascoli che ha portato a grandi emissioni di gas serra: CO₂ dalle industrie e dai mezzi di trasporto e metano negli allevamenti intensivi e nelle risaie. Attualmente sia le emissioni di gas sia la deforestazione sono cresciute fino a un livello per cui pare difficile la loro riduzione nel breve o nel medio periodo, per le implicazioni tecniche ed economiche delle attività coinvolte. L'attività umana ha in questo modo intensificato l'effetto serra naturale, contribuendo in maniera marcata al riscaldamento globale. Oltre che aumentando l'effetto serra, l'uomo ha apportato e apporta sempre più grandi quantità di calore in eccesso rispetto all'equilibrio termico naturale. Attualmente il consumo energetico dell'umanità ammonta a 400 EsaJoule, dello stesso ordine di grandezza di tutta l'energia solare assorbita dalla fotosintesi clorofilliana. E tutta l'energia prodotta si trasforma, in parte prima dell'utilizzo, e totalmente dopo l'utilizzazione, in calore per il secondo principio della termodinamica alterando l'equilibrio termico naturale della superficie planetaria e aumentando progressivamente le temperature. L'uomo sta scaldando direttamente la superficie planetaria. È per questo che l'emisfero nord, più antropizzato e dove si concentrano i consumi energetici, ha inverni mediamente più caldi di 5° C rispetto al secolo scorso mentre nell'emisfero sud l'aumento è di soli 2° C. Combustibili fossili, energia nucleare e anche l'energia da geotermia profonda forzata aggiungono calore in eccesso all'atmosfera. Viceversa sono poco clima - alteranti le energie rinnovabili quali le energie idrica, eolica, geotermica da sfruttamento di affioramenti energetici naturali, geotermica superficiale a sonde, da correnti marine e da maree, e soprattutto non è clima - alterante l'energia solare, disponibile in quantità infinita, che è prodotta intercettando la radiazione solare prima che essa riscaldi la superficie planetaria, e quindi senza modificare l'equilibrio termico naturale. Per combattere il riscaldamento climatico, oltre alla primaria ottimizzazione dei consumi energetici con l'eliminazione degli sprechi e la resa efficiente degli utilizzi, occorre attuare rapidamente la conversione alle forme di energia sopra indicate che non alterano l'equilibrio termico naturale della superficie del pianeta. Per fortuna, i provvedimenti per contenere l'effetto serra (ottimizzazione dei consumi, diminuzione di ricorso ai combustibili fossili) coincidono in gran parte con quelli per diminuire la produzione di calore in eccesso, a parte i casi dell'energia nucleare e di quella geotermica forzata, che contribuiscono all'aumento di calore oltre all'equilibrio naturale, senza produzione di gas serra. Il riscaldamento globale quindi associato ai mutamenti climatici sopra descritti sono causa di effetti di vario tipo quali per esempio effetti sull'ambiente e sull'economia⁹.

1.4.2 Protocollo di Kyoto

Il lungo ciclo di espansione economica mondiale iniziato nella seconda metà degli anni '80 sembrava non aver fine. Era crollato il blocco sovietico ed erano scomparsi sistemi economici e ideologici alternativi al libero mercato. Si erano

⁹ http://it.wikipedia.org/wiki/Riscaldamento_globale;

aperti nuovi e vasti mercati, con la privatizzazione delle imprese statali e la liberalizzazione dei flussi di capitale e degli scambi commerciali, la creazione di nuove aree economiche fortemente integrate (in Europa, nel Nord America, nel sud est asiatico), la costituzione di potenti strutture di regolazione della liberalizzazione commerciale. Lo sviluppo dell'informatica e delle reti di telecomunicazione, raggiunta la soglia critica di diffusione, aveva trasformato le modalità di lavoro e di organizzazione, attivato un nuovo settore economico, passato attraverso la vita quotidiana. Questi processi promettevano l'emancipazione, pur travagliata, di vaste aree del mondo. La Cina e altri paesi asiatici come la Corea, l'Indonesia, la Malesia, la Thailandia, conoscevano ritmi di crescita economica senza precedenti e attraevano flussi immensi di capitali. Con lo sviluppo dell'economia della conoscenza, basata sulla ricerca e la tecnologia, si ponevano le basi di un disaccoppiamento tra crescita economica e consumo di materie prime e di energia, si avvertivano al contempo quali potevano essere le problematiche ambientali che questo così celere fenomeno poteva causare all'ambiente, proprio questa crescente attenzione internazionale sul tema del cambiamento climatico spinse il WMO, l'Organizzazione Meteorologica Mondiale, e l'UNEP (*United Nations Environment Programme*) sistema organizzativo delle Nazioni Unite, a creare nel 1988 l'IPCC, un Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento del Clima. Grazie agli studi svolti dall'IPCC, sui cambiamenti climatici, nel 1992, i delegati di 150 Paesi, presa coscienza del problema, approvarono la Convenzione Quadro sui cambiamenti climatici adottata a New York il 9 maggio e presentata ai Governi per la firma, nel corso del vertice delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile, tenutosi a Rio de Janeiro nel successivo mese di Giugno. Questa convenzione rappresenta la base del successivo Protocollo di Kyoto che definisce un obiettivo di stabilizzazione delle concentrazioni di gas-serra per la protezione del sistema climatico e promuove interventi a livello nazionale ed internazionale per il suo raggiungimento. La Convenzione Quadro non prevedeva però impegni vincolanti per la riduzione delle emissioni, ma solo un'assunzione di responsabilità dei Paesi industrializzati a produrre comunicazioni nazionali sulla propria produzione di gas serra, con l'intento di riportarli, entro il 2000, ai livelli del 1990. Il Protocollo di Kyoto al contrario è un vero e proprio atto esecutivo che obbliga i Paesi industrializzati e Paesi con economia in transizione, alla riduzione delle emissioni di sei tipi di gas serra, individuati in anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), ossido d'azoto (N₂O), idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC) ed esofluoruro di zolfo (SF₆). Il Protocollo impegna i Paesi firmatari a ridurre complessivamente nel periodo 2008 - 2012 le emissioni in atmosfera dei gas - serra del 5,2% rispetto ai livelli di riferimento del 1990. Per il conseguimento dei propri obiettivi, i Paesi industrializzati e ad economia in transizione possono avvalersi di alcuni strumenti quali:

- Rafforzare o istituire politiche nazionali di riduzione delle emissioni quali il miglioramento dell'efficienza energetica, sviluppo di fonti di energia rinnovabile, ecc..
- Avvalersi dei cosiddetti "meccanismi flessibili".
- Emission Trading (commercio delle emissioni): consente lo scambio di crediti di emissione tra paesi industrializzati e ad economia in transizione.
- Clean Development Mechanism - CDM (Meccanismo di Sviluppo Pulito): consente ai paesi industrializzati e ad economia in transizione di realizzare progetti nei paesi in via di sviluppo, che producano benefici ambientali in

termini di riduzione delle emissioni di gas - serra e di sviluppo economico e sociale dei Paesi ospiti e nello stesso tempo generino crediti di emissione per i Paesi che promuovono gli interventi.

- Joint Implementation - JI (Attuazione congiunta): consente ai paesi industrializzati e ad economia in transizione di realizzare progetti per la riduzione delle emissioni di gas-serra in un altro paese dello stesso gruppo e di utilizzare i crediti derivanti assieme al paese ospite.

In tre punti è possibile riassumere quello che prevede il protocollo di Kyoto, ovvero:

- I Paesi più industrializzati hanno l'obbligo di ridurre le emissioni di gas - serra di almeno il 5% rispetto ai livelli del 1990, nel periodo che va dal 2008 al 2012.
- Gli stessi Paesi devono realizzare progetti di protezione di boschi, foreste e terreni agricoli che assorbono anidride carbonica, (aree definite "carbon sinks", cioè assorbitori di CO₂).
- Questi Paesi possono guadagnare "carbon credit" esportando tecnologie pulite ai Paesi in via di sviluppo allo scopo di aiutarli ad abbattere le emissioni inquinanti nei processi produttivi.

Una prima considerazione dell'adattamento degli impegni assunti dai paesi sviluppati si ebbe come previsto, a Berlino nel 1995. Qui si decise che gli impegni dei paesi sviluppati, di mantenere le emissioni dell'anno 2000 ai livelli del 1990, non permetteva di perseguire l'obiettivo, a lungo termine, della Convenzione, di impedire "interferenze antropiche pericolose per il sistema climatico". I ministri e gli altri funzionari di alto livello risposero adottando il "Mandato di Berlino" ed aprendo un nuovo giro di consultazioni per rafforzare gli impegni dei paesi sviluppati. Il Gruppo Speciale del Mandato di Berlino è stato istituito al fine di produrre una bozza di accordo. Numerose furono le persone che parteciparono a questo importantissimo evento, delegati, osservatori e giornalisti, celebrato a Kyoto, Giappone nel dicembre del 1997. Alla Conferenza si approvò, per consenso, la decisione per l'adozione di un Protocollo secondo il quale i paesi industrializzati si impegnano a ridurre, per il periodo 2008-2012, il totale delle emissioni di gas ad effetto serra almeno del 5% rispetto ai livelli del 1990. Questi impegni, giuridicamente vincolanti, produrranno una reversione storica della tendenza ascendente delle emissioni che detti paesi hanno da circa 150 anni. Ogni Stato prese parte ad osservare gli impegni di limitazione quantificata e di riduzione delle emissioni, prevista dagli articoli della convenzione, al fine di promuovere uno sviluppo sostenibile:

- migliorando l'efficacia energetica in settori rilevanti dell'economia nazionale;
- proteggendo e migliorando i meccanismi di rimozione e di raccolta dei gas ad effetto serra, non inclusi nel Protocollo di Montreal;
- promuovendo metodi sostenibili di gestione forestali, di imboscamento e di rimboscamento;
- promuovendo forme sostenibili di agricoltura, alla luce delle considerazioni relative ai cambiamenti climatici;
- migliorando l'efficacia energetica in settori rilevanti dell'economia nazionale;
- promuovendo di forme sostenibili di agricoltura, alla luce delle considerazioni relative ai cambiamenti climatici; · ricercando promozione, sviluppo e maggiore utilizzazione di forme energetiche rinnovabili, di

tecnologie per la cattura e l'isolamento del biossido di carbonio e di tecnologie avanzate ed innovative compatibili con l'ambiente;

- riducendo progressivamente, o eliminando gradualmente, delle imperfezioni del mercato, degli incentivi fiscali, delle esenzioni tributarie e di sussidi, che siano contrari all'obiettivo della Convenzione, in tutti i settori responsabili di emissioni di gas ad effetto serra, ed applicazione di strumenti di mercato;
- incoraggiamento di riforme appropriate nei settori pertinenti, al fine di promuovere politiche e misure che limitino o riducano le emissioni dei gas ad effetto serra non inclusi nel Protocollo di Montreal;
- adozione di misure volte a limitare e/o ridurre le emissioni di gas ad effetto serra non inclusi nel Protocollo di Montreal nel settore dei trasporti;
- limitazione e/o riduzione delle emissioni di metano attraverso il suo recupero ed utilizzazione nel settore della gestione dei rifiuti, come pure nella produzione, il trasporto e la distribuzione di energia.

Sono previste sanzioni per i Paesi firmatari che mancheranno di raggiungere gli obiettivi fissati dal protocollo. Per i Paesi in via di sviluppo sono previste regole più flessibili. Durante il vertice delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile, tenutosi a Rio de Janeiro, venne inoltre redatto un documento dal nome di Agenda 21 il quale ha lo scopo di servire da guida ai governi dei vari Paesi nelle decisioni in materia di tutela dell'ambiente e sullo sviluppo sostenibile. Questo documento contiene su molti principi basilari sui quali dovrebbero essere fondate le politiche ecocompatibili del 21° secolo, in particolare viene posta l'attenzione su due principi fondamentali da osservare, ovvero:

- il "principio di precauzione" con il quale si è stabilito che ogni qualvolta vi sia una ragionevole possibilità di conseguenze dannose per l'ambiente, è necessario intervenire con opportune contromisure, senza aspettare che studi scientifici accertino l'effettiva esistenza del danno;
- il cosiddetto principio del "chi inquina paga" secondo cui, l'intero costo associato ad un evento inquinante, va addebitato all'organizzazione responsabile della sorgente di inquinamento.

Oltre all'Agenda 21, durante il Vertice di Rio sono state approvate tre Convenzioni internazionali:

- la "Convenzione sui Cambiamenti Climatici";
- la "Convenzione sulla Biodiversità";
- la "Convenzione per la lotta alla Desertificazione".

1.4.3 Sviluppo sostenibile

Il nostro modo di vivere, di consumare, di comportarsi, decide la velocità del degrado entropico (misura dello stato del disordine di un sistema), la velocità con cui viene dissipata l'energia utile e il periodo di sopravvivenza della specie umana. Si arriva così al concetto di sostenibilità, intesa come l'insieme di relazioni tra le attività umane la loro dinamica e la biosfera, con le sue dinamiche, generalmente più lente. Queste relazioni devono essere tali di permettere alla vita umana di continuare, agli individui di soddisfare i loro bisogni e alle diverse culture umane di svilupparsi, ma in modo tale che le variazioni apportate alla natura dalle attività umane stiano entro certi limiti così da non distruggere il contesto biofisico globale. Se riuscissimo ad arrivare a un'economia da equilibrio sostenibile come indicato da Herman Daly, le future generazioni potranno avere almeno le stesse opportunità che la nostra generazione ha avuto: è un rapporto tra economia ed

ecologia, in gran parte ancora da costruire, che passa dalla strada dell'equilibrio sostenibile. Giorgio Nebbia conclude il suo saggio "Lo sviluppo sostenibile" (Edizioni Cultura della Pace, Firenze, 1991) con un'importante osservazione "... occorre avviare un grande movimento di liberazione per sconfiggere le ingiustizie fra gli esseri umani e con la natura, una nuova protesta per la sopravvivenza capace di farci passare dalla ideologia della crescita a quella dello sviluppo. Nessuno ci salverà se non le nostre mani, il nostro senso di responsabilità verso le generazioni future, verso il prossimo del futuro di cui non conosceremo mai il volto, ma cui la vita, la cui felicità dipendono da quello che noi faremo o non faremo domani e nei decenni futuri. La costruzione di uno sviluppo sostenibile e la pace si conquistano soltanto con la giustizia nell'uso dei beni della Terra, unica nostra casa comune nello spazio, con una giustizia planetaria per un uomo planetario, [Ernesto Balducci]. Senza giustizia nell'uso dei beni comuni della casa comune, del pianeta Terra, non ci sarà mai pace"¹⁰. Le nuove teorie dello sviluppo sostenibile e dell'ecological economics¹¹ ci pongono davanti all'idea di un'economia non più basata su due parametri, il lavoro e il capitale, ma su un'economia ecologica che riconosce l'esistenza di tre parametri, il lavoro, il "capitale naturale" e il "capitale prodotto dall'uomo". Intendendo per "capitale naturale" l'insieme dei sistemi naturali (mari, fiumi, laghi, foreste, flora, fauna, territorio), ma anche i prodotti agricoli, i prodotti della pesca, della caccia e della raccolta e il patrimonio artistico – culturale presente nel territorio, si vede come sia fondamentale oggi investire in questa direzione. Herman Daly scrive: "... per la gestione delle risorse ci sono due ovvi principi di sviluppo sostenibile. Il primo è che la velocità del prelievo dovrebbe essere pari alla velocità di rigenerazione (rendimento sostenibile). Il secondo, che la velocità di produzione dei rifiuti dovrebbe essere uguale alle capacità naturali di assorbimento da parte degli ecosistemi in cui i rifiuti vengono emessi. Le capacità di rigenerazione e di assorbimento debbono essere trattate come capitale naturale, e il fallimento nel mantenere queste capacità deve essere considerato come consumo del capitale e perciò non sostenibile". Il tema della complessità ecologica si può così leggere attraverso le seguenti parole di Herman Daly: "... ci sono due modi di mantenere il capitale intatto. La somma del capitale naturale e di quello prodotto dall'uomo può essere tenuta ad un valore costante; oppure ciascuna componente può essere tenuta singolarmente costante. La prima strada è ragionevole qualora si pensi che i due tipi di capitale siano sostituibili l'uno all'altro. In questa ottica è completamente accettabile il saccheggio del capitale naturale fintantoché viene prodotto dall'uomo un capitale di valore equivalente. Il secondo punto di vista è ragionevole qualora si pensi che il capitale naturale e quello prodotto dall'uomo siano complementari. Ambedue le parti devono quindi essere mantenute intatte (separatamente o congiuntamente ma con proporzioni fissate) perché la produzione dell'una dipende dalla disponibilità dell'altra. La prima strada è detta

¹⁰ E. Tiezzi e N. Marchettini: Che cos'è lo sviluppo sostenibile?, Donzelli Editore, Roma (1999), pp. 39 – 41;

¹¹ R. Costanza, Presidente dell'International Society for Ecological Economics (I.S.E.E): L'economia ecologica è un tentativo di superare le frontiere tradizionali per sviluppare una conoscenza integrata dei legami tra sistemi ecologici ed economici. Un obiettivo chiave in questa ricerca è quello di sviluppare modelli sostenibili di sviluppo economico, distinti dalla crescita economica che non è sostenibile in un pianeta finito. Un aspetto chiave nello sviluppare modelli sostenibili di sviluppo è il ruolo dei vincoli: vincoli termodinamici, limiti biofisici, limiti di risorse naturali, limiti all'assorbimento dell'inquinamento, limiti demografici, vincoli imposti dalla 'carryng capacity' (a) del pianeta e, soprattutto, limiti della nostra conoscenza rispetto a ciò che questi limiti sono e come influenzano il sistema". (a) Per 'Carryng Capacity', definita dai vincoli biofisici del pianeta, s'intende la capacità di portare, di sostenere la popolazione e tutte le altre forme viventi di cui l'uomo e la natura hanno bisogno di sopravvivere: questa è la base della sostenibilità;

della sostenibilità debole la seconda e quella della sostenibilità forte”¹². La sostenibilità di questo fenomeno è correlato ad una molteplicità d’aspetti legati alla vita dell’uomo, in relazione all’ambiente in cui esso si trova. Purtroppo in passato, la scarsa coscienza offuscata principalmente dal bisogno sfrenato di sviluppo e sopravvivenza, ha posto le basi ad un problema che oggi riflette in negativo le sue conseguenze. Lo sviluppo sostenibile è dunque caratterizzato dal confronto dualistico fra gli aspetti economia ed ambiente. Entrambi rappresentano risorse importanti per l’uomo e si differenziano per dimensione espressiva e connessione con le attività umane. L’economia, infatti, è un fenomeno astratto, della quale si avvertono solo gli effetti, ritagliandosi allo stesso tempo uno spazio di primaria importanza. Il ruolo di quest’ultima s’identifica nella capacità relazionale tra le diverse comunità esistenti, divenendo a tutti gli effetti un motore fondamentale per l’intero sistema terrestre. Inoltre presenta una differente sensibilità percettiva rispetto ai cambiamenti scaturiti dallo sviluppo, rappresentando spesso una variabile per qualsiasi identità umana. sviluppo sostenibile significa:

- considerare i valori sociali ed ambientali unitamente ai criteri economici convenzionali;
- non consumare le risorse rinnovabili più velocemente del tempo che occorre per rigenerarle;
- usare le risorse non rinnovabili con la consapevolezza che un giorno esse dovranno per forza essere sostituite da altre rinnovabili;
- mirare a cose più piccole ma di qualità superiore;
- cercare uno sviluppo che aumenti la diversità e la fiducia nelle proprie azioni;
- rendere produttivi i rifiuti;
- considerare la qualità della vita come un patrimonio essenziale;
- considerare gli effetti che le decisioni di oggi possono avere per generazioni future;
- considerare gli effetti collaterali delle decisioni;
- considerare gli effetti cumulativi che una serie di decisioni può avere;
- valutare se le azioni intraprese corrispondono a quello che s’intendeva di fare.

Lo sviluppo sostenibile si raggiunge solo tramite un processo evolutivo, non da un giorno all’altro. Ciascuna economia locale possiede caratteristiche non sostenibili e altre sostenibili. Un obiettivo realistico è pertanto di eliminare, passo dopo passo le caratteristiche non sostenibili e far crescere l’economia. I criteri generali attualmente applicati al problema della gestione dei rifiuti incoraggiano in primo luogo la loro riduzione alla fonte (minimizzazione tramite prevenzione), quindi, in alternativa, il riutilizzo in forma originale, il riciclaggio ed il recupero di materiali ed energia, ed infine, solo come ultima alternativa, lo smaltimento appropriato. Per i pneumatici usati, il riutilizzo in forma originale (diretto o a seguito di alcuni pretrattamenti di ricostruzione) viene attualmente considerata come la “Best Practicable Environmental Option” (BPEO). Tuttavia, a causa della sempre maggiore diffusione dei pneumatici a basso profilo e ad alta prestazione, la vita media dei pneumatici sta notevolmente diminuendo ed una sempre maggiore porzione di pneumatici usati risulta essere inadeguata alla ricostruzione. Contrariamente ad altri tipi di rifiuti quali, ad esempio, i contenitori di vetro, gli imballaggi, i metalli

¹² E. Tiezzi e N. Marchettini, op. cit., pp. 43 – 44, p. 86

e la carta, i pneumatici usati sono difficili da riciclare. Il riciclaggio completo, che consisterebbe nel processare i pneumatici usati per produrne di nuovi, non è attualmente ottenibile a causa delle difficoltà incontrate nei pretrattamenti di completa devulcanizzazione (rottura dei legami del carbonio con lo zolfo) della gomma. Tra i vari possibili procedimenti di riciclo, le tecnologie di trattamento termico, incenerimento, gassificazione e pirolisi, rappresentano, sicuramente, una possibile alternativa alla discarica che permetta di attuare il recupero di materia e/o energia dai pneumatici fuori uso, tuttavia, queste tecnologie non risultano essere quelle che danno il maggior risultato ambientale complessivo in linea con l'obiettivo "zero rifiuto" che dovrebbe concludere il ciclo di vita del prodotto. In tale ottica, ad esempio, l'ECOGLOBAL, da qualche anno sta sviluppando il progetto di disgregazione selettiva dei PFU con il sistema "water jet". L'alternativa alle precedenti tecnologie potrebbe essere la separazione meccanica e la disgregazione selettiva attraverso la tecnologia "water jet", che è quella del getto d'acqua generato a pressione medio - alta, il quale permette il recupero altamente selettivo non solo del granulato di gomma ma anche dell'acciaio armonico contenuto nei pneumatici e della frazione tessile, con elevato grado di purezza. La tecnologia "water jet" è in grado di disintegrare gli pneumatici con elevata selettività consentendo di ottenere prodotti di recupero richiesti sul mercato con valori particolarmente elevati, tanto da rendere il processo estremamente conveniente sul piano economico. Infatti, i getti d'acqua disgregano e polverizzano la gomma, lasciando la carcassa dello pneumatico, costituita da una rete di fili d'acciaio, intatta e perfettamente ripulita. Il granulato di gomma così ottenuto viene privato della materia tessile e successivamente sottoposto a processo di essiccazione e vagliatura. Il polverino, di dimensioni sub-millimetriche, ottenibile classificando il granulo o trattandolo con successive tecniche di comminazione, è richiesto per applicazioni di nicchia ad alto valore aggiunto.

1.5 Il problema dei rifiuti¹³

per quanto riguarda la situazione europea, il "Rapporto ARGO", redatto nel 2001, "Indagine sul riciclo dei pneumatici usati" nell'ambito dell'Italia del recupero rapporto FIS e Assoambiente sul ciclo dei rifiuti, sostanzialmente, ad oggi ancora attuale, espone la situazione europea in termini di gestione dei rifiuti, ed in particolare di pneumatici usati (in seguito PU), Questa situazione di stallo è stata "agevolata" dal tardato recepimento, nel sistema delle leggi degli Stati membri, delle direttive europee in materia di gestione di rifiuti dei PU (75/442 e successive modifiche, 99/31/CE). Tuttavia, la Commissione Europea, sostenuta dall'evidente scarsa sensibilità dei governi degli Stati membri, sta intraprendendo misure sanzionatorie nei loro confronti. Fra i paesi che fino a poco tempo fa, ancora non avevano recepito integralmente queste direttive c'era anche l'Italia, soprattutto per quanto riguarda la Direttiva Discariche (99/31/CE). Ultimamente, sono stati fatti passi in avanti, seppur minimi, volti all'adeguamento alle direttive. Nella tabella 1.3, è riportato il quantitativo dei pneumatici usati prodotti in Europa, distinti per paesi e destinazioni; accantonamento permanente (Discarica), forme di accantonamento provvisorio (Stoccaggi) e forme di recupero (Riciclo Materia, Energia, altro). Come si evidenzia dalla tabella 1.3, le percentuali relative alle varie destinazioni sono ben differenti tra i vari stati, questo può essere attribuito alla diversità dei seguenti fattori:

¹³ Rapporto ARGO: "Indagine sul riciclo dei pneumatici usati" (2001)

- normative e politiche vigenti in uno Stato;
- grado di recepimento delle Direttive europee;
- mercato del prodotto nuovo e dei materiali prodotti del riciclaggio;
- sensibilità degli operatori del settore e dei cittadini;
- condizioni climatiche;
- grado di sviluppo della rete stradale.

Stato	Produzione Pneumatici Usati	Export	%	Ricostruzione	%	Produzione PFU*	Discarica	%	Stoccaggio	%	Riciclo Materia	%	Recupero Energia	%	Altro	%
Austria	50.000	5.000	10,0	4.500	9,0	40.500	20.000	40,0	0	0,0	500	1,0	20.000	40,0	0	0,0
Belgio	70.000	8.400	12,0	10.500	15,0	51.100	2.800	4,0	350	0,5	9.800	14,0	38.150	54,5	0	0,0
Danimarca	37.500	4.500	12,0	1.125	3,0	31.875	0	0,0	0	0,0	26.250	70,0	5.625	15,0	0	0,0
Finlandia	30.000	3.000	10,0	1.800	6,0	25.200	0	0,0	1.200	4,0	24.000	80,0	0	0,0	0	0,0
Francia	370.000	18.500	5,0	74.000	20,0	277.500	74.000	20,0	92.500	25,0	55.500	15,0	29.600	8,0	25.900	7,0
Germania	650.000	110.500	17,0	117.000	18,0	422.500	32.500	5,0	0	0,0	78.000	12,0	279.500	43,0	32.500	5,0
Gran Bretagna	435.000	8.700	2,0	73.950	17,0	352.350	117.450	27,0	19.575	4,5	113.100	26,0	69.600	16,0	32.625	7,5
Grecia	58.500	0	0,0	1.755	3,0	56.745	48.065	82,2	0	0,0	4.585	7,8	4.095	7,0	0	0,0
Irlanda	32.000	0	0,0	1.600	5,0	30.400	17.600	55,0	12.800	40,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Italia	350.000	7.000	2,0	29.000	8,3	314.000	231.000	66,0	0	0,0	34.000	9,7	49.000	14,0	0	0,0
Lussemburgo	2.750	2.612,5	95,0	137,5	5,0	0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Olanda	67.000	12.060	18,0	1.340	2,0	53.600	0	0,0	0	0,0	20.100	30,0	33.500	50,0	0	0,0
Portogallo	52.000	676	1,3	1.560	3,0	49.764	31.200	60,0	0	0,0	5.876	11,3	6.500	12,5	6.188	11,9
Spagna	244.000	3.660	1,5	30.744	12,6	209.596	195.200	80,0	0	0,0	7.076	2,9	7.320	3,0	0	0,0
Svezia	60.000	3.600	6,0	7.200	12,0	49.200	1.200	2,0	600	1,0	18.600	31,0	20.400	34,0	8.400	14,0
TOTALE	2.508.750	188.208,5	7,5	356.211,5	14,2	1.964.330	771.015	30,7	127.025	5,1	397.387	15,8	563.290	22,5	105.613	4,2

* Produzione dei PFU (Pneumatici Fuori Uso) = Produzione Pneumatici Usati - Export - Ricostruzione
 Le percentuali sono riferite alla produzione di pneumatici usati (PU).

Tabella 1.3 – Produzione pneumatici usati, destinazione e fonte di recupero dei pneumatici usati e a fine uso nei paesi europei (Fonte: ETRA, Environmental Tyre Recycling Association, relativi all’anno 2000)

Attraverso la lettura dei grafici seguenti, è possibile fornire una panoramica sulla situazione attuale nei paesi presi a riferimento. Come viene evidenziato dal grafico di figura 1.6, il paese che più produce PU è la Germania, seguita da Gran Bretagna, Francia e Italia. Questa tendenza è funzione del numero di abitanti e, quindi, del parco circolante di autoveicoli, della tipologia prevalente di trasporto delle merci all’interno dello Stato, dell’orografia dello stesso e del clima. Ad esempio, un paese che ha un basso sviluppo costiero avrà come conseguenza un utilizzo marginale di mezzi navali e un impiego sostenuto di autovetture, autocarri e mezzi ferroviari o, come nel caso della Germania, un utilizzo considerevole di automezzi che di mezzi fluviali.

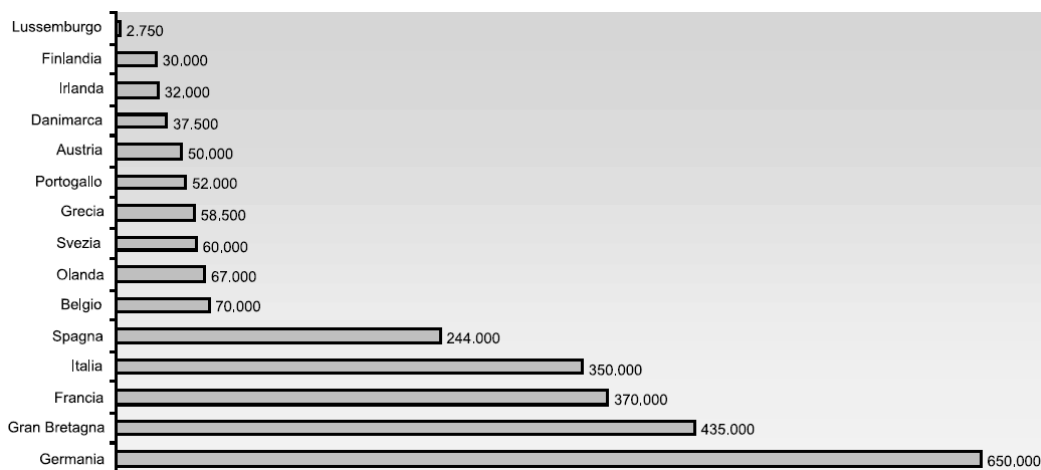


Figura 1.6 – Produzione PU in Europa in tons (2000)

Sebbene in termini di tonnellate (figura 1.7) l’Italia risulti la Nazione che destina il maggior quantitativo di pneumatici fuori uso (in seguito PFU) alle discariche, una più reale analisi dei dati (figura 1.8) mostra che, esprimendo tale valore in forma percentuale rispetto alla produzione di PU, ci sono altri Paesi che risultano essere più indisciplinati (Grecia e Spagna i quali, rispettivamente, destinano alle discariche l’82% e l’80% dei PU, l’Italia si posiziona al 66%). Se questi paesi

vestono la maglia nera della gestione dei PU, bisogna dare anche risalto a chi, invece, riesce ad azzerare questa voce, come nel caso di Olanda, Lussemburgo, Finlandia e Danimarca o a convogliarne una quantità minima in discarica, come nel caso della Svezia, Belgio e Germania; Dalle considerazioni svolte nei precedenti punti, si deduce che le Nazioni che hanno recepito le direttive europee e hanno mostrato una maggiore sensibilità alla loro attuazione e alla tutela dell'ambiente risultano quelle che maggiormente fanno dei PFU una fonte di recupero (sia energetico che di materie prime): Danimarca (85%), Finlandia (80), Olanda (80), Belgio (68,5), Svezia (65) e Germania (55). L'Italia, in questa graduatoria occupa solo il decimo posto con un 23,7% di PFU destinato al recupero (Energia più Materia prima).

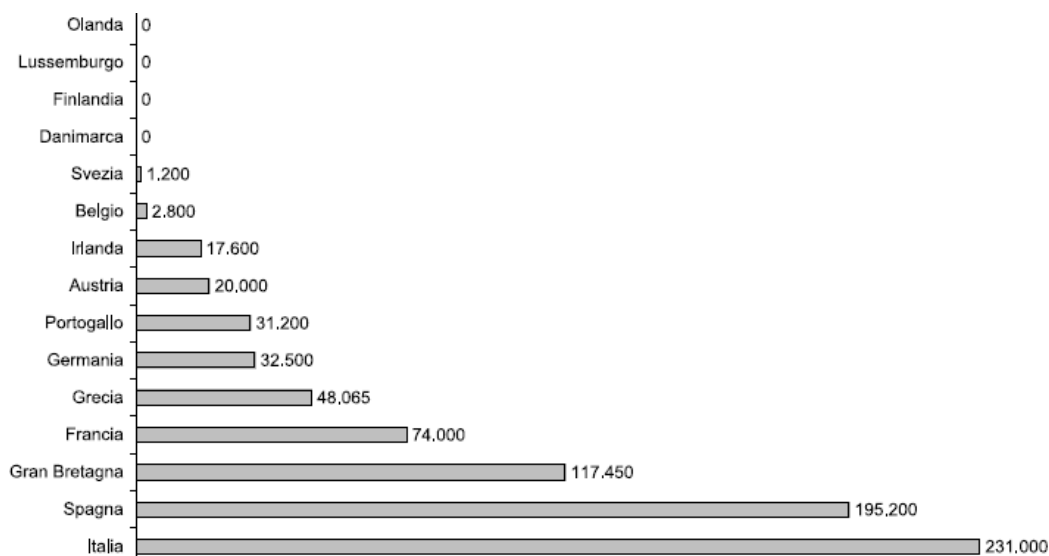


Figura 1.7 – PFU in discarica (tons)

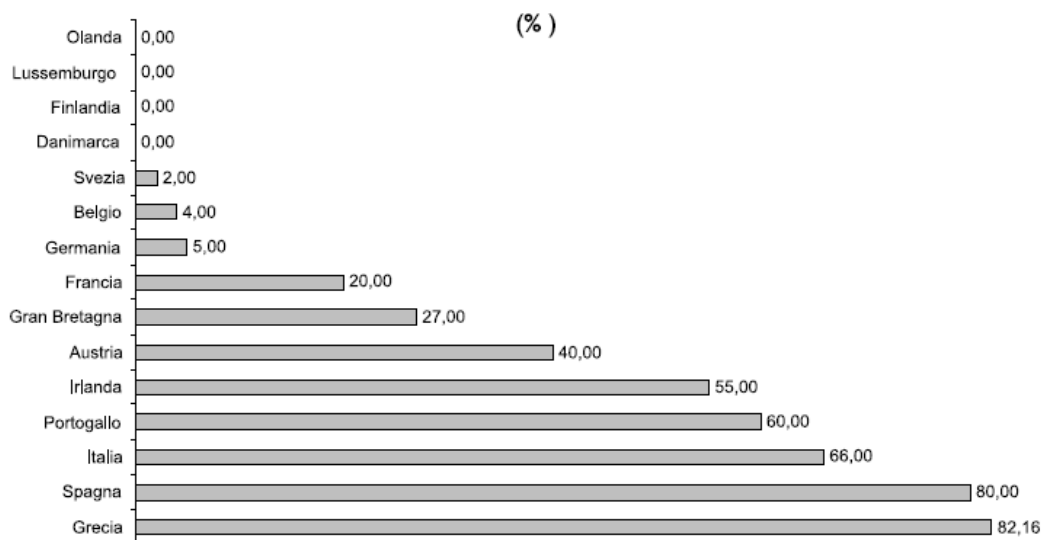


Figura 1.8 – PFU in discarica (%)

Approfondendo i risultati riportati in figura 1.10, in tema di solo recupero energetico e di materie prime, si possono svolgere alcune riflessioni sui mercati e sulle linee di sviluppo nei vari Paesi. Ad esempio, è evidente come la nazione Finlandia faccia recupero solo, ed in percentuale rilevante (80%), di materie prime tralasciando completamente quello energetico. Tendenza totalmente opposta a quella seguita dal Belgio e Germania che hanno un recupero energetico molto

superiore (54,5% e 43%) rispetto al recupero di materie prime (14% e 12%). I dati relativi all'Italia sono: 9.71% come recupero di materia prima e 14% come recupero energetico. Da ultimo si può osservare come Irlanda e Lussemburgo, non facciano né recupero energetico, né di materie prime. Mentre, il Lussemburgo destina il 95% dei PFU all'export, inteso come esportazione verso centri di trattamento nei paesi confinanti, e il rimanente 5% alla ricostruzione e quindi non avrebbe altro PFU da impiegare in azioni di recupero, l'Irlanda destina il 55% alle discariche, il 5% alla ricostruzione e il restante 40% allo stoccaggio. Viene riepilogato quanto avviene in Europa sulla destinazione dei pneumatici usati, facendo emergere ancora una volta il 31% che viene interrato nelle discariche, ed un 5% temporaneamente accumulato (stoccaggio) che comunque dovrà trovare una destinazione verso una delle forme di recupero o smaltimento citate (figura 1.11).

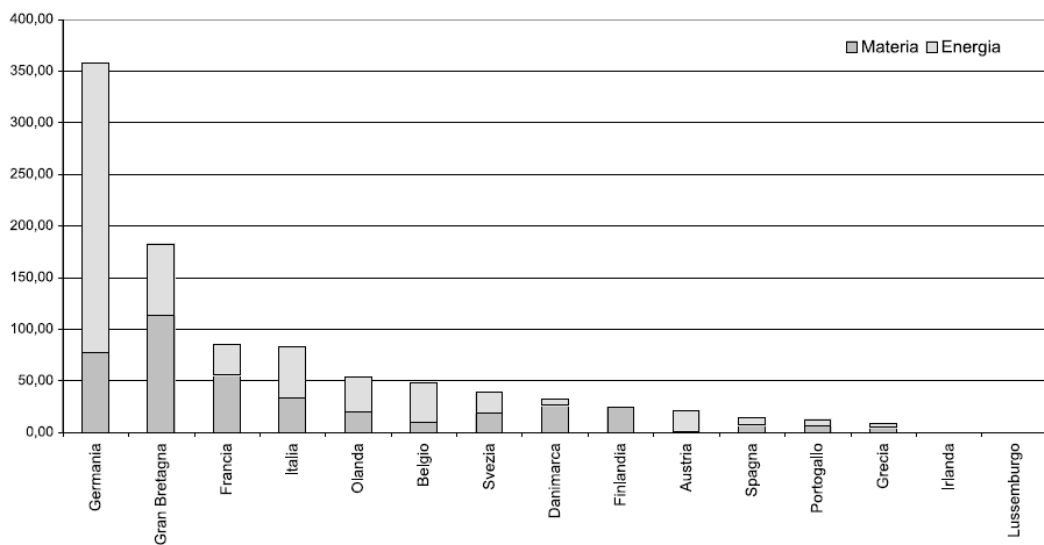


Figura 1.9 – PFU destinati al recupero energetico e di materia (migliaia di tonnellate)

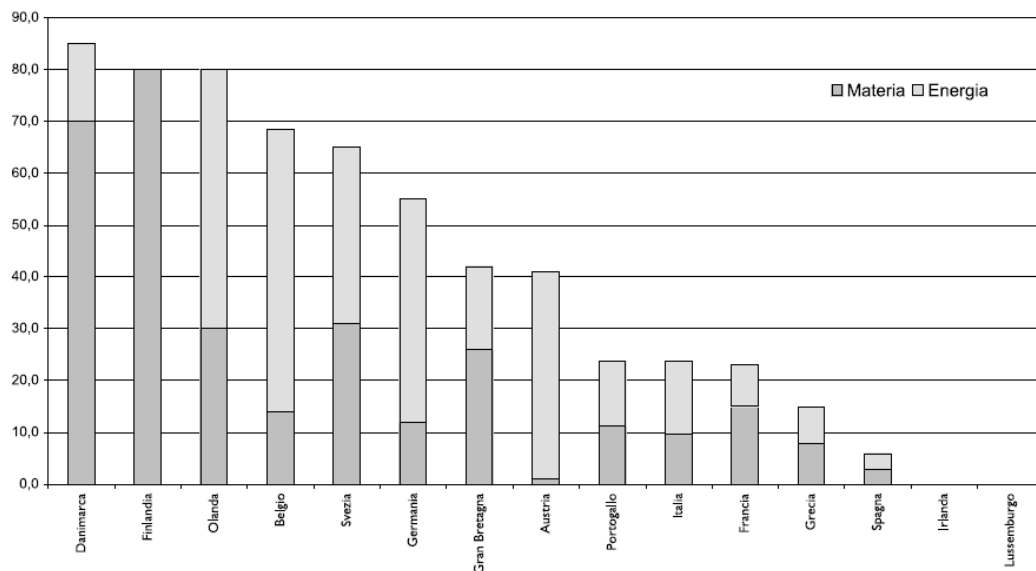


Figura 1.10 – PFU destinati al recupero energetico e di materia (%)

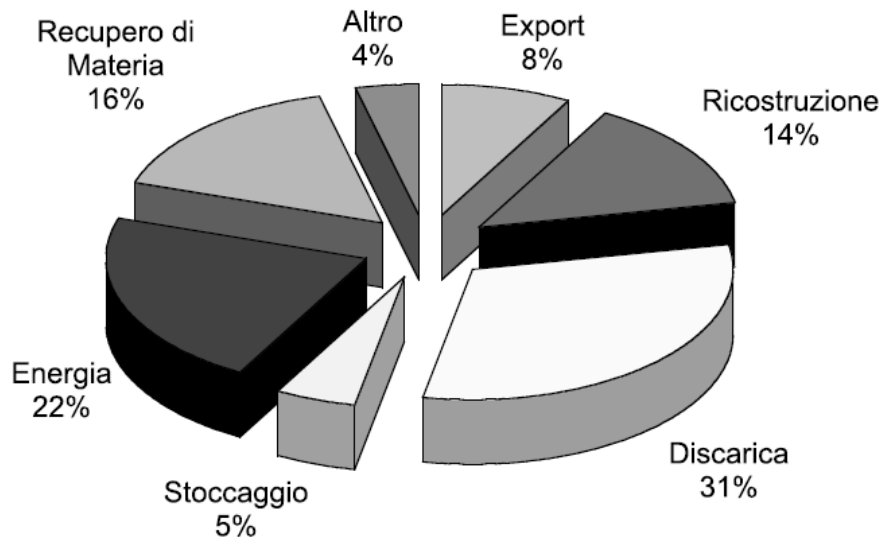


Figura 1.11 – Destinazione dei PFU in Europa (Fonte: ETRA, anno 2000)

1.5.1 Problematica dei PFU

Fino all'emanazione della direttiva europea 99/31/CE ed al suo recepimento in Italia con il d.lgs. 36/03, la modalità prevalente di smaltimento controllato degli pneumatici fuori uso (PFU) nella nostra nazione è stata certamente la discarica. Peraltro, come ben evidenziato da un rapporto dell'Agenzia di Protezione dell'Ambiente degli U.S.A. (EPA-Environmental Protection Agency) datato 1991, i pneumatici fuori uso costituiscono una tipologia di rifiuti che non si presta ad uno smaltimento negli scarichi controllati a causa di un'intrinseca resistenza della gomma all'azione di compattazione, spesso all'origine di problemi estetici (i pneumatici tendono a fuoriuscire dal terreno di copertura) nonché funzionali, in termini di locali alterazioni delle proprietà geotecniche del corpo rifiuti. Anche per tali ragioni, in passato, si è registrato negli U.S.A., così come in Europa, un proliferare di attività di stoccaggio permanente in depositi non autorizzati. Solo per dare un'idea dell'entità e della complessità del fenomeno, nel 1991 si stimava che nel territorio degli Stati Uniti risultassero accatastati tra i 2 e 3 miliardi di PFU, grossomodo equivalenti a 320÷480 milioni di tonnellate. Con l'entrata in vigore del citato d.lgs. 36/03, coerentemente con gli indirizzi generali di gestione dei rifiuti che spingono verso la riduzione dei quantitativi prodotti, incentivando il recupero ed il riciclaggio, la destinazione obbligatoria per tali categorie di residui è stata individuata proprio negli impianti di recupero di materia e/o energia. Peraltro, in conseguenza di una ancora troppo diffusa inosservanza delle norme ambientali, il fenomeno dell'abbandono sul terreno o dello stoccaggio non autorizzato dei PFU risulta ancora molto frequente sia a livello nazionale che regionale, come segnalato dagli operatori del settore e riscontrabile agli occhi di un osservatore attento. In Italia la percentuale dei PFU avviata verso destinazioni non censite (frequentemente ascrivibili a depositi/stoccaggi irregolari) è, infatti, piuttosto elevata (48% circa). Si stima che ogni anno, solo nel nostro Paese Italia, ben 350.000t di pneumatici arrivano a fine vita e, di questi, circa la metà è destinato al recupero energetico, solo il 20% diventa materia prima seconda impiegata in numerosi utilizzi urbani e industriali, mentre della rimanente parte se ne perde completamente ogni traccia. Sicuramente la situazione è tutt'altro che rosea, ma, seppur lentamente, qualcosa sta cambiando, frutto di una nuova sensibilità in seno a produttori e importatori del settore e di nuovi decreti che

stanno per essere varati dal Ministero dell'Ambiente. Un'occasione importante per l'Italia, che da fanalino di coda, grazie ad un sistema nazionale integrato per il monitoraggio, la raccolta, il trattamento e il rimpiego di pneumatici fuori uso, potrebbe scoprire una nuova linfa vitale, affrontando così una stimolante sfida per la salvaguardia dell'ambiente. Ad annunciare quella che ha tutta l'aria di essere una svolta è Ecopneus, società creata dai principali marchi nazionali del mercato di pneumatici che, in occasione dell'Ecomondo di Rimini, ha promosso un convegno spiccatamente dedicato a questo tema. All'invito hanno risposto sia gran parte degli attori presenti oggi sul mercato, sia rappresentanti istituzionali del Ministero dell'Ambiente. L'obiettivo più generale è anche quello di valorizzare un materiale che si dimostra ancora prezioso, versatile e dalle eccellenti potenzialità di riutilizzo, oggi ancora poco conosciute e utilizzate, visto che purtroppo è ancora largamente disperso nell'ambiente ed esposto al rischio di incendi. È un dato di fatto: il pneumatico, inventato da John Boyd Dunlop nel 1888, non ha solo una vita, bensì due, Grazie alle sue caratteristiche costitutive, infatti, può continuare a percorrere altre strade, quelle del riciclo. Nella sua prima vita, composto principalmente da elastomeri, nerofumo, rinforzi metallici, rinforzi tessili, ossido di zinco e zolfo, è l'elemento che viene montato sulle ruote, ovvero l'unico contatto tra il veicolo e la strada, ed è quindi particolarmente soggetto a usura. Dalla nascita è stato studiato e perfezionato con l'obiettivo di migliorarne durata e prestazioni. Terminato il suo ciclo di vita, per molti anni è stato abbandonato, fino a quando si è iniziato a scoprire la sua vera anima, la possibilità di rinascere e trasformarsi, sia sottoforma di recupero materiale che energetico. Da un lato, infatti, sotto forma di granulo, si presta a varie applicazioni (ad esempio, nella produzione di bitumi modificati, prodotti e materiali per l'isolamento di rumore, vibrazione e umidità e per garantire protezione antinfortunistica, può essere utilizzato nelle costruzioni civili, nell'arredo urbano, nelle acciaierie e fonderie, nell'industria calzaturiera e nei bacini di raccolta acque); dall'altro lato ha un potere calorifico simile a quello del carbone. Può essere, quindi, considerato a pieno titolo una vera e propria fonte energetica. A questi si aggiungono altri possibili riutilizzi: dal co-incenerimento alla produzione di energia elettrica e vapore, fino alla pirolisi, un processo di decomposizione termochimica attraverso il quale si scindono i legami chimici del materiale sottoposto al trattamento. L'olio di pirolisi e i gas possono essere in questo modo utilizzati come combustibili, mentre il residuo carbonioso può essere trasformato in carbone attivo. Tra le caratteristiche dei materiali impiegati si nota soprattutto la resistenza ad agenti atmosferici e batteri, solventi e agenti chimici e allo stress meccanico, la stabilità nel tempo e al contempo l'elasticità e flessibilità, oltre a una buona capacità di drenaggio. Si contano 12 grandi produttori di pneumatici in Europa, 90 impianti in cui si producono ogni anno 355 milioni di pneumatici, il 24% della produzione mondiale. Il tasso di raccolta testimonia un trend molto positivo con un aumento costante negli ultimi 15 anni del recupero, in particolare del materiale. Il sistema integrato per una gestione e per il recupero dei pneumatici fuori uso deve basarsi prima di tutto su un principio cardine imprescindibile: la responsabilità del produttore; le aziende che producono o importano e distribuiscono pneumatici devono occuparsi di tutto il suo arco di vita. Un approccio che non deve essere dato per scontato e che in Europa ha già portato i suoi primi frutti, con una maggiore consapevolezza e un aumento costante del materiale recuperato. Secondo questo principio, i produttori e importatori saranno tenuti ogni anno a gestire (assicurando raccolta, trasporto, recupero e smaltimento) una quantità di

pneumatici fuori uso equivalenti a quanto immesso nel mercato del ricambio nell'anno precedente. E per dare concretezza a questa richiesta ci si è dati delle scadenze importanti, o meglio delle tappe intermedie di un percorso che deve portare alla massima ottimizzazione e al massimo recupero del materiale. Entro il 31 dicembre 2010 dovrà essere controllato dal sistema almeno il 35% dei pneumatici fuori uso immessi nel mercato ed entro il 31 dicembre 2011 dovrà essere raggiunto l'ambito traguardo: un controllo e un recupero al 100%. Nella creazione di questo sistema di gestione e nella richiesta di maggiore responsabilità da parte dei produttori e importatori è implicito il ruolo fondamentale di Ecopneus e il compito cui è stato chiamato. Anzitutto, l'obiettivo deve essere combattere l'illegalità, raccogliendo alla fonte, controllando le destinazioni e monitorando ogni passaggio del sistema; quindi, incrementare il recupero di materiale, sviluppando nuove applicazioni; complessivamente, dunque, riequilibrare il tutto attivando controlli efficaci. Gioco di squadra Fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi è la sinergia tra il mondo imprenditoriale e istituzionale. Una prima convergenza si vede in questa fase di partenza: il sistema, infatti, sarà finanziato attraverso un contributo ambientale (comma 2, articolo 228 del d.lgs. 152/06) che, come avviene già oggi, sarà pagato al momento dell'acquisto dei nuovi pneumatici. L'importo sarà indicato in modo trasparente e chiaro sulla fattura di acquisto. Si tratterà di un sistema senza fini di lucro che punta a una progressiva ottimizzazione di tutti i costi di sistema. Eventuali risorse disponibili saranno destinate ad attività negli anni successivi e, per il 30%, potranno essere utilizzate dal Ministero dell'Ambiente per la bonifica e il recupero di siti dove esistono stock storici abbandonati, una realtà presente un po' in tutta Italia¹⁴.

1.5.2 Normativa

Il decreto legislativo 13 Gennaio 2003, n. 36 ed il DM 13 Marzo 2003 che introducono nella legislazione italiana la nuova disciplina in materia di discariche, recependo la Direttiva 99/31/CE, comportano notevoli cambiamenti nel settore. I principali interventi innovativi hanno riguardato:

- la nuova classificazione delle discariche e le relative nuove norme tecniche; in particolare si passa dalle cinque categorie previste nella deliberazione 27 Luglio 1984 a tre sole categorie (inerti, non pericolosi e pericolosi);
- l'elenco dei rifiuti ammissibili in discarica, in conformità alla Direttiva 99/31/CE, viene ampliato rispetto a quello già contenuto nel DM n. 141/98 relativo ai soli rifiuti pericolosi;
- l'introduzione di obiettivi di riduzione della frazione biodegradabile da smaltire in discarica;
- condizioni più restrittive e dettagliate per il rilascio delle autorizzazioni da parte delle autorità competenti;
- l'introduzione di specifiche procedure di controllo per il conferimento e l'accettazione dei rifiuti in discarica;
- la definizione della procedura di chiusura delle discariche e delle modalità di gestione operativa e post-operativa;
- un nuovo sistema di garanzie finanziarie;
- un riequilibrio dei costi di smaltimento in discarica rispetto ai costi relativi ad altre forme di smaltimento e/o recupero in considerazione del fatto che

¹⁴ Ecopneus, Riciclo al 100%, MT Rivista del Movimento Terra (02-2010), pp. 62-64

il prezzo applicato dal gestore per lo smaltimento di qualsiasi tipo di rifiuti dovrà coprire tutti i possibili costi derivanti dalla realizzazione dell'impianto e dal suo esercizio, dalla prestazione della garanzia finanziaria, dalla chiusura che si protrarrà per un periodo di almeno 30 anni;

- l'introduzione di alcune nuove sanzioni specifiche, ferme restando le sanzioni in via generale previste dal d.lgs. 22/97;

Tra i rifiuti non ammessi in discarica l'articolo 6, lettera o) prevede: "Pneumatici interi fuori uso a partire dal 16 luglio 2003, esclusi i pneumatici usati come materiale di ingegneria ed i pneumatici fuori uso triturati a partire da tre anni da tale data, esclusi in entrambi i casi quelli per biciclette e quelli con diametro esterno superiore a 1400 mm". La normativa, inoltre, prevede che a partire dal 1° Gennaio 2007 non potranno più essere smaltiti in discarica i rifiuti con un potere calorifico inferiore a 13.000 kJ/kg. Gli obiettivi di riduzione sono stati:

- Entro cinque anni dall'entrata in vigore del decreto i rifiuti urbani biodegradabili allocati in discarica dovranno essere inferiori a 173 kg/anno per abitante;
- Entro otto anni i rifiuti urbani biodegradabili dovranno essere inferiori a 115 kg/anno per abitante;
- Entro 15 anni i rifiuti urbani biodegradabili dovranno essere inferiori a 81 kg/anno per abitante.

L'entrata in vigore dei nuovi criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica in conformità alle disposizioni europee, prevista per il 16 Luglio 2005, è stata prorogata al 31 Dicembre 2005. L'articolo 17 del d.lgs. 36/2003 disciplina il periodo transitorio in attesa dell'applicazione delle nuove disposizioni; in particolare viene disposto che le discariche già autorizzate alla data di entrata in vigore del decreto possano continuare a ricevere, fino al 31 Dicembre 2005, i rifiuti oggetto dell'autorizzazione. Il Green Procurement ('acquisti verdi') è un sistema di acquisti di prodotti e servizi ambientalmente preferibili, cioè "quei prodotti e servizi che hanno un minore, ovvero un ridotto, effetto sulla salute umana e sull'ambiente rispetto ad altri prodotti e servizi utilizzati allo stesso scopo". Inserire criteri ambientali nelle procedure di acquisizione di prodotti e servizi della Pubblica Amministrazione (Green Public Procurement) può dare, quindi, un contributo significativo allo sviluppo di un mercato verde, e nello stesso tempo, un incentivo alle imprese a produrre beni a minor impatto ambientale, rafforzando al contempo anche la competitività dell'industria europea. Una politica pubblica di acquisti verdi può dare, inoltre, un grande contributo agli obiettivi della riduzione della produzione dei rifiuti, dell'aumento della quota di essi avviati a riciclo e/o a recupero energetico, della riduzione della quantità e della tossicità di quelli pericolosi, in quanto gli acquisti che la Pubblica Amministrazione effettua riguardano un ampio ventaglio di beni, che vanno dalla carta ai computer, ai mobili, alle apparecchiature elettriche, etc. Gli studi effettuati, infine, dimostrano che scegliere sulla base dell'analisi del ciclo di vita prodotti a minor impatto ambientale comporta una diminuzione dei costi di elettricità, di emissioni, di produzione di rifiuti, etc. che si traduce al contempo in un vantaggio per l'ambiente e in un risparmio per la Pubblica Amministrazione. Con il Sesto programma d'azione ambientale l'UE ha indicato, tra gli strumenti più efficaci per perseguire l'obiettivo prioritario della prevenzione e minimizzazione dei rifiuti, lo sviluppo una politica verde di approvvigionamenti pubblici. Il contributo più importante allo sviluppo del GPP è venuto con le

Direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE che regolano l'aggiudicazione degli appalti pubblici e che inseriscono a pieno titolo le caratteristiche ambientali tra i criteri di preferenza negli acquisti della Pubblica Amministrazione. Un utile strumento di lavoro per le Amministrazioni che vogliono attuare una politica di acquisti verdi è il Manuale europeo del Green Public Procurement. Tra le indicazioni in esso contenute vi è, in particolare, la raccomandazione di tener conto, nell'acquisto di prodotti e servizi, della quantità dei rifiuti che generano, della loro pericolosità, e della quantità di materiale che può essere riciclato¹⁵.

In questo senso, la Legge finanziaria n. 448 del 2001 (art. 52, comma 56), con un emendamento all'art. 19, comma 4 del d.lgs. 22/97, ha stabilito che le pubbliche amministrazioni hanno l'obbligo di coprire almeno il 30% del loro fabbisogno annuale di manufatti e beni con prodotti realizzati in materiale riciclato, in ciascun anno solare e per ciascuna categoria di prodotto. L'obbligo riguarda tutti gli uffici e gli enti pubblici e le società a prevalente capitale pubblico, anche di gestione dei servizi, quindi un numero di soggetti molto vasto e diffuso capillarmente sul territorio, di cui le Regioni e l'Osservatorio, ciascuno per il proprio ambito di competenza, terranno l'elenco. I destinatari della norma sono tenuti a rispettarla in sede di formulazione di una gara per la fornitura e l'installazione di manufatti e beni, nonché nella formulazione di capitolati di opere pubbliche. La Finanziaria 2002 ha rinviato ad un successivo decreto l'individuazione delle metodologie di calcolo, nonché la definizione di materiale riciclato, al fine di consentire alle Regioni di adottare le disposizioni necessarie a garantire che una quota pari, come si è detto, ad almeno il 30% del fabbisogno annuale di manufatti e beni fosse realizzata con materiale riciclato. Le relative disposizioni attuative sono contenute nel decreto interministeriale 8 maggio 2003, n. 203. Il decreto istituisce il cd. "Repertorio del Riciclaggio", ove sono iscritti i materiali riciclati e i manufatti e i beni realizzati in materiale riciclato per i quali sussiste il citato obbligo per le pubbliche amministrazioni. In base al decreto si possono considerare prodotti con materiale riciclato quei manufatti o quei beni che sono stati realizzati con una prevalenza in peso di materiale riciclato. Per il calcolo della prevalenza in peso dei materiali riciclati si fa riferimento al materiale stesso e non ai rifiuti. Per ciascuna categoria di prodotto il quantitativo rappresentante il fabbisogno annuale di manufatti e beni è espresso nell'unità di misura atta ad identificare l'unità di prodotto. Per quelle categorie di prodotto per le quali ciò non è possibile si fa riferimento all'importo annuo destinato all'acquisto di manufatti e beni appartenenti alla stessa categoria di prodotto. L'obbligo di copertura si riferisce a manufatti e beni realizzati con materiale riciclato iscritti nel Repertorio del Riciclaggio, che rappresenta una sorta di catalogo dei beni riciclati disponibili sul mercato, per i quali sia stata verificata la congruità del prezzo e la disponibilità dell'offerta. La pubblicazione del decreto era stata ritardata a seguito dell'intervento della Corte dei Conti, che aveva formulato dei rilievi in sede di registrazione, superati con lo stralcio di alcune parti del provvedimento: poiché tuttavia questo rimaneva in tal modo privo del suo braccio operativo, ovvero dell'organo che doveva provvedere all'istruttoria delle pratiche per l'iscrizione nel Repertorio, nonché a fornire determinate indicazioni per l'applicabilità del decreto, si è resa necessaria l'emanazione di un nuovo decreto, questa volta del solo Ministro dell'ambiente (DM 9 ottobre 2003), che ha istituito presso lo stesso Ministero una Commissione tecnica con i compiti sopra menzionati. L'operatività del decreto rimaneva comunque condizionata alla "declinazione" in termini

¹⁵ Fonte - Rapporto Rifiuti 2004 APAT

settoriali delle disposizioni in esso contenute, che avrebbe finalmente consentito l'iscrizione nel Repertorio del riciclaggio, per categoria di prodotto, dei materiali riciclati e dei manufatti e beni realizzati in materiale riciclato. Ciò si sta realizzando tramite le indicazioni che il Ministero sta progressivamente fornendo in alcune circolari per i diversi settori. In particolare finora sono state emanate:

- Circolare 8 giugno 2004 relativa al settore tessile e dell'abbigliamento;
- Circolare 4 agosto 2004 relativa al settore plastico;
- Circolare 3 dicembre 2004 relativa al settore della carta;
- Circolare 3 dicembre 2004 relativa al settore del legno e arredo;
- Circolare del 15 luglio 2005 relativa al settore inerti;
- Circolare del 19 luglio 2005 relativa al settore della gomma.

Con Circolare del 19 luglio 2005 (pubblicata nella Gazzetta Ufficiale del 27 luglio 2005 n. 173) sono state fornite le indicazioni operative per l'applicazione del citato decreto n. 203 ai materiali riciclati e ai beni e manufatti ottenuti con materiale riciclato, proveniente da articoli in gomma. La redazione della circolare è stata resa possibile dalla fattiva collaborazione delle rappresentanze dei riciclatori presenti in ARGO le quali, oltre a contribuire con propri esperti alle riunioni della Commissione ministeriale incaricata, hanno, per quanto riguarda gli aspetti tecnici, formulato proposte specifiche, condivise con i rappresentanti delle altre categorie industriali interessate. Pertanto, l'emanazione della circolare è frutto di un lungo processo di consultazione e intermediazione, sia interna, tra gli associati, sia esterno, con le altre associazioni imprenditoriali consultate e con il Ministero, che ha consentito di valutare e contemperare le diverse condizioni ed esigenze per l'idonea attuazione della normativa in materia di Green Public Procurement e, quindi, per lo sviluppo del mercato dei materiali e prodotti riciclati nel settore della gomma. La circolare fornisce indicazioni sui seguenti punti:

- materiale riciclato (definizione, limite in peso imposto dalla tecnologia);
- categorie di prodotti iscrivibili nel repertorio;
- metodologia di calcolo;
- obbligo;
- congruità del prezzo;
- iscrizione nel repertorio del riciclaggio.

L'obbligo di copertura del 30% degli acquisti pubblici con beni e manufatti realizzati in gomma riciclata deve essere soddisfatto con riferimento a ciascuna delle categorie di impiego di manufatti, prodotti con una prevalenza di gomma riciclata, indicati nella circolare (arredo urbano e stradale, attrezzature per il gioco e strutture ludiche, pavimentazione per interni ed esterni, prodotti per florovivaistica, etc.), per ognuna delle quali è riportata una elencazione di prodotti esemplificativa e non esaustiva. La circolare contiene altresì i limiti minimi in peso di rifiuti in gomma contenuti nel materiale riciclato, imposti dalle diverse tecnologie di produzione: essendo tali limiti molto variegati in funzione sia delle caratteristiche del materiale che del suo utilizzo, sono stati forniti a titolo indicativo alcuni valori relativi alle tecnologie più diffuse, fermo restando che la quantità effettiva dei rifiuti impiegati dovrà essere indicata nella domanda di iscrizione al Repertorio e nella perizia a corredo della stessa. Così come previsto dalle altre circolari settoriali e in generale dal decreto, l'obbligo di copertura del 30% scatta decorsi 180 giorni, dall'iscrizione dei prodotti nel Repertorio, realizzati con una prevalenza in peso di materiali riciclati (anch'essi iscritti nel Repertorio), per i quali sia stata verificata la disponibilità sul mercato e la

congruità di prezzo: quanto a quest'ultima, ricordiamo che questa si realizza nel momento in cui il valore dei prodotti iscrivibili non supera quello dei corrispondenti prodotti realizzati con materiali vergini di analoghe caratteristiche, che si vanno a sostituire. Il Repertorio risulta ufficialmente aperto dallo scorso aprile, ed è consultabile sul sito web dell'O.N.R. Il decreto, entrato in vigore il 22 agosto 2003, introduce significative modificazioni nell'attuale sistema di gestione dell'importante flusso di rifiuti costituito dai veicoli a fine vita. In realtà l'articolo 46 del d.lgs. 22/97 aveva già "anticipato" molte disposizioni della norma europea garantendo in particolare uno degli obiettivi prioritari della direttiva: la consegna obbligatoria del veicolo ad operatori autorizzati in grado di assicurare un corretto trattamento e recupero dello stesso. Al fine di ottenere e perseguire gli obiettivi della direttiva, secondo il principio della "responsabilità condivisa", viene previsto il coinvolgimento nella gestione dei veicoli fuori uso di tutti gli operatori interessati: produttori di veicoli e componenti, concessionari, operatori addetti alla raccolta e imprese di demolizione, di frantumazione, di recupero, e di riciclaggio. Appare opportuno riportare, in maniera sintetica, i principali disposti legislativi in maniera di rifiuti:

- In Italia il decreto legislativo del 5 febbraio 1997 n.22 "... disciplina la gestione dei rifiuti, dei rifiuti pericolosi, degli imballaggi e dei rifiuti di imballaggi ...", "... per garantire elevata protezione dell'ambiente e controlli efficaci, tenendo conto della specificità dei rifiuti pericolosi ...".
- D.M. 29 ottobre 1997, Approvazione Statuto CONAI. Con sette Decreti Ministeriali emanati tutti il 15 luglio 1998 sono stati approvati gli Statuti dei vari Consorzi. (Artt. 40, 41- Istituzione del CONAI e di un Consorzio per le varie tipologie di materiali da imballaggio-47, comma 1; 48, comma 1, d.lgs. 22/97).
- Accordo di Programma Quadro per la raccolta ed il recupero dei rifiuti d'imballaggio, stipulato tra ANCICONAI. (Art. 41 comma 3, d.lgs. 22/97).
- D.M. 5 febbraio 1998, disciplina il recupero di rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero. (Artt. 31 comma 2, 33 d.lgs. 22/97).
- D.M. 11 marzo 1998, n° 141, Regolamento recante norme per lo smaltimento in discarica dei rifiuti e per la catalogazione dei rifiuti pericolosi smaltiti in discarica. (Artt. 18, comma 2, lett. a, comma 4 e 28, comma 2, D. Lgs. 22/97).
- D.M. 1 aprile 1998, n° 145, Regolamento recante la definizione del modello e dei contenuti del formulario di accompagnamento dei rifiuti. (Artt. 15, 18, comma 2, lett. e, comma 4 D. Lgs. 22/97).
- D.M. 1 aprile 1998, n° 148, Regolamento recante approvazione del modello dei registri di carico e scarico dei rifiuti. (Artt. 12, 18, comma 2 let.m, comma 4, d.lgs. 22/97).
- D.M. 28 aprile 1998, n°406, Regolamento recante norme di attuazione di direttive dell'Unione Europea, avente ad oggetto la disciplina dell'Albo Nazionale delle Imprese che effettuano la gestione dei rifiuti. (Art. 30, comma 6, d.lgs. 22/97).
- D.M. 21 luglio 1998, n° 350, Regolamento recante norme per la determinazione dei diritti di iscrizione in appositi registri dovuti da imprese che effettuano operazioni di recupero e smaltimento rifiuti. (Artt. 31, comma 5, 32, 33, d.lgs. 22/97).

- D.M. 4 agosto 1998, n° 372, Regolamento recante norme sulla riorganizzazione del Catasto dei Rifiuti. (Art. 11, comma 1, d.lgs. 22/97).
- D.M. 3 settembre 1998, n° 370, Regolamento recante norme concernenti le modalità di prestazione della garanzia finanziaria per il trasporto transfrontaliero di rifiuti. (Art. 16, comma 2, d.lgs. 22/97).
- D. Lgs. 16 marzo 1999, n° 79, Attuazione della Direttiva 96/92/CE Recante norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica. (Art. 33, comma 9, D. Lgs. 22/97).
- D.M. 23 aprile 1999, Modificazione al D.M. 8 ottobre 1996, Recante "Modalità di prestazione delle garanzie finanziarie a favore dello Stato da parte delle imprese esercenti attività di trasporto dei rifiuti". (Art. 30, comma 6, d.lgs. 22/97).
- D.P.R. 27 aprile 1999, n° 158, Regolamento recante norme per l'elaborazione del metodo normalizzato per definire la tariffa del servizio di gestione del ciclo dei rifiuti urbani. (Art. 49, comma 5, D.Lgs. 22/97).
- D.M. 22 ottobre 1999, n° 460, Regolamento recante disciplina dei casi e delle procedure di conferimento ai centri di raccolta dei veicoli a motore o rimorchi rinvenuti da organi pubblici o non reclamati dai proprietari e di quelli acquisiti ai sensi degli artt. 927-929 e 923 del c.c. (Art. 46, comma 3, d.lgs. 22/97).
- D.M. 25 ottobre 1999, n° 471, Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati. (Art.17, comma 1, d.lgs. 22/97).
- D.M. 25 febbraio 2000, n° 124, Regolamento recante i valori limite di emissione e le norme tecniche riguardanti le caratteristiche e le condizioni di esercizio degli impianti di incenerimento e di coincenerimento dei rifiuti pericolosi, in attuazione della direttiva 94/67/CE del Consiglio del 16 dicembre 1994 e ai sensi dell'art. 3, comma 2 del D.P.R. 24 maggio 1998, n° 203, e dell'art. 18, comma 2, let. a, d.lgs. 22/97. (Art.18, comma 2, let. a e comma 4, d.lgs. 22/97).
- D.M. 18 aprile 2000, n° 309, Regolamento di organizzazione e funzionamento dell'Osservatorio Nazionale sui Rifiuti. (Art.26, comma 4, d.lgs. 22/97).
- D.M. 26 giugno 2000, n° 219, Regolamento recante la disciplina per la gestione dei rifiuti sanitari. (Art.45, comma 4, d.lgs. 22/97).
- D. Lgs. 36 del 13 gennaio 2003. "Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti": " ... è opportuno incoraggiare la prevenzione, il riciclaggio e la valorizzazione dei rifiuti nonché l'impiego dei materiali e dell'energia recuperati al fine di risparmiare le risorse naturali ... ”.
- Decisione della Commissione 2000/532/CE del 3 maggio 2000 (G.U.C.E. n. L 226 del 6/9/2000) che sostituisce la decisione 94/3/CE che istituisce un elenco dei rifiuti conformemente all'art. 1, lett. a) della direttiva 75/442/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti e la decisione 94/904 del Consiglio che istituisce un elenco di rifiuti pericolosi ai sensi dell'art. 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti pericolosi.

- Decisione 2001/118/CE della Commissione del 16 gennaio 2001 che modifica l'elenco dei rifiuti istituito dalla decisione 2000/532/CE (G.U.C.E. n. L 47 del 16/2/2001).
- Decisione della Commissione 2001/119/CE del 22 gennaio 2001 che modifica la decisione 2000/532/CE che sostituisce la decisione 94/3/CE che istituisce un elenco dei rifiuti conformemente all'art. 1, lett. a) della direttiva 75/442/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti e la decisione 94/904 del Consiglio che istituisce un elenco di rifiuti pericolosi ai sensi dell'art. 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi. (G.U.C.E. n. L. 47 del 16/2/2001).
- Decisione del Consiglio 2001/573/CE del 23 luglio 2001 che modifica l'elenco dei rifiuti contenuto nella decisione 2000/532/CE. (G.U.C.E. n. L203 del 28/7/2001).
- Legge 31 luglio 2002 (l'Art. 23), n. 179 ha disposto che “all’Allegato A [del D.L.vo 22/97] le parole “16 01 03 pneumatici usati” sono sostituite dalle seguenti: “16 01 03 pneumatici fuori uso” ed, attualmente sia l’art. 228 che l’allegato A – voce 16 01 03 – del d.lgs. 152/2006, contemplano anch’essi nella categoria dei rifiuti unicamente i “pneumatici fuori uso” (Cass. Pen., sez. III, 1 marzo 2007, n. 8679 – ud. 23 gennaio 2007). E’ vero che, come recentemente rilevato, la stessa Corte di Cassazione sez. III n. 46643 del 14 dicembre 2007 evidenzia che “in tema di gestione dei rifiuti, dopo l’entrata in vigore della legge 31 luglio 2002, n. 179, la qualifica di rifiuto va attribuita ai soli pneumatici fuori uso, come confermato dall’allegato A, voce 160103 del d.lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e non ancora ai pneumatici usati né ancora ricostruibili (sent. pen. sez. III, 23 gennaio 2007, n. 8679, Vitale). Peraltro, come ha precisato questa Corte, esulano dalla nozione di rifiuto solo i materiali residuali di produzione o di consumo che siano effettivamente riutilizzati senza subire alcun trattamento preventivo, ovvero subendo un trattamento preventivo che non importi un’operazione di recupero, mentre i pneumatici usati, dei quali il detentore si disfa o che vende a terzi perchè siano riutilizzati previa rigeneratura o ricopertura, costituiscono rifiuti, stante la loro destinazione ad un’operazione di recupero individuata dall’allegato c) del d.lgs. n. 22 del 1997. (v. per tutte Cass. pen. sez. III sent. 6 luglio 2006, n. 23494 Curto e altro)”.
- D.M. 9 gennaio 2003 - Esclusione dei pneumatici ricostruibili dall'elenco di rifiuti non pericolosi. (pubblicato nella Gazzetta Ufficiale italiana n. 14 del 18 gennaio 2003.)

1.6 Principali metodologie per il recupero della gomma

Lo smaltimento ed il recupero dei rifiuti in gomma ha suscitato, negli ultimi anni, grande interesse. Tale interesse, non si deve soltanto agli effetti nocivi che lo smaltimento in discarica può dar luogo, ma anche al fatto che la pratica di dismissione costituisce perdita di risorse, essendo la gomma un materiale recuperabile sia sotto forma di materia che di energia. Infatti, sebbene il quantitativo di pneumatici fuori uso non sia notevole, l’ammontare dell’energia recuperabile, dovuto all’elevato potere calorifico (7500-8000 kcal/kg, compreso tra quello del carbone e quello dell’olio combustibile) è comunque degno di nota. Anche la ricostruzione, contribuisce al riutilizzo dei pneumatici per l’uso originario, favorendo il risparmio energetico e quello delle materie prime, dovuto

alla mancata produzione di pneumatici nuovi. I rifiuti in gomma, nel caso in cui vengano riutilizzati direttamente nella miscela elastomerica, si comporterebbero come un materiale riempitivo. La vulcanizzazione, infatti, trasforma l'elastomero in una sostanza infusibile e insolubile, per cui il riciclaggio degli stessi in sostituzione della materia prima vergine richiede l'applicazione di alcuni pretrattamenti quali ad esempio la de-vulcanizzazione, che permette l'ottenimento di un materiale denominato "rigenerato". Le metodologie per il recupero della gomma si possono distinguere in due categorie:

- riutilizzo del materiale in gomma, dopo opportuno trattamento (triturazione), per riprodurre prodotti simili a quelli di partenza;
- recupero di altri materiali o di energia (termodistruzione).

Mediante la triturazione il rifiuto in gomma viene ridotto nella granulometria idonea a consentirne il reimpiego nella miscela utilizzata per la produzione dei manufatti. Le tecnologie più utilizzate sono le seguenti:

- Triturazione meccanica.
- Processi criogenici.
- Processi elettrotermici.

Abbiamo poi, come già espresso, la termodistruzione con recupero di energia dei pneumatici fuori uso e rifiuti in gomma, utilizzando questi come supplemento del combustibile non rinnovabile.

1.6.1 Il ciclo dei pneumatici

Il flusso di rifiuti in gomma è stato inserito tra i Flussi Prioritari di Rifiuti nell'ambito comunitario. Solo in Europa ogni anno vengono accantonate oltre 2.000.000 di tonnellate di pneumatici fuori uso ed il loro recupero e riutilizzo consentirebbe un risparmio significativo di risorse ed un contributo importante al rispetto dell'ambiente. Le metodologie per il riutilizzo e il recupero della gomma si possono distinguere in quattro categorie:

- Riscolpitura.
- Ricostruzione.
- Riutilizzo del materiale in gomma, dopo opportuno processo di triturazione.

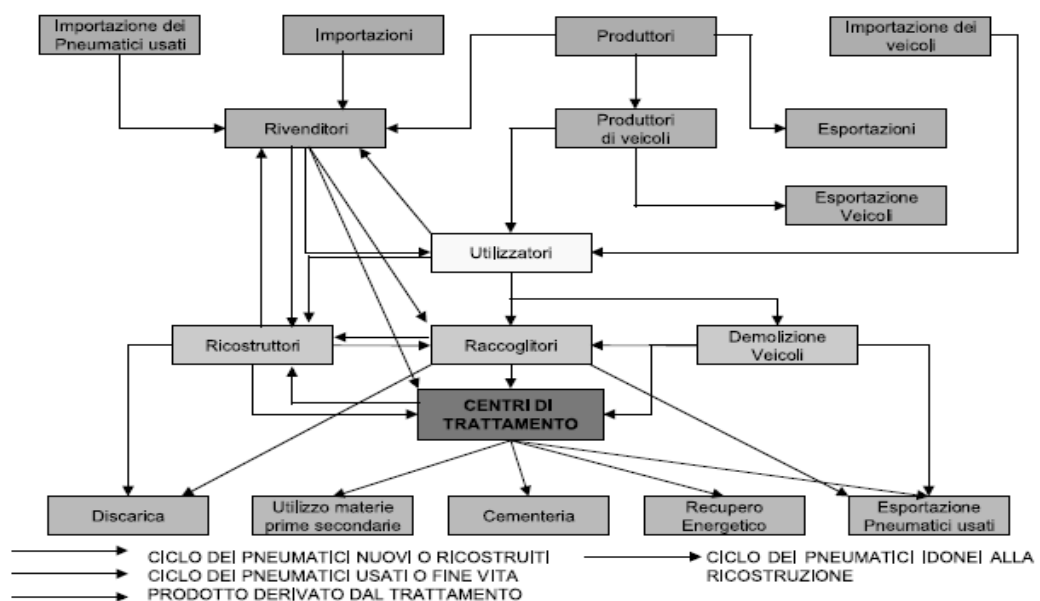


Figura 1.12 – Ciclo di vita dei PFU



Figura 1.13 – Esempi di discarica e di incendi in alcune discariche di Pneumatici

1.6.2 Riutilizzo della gomma: Riscolpitura

La riscolpitura è un processo nel quale si realizza una scolpitura di nuove scanalature sul vecchio battistrada usurato questo permette di allungare la vita dei pneumatici degli autocarri, ma non può essere realizzata sui pneumatici delle vetture, perché la distanza tra il fondo degli incavi del battistrada e la cintura metallica, non è adeguata. La tecnica della riscolpitura del pneumatico per camion fu introdotta con successo nel 1949, consentendo di estendere in modo economico ed in totale sicurezza la durata di percorrenza dei pneumatici. Tipicamente, un pneumatico nuovo per camion può essere riscolpito fino ad una profondità di 3-4mm al di sotto del livello della scolpitura originale. Non tutti i pneumatici sono adatti alla riscolpitura. Non possono essere sottoposti al processo pneumatici danneggiati o precedentemente sottoposti a riparazioni. Inoltre, il pneumatico deve riportare sul lato la dicitura “Regroovable”¹⁶.



Figura 1.14 – Processo di riscolpitura e dicitura riportata sul pneumatico

¹⁶ <http://abruzzoattrezzature.jimdo.com/italmatic/rigatori/>

1.6.3 Riutilizzo della gomma: Ricostruzione

Il ricostruito è un pneumatico al quale è stato sostituito il battistrada consumato con materiale nuovo che ha caratteristiche del tutto simili all'originale. I processi utilizzati per la ricostruzione sono essenzialmente due: “a caldo” e “a freddo”. La differenza sostanziale tra i due procedimenti sta nell’origine del nuovo battistrada che viene applicato sulla carcassa “raspata”: nel primo caso viene applicato uno strato di para che viene cotto nello stampo che imprime anche il disegno stesso; nel secondo caso invece viene applicata una fascia scolpita già pronta che viene saldata alla carcassa nell’autoclave. I pneumatici ricostruiti sono prodotti essenzialmente sicuri. Basti pensare che:

- le strutture portanti (carcasse) da ricostruire vengono selezionate sulla base di controlli rigorosi con l'impiego di sofisticate apparecchiature in grado di evidenziare anche il più piccolo difetto;
- la ricostruzione è regolata dalle norme ECE ONU 108 (veicolo) e 109 (autocarro) che disciplinano l'intero processo, stabilendo che sui pneumatici ricostruiti vengano eseguite le stesse prove previste per i pneumatici nuovi e che le aziende di ricostruzione siano dotate di un adeguato sistema di qualità.

Nel nord America il 50% dei pneumatici di ricambio per trasporto pesante è costituito da ricostruiti; i pneumatici per aerei vengono normalmente ricostruiti diverse volte. L'apporto della ricostruzione per limitare il danno ecologico è decisamente significativo. Soltanto in Italia ogni anno la ricostruzione evita lo smaltimento di oltre 47.000 tonnellate di pneumatici usati. Inoltre, bisogna considerare che i pneumatici sono essenzialmente dei prodotti petrolchimici e per produrre un pneumatico per autocarro servono 80 litri di petrolio. Poiché circa il 70% di quel petrolio si trova nella carcassa del pneumatico che viene riutilizzato nel processo di ricostruzione, per ricostruire quello stesso pneumatico sono necessari solo circa 25 litri di petrolio. Un parco automezzi di medie dimensioni che utilizza solo 500 pneumatici l’anno aiuterebbe perciò a risparmiare più di 27.500 litri di petrolio l’anno¹⁷.



Figura 1.15 – Fasi della ricostruzione di un pneumatico

1.6.4 Triturazione meccanica

La triturazione meccanica consta di più fasi di lavoro. Il fine è quello di separare la parte in gomma da quella tessile e metallica e, quindi, ottenere “materie prime” nuovamente riutilizzabili per scopi diversi. La parte di maggior interesse è certamente quella in gomma peraltro costituente il 70% del pneumatico. Le principali fasi sono:

- Fase 1 - rimozione del tallone.
- Fase 2 - triturazione.
- Fase 3 - granulazione.

¹⁷ <http://www.rifergomme.com/ricostruzione.asp>

- Fase 4 - micronizzazione.

E' possibile ridurre ulteriormente la granulometria aggiungendo all'impianto alcuni mulini polverizzatori. Successivamente il materiale viene stoccato in differenti big-bag.

1.6.4.1 Rimozione del tallone

Questa fase avviene solo per i pneumatici di autocarro in quanto sono dotati di due anelli metallici di sezione variabile da 12 a 20 mm con lo scopo di sostenere il tallone. Con questa operazione vengono separati, senza rottura, i due anelli dal pneumatico.

1.6.4.2 Triturazione

Con questa seconda fase, tutti i pneumatici di autovetture e mezzi leggeri nonché i pneumatici di autocarro (privati degli anelli metallici) vengono introdotti nei diversi triturator i quali provvedono a ridurli in pezzature variabili da 70x70 mm fino a 100x100 mm. Durante questa fase la velocità di triturazione non può essere elevata per evitare il riscaldamento dei mulini e quindi che le diverse parti in gomma possano aderire alle pale.

1.6.4.3 Granulazione primaria

La gomma proveniente dalla triturazione viene avviata alla fase di granulazione per essere ulteriormente ridotto di dimensioni. In questa fase avviene anche una prima separazione della parte in gomma da quella in acciaio e tessile. Una quota del granulo così ottenuta può essere asportata tal quale e destinata all'impiego corrispondente, mentre il rimanente viene trasportato al successivo impianto di granulazione di raffinazione. Questa lavorazione separa dalla gomma il 99% dell'acciaio presente nel pneumatico: l'acciaio viene rimosso tramite un separatore magnetico posizionato dopo il granulatore e scaricato in un cassone scarrabile per mezzo di un nastro trasportatore. Durante questo processo si produce una frazione di tela e gomma polverizzata che, per motivi di inquinazione ambientale, deve essere aspirata ed abbattuta attraverso un filtro separatore a maniche, previo passaggio all'interno di un ciclone abbattitore.

1.6.4.4 Granulazione secondaria

Il materiale granulato con pezzatura compresa fra 0 e 20mm viene convogliato ad un nastro reversibile, nel caso di granulo proveniente da pneumatici senza tessuto (camion o trattore), il materiale arriva ad un vaglio rotativo che provvede alla selezione delle differenti frazioni. Nel caso sia richiesta un'ulteriore raffinazione delle frazioni uscenti, il granulo viene inviato alla linea di mulini per pneumatici auto. Nel secondo caso (pneumatici auto) ci sono due linee di mulini raffinatori a lame che scaricano su un unico nastro trasportatore che convoglia il prodotto in uscita in un altro vaglio rotativo dotato di 3 griglie con fori di differente diametro (approssimativamente da 0,5 a 3 mm). Il prodotto durante la vagliatura cade nelle rispettive tramogge andando a riempire i big bags agganciati alla struttura metallica del vaglio rotante. Anche durante questa fase si produce una frazione di tela e gomma polverizzata che, per motivi di inquinazione ambientale, deve essere aspirata ed abbattuta attraverso un filtro separatore a maniche, previo passaggio all'interno di un ciclone abbattitore.

1.6.4.5 Micronizzazione

Tramite nastri magnetici di diversa natura, la gomma proveniente dalla fase di granulazione, viene pulita dalle diverse impurità presenti e successivamente divisa per granulometria. E' possibile ridurre ulteriormente la granulometria aggiungendo all'impianto alcuni mulini polverizzatori. Successivamente il materiale viene stoccato in differenti contenitori (big-bag) A questo punto il prodotto è pronto per essere riutilizzato nelle sue più diverse applicazioni.

1.6.4.6 Prodotti di triturazione

Dal processo di triturazione dei pneumatici a fine vita possono essere ricavate diverse materie prime "seconde" di diverse dimensioni: granulati di gomma, (cedibili ad aziende di primaria importanza nazionale per la produzione di energia), materiali metallici (di notevole pregio sia per qualità che per valore, direttamente conferiti alle acciaierie); materiali tessili (di scarsa rilevanza, sia quantitativa che di valore). I granulati di gomma possono essere di varie dimensioni, in particolare, si fa la distinzione tra polverino e grani. Il polverino di gomma ha un diametro massimo in genere inferiore al millimetro (figura 2-11) mentre i grani possono avere un diametro massimo di variabile fino all'ordine di qualche centimetro.



Figura 1.16 – Esempi di trituratore meccanico e nastri trasportatori



Figura 1.17 – Esempi di granulatore primario e di vaglio rotante



Figura 1.18 – Esempi di granulatore secondario, aspiratore e separatore magnetico

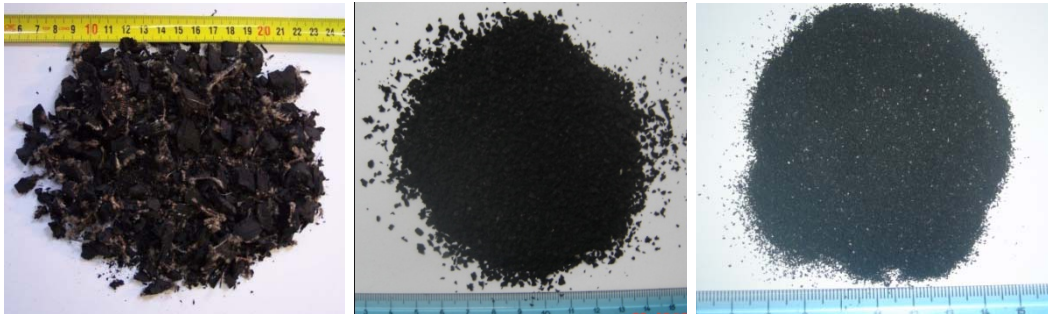


Figura 1.19 – Alcune frazioni granulometriche ottenibili dal processo di triturazione: grana grossa (0-5cm), grana fina (0-5mm), polverino (0-1mm)



Figura 1.20 – Tessili e fibra metallica ottenibile dal processo di triturazione meccanica

1.6.5 Processi criogenici

Nella triturazione criogenica la gomma viene raffreddata con azoto liquido, in modo che assuma una struttura cristallina fragile per essere macinata più finemente senza difficoltà. Tale processo consiste in tre fasi distinte:

- fase iniziale di triturazione meccanica grossolana di tipo convenzionale, in cui i pneumatici dismessi vengono sottoposti ad una triturazione meccanica grossolana di tipo convenzionale, che riduce le dimensioni dei singoli pezzi da trattare;
- fase intermedia di sbriciolamento criogenico, in cui il pezzame di gomma viene raffreddato con azoto liquido, in modo da assumere una struttura cristallina fragile che può essere macinata più finemente senza troppe difficoltà;
- fase finale di polverizzazione in un mulino a dischi o a martelli, in cui il prodotto della triturazione criogenica viene sottoposto ad un ulteriore processo di riduzione volumetrica.

Il materiale ottenuto presenta caratteristiche merceologiche superiori a quello derivante da triturazione meccanica, e, quindi, con sbocchi di mercato più ampi e prezzi di vendita più elevati¹⁸.

1.6.6 Processi elettrotermici

I metodi elettrotermici constano di tre fasi distinte, ovvero:

- Triturazione meccanica. Il pneumatico viene ridotto in pezzatura grossolana.
- Trattamento elettrotermico. I pneumatici in pezzi grossolani vengono introdotti in un forno verticale ad induzione elettromagnetica. La parte metallica del pneumatico, sottoposta al campo elettromagnetico, si riscalda rapidamente fino a temperature di circa 700 °C. A queste temperature la gomma carbonizza all'interfaccia ed il metallo si distacca dalla gomma. Nella parte bassa del forno, nella fase finale del procedimento, vengono raccolti separatamente il materiale metallico, la gomma inalterata e la gomma carbonizzata.
- Devulcanizzazione. Attraverso i processi di devulcanizzazione e rigenerazione, la gomma, preventivamente tritурata, viene riportata ad una struttura chimica vicina a quella dell'elastomero di partenza, in maniera tale da permetterne l'aggiunta alle normali mescole. La devulcanizzazione in genere è effettuata in autoclave mediante processi termochimici, sfruttando l'azione congiunta di temperatura, pressione ed additivi chimici.

1.6.7 La termodistruzione (combustione)

Questo processo prevede l'eliminazione dei pneumatici a fine vita attraverso un processo definito "termodistruzione", attraverso il quale si ha produzione di energia. Il pneumatico fuori uso, grazie al fatto che è composto per una percentuale superiore al 70 % da componenti polimerici, derivati quindi dal petrolio, ha un potere calorifico molto elevato, dell'ordine delle 6.000 kcal/kg, in grado di permettere una combustione senza necessità di sostenerla con l'apporto di energia esterna (il bruciatore a metano installato serve solo per portare il sistema in temperatura e per eventuali emergenze). Da qui è nata l'idea di un suo riutilizzo attraverso la termodistruzione, con recupero di energia termica e materie prime seconde (fili di acciaio, ossido di zinco, solfato di sodio). I primi tentativi sono avvenuti alla fine degli anni '70, e poi, attraverso successivi miglioramenti e implementazioni, si è arrivati alla configurazione impiantistica attuale, dove un modulo tipico è in grado di bruciare circa 2.000 kg/h di pneumatici fuori uso interi (15.000 ton/anno), producendo 3.300 kWh di energia elettrica (circa 24.000 MWh/anno). L'impianto di termodistruzione è composto da un sistema di caricamento automatico dei PFU interi, autovettura ed autocarro, che permette la loro introduzione nel combustore, costituito da un cilindro rotante di acciaio rivestito internamente di materiale refrattario. Dal forno i fumi, attraverso un condotto di postcombustione, entrano nella caldaia a recupero e qui avviene la produzione di vapore surriscaldato che è poi inviato alla turbina a condensazione dove, attraverso l'alternatore ad essa collegato, avviene la produzione di energia elettrica. Il vapore, una volta condensato e degasato, è inviato nuovamente in caldaia per ricominciare il ciclo. I fumi, invece, dopo aver ceduto il loro contenuto

¹⁸ <http://www.arch.unige.it/did/11/disegnoind/terzo0506/ecodesign/materialeddid/gomma.pdf>;

<http://gestione-rifiuti.it/smaltimento-pneumatici-riciclo>

entalpico all'interno della caldaia, sono inviati al sistema di filtrazione costituito da due gruppi di filtri a maniche: nel primo viene eseguito un trattamento di depolverazione da cui si ricavano ceneri ricche in ZnO (circa il 65%), mentre nel secondo gruppo di filtri, tramite reazione con bicarbonato di sodio, si effettua la desolforazione, quindi sono espulsi attraverso il camino. Questi trattamenti consentono di rispettare le più stringenti normative in fatto di emissioni nell'atmosfera. Da sottolineare che le emissioni sono tenute sotto osservazione dalla sala controllo con l'utilizzo di un sistema di monitoraggio in continuo collegato a sonde installate nel camino. A valle del forno esiste anche un sistema di nastri che permette l'estrazione e, attraverso l'utilizzo di un vibrovaglio, la pulizia dei fili di acciaio derivanti dalle carcasse. Tutto l'impianto è monitorato dalla sala controllo con l'utilizzo di un sistema di supervisione DCS, attraverso il quale si può agire sui macchinari che compongono il sistema. L'impianto si basa su alcune caratteristiche fondamentali che lo rendono del tutto particolare nell'ambito dei sistemi di termovalorizzazione¹⁹.

1.6.7.1 Co-combustione in forni industriali

Consiste nell'impiegare i pneumatici fuori uso come combustibile alternativo in forni industriali, come ad esempio nei cementifici. In questo modo si contribuisce al risparmio energetico, da un lato, e al recupero di materia dall'altro, in quanto i metalli ferrosi presenti nei pneumatici e gli inerti della miscela elastomerica vengono inglobati nei clinker di cemento. Tale tecnologia ha dimostrato la sua maturità nelle numerose applicazioni in Germania, dove vengono utilizzati nei cementifici circa il 40% dei pneumatici fuori uso e negli Stati Uniti.

1.6.7.2 Pirolisi

Consiste in una degradazione termica in atmosfera inerte, ottenuta mediante riscaldamento indiretto, in seguito alla quale i pneumatici subiscono un cracking termico a temperature sui 500/600 °C, scindendosi in una componente solida (char), una parte liquida (oli) ed una gassosa (syngas), in parte condensabile. Le percentuali delle tre frazioni dipendono dalla temperatura, dalla pressione e dal tempo di residenza del rifiuto nel reattore, nonché dalle temperature a cui viene operata la successiva fase di condensazione. La proporzione relativa tra i vari prodotti dipende dal modo in cui si realizza il processo e dai parametri di reazione. Sottoponendo i gas di pirolisi ad una fase di condensazione è possibile ottenere una frazione liquida (costituita in gran parte da idrocarburi) ed una frazione gassosa incondensabile (costituita essenzialmente da idrogeno, metano e monossido di carbonio) che può essere combusta contribuendo in tal modo all'economia di processo (che risulta maggiore qualora tutta la frazione gassosa uscente dal reattore venga combusta nel bruciatore). Il residuo carbonioso, quando le caratteristiche lo permettono, può essere riutilizzato direttamente come combustibile in luogo del carbone, o sottoposto ad ulteriore processo di gassificazione per la produzione di gas combustibile, ovvero destinato alla produzione di carboni attivi per depurazione acque reflue o fumi. (eco – design). Attraverso appositi centrali e sistemi produttivi si possono produrre i cosiddetti gas di sintesi, la tabella mostra alcuni dei dettagli in riferimento a cosa è possibile produrre attraverso le operazioni di pirolisi e gassificazione dei pneumatici.

¹⁹ G. Squarizoni: Recupero energetico - La termodistruzione di pneumatici fuori uso (PFU), Rapporto Argo 2001 - Indagine sul riciclo dei Pneumatici Usati, p. 44;

L'impianto di gassificazione si compone di un reattore verticale, alimentato dall'alto, in cui possono individuarsi tre zone:

- zona superiore di essiccamento (400 °C);
- zona mediana di pirolisi (750 °C);
- zona inferiore di combustione primaria e fusione (1400 °C).

I vantaggi principali di un impianto di gassificazione sono rappresentati dal modesto ingombro e dal bassissimo impatto ambientale che esso induce in quanto le emissioni in atmosfera sono estremamente ridotte e le scorie sono vetrificate²⁰.

1.6.8 Recupero energetico

Nei paragrafi successivi, molto brevemente, sono stati riportati alcuni approfondimenti circa le tipologie di recupero energetico possibile mediante l'utilizzo dei PFU.

1.6.8.1 Industrie dei cementi e produzione di fuliggine

L'adeguamento normativo del nostro Paese alle direttive dell'Unione Europea comincia a produrre i primi effetti anche nel settore energetico coinvolgendo in maniera interessante alcuni comparti dell'industria. In particolare, anche in Italia è ora consentito l'utilizzo dei pneumatici fuori uso ad elevato contenuto energetico come combustibili non convenzionali nei forni da cemento. I pneumatici al termine del proprio ciclo di vita grazie ad un potere calorifico di circa 7.500Kcal/kg, costituiscono un'ottima risorsa energetica. Questa rappresenta la forma di recupero di pneumatici usati, in termini quantitativi, più rilevante. Attraverso opportuni pretrattamenti del pneumatico fuori uso è possibile ottenere vantaggi di tipo tecnico – ambientale – economico. L'utilizzo in cementeria ne comporta alcuni, i principali sono:

- miglioramento delle emissioni (SO₂ in particolare);
- risparmio sui costi del combustibile;
- riduzione delle attività di estrazione del carbone e altre fonti non rinnovabili;
- riduzione dei rifiuti inviati a discarica.

Sotto questo aspetto possono nascere due tipi di problematiche in funzione della tipologia del forno:

- scelta della pezzatura del pneumatico triturato;
- punto di immissione nell'impianto del combustibile pneumatico.

Questi aspetti possono essere ottimizzati da un'analisi di compromesso tra costi e tecnologia. Durante il processo produttivo del cemento, il riutilizzo dei pneumatici fuori uso può avvenire in diversi punti di alimentazione, ma sempre nella linea di cottura del clinker dove vengono raggiunte e mantenute per diversi secondi temperature tra 1000 e 2000 ° C:

- al bruciatore principale del forno, con utilizzo in forma di gomma polverizzata;
- al bruciatore ausiliario del forno, posto tra il forno rotante ed il sistema di preriscaldamento del materiale in alimentazione, in apposita camera di combustione dove si impiegano pneumatici triturati con pezzatura di 50 - 100 mm;
- al bruciatore ausiliario o in un punto intermedio del forno, alimentato con pneumatici interi.

²⁰ <http://www.dinoi.it/press/pubblicazioni/ArticoloPneumatici.pdf>

Ne consegue che:

- si realizza un recupero totale dell'energia, in quanto l'energia termica fornita dal combustibile non convenzionale sostituisce quella risparmiata in combustibili convenzionali;
- il riutilizzo nei forni da cemento non dà luogo alla formazione di residui solidi, scorie o liquidi (in quanto le ceneri di combustione vengono inglobate nel clinker) e ai problemi relativi al loro smaltimento con cui i forni convenzionali devono fare i conti.

L'utilizzo di combustibile non convenzionale non modifica le caratteristiche chimico – fisiche del clinker prodotto dal processo di cottura. Gli effetti ambientali sono significativi:

- non si prospettano rischi di inquinamento del suolo e delle acque, in quanto il riutilizzo avviene senza la produzione di residui solidi né liquidi;
- i forni sono dotati di impianti di abbattimento delle polveri sospese nei gas emessi, la concentrazione di ossidi di zolfo nelle emissioni viene ridotta grazie alle caratteristiche chimico-fisiche del processo, in cui la SO₂ viene quasi completamente fissata nel clinker;
- si verifica una riduzione del tenore di ossidi di zolfo nei gas emessi grazie al minor contenuto dello zolfo nei pneumatici rispetto al combustibile tradizionale (2% contro 5%);
- si consente la distruzione totale di tutti i composti organici – date le elevate temperature ed i tempi di permanenza - e non si registrano aumenti significativi dei metalli emessi²¹.

In altre industrie il processo viene sfruttato per la produzione di fuliggine (carbon black), questo procedimento sottopone i pneumatici usati a una pirolisi controllata (500°C). Oltre al carbon black vengono prodotti idrocarburi, gas combustibile e rottami d'acciaio. Il carbon black è utilizzato per la fabbricazione di gomma, colori, toner e materie plastiche. La quantità di metalli pesanti contenuta nella fuliggine dipende dalla preparazione.

1.6.8.2 Produzione di energia elettrica

Alcune centrali elettriche sono progettate per bruciare PFU con lo scopo di minimizzare i costi del carburante. La tecnologia è consolidata. Durante la combustione, i pneumatici sono riposti su una grata a letto fluido. Questa tipologia di impianto favorisce il flusso dell'aria sia sopra che sotto ai pneumatici aiutando la combustione e il raffreddamento della griglia. La griglia inoltre permette alle scorie e alla cenere di passare al sottostante sistema di trasporto che li invia ai silos per la successiva collocazione. Un sistema di bloccaggio per i metalli separa la parte acciaiosa dai pneumatici bruciati. Ogni forno possiede la relativa caldaia. La caldaia produce vapore che comanda una turbina con generatore.

1.6.8.3 Produzione di vapore

L'incenerimento avviene all'interno di apposite caldaie, nelle quali è fatta passare, attraverso opportune condutture, l'acqua con conseguente produzione di vapore. Questo è principalmente usato nelle industrie dei pneumatici e della ricostruzione, infatti, esso è indispensabile per il processo di vulcanizzazione. Tale impianto è, infatti, solitamente abbinato ad un processo per la realizzazione di pneumatici nuovi o ricostruiti.

²¹ G. Girelli Carasi, *Recupero energetico - La combustione in cementerai*, Rapporto Argo 2001 - Indagine sul riciclo dei Pneumatici Usati, pp. 47-48

1.6.8.4 Inceneritori di rifiuti

L'incenerimento di pneumatici vettura in piccole quantità unitamente a rifiuti domestici è comunemente praticato. Il funzionamento del forno non ha effetti negativi tenendo conto dell'inserimento di pneumatici in percentuale non superiore al 10% in peso. In sostanza, i PFU aiutano a colmare lo svantaggio nella produzione di calore quando si abbassa il potere calorifico dei rifiuti domestici. Quando il potere calorifico è più alto della media i PFU non dovrebbero essere aggiunti fino a che la temperatura del forno è a livelli superiori alla normalità.

1.7 Analisi della quantità di pneumatici immessi nel mercato: la situazione italiana

1.7.1 Stima del quantitativo di pneumatici usati prodotti

Per la situazione italiana, si ritiene plausibile che non ci siano state grosse variazioni dall'anno 2000. E' possibile citare un'analisi di varie metodologie di calcolo, che possono gettare nuova luce sulle quantità sinora espresse, e quindi metterebbero in evidenza delle variazioni, anche significative. Le difficoltà per la valutazione del quantitativo di PFU nascono dalla constatazione che non esiste al momento nella nostra nazione un unico ente preposto al monitoraggio completo di tutti i flussi (alquanto complessi) dell'intera filiera, in considerazione del flusso a cui un pneumatico nel suo ciclo di vita è sottoposto. E' possibile utilizzare vari metodi per la stima di questi quantitativi. Tra i principali è possibile citarne almeno tre: Metodo diretto, Metodo Etra e Metodo dei Minimi quadrati.

1.7.2 Metodo diretto

La metodologia seguita in questa valutazione ha come base di partenza i dati provenienti da FEDERPNEUS (Federazione Rivenditori Pneumatici) e AIRP (Associazione Italiana Ricostruttori Pneumatici) sul mercato del ricambio con pneumatici nuovi o ricostruiti, in funzione delle categorie dell'autoveicolo. Il procedimento può essere schematizzato attraverso il seguente diagramma di flusso.

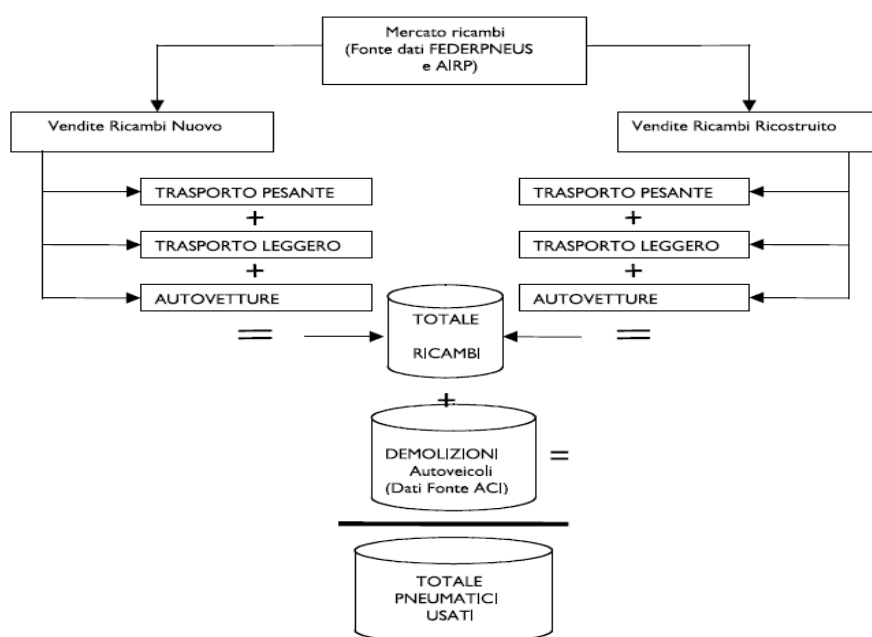


Figura 1.21 – Schematizzazione del Metodo diretto

Qualitativamente dall'applicazione del metodo risulta quanto riportato in tabella 1.4. Questa prima valutazione seppur significativa, potrebbe essere ulteriormente approfondita in quanto sono stati trascurati gli effetti indotti dalla immissione netta di nuovi pneumatici (import meno export) sia in forma diretta che attraverso la vendita di autoveicoli nuovi ed usati ed inoltre dal quantitativo di tutti quegli autoveicoli che non sono soggetti ad immatricolazione.

VENDITA RICAMBI NUOVO			
Categoria	Peso Medio Pneumatico (kg)	N _i di pneumatici sostituiti	Quantit (Tonnellate)
Trasporto Pesante	60	1.350.000	81.000
Trasporto Leggero	20	1.650.000	33.000
Autovetture	8	19.650.000	157.200
		Totale (A)	271.200

VENDITA RICAMBI RICOSTRUITO			
Categoria	Peso Medio Pneumatico (kg)	N _i di pneumatici sostituiti	Quantit (Tonnellate)
Trasporto Pesante	60	850.000	51.000
Trasporto Leggero	20	350.000	7.000
Autovetture	8	550.000	4.400
		Totale (B)	62.400

DEMOLIZIONI			
Categoria	Peso Medio Pneumatici per ogni Autoveicolo (kg)	N _i di Autoveicoli Demoliti	Quantit (Tonnellate)
Trasporto Pesante e Leggero	300	104.666	31.400
Autovetture	35	1.823.466	63.821
Motocicli	6	96.866	581
		Totale (C)	95.802
TOTALE DI PNEUMATICI USATI A+B+C			429.402

Tabella 1.4 – Quantitativi di PFU stimati con Metodo Diretto

1.7.3 Metodo ETRA

Questo metodo parte dalla considerazione che il quantitativo di pneumatici usati è funzione del parco circolante, sulla base del numero medio annuo di pneumatici che vengono sostituiti su un autoveicolo; in base alle osservazioni e ricerche condotte da ETRA nei vari paesi, per le diverse tipologie di autoveicoli, è stato possibile stabilire il seguente parametro pari a:

Trasporto Pesante	3 gomme/anno
Trasporto Leggero	1 gomma/anno
Autovetture	1 gomma/anno
Motocicli	1 gomma/anno

La consistenza del parco circolante (Fonte ACI), per le sopra citate categorie ammonta a:

Trasporto Pesante	1.400.000
Trasporto Leggero	955.593
Autovettura	35.012.402
Motocicli	3.375.782

Il peso medio del singolo pneumatico, sempre per le stesse categorie è:

Trasporto Pesante	60 kg
Trasporto Leggero	30 kg
Autovettura	7 kg
Motocicli	3 kg

METODO ETRA				
Categoria	Peso Medio Pneumatico (kg)	N°pneumatici /anno	Parco Circolante	Totale PU (tonnellate)
Trasporto Pesante - Camion	60	3	1.400.000	252.000
Trasporto Leggero	30	1	955.593	28.668
Autovetture	7	1	35.012.402	245.087
Motocicli	3	1	3.375.782	10.127
			TOTALE	535.882

Tabella 1.5 – Quantitativi di PFU stimati con il Metodo ETRA

1.7.4 Metodo dei minimi quadrati

Si è preso in considerazione la serie dei dati relativi al parco circolante nei paesi europei (Fonte – ACI) e di ognuna si è considerato la quantità di produzione dei pneumatici usati (Fonte ETRA). Con il metodo dei minimi quadrati si è ottenuta una funzione che stimi la produzione di PU a partire dal parco circolante. Per l'Italia la produzione stimata dei PFU è risultata di circa 442.823 tonnellate. In questo caso il dato è stimato secondo una funzione di regressione di tipo esponenziale. Per una stima più dettagliata, si potrebbe “correggere” il dato utilizzando una serie di coefficienti che portino in conto le diverse situazioni di ogni paese. La quantità dichiarata dai produttori di pneumatici nel 2000 è di 330.000 tonnellate (Fonte Eco.Pne.Us. (Consorzio per il riutilizzo e lo smaltimento dei pneumatici usati)); considerando le difficoltà e le possibili quantità di pneumatici che non vengono monitorate nei tre metodi (ad esempio, autoveicoli non immatricolati, macchinari agricoli, muletti, pale meccaniche, ecc.), è opportuno ritenere che il vero valore possa essere compreso tra le 330.000 e le 535.000 tonnellate circa stimate. Questa supposizione è tuttavia confortata da un'altra valutazione di immediata e semplice comprensione. Se si vanno a leggere e confrontare i dati relativi al parco circolante nel 1991 e nel 2000 (Fonte ACI), ed le quantità dei pneumatici usati (Fonte Istituto per l'Ambiente – Ecopneus) rilevati rispettivamente nel 1991 e nel 2000, non ci si spiega (a meno di non considerare il dato sottostimato) come a fronte di un aumento dei veicoli circolanti pari al 17%, relativamente al periodo 1991-2000, i produttori non registrino nessun aumento di pneumatici usati, ma al contrario addirittura una riduzione dello 0,3%. È, quindi, ragionevole concludere che l'effettiva quantità di pneumatici usati, risente di innumerevoli fattori, diversamente influenti a seconda del metodo di calcolo prescelto. Sarebbe auspicabile che i vari soggetti della filiera prendano spunto dalle riflessioni fatte, per addivenire ad un sistema di calcolo il più possibile oggettivo ed efficace. Nel frattempo dovremo accontentarci dei valori riassunti nella tabella 1.6.

	Quantit Stimata (tonnellate)
Metodo Diretto	429.401
Metodo Etra	535.882
Metodo Minimi Quadrati	442.823
Produttori	330.000
Media Aritmetica	434.527

Tabella 1.6 – quantitativi di PFU stimati con i diversi metodi

1.7.5 Quantitativi dei PFU e loro destinazioni

Partendo dalla stima dei quantitativi dei pneumatici usati (PU) fatta nel paragrafo precedente, ed analizzando i dati raccolti dagli operatori del settore, è possibile

quantificare le quantità di pneumatici fuori uso trattate ed avviate al recupero. A tal fine giova ricordare la distinzione tra PU e PFU: il PU è un prodotto che, tramite ricostruzione, può essere riutilizzato per un uso tal quale, mentre il PFU è il rifiuto di un prodotto che è pervenuto alla fine del suo ciclo di vita e, quindi, idoneo ad essere trattato per un recupero energetico o di materia prima secondaria. Detto questo, il quantitativo di PU preso come base di calcolo, stante le considerazioni fatte nel paragrafo precedente, può essere assunto pari a 434.527 tonnellate. Partendo da questo valore la quantità di PFU può essere ricavata per mezzo della seguente formula:

$$\text{Pneumatici Usati} - \text{Ricostruzione} - \text{Export} = \text{Totale Pneumatici Fuori Uso (PFU)}$$

Precisiamo che il quantitativo di pneumatici ricostruiti è noto (Fonte AIRP), mentre più difficoltosa risulta la stima dell'export, in quanto influenzata da una serie di fattori e comportamenti visualizzati nel "Ciclo di vita del Pneumatico". Si ritiene corretto, in assenza di maggiori informazioni, assumere prudenzialmente tale valore per il 2001 in una percentuale del 2% dei PU. Il conteggio porta al seguente risultato:

$$\text{Pneumatici Usati (434.526)} - \text{Ricostruzione (62.400)} - \text{Export (7.000)} = \text{Totale PFU (365.126)}$$

L'analisi fin qui svolta è riferita agli anni 2000-2001. Nel 2004, riferiti all'anno 2003, è stata effettuata dal Consorzio ARGO una ulteriore indagine in cui è emerso un sostanziale non cambiamento della situazione che è rimasta pressoché stabile. In figura 1.22 è riportato l'andamento del settore dei PFU dal 1992 al 2003.

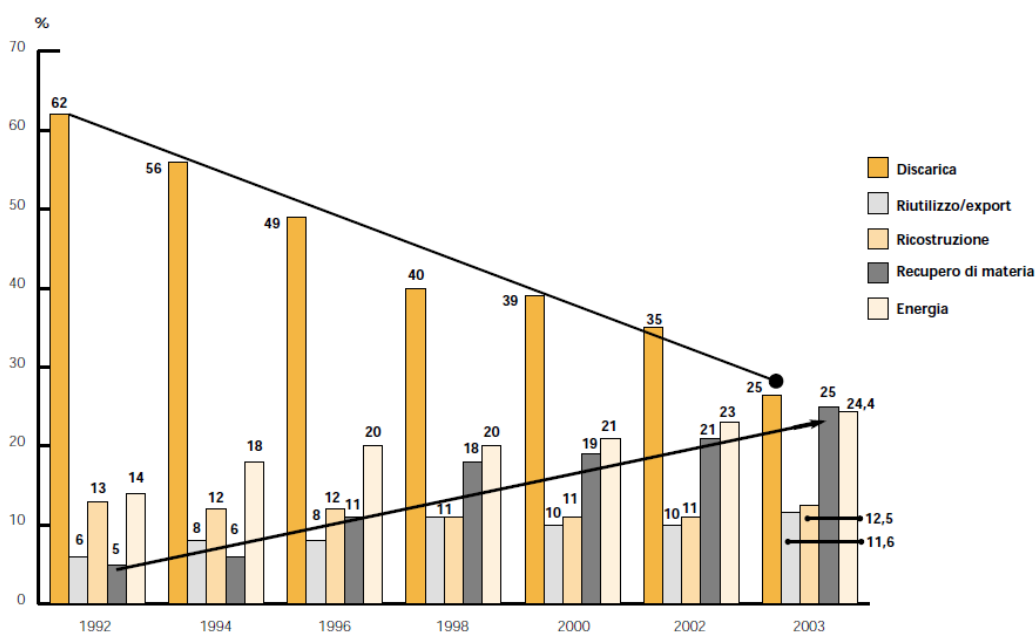


Figura 1.22 – Andamento del settore dei PFU dal 1992 al 2003 (Fonte ETRA)

Dall'analisi sullo stato del recupero dei pneumatici in Europa, si evince che il nostro Paese mantiene il primato di Stato che conferisce la maggiore percentuale (sul totale dei PFU) in discarica. Mentre, in Europa generalmente si osservano sviluppi interessanti in tema di recupero e smaltimento dei pneumatici (minor quantità di PFU in discarica, aumento del quantitativo destinato al recupero energetico ed alla valorizzazione della materia prima), la situazione italiana appare come bloccata, complici un quadro giuridico a volte inadeguato al reale sviluppo del mercato (come nel caso del DM 5 febbraio 1998, che regola il

recupero dei rifiuti e l'utilizzo di materie prime da essi ottenuto, norma che necessita di un aggiornamento tecnico), l'insufficienza dei controlli e l'assenza di un coordinamento della filiera.

Stati Membri	PFU
Austria	50.000
Belgio	72.000
Danimarca	40.867
Finlandia(2)	42.200
Francia	390.000
Germania	600.000
Grecia	50.000
Irlanda	32.000
Italia	388.389
Lussemburgo	5.452
Olanda	67.500
Portogallo	50.000
Spagna	301.000
Svezia	64.000
Regno Unito	450.000
Totale	2.603.408

Figura 1.23 – PFU in Europa (anno 2003)

Va osservato, inoltre, che le crescenti esigenze di salvaguardia dell'ambiente e conseguentemente di rigore normativo, rendono il processo di trattamento e gestione dei PFU sempre più onerosi. Dal confronto dei dati nazionali con quelli europei e dall'analisi che ne consegue emergono le seguenti considerazioni:

- quota destinata al recupero energetico (27%) in linea con la media europea: la quota di recupero energetico è sostanzialmente equivalente. In Italia, tuttavia, ci potrebbero essere spazi tecnici di incremento purché si creino le necessarie condizioni di consenso da parte delle popolazioni e delle amministrazioni locali;
- quota di export (2%) inferiore alla media europea: la quota di export non è facilmente incrementabile, in quanto in Italia, sia per condizioni climatiche, sia per questioni di costume, i pneumatici vengono sostituiti quando sono in condizioni di usura molto più accentuati che in Europa, e quindi non più utilizzabili nei paesi di normale destinazione dell'export, dove viene sfruttata la rimanente capacità di percorrenza del battistrada residuo. Questa differenza tra Europa del Nord ed Europa del Sud riflette la differenza che esiste tra il Nord Italia ed il Sud Italia per quanto riguarda il settore ricambi. Infatti si passa da un tasso di sostituzione di 73 pneumatici al Nord contro i 47 del Sud. Le motivazioni di questa sensibile differenza possono essere ricercati: nella diversa economia (possibilità inferiore di sostituzione dei pneumatici in quanto il reddito pro-capite è notevolmente minore al Sud) e nelle diverse condizioni climatiche (nel Nord si ha un ricambio maggiore per l'utilizzo dei pneumatici da neve e per le avverse condizioni climatiche che vengono a stabilirsi durante il periodo invernale);
- quota di recupero di materia inferiore alla media europea (il nostro 6% contro il 25% circa in UE);

- quota destinata alla discarica ancora troppo elevata rispetto alla media europea (47,5% in Italia contro il 25% circa in UE);
- quota destinata alla ricostruzione (12,9%) in linea con la media europea: la ricostruzione, così come nel mercato europeo, si attesta su valori costanti. Nel 2002 la ricostruzione dei pneumatici ha consentito all'Italia di risparmiare 167 milioni di litri di petrolio, di evitare l'immissione nell'ambiente di 50.700 tonnellate di pneumatici, potenzialmente fuori uso e quindi rifiuto, di risparmiare 47.700 tonnellate di materia prima (Fonte AIRP - Associazione Italiana Ricostruttori Pneumatici).

In sintesi il mercato del pneumatico si conferma come sostanzialmente stabile tranne che per delle variazioni fisiologiche della filiera. Tuttavia, considerata l'elevata potenzialità di riciclo che caratterizza il rifiuto pneumatico, il sistema risulta appesantito da molti problemi e necessita di essere stimolato sia con politiche adeguate da parte delle istituzioni, sia con interventi e iniziative per le creazioni di sbocchi opportuni ai materiali ottenuti dal riciclaggio dei pneumatici. Nel 2004, in Italia è stato venduto per ogni auto circolante 1/2 di pneumatico di ricambio (nuovo più ricostruito), come emerge dal rapporto tra parco circolante (fonte ACI – circa 44 milioni) e vendita del ricambio (fonte AIRP – circa 27 milioni). Dati più recenti indicano ogni anno in Europa circa 1,3 miliardi di tonnellate: secondo le stime della Commissione europea, una parte significativa riguarda il settore dei pneumatici. Secondo dati forniti da ETRMA (European Tyre & Rubber Manufacturer's Association) in Europa, nel solo 2008, sono stati smontati dai veicoli 3,3 milioni di tonnellate di pneumatici: di questi circa il 20% è tornato al reimpiego come pneumatico (ricostruzione e riutilizzo), il 39% è andato a recupero di materiale, il 32% a recupero di energia determinando così un recupero totale del 91%. Per quanto riguarda la situazione italiana, secondo stime di Ecopneus (società consortile per il rintracciamento, la raccolta, il trattamento e la destinazione finale dei PFU) nel nostro Paese ogni anno vengono venduti in Italia oltre 30 milioni di pneumatici per autovettura, 2 milioni per autocarro, 3 milioni per mezzi a 2 ruote e 200.000 per mezzi industriali ed agricoli, cui corrisponde, in linea di massima, l'uscita dall'uso di altrettante quantità di pneumatici usati. Ogni anno sono circa 350.000 le tonnellate di PFU prodotte nel nostro Paese; non esistono statistiche ufficiali, tale dato (stima Ecopneus) deriva dalla convergenza di diverse fonti legate al settore, che lo convalidano come riferimento affidabile per dimensionare il fenomeno. Di questa quantità, nel 2009 circa la metà è stato destinato al recupero energetico; circa il 20% recuperato come materia prima seconda per utilizzi urbani ed industriali (dato pari alla metà della media Europea); la quota restante (circa il 25%) si è dispersa in traffici, pratiche illegali o comunque fuori controllo. Fino ad oggi l'assenza di sistema integrato di gestione a livello nazionale ha generato una situazione caratterizzata dalle seguenti criticità:

- mancato controllo sui flussi globali di questo materiale attraverso tutti i passaggi della filiera, situazione che non permette oggi di avere una chiara visione complessiva di questa realtà;
- insufficiente utilizzo dei PFU e dei suoi derivati;
- assenza di una ottimizzazione tra le varie componenti del sistema (raccolta, trasporto, recupero e impiego).

Tra le ultime novità normative nel settore, per cercare di contribuire al problema del recupero dei "pneumatici fuori uso" (PFU) avviandoli ad un miglior recupero e raccogliendo le esigenze espresse dai produttori, dagli utilizzatori dei materiali

ricavati dai pneumatici e da altri soggetti interessati, in sede europea è stato messo a punto un documento normativo che definisce le metodiche per determinare le caratteristiche di tali materiali, sotto il coordinamento dell'UNI. Si tratta della specifica tecnica CEN/TS 14243 "Materiali prodotti da pneumatici fuori uso - Specifiche delle categorie basate sulle loro dimensioni e impurità, e metodi per la determinazione delle loro dimensioni e impurità" che sarà a breve pubblicata come specifica tecnica UNI e la cui applicazione, oltre a contribuire ad un miglior recupero di questi materiali, potrà avere un impatto positivo sull'ambiente e sulla collettività con conseguenti vantaggi sia di tipo economico sia ambientale. Il documento, oltre ad offrire una chiara definizione dei materiali ottenibili dalla frantumazione dei PFU fornisce metodi per misurare varie impurità e, quindi, caratterizzare la qualità dei materiali ottenuti. Le principali categorie di materiali derivanti da pneumatici fuori uso sono definite sulla base delle loro dimensioni: i materiali che vengono ottenuti durante i differenti stadi del processo di trattamento dei PFU sono, come ampiamente detto, sostanzialmente granulati, polverini e ciabattati (ma anche cippato, acciaio e tessile) e vengono utilizzati soprattutto nelle attività di recupero in mescole, recupero nella produzione di bitumi e recupero nella produzione di parabordi, ma non solo. Si tratta, infatti, di prodotti che possono essere utilizzati con grande vantaggio in moltissimi impieghi: come base per i campi da calcio in erba sintetica, come superfici dei campi sportivi e dei parchi gioco, nella realizzazione dei manti stradali e dei pannelli insonorizzanti, dai cementifici, dalle acciaierie²².

1.8 Impieghi principali dei PFU

Dal riciclaggio di pneumatici a fine vita possono essere prodotti svariatissime tipologie di manufatti in gomma. La definizione esatta di tali manufatti è quella di ecoprodotti. Quello che definisce e distingue un eco-prodotto è la sua storia. Un prodotto è ecologico quando il suo ciclo di vita è caratterizzato dal rispetto per le risorse umane e ambientali. I campi di applicazione possono essere tanti, ma indubbiamente, come già espresso in precedenza, la prima tappa per la valorizzazione del pneumatico usato è la ricostruzione. Essa consente, infatti, un considerevole risparmio per l'utente, agevolando un'ulteriore durabilità praticamente simile al primo ciclo di vita. Il pneumatico nuovo contiene circa 4,8 kg di gomma mista. Le applicazioni che seguono sono tra le più interessanti riscontrate nei paesi della Comunità Europea. E' doveroso premettere però che, mentre il recupero energetico dei pneumatici, e in particolare quello effettuato nelle industrie cementiere, ha dimostrato di saper conseguire risultati eccellenti, il recupero dei pneumatici a fine vita, mediante il reimpiego dei propri composti, in altri processi produttivi stenta a decollare, perché risente fortemente degli elevati costi di lavorazione necessari, comuni ai processi di trattamento di rifiuti ad elevato contenuto di acciaio.

1.8.1 Pavimentazioni antitrauma

Nascono dalla necessità di ridurre gli incidenti ed i problemi legati alla sicurezza negli spazi interni ed esterni. Testimonianza è il numero crescente di installazioni di pavimenti di questo tipo e l'attenzione nella messa in sicurezza di aree di intrattenimento, specialmente per i bambini, come i parchi giochi. Le norme EN 1176-77 sulle attrezzature ludiche obbligano all'inserimento nelle aree gioco di

²² <http://www.sicurambiente.it/utente/news/ambiente/2010/0192105.htm>;

http://www.ecopneus.it/zone/pagina.php?ID_pgn=40&ctg1=In%20evidenza&ctg2=Nessuna

pavimentazioni antitrauma che riducano il rischio di cadute ed il loro effetto, migliorando di conseguenza la sicurezza dei bambini che ne usufruiscono. Vengono così prodotti sempre più spesso pavimenti in gomma antitrauma o antishock usati soprattutto quando si vuole utilizzare le aree esterne ed interne pavimentate di asili e scuole materne in totale sicurezza. La pavimentazione esterna o interna antitrauma risulta, quindi, un efficace strumento per la prevenzione di incidenti, perché attutisce in modo determinante l'energia di impatto al suolo in seguito a caduta e annulla completamente il rischio di scivolamento. La pavimentazione antitrauma realizzata in granuli e polverino di gomma riciclata da pneumatici usati è impiegata sia in ambienti interni come asili e palestre che in ambienti esterni come piscine, piste ciclabili ed impianti sportivi. La superficie superiore può essere liscia o leggermente improntata. Mattoni di sicurezza realizzati in granuli e polverino di gomma riciclata da pneumatici usati. Vengono impiegati per pavimentazioni temporanee poiché la loro morfologia garantisce resistenza stabilità anche in assenza di incollaggio sul piano d'appoggio. Nelle caratteristiche tecniche dichiarate dalle varie aziende produttrici si rileva per questi tipi di pavimentazione:

- l'elevata capacità di assorbimento degli urti;
- l'effetto antishock, antisdrucchiolo e antiscorrimento;
- azione drenante;
- resistenza agli agenti atmosferici e all'usura;
- inattaccabilità da muffe e microrganismi.

Altre informazioni utili, riguardano:

- la facilità di applicazione e l'assenza di alcun tipo di manutenzione;
- riciclabilità al 100%.

1.8.2 Pannelli fono e termo-isolanti

Sempre di più la vita moderna porta all'utilizzo di strumenti o macchinari che aumentano il rumore e generano inquinamento acustico. Suoni di ogni genere penetrano e si propagano nei fabbricati attraverso le strutture ed aperture generando fastidio; i sistemi costruttivi moderni prevedono un largo impiego di strutture leggere quali il ferro ed il cemento armato, propagatori di vibrazioni e rumori. Questi, legati alla sensibile riduzione dimensionale degli ambienti abitativi e agli spessori delle pareti, amplificano la necessità di isolare acusticamente le zone in cui si vive, garantendo il necessario comfort abitativo. Se si associa tale tipo di esigenza, a quella di rispondere ai problemi legati al reimpiego di materiale riciclato, si possono utilizzare:

- Pannelli monostrato, in granuli di gomma SBR (stirenebutadiene), con funzione fonoimpedente per la correzione acustica di partizioni murarie e murature esterne esistenti e/o di nuova concezione. Questi consentono la correzione acustica tra unità abitative adiacenti, garantendo un buon effetto fonoimpedente sulle basse e medie frequenze e migliorando, di conseguenza, l'isolamento acustico percepito per via aerea, grazie all'elevata massa specifica. Tali pannelli sono composti da soli granuli di gomma SBR ad alta densità ed a granulometria controllata, legati a freddo con resine sintetiche poliuretaniche, in modo da garantire un'elevata elasticità permanente nel tempo. Sono specialmente indicati in caso di partizioni leggere (cartongesso o laterizio sottile) quale elemento smorzante per il disaccoppiamento di successive contropareti. Possono essere applicati sia in intercapedine classica (realizzata con doppio

laterizio), al fine di ridurre le frequenze di risonanza ed aumentare il potere fonoisolante, sia direttamente sulla struttura a finire. Sono idonei all'utilizzo in strutture in calcestruzzo armato (vani ascensore, rampe di scale, travi a vista) come correttore acustico e antivibrante, garantendo un ottimo miglioramento del confort acustico. Le caratteristiche fisiche di questi tipi di pannelli, totalmente provenienti da materiale riciclato, garantiscono elasticità permanente al prodotto (anche in caso di esposizione agli agenti atmosferici) e lo rendono idoneo anche all'utilizzo in ambienti aggressivi.

- Pannelli fonoisolanti e antivibranti per solai. Sono composti da granuli di gomma riciclata da pneumatico (SBR) ad alta densità, resistenti a basse e ad alte temperature. Tali manufatti presentano un'ottima resistenza meccanica, termica, chimica, all'umidità, agli oli, ed un'ottima stabilità dimensionale. Sono, inoltre imputrescibili e non pulverulenti. Rappresentano eccellenti antivibranti e fonoisolanti, da utilizzare come sottomassetti nei pavimenti. Adatti all'edilizia abitativa commerciale ed industriale. Alcuni esempi sono: isolante acustico per pavimento composto da fibre, granuli di gomma SBR e perle di EPS incollati a caldo con lattice speciale su feltro bitumato fornito con cimosa laterale per facilitarne la posa evitando i ponti acustici e mantenendo un pavimento planare senza sormonti; fascia isolante composta da fibre e granuli di gomma SBR legati a freddo con resine poliuretatiche. Vengono utilizzate sotto parete per la riduzione delle vibrazioni e lungo tutto il perimetro dei locali per un'altezza non inferiore al livello di posa del pavimento finito; isolante acustico per pavimenti composto da granuli di sughero e granuli di gomma SBR incollati a freddo con resine poliuretatiche. Il prodotto è ideale per applicazioni dirette sotto pavimenti in legno, linoleum e moquette.

1.8.3 Pavimentazioni

Tutta una gamma di nuove pavimentazioni si è sviluppata a partire dalla granulazione del pneumatico. Facili da installare, antiscivolo, elastici, resistenti all'acqua, alla muffa ed alle tracce di umidità, questi materiali per le pavimentazioni sono impiegati nelle piscine, nelle aree giardini e in numerose altre applicazioni pubbliche e private. Disponibili in molteplici colori e forme, sono un'alternativa interessante al cemento e ad altri materiali rigidi. Spesso possono essere installati direttamente sul suolo senza costosi lavori preparatori.

1.8.4 Superfici drenanti

Recentemente è aumentata la quota di granulo di gomma proveniente dalla granulazione del pneumatico destinata alle superfici sportive, come quelle dei campi di calcio e calcetto, grazie alle sue proprietà drenanti, che impediscono all'acqua di stagnare, rendendo il campo praticabile.

1.8.5 Suoli sportivi

Le pavimentazioni sulle aree dedicate alle attività ginniche e sportive in generale, sono spesso realizzate con l'impiego di granuli di gomma provenienti dal riciclaggio dei pneumatici a fine vita. Sono facili da installare, poco costose e offrono ai fruitori il vantaggio di ridurre il rischio di ferite conseguenti alle cadute. In più, permettono una diminuzione dell'inquinamento sonoro generato dalla presenza degli spettatori.

1.8.6 Aree di gioco

Molteplici aree di gioco contengono materiali riciclati dalla gomma dei pneumatici, garantendo sicurezza ed un basso costo di manutenzione. La loro collocazione è consigliabile, ad esempio, sotto altalene e scivoli, dove attutiscono le cadute.

1.8.7 Parti di auto

Quantità considerabili di gomma da pneumatico riciclata, sono impiegati nella fabbricazione di nuovi veicoli. Il principio consiste nel mescolare granuli di gomma con altri prodotti, per la fabbricazione di componenti quali, ad esempio, freni, volantini, flessibili, rivestimenti interni, tappeti, cinture di sicurezza, sistemi di areazione.

1.8.8 Ruote

Fasce e ruote piene, a base di granulo di gomma, vengono frequentemente impiegate in articoli mobili come valigie, pattini, carriole, passeggini ed altri accessori. Le ruote, così composte, dimostrano di avere una lunga durata.

1.8.9 Calzature

Le industrie calzaturiere utilizzano, da anni, quantità considerabili di gomma proveniente dal riciclaggio dei pneumatici. In particolare, si evidenzia l'impiego nelle calzature sportive che permette la compensazione degli shock, la diminuzione della fatica ed il miglioramento del confort.

1.8.10 Rivestimenti interni

La gomma riciclata è utilizzata, storicamente, nella fabbricazione di pannelli, moquette rinforzata e zerbini. Numerosi complessi commerciali ed industriali utilizzano rivestimenti a base di questa gomma riciclata, per le sue molteplici proprietà: assorbimento del rumore, flessibilità, impermeabilità, resistenza ai solventi, acidi e oli, durabilità. Nuove applicazioni includono le zone pedonali e le sale d'aspetto in aeroporto.

1.8.11 Materiali per tetti

Numerosi prodotti per tetti sono fabbricati da tempo con l'impiego di gomma riciclata e manifestano una buona resistenza alla variazione della temperatura, all'umidità, alla muffa e non risentono degli effetti negativi dei raggi ultravioletti prodotti dal sole.

1.8.12 Segnaletica ed accessori stradali

Gli accessori stradali come dossi di rallentamento, paletti per limitare la circolazione e la sosta, segnaletica sono realizzati con gomma riciclata dai pneumatici, in quanto riducono i danni dovuti in caso di urto.

1.8.13 Condotte idriche drenanti

Le condotte idriche drenanti fabbricate con granuli di gomma, sono impiegate nella realizzazione delle aree verdi, di complessi commerciali e residenziali, in quanto risultano facili da mantenere, resistenti all'umidità e alla muffa, stabili e durature.

1.8.14 Asfalti

Mescolati nell'asfalto, i granuli di gomma provenienti dai pneumatici usati, conferiscono una maggiore porosità che permette il drenaggio dalla superficie dell'acqua piovana, riducendo i ristagni d'acqua. L'aderenza dei pneumatici al rivestimento stradale è nettamente migliorata, riducendo al minimo il fenomeno dell'acqua-planning. Questo impiego permette inoltre la riduzione del rumore prodotto dal veicolo stesso e l'attenuazione dell'abbagliamento prodotto dai fanali. Treni e tramvie. Recenti sviluppi sulla granulazione della gomma hanno dato luogo all'elaborazione di molteplici prodotti che possono essere utilizzati nella costruzione di strade ferrate e tranviarie, per ridurre il rumore e le vibrazioni prodotti da materiali rotanti. I risultati indicano che l'inquinamento sonoro può essere ridotto del 40% e le vibrazioni del 30%. La loro utilizzazione è particolarmente interessante nei centri urbani.

1.8.15 Porti e marina

Sui porti marittimi o fluviali, i pneumatici sono utilizzati come paracolpi. La diminuzione degli impatti dovuta al dislocamento dei battelli, protegge lo scafo, soprattutto durante le tempeste. Il nuovo metodo di supporto delle strutture è realizzato sui luoghi di ammaraggio sulle banchine. Di seguito verrà riportata una rassegna, da un punto di vista tecnico e prestazionale, dei principali manufatti in gomma impiegati in edilizia.

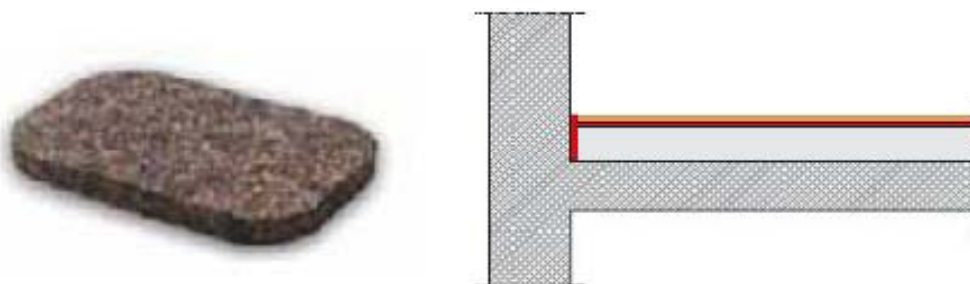


Figura 1.23 - Esempio di applicazione di isolante acustico per pavimenti



Figura 1.24 - Esempio di applicazione sotto parete di una fascia isolante

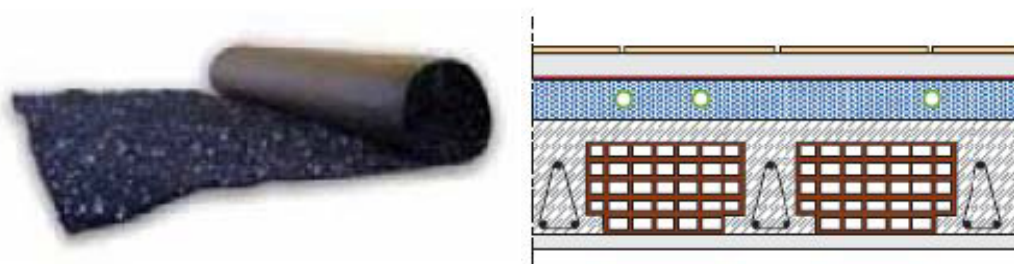


Figure 1.25 - Esempio di isolante acustico, applicazione sotto massetto



Figura 1.26 – Pannelli per solai, pannelli monostrato per partizioni murarie, “betonelle” di sicurezza, pavimentazione antitrauma, isolante per tetti, materiale per suoli sportivi



Figura 1.27 – Componenti per auto, campioni di superfici da gioco, campione per superfici sportive, pavimentazione antitrauma, ceppo chilometrico, spartitraffico, dossi artificiali, soles per calzature, elementi per aree da gioco

1.9 Impiego del materiale PFU nei conglomerati cementizi: stato dell'arte

L'impiego più importante del materiale PFU, come visto, è quello relativo all'utilizzo come combustibile alternativo. Altri impieghi importanti si hanno nel campo dei manufatti. Infatti, dopo opportuni processi di triturazione e di miscelazione con appositi leganti si possono ottenere manufatti di varia tipologia da adoperare in svariati campi di applicazione. Tutte queste tipologie di prodotti sono accomunati da caratteristiche particolari quali ad esempio un grande coefficiente di attrito, ottima durabilità, facile posa e manutenzione, funzione di fono-isolanza, antivibrante e antishock per pavimentazioni. Da tutto ciò, è nata l'idea dell'utilizzo combinato del materiale polimerico con il materiale più utilizzato nel campo delle costruzioni: il cemento. Dalla letteratura scientifica in merito, emergono sia le potenzialità di utilizzo sia limitazioni. L'uso di materiale PFU nel confezionamento di malte e calcestruzzi, conferisce al manufatto allo stato indurito interessanti proprietà quali ad esempio una bassa densità, elevata resistenza agli urti, migliori caratteristiche di isolamento acustico, ecc.. La limitazione più grande è caratterizzata dalla riduzione di resistenza causata sia dal basso valore di resistenza a compressione tipica del materiale PFU, sia dalla scadente adesione tra le particelle di gomma e la matrice cementizia.

Le prime esperienze scientifiche circa l'utilizzo di parti di gomma nei conglomerati cementizi risalgono agli inizi degli anni '90²³. Nel 1995, la rivista *Cement and Concrete Research* pubblica un articolo di Topcu I.B.²⁴ dal titolo "The properties of rubberized concretes" (le proprietà del calcestruzzo confezionato con la gomma) e nell'introduzione si discute circa l'opportunità di avere nel calcestruzzo, in alcuni particolari casi, alcune peculiari proprietà quali un basso peso specifico, un'elevata tenacità e una elevata resistenza agli urti ed è stata paventata l'eventualità di migliorare le proprietà elastiche del materiale composito riciclando materiali di scarto, tra cui il materiale PFU. E' stato ipotizzato che il materiale cementizio ottenuto potesse essere usato per barriere stradali di tipo Jersey. Gli effetti prodotti dalla gomma nel calcestruzzo, in base allo studio allora effettuato, sono stati:

- una riduzione generalizzata delle proprietà meccaniche dei calcestruzzi (perdita del 50% della resistenza a compressione, perdita del 64% di resistenza a trazione) usando particelle di gomma fine (0-1mm);

²³ Topcu. I. B., Ozcelikors. Y., "Rubberized Concrete", Akdeniz University, Isparta Engineering Faculty.,7. Engineering Week, 25-27 May 1991, Isparta,,Türkiye, (In Turkish);

Ali N. A., Amos A. D. and Roberts M., "Use of ground rubber tires in Portland cement concrete", Proc. Int. Conf. Concrete 2000, University of Dundee, UK 1993, pp. 379-390;

Topcu I. B., Concrete Barriers Using Rubbers as Aggregate , Antalya Bulletin, Union of Turkish Engineers and Architects, Chamber of Cir. Eng., Branch of Antalya, No.5-7, 1993;

Eldin N., Senouci A.B., "Rubber-Tire Particles As Concrete Aggregate", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.5, No.4, November, 1993, pp. 478-497;

Girsen E., "Physical and Mechanical Properties of Rubberized Concrete (with fine aggregate)", BS. Thesis, Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of CE, January 1994, Eski-ehir, Ttirkiye, (In Turkish);

Ersoz. E., "Physical and Mechanical Properties of Rubberized Concrete (with coarse aggregate)", BS. Thesis, Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of CE, January. 1994, Eski-ehir, Ttirkiye, (In Turkish);

Topcu. I.B., "Analysis of Rubberized Concretes as a Composite Material", Seminar of Structural Mechanics 94, Dumlupnar University, June 1994, Kiiyahya, Ttirkiye, (In Turkish);

²⁴ Topcu I. B., "The properties of rubberized concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 2, pp. 304-310, 1995;

- una riduzione di resistenza ancora maggiore (perdita del 60-70% di resistenza a compressione, perdita del 74% di resistenza a trazione) in caso di utilizzo di particelle di PFU più grossolane (1-4mm).

Tuttavia, è stato osservato che il calcestruzzo diventa relativamente più duttile. Un anno dopo, N.I. Fattuhi e L.A. Clark hanno condotto uno studio²⁵ su paste, malte e calcestruzzi utilizzando briciole di gomma PFU: nelle conclusioni dell'articolo si evidenzia che la gomma PFU può essere aggiunta senza difficoltà negli impasti cementizi. E' stata registrata, anche in questo caso, una perdita di resistenza a compressione e un abbassamento di densità dei manufatti in funzione del quantitativo di gomma utilizzata. Da prove "a fuoco" è stato evidenziato che l'infiammabilità della gomma è stata molto ridotta dalla presenza della matrice cementizia. Ancora nel 1996, H.A. Toutanji ha studiato²⁶ la possibilità di usare particelle di gomma PFU nel calcestruzzo in sostituzione agli aggregati tradizionali secondo 4 diverse percentuali (25%, 50%, 75% e 100%). Tra i risultati ottenuti è stato evidenziato che l'inserimento del materiale gommoso nel calcestruzzo ne provoca una riduzione di resistenza alla compressione ed alla flessione. Nel suo lavoro H.A. Toutanji ha quantificato tale riduzione di resistenza a compressione pari a circa due volte rispetto a quella a flessione. I manufatti con PFU, però, hanno subito spostamenti significativi prima di arrivare a frattura. I test di flessione, infatti, hanno rilevato un'alta tenacità dei manufatti con PFU rispetto ai rispetti manufatti confezionati senza. Successivamente, nel 1997, altri studi sui conglomerati cementi realizzati con gomma PFU hanno evidenziato che:

- il calcestruzzo confezionato con gomma PFU potesse essere studiato come un composito a tre fasi (pasta cementizia, aggregati e gomma PFU)²⁷;
- l'indice di fragilità dei calcestruzzi confezionati con diverse percentuali di gomma PFU è stato più alto per un contenuto di gomma PFU pari al 15% in peso²⁸;
- la resistenza agli urti di calcestruzzi realizzati con gomma PFU è stata più alta rispetto a quelli realizzati senza granuli²⁹;
- i calcestruzzi realizzati con materiale PFU hanno mostrato piccoli cambiamenti in ambienti altamente alcalini, per cui l'aggiunta del granulo di gomma non influenza notevolmente la durabilità dei manufatti³⁰.

Nel 1998, è stato redatto un articolo³¹ molto interessante sulla lavorabilità, sulle caratteristiche meccaniche e sulla stabilità chimica di malte cementizie realizzate con particelle fini di gomma PFU. Nell'elaborato tecnico è stato messo in

²⁵ Fattuhi N.I, Clark L.A., "Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber Constr. Build. Mater., 10 (1996), pp. 229-36;

²⁶ Toutanji H.A., "The Use of Rubber Tire Particles in concrete to Replace Mineral aggregates", Cement and Concrete Composites 18 (1996), pp. 135-139;

²⁷ Topcu I. B., Avcular N., "Analysis of rubberized concrete as a composite material", Cement and Concrete Composites 27 (1997), pp. 1135-1139;

²⁸ Topcu I. B., "Assessment of the brittleness index of rubberized concretes", Cement and Concrete Composites 27 (1997), pp. 177-183;

²⁹ Topcu I. B., Avcular N., "Collision behaviours of rubberized concrete", Cement and Concrete Composites 27 (1997), pp. 1893-1139;

³⁰ Huynh H., Raghavan D. "Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments", Elsevier Science 6 (1997), pp. 138-143;

³¹ Raghavan D., Huynh H., Ferraris C.F., "Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite, Journal of Materials Science 33 (1998), pp. 1745-1752;

evidenza che l'aggiunta di particelle di gomma ha causato una perdita di resistenza a flessione su provini di malta proporzionale al contenuto stesso di gomma, ma il materiale ha consentito la riduzione dei valori di ritiro plastico. L'eventuale uso di brandelli di gomma ha comportato, per i provini sottoposti a frattura, l'integrità strutturale, cioè anche dopo rottura il provino è rimasto in un unico pezzo (figura 1.28). Altro interessante articolo³² è stato redatto nel 2000 in cui è stata studiata la possibilità di aumentare l'adesione del polverino di gomma PFU alla pasta cementizia tramite opportuna modifica della superficie della gomma stessa. Le particelle di gomma, prima del confezionamento dei manufatti, sono stati, infatti, immersi in una soluzione acquosa di NaOH per 20 minuti. In questo modo è stato possibile migliorare le proprietà meccaniche dei conglomerati cementizi realizzati.

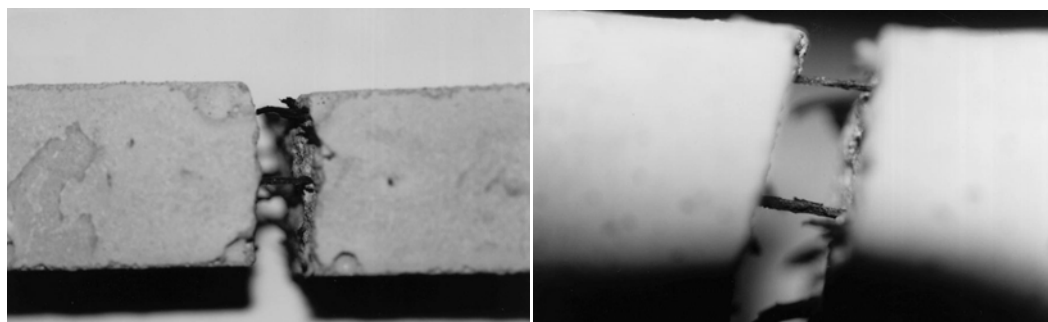


Figura 1.28 – Fratture di provini realizzati con brandelli di gomma PFU

Nei successivi anni, la comunità scientifica ha affrontato diverse altre problematiche relative ai manufatti cementizi realizzati con gomma PFU e sono stati sperimentati anche dei conglomerati altamente innovativi e con prestazioni davvero particolari. Ad esempio, nel 2004, un lavoro³³ scientifico ha presentato il comportamento di calcestruzzi ad alta resistenza (HSC) confezionati con fumo di silice e modificati con diversi quantitativi di particelle PFU, relativamente alle prestazioni meccaniche e di resistenza al fuoco. Nel lavoro sono state eseguiti una anche dei controlli non distruttivi al fine di ottenere la quantità ottimale di PFU da utilizzare negli impasti, tenendo conto della lavorabilità, della rigidità e ovviamente della resistenza meccanica. In base ai risultati ottenuti nella sperimentazione l'autore mette in luce il fatto che una frazione di volume relativamente elevata di gomma (3% in volume) non riduce in modo significativo la resistenza, anche se riduce la rigidità. Dosaggi di gomma crescenti hanno prodotto una progressiva riduzione di tali caratteristiche dei manufatti, ma potrebbero migliorare il comportamento dinamico. Le prove al "fuoco" hanno mostrato una riduzione del rischio di "sfaldamento esplosivo" per i manufatti realizzati con un alto contenuto di gomma PFU (figura 1.29).

³² Segre N., Joekes L., "Use of tire rubber particles as addition to cement paste", Cement and Concrete Research 30 (2000) pp. 1421-1425.

³³ Hernandez-Olivares F., Barluenga G., "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete", Cement and Concrete Research 34 (2004) 109- 117;

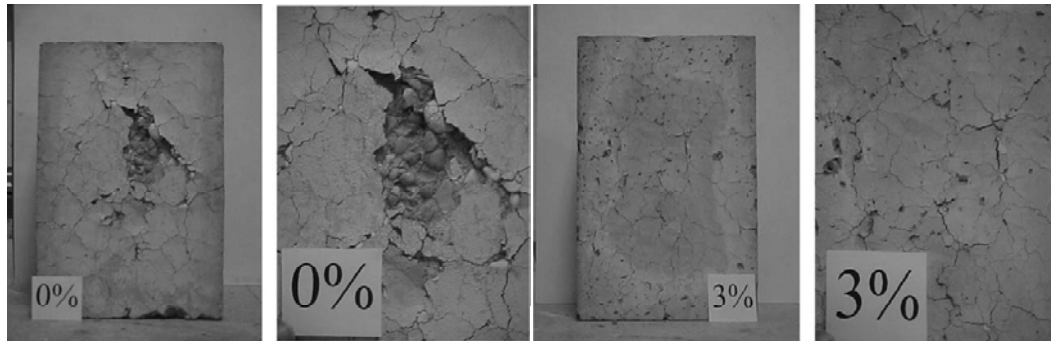


Figura 1.29 - diverso sfaldamento di provini di calcestruzzo non contenenti gomma PFU a confronto di provini contenenti il 3% di gomma PFU sottoposti a prova "a fuoco"

Sono stati fatti anche tentativi poco tradizionali in Europa, in particolare, in Corea del Sud, dove è stata valutata la possibilità di utilizzo in accoppiata di paglia di riso e gomma PFU³⁴. C'è stato anche chi ha provato a realizzare calcestruzzi autocompattanti (SCC). In Italia, ad esempio, nel 2006 è stato pubblicato un lavoro scientifico³⁵ in cui sono stati realizzati e caratterizzati questi tipi di calcestruzzo. Tra gli ultimi lavori scientifici pubblicati sui conglomerati cementizi realizzati con gomma PFU è stato sperimentato:

- la possibilità di utilizzo di gomma PFU per migliorare le proprietà termiche e acustiche di pannelli prefabbricati di cemento³⁶;
- la possibilità di sostituire aggregati e filler per calcestruzzi con gomma PFU³⁷;
- la possibilità di miglioramento della resistenza alla penetrazione di ioni cloruro in malte cementizie modificate con gomma PFU³⁸;
- la possibilità di confronto tra i processi di frattura di calcestruzzi ordinari e di calcestruzzi realizzati con PFU sotto carico di flessione³⁹.

Ad oggi, nonostante i numerosi studi, permangono ancora difficoltà di utilizzo del materiale PFU in malte e calcestruzzi soprattutto in relazione alla perdita di prestazioni meccaniche di questi conglomerati rispetto ai rispettivi realizzati senza gomma.

³⁴ Han-Seung Yang a, Dae-Jun Kim, Young-Kyu Lee, Hyun-Joong Kim.*, Jin-Yong Jeon, Chun-Won Kang, "Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials", *Bioresource Technology* 95 (2004), pp. 61–65;

³⁵ Bignozzi M.C., Sandrolini F., "Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research* 36 (2006), pp. 735–739;

³⁶ Sukontasukkul P., "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel", *Construction and Building Materials* 23 (2009), pp. 1084–1092;

³⁷ Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A.A., "Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete", *Construction and Building Materials* 23 (2009), pp. 1828–1836;

³⁸ Oikonomou N., Mavridou S., "Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires", *Cement & Concrete Composites* 31 (2009), pp. 403–407;

³⁹ Zhang YaMei, Wang Chao, Lu Yi, Ma AiBin, "Comparison of the fracture process of the rubberized concrete and plain concrete under bending load", *Science China Technological Sciences* 53 (2010), pp.1526–1533.

Capitolo 2

Le Malte

2.1 Premessa

La malta è un conglomerato in cui gli elementi inerti, che hanno piccole dimensioni e che costituiscono l'ossatura minerale, vengono inglobati da un elemento collante. Questo elemento è la pasta, la quale è costituita dall'unione del legante, che può essere di natura organica o inorganica, con l'acqua. La miscela dei vari componenti in opportuni rapporti permette di ottenere un impasto fresco capace di far presa e indurire in tempi prefissati. Più nel dettaglio, nei paragrafi successivi di questo capitolo, si approfondiranno le diverse tipologie di malte, le loro applicazioni, i materiali che in genere sono utilizzati per il loro confezionamento ed alcuni importanti aspetti normativi.

2.2 Leganti: cenni storici

I primi leganti utilizzati dalle popolazioni antiche, le popolazioni nomadi, per le costruzioni furono il gesso e la calce aerea. La scoperta di questi due leganti è connessa alle abitudini di questi popoli che, usando focolari di fortuna, riparati con ciottoli di pietra calcarea e gessifera, avranno osservato che questi materiali a stretto contatto con la fonte di calore in superficie cambiavano aspetto e che congiuntamente a contatto con l'acqua formavano delle paste che lavorate in qualche maniera e poi lasciate ad essiccare indurivano notevolmente. Nelle prime costruzioni vediamo un utilizzo molto abbondante del gesso o di gesso con calce, soprattutto nelle costruzioni egiziane (piramide di Cheope), perché è nota la difficoltà di raggiungere temperature elevate con i soli focolai affinché si potesse cuocere la pietra di calcare. Molto esperti sia nella cottura che nello spegnimento della calce erano invece gli antichi Romani, difatti, oggi troviamo memoria scritta persino di regole tecniche che dovevano essere osservate per eseguire i vari passaggi tecnici per la loro manipolazione. Già Catone senior, in riferimento alla produzione di malte a base di calce, nel "De re rustica", consiglia di utilizzare il calcare di colore bianco affermando che sia possibile ottenere i migliori risultati con il loro utilizzo. Successivamente Vitruvio specifica che non tutti i calcari sono uguali e che è consigliabile utilizzare per le murature calcari compatti, mentre per gli intonaci era consigliabile l'uso di calcari porosi. Nelle varie trattazioni tecniche in merito all'uso della calce, già in quell'epoca si faceva menzione di un ufficio preposto al controllo delle operazioni che riguardavano la cottura e lo spegnimento della calce aerea; in particolare, l'operazione di spegnimento, è precisato, doveva avvenire in apposite fosse con una stagionatura molto lunga: Plinio addirittura prescriveva di utilizzare la calce che avesse avuto almeno una permanenza in fossa di stagionatura per un periodo uguale o maggiore a tre anni. Il primo utilizzo dei leganti idraulici, quindi, quelli che hanno la capacità di resistere e maturare a contatto con l'acqua, lo abbiamo a partire dal decimo secolo avanti Cristo nella costruzione di cisterne nei pressi di Gerusalemme, la parte inferiore delle cisterne a contatto con l'acqua era ricoperto da un intonaco a base di calce e polvere di mattone mentre la restante parte, non a contatto con acqua era costruita con malte a base di calce aerea. Questa tecnica pare sia stata insegnata dagli operai fenici adibiti alla costruzione delle cisterne, da qui, quindi, è possibile affermare che già gli antichi fenici conoscessero, si presuppone in maniera solo empirica, le proprietà idrauliche dell'argilla cotta. Successivamente, dalla caduta dell'impero romano sino al XVII secolo non ci furono molti progressi nella

tecnica costruttiva, difatti fino al 1756, si continuò a costruire con malte a base di gesso, di calce, di calce e polvere di laterizi (malte pozzolaniche). Questa data segna un passo importante per la ricerca del confezionamento di malte che potessero indurire sotto l'acqua del mare, fu l'ingegnere inglese Smeaton che per primo affrontò il problema quando fu chiamato a dirigere la costruzione del faro di Eddystone nei pressi di Plymouth, spinto dall'evidente necessità di utilizzare una malta che avesse determinate capacità idrauliche; in particolare, egli dedusse che il contenuto di argilla nei calcari era uno dei fattori principali che determinavano, e determinano, l'idraulicità della calce. Per cui, è all'ingegnere Smeaton che si deve attribuire il merito di aver per primo saputo riconoscere, in alcuni tipi già usati di calce, e grazie a sperimentazioni fisiche chimiche, le proprietà idrauliche. Nel 1812 Vicat, continuò lo studio delle calce idrauliche su base più scientifica, questa volta supportato da cognizioni chimiche più approfondite, pubblicando i risultati nel 1818. Non fece altro che stabilire, come già d'altronde aveva fatto circa mezzo secolo prima Smeaton, quali fossero i calcari più adatti per confezionare malte e che avessero la capacità di sviluppare la loro resistenza meccanica in acqua, e che egli denominò calce idraulica. Ma non fu tanto questa la scoperta che rese Vicat "famoso" per le sue ricerche, piuttosto egli precisò che è durante la cottura che avviene la combinazione della calce, della silice e dell'allumina che sono contenute nell'argilla; ancora egli dimostrò la possibilità di produrre calce idrauliche artificiali da miscele di calcare o di calce grassa con argilla, quindi, il concetto di idraulicità come oggi lo conosciamo, sia da un punto di vista teorico che da un punto di vista scientifico. Fu però grazie all'inglese Parker che nacque la prima iniziativa di produrre, attraverso la fabbricazione industriale, leganti idraulici. Parker, nel 1796, brevettò un prodotto capace di indurire in acqua, dal colore simile alle pozzolane rosse del Lazio, denominandolo cemento romano. Questo prodotto, molto più ricco di argilla rispetto alle calce utilizzate da Smeaton, veniva cotto ad una temperatura attorno ai 1000-1100°C, si deve precisare che nelle fasi di produzioni del cemento romano di Parker non c'era l'introduzione in forno delle scorie, quindi, di conseguenza veniva a mancare quel componente che è il silicato tricalcico. Tra il 1822-1823, alla scadenza del brevetto di Parker (1810), tra i vari leganti prodotti su base industriale si ricorda quello brevettato da Frost, il cosiddetto british cement, più tardi Aspdin brevettò il progresso nel modo di produrre una pietra artificiale, a cui egli diede il nome di portland cement. Il nome gli deriva dal fatto che il colore del prodotto brevettato era molto simile ad una pietra naturale da costruzione che era molto in uso in Inghilterra in quel periodo, appunto la pietra di Portland. Questa invenzione non differiva dai cementi brevettati da Parker e dallo stesso Frost, se non per il colore in quanto, difatti, la cottura rimaneva comunque circoscritta a temperature che non superavano i 1100°C, quindi, sempre al di sotto di quelle che permettono la scorificazione, e comunque sempre diverso da quello che oggi noi chiamiamo cemento portland, perché non era effettivamente un cemento, ma si trattava ancora di una mera calce idraulica. Fu solo nel 1844, e grazie a Johnson, che cominciano a prodursi nelle fabbriche cementi che di molto si avvicinano al cemento portland come oggi lo conosciamo; Johnson stabilì che per ottenere un miglioramento nei cementi occorreva giungere ad una temperatura di cottura ben più elevata, ovvero fino a raggiungere la scorificazione. Esso fu il primo a stabilire questo principio essenziale che differenzia nettamente le qualità del cemento da quelle delle calce idrauliche, ovvero, la produzione del cemento deve avvenire in presenza di fase liquida, mentre quelle delle calce idrauliche rimane

allo stato solido. In Italia, l'inizio della produzione dei cementi e dei leganti idraulici in genere ebbe luogo solo all'inizio del 1856 con l'impianto di uno stabilimento per la produzione di calce idraulica a Palazzolo sull'Oglio, nel 1892 sempre a Palazzolo si produsse per la prima volta il cemento portland; la produzione del cemento di alto forno iniziò nel 1906 a Piombino e quello pozzolanico solo nel 1920 a Segni. Da allora fino ai giorni nostri l'attività di ricerca e di sperimentazione, per ottenere cementi sempre migliori e diversificati agli usi speciali a cui sono chiamati a rispondere in taluni casi, è andata crescendo. Oggi sono molteplici le industrie che producono cementi e leganti di tutti le tipologie previste dagli organi di controllo e tutela¹. Nel corso dei secoli si è, quindi, assistito ad una progressiva trasformazione delle caratteristiche chimiche e fisiche dei leganti utilizzati nelle costruzioni, comportando una continua variazione degli impasti in opera ed un miglioramento delle prestazioni del prodotto finito. L'uso dei leganti ottenuti dalla cottura della pietra era già pratica diffusissima in Siria, Fenicia, Cipro e Grecia fin dal VI secolo a.c. Lo stesso Marco Vitruvio Pollione (I sec. a. c.) nel suo "De Architectura", fissava tre categorie principali di leganti: calce grassa di fossa, malta di calce e pozzolana, malta di calce e cocchiopesto. Il Delorme (1567), per quanto riguarda le calce magre (calx macra), sottolineò la capacità di alcune calce impure di fare presa anche sott'acqua. La calce si otteneva attraverso la cottura di calcari relativamente puri, in forni. Per ridurre il lungo tempo di presa della calce grassa (calx pinguis), essa si mescolava con la pozzolana (pulvis puteolana), nella proporzione di 1 a 3, e questo permetteva alla malta di indurire anche sott'acqua. Quando, intorno al 1750, si scoprì la calce idraulica essa sostituì, come accennato in precedenza, la miscela calce-pozzolana; la calce idraulica permetteva la produzione di conglomerati meccanicamente più resistenti e soprattutto impermeabili. La calce idraulica, inoltre, presentava il vantaggio di indurire autonomamente senza la necessaria presenza dell'aria e della pozzolana. La capacità di indurire anche sott'acqua è dovuta alla formazione (durante la reazione chimica che si instaura nella cottura), di un calcare argilloso (a temperatura superiore a 850 °C), di silicato bicalcico e alluminato monocalcico. È proprio la scoperta della calce idraulica che segna il passaggio dal "vecchio" al "nuovo" calcestruzzo. Sperimentazioni successive nella cottura di miscele artificiali di calcare ed argilla (progressivamente aumentata fino al 40%) a temperature sempre più elevate portarono al moderno cemento Portland e agli altri vari tipi di cemento. Dunque, il tipo di legante distingue l'antico calcestruzzo da quello che utilizziamo oggi; infatti, nel calcestruzzo antico, il legante era costituito da calce e pozzolana, o da calce idraulica che grazie ad alcune impurità aveva proprietà simili a quelle del cemento; nel calcestruzzo moderno, il legante è costituito dal cemento Portland o miscele di questo con loppe d'altoforno e pozzolana. Un'altra importantissima differenza risiede nell'utilizzo degli aggregati. Nel calcestruzzo moderno, si dà un importante ruolo alla curva granulometrica degli aggregati, la quale ottimizza la varietà delle dimensioni degli aggregati da utilizzare negli impasti in modo da diminuire il volume dei vuoti interstiziali riducendo, pertanto, il volume di cemento necessario al loro riempimento. Dall'utilizzo della curva granulometrica non solo si ha un vantaggio di tipo economico, riducendo la quantità di cemento da utilizzare, ma si riducono alcuni fenomeni quali: ritiro, deformazione viscosa, fessurazioni, gradienti termici. Nel tempo l'avanzamento scientifico e tecnologico ha portato il cemento ad un incremento della resistenza meccanica a breve e a lungo termine rispetto

¹ Luca Bertolini: Materiali da Costruzioni - Volume 1, Città Studi, Novara 2006, pp. 202 – 204.

alle malte cementizie del passato. L'esaltazione di tali caratteristiche meccaniche in tutti i leganti, anche non strutturali, ha fatto sì che si perdessero le peculiarità tipiche degli impasti del passato, interessanti soprattutto per le loro potenzialità microclimatiche. Per effettuare un'inversione di tendenza e, quindi, riscoprire le virtù dei leganti al fine di migliorare le condizioni di salubrità e vivibilità degli ambienti, è necessario individuare nuovi materiali aventi parametri e caratteristiche tali da rispondere alle tecniche costruttive attuali in un'ottica biocompatibile nei vari momenti di produzione, utilizzazione e smaltimento.

2.3 Costituenti delle malte

La malta è un conglomerato prodotto miscelando i seguenti elementi: acqua, legante ed elementi lapidei, questi ultimi noti con il termine di inerti o meglio aggregati che non superano i 5 mm di dimensione massima (sabbia). L'impiego della malta che per lo più è destinata ai sistemi di finitura (intonaci) o alla giunzione di altri materiali da costruzione (mattoni e pietre). Il settore d'impiego non è solo l'ingegneria civile o industriale, dove altri materiali sono più avvantaggiati, ma non è difficile trovare applicazioni secondarie per supporto di finiture, giunzioni, riempimenti o altro ancora. La versatilità di impiego dipende dalla larga disponibilità delle materie prime in tutte le regioni del mondo, dall'economia del processo produttivo rispetto ad altri materiali, dalla buona resistenza alle aggressioni ambientali naturali e all'acqua. Una volta indurita, la malta si presenta dal punto di vista macro strutturale come un materiale composito dove gli elementi lapidei, oltre i 2mm di dimensioni, appaiono dispersi in una matrice cementizia. Osservando il tutto ad un microscopio elettronico, il sistema appare molto più complesso: accanto agli elementi lapidei, la matrice cementizia si presenta eterogenea formata da diverse fasi dove ne distinguiamo due, quella di transizione e la circostante matrice vera e propria. La malta è un materiale dinamico, le cui proprietà evolvono continuamente e sono sottoposte a variazioni significative in relazione non solo al tempo atmosferico, ma anche al tempo cronologico che coinvolgono le reazioni chimiche tra i due ingredienti principali acqua e cemento.

2.3.1 Leganti

I leganti sono dei materiali aventi la capacità di indurire a contatto con l'aria o con l'acqua; hanno il compito di aderire agli altri componenti dell'impasto, interponendosi tra loro e conferendo al tutto la necessaria coesione. Possono essere di natura diversa. Nei paragrafi successivi, si esamineranno, in linea generale, i principali leganti oggi utilizzati nel campo delle costruzioni.

2.3.1.1 Cementi

Il cemento è oggi il legante maggiormente utilizzato. Il cemento Portland è prodotto per macinazione di un clinker (ottenuto da cottura di rocce calcaree e argillose) con piccole quantità di gesso bi-idrato. La cottura del clinker avviene a temperature più elevate per consentire la completa combinazione dell'ossido di calcio con altri ossidi (SiO_2 , Al_2O_3 , ecc.) per arrivare alla completa formazione di alluminati e silicati di calcio. Nell'atto pratico, la polvere di cemento portland mescolata con acqua indurisce molto velocemente, raggiungendo valori di resistenza meccanica finale molto più elevati rispetto a quelli conseguibili con la calce idraulica che è stata abbandonata come legante idraulico per le costruzioni in calcestruzzo. Il cemento portland è costituito principalmente da silicati di

calcio, quindi, le materie prime per la produzione del cemento devono fornire calcio e silice in opportune proporzioni. I calcari e le marne sono comuni fonti industriali di calcio, mentre l'argilla e gli scisti assicurano il rifornimento di silice. Sottoposti a temperatura di 1300-1450 °C, la fase liquida del clinker, formata in gran parte da alluminati e ferro-alluminati di calcio, permette l'adesione delle particelle solide tra loro, rendendo possibile la diffusione delle specie ioniche più rapidamente di quanto sia possibile nello stato solido. Inoltre, la presenza della fase liquida nel clinker dà luogo alla formazione di silicati di calcio già a temperature basse e in tempi relativamente brevi. I componenti della miscela cruda devono essere finemente macinati e ben miscelati affinché nel forno avvengano le reazioni desiderate. Il clinker che si ottiene, viene macinato in un mulino a sfere per la produzione di una polvere fine le cui particelle sono più piccole di 75 micron. Nella realtà il clinker viene mescolato insieme a una piccola percentuale di gesso bi-idrato e ad altri costituenti "principali" come la loppa d'altoforno, la cenere volante, la pozzolana naturale o "secondari" le cui quantità sono stabilite dalla normativa. La principale normativa nazionale ed europea in materia è la UNI EN 197, che per il cemento portland (tipo I) prevede che il clinker costituisca almeno il 95% del sistema. Presa e indurimento sono il conseguimento della reazione chimica del cemento con l'acqua, ma per un'idratazione completa dal punto di vista stechiometrico, il cemento avrebbe bisogno almeno di un quantitativo di acqua pari al 25% circa del suo peso. Per ottenere una pasta sufficientemente lavorabile, la percentuale di acqua deve essere aumentata sensibilmente fino al 30-35%. Se si aggiunge alla pasta di cemento della sabbia il fabbisogno in acqua aumenta ancora, quindi, il rapporto in peso acqua/cemento raggiunge valori di 0,40-0,50 per le malte. Il fenomeno di per sé dell'idratazione viene spiegato con due meccanismi: nei primi stadi dell'idratazione del cemento la reazione avverrebbe attraverso la dissoluzione dei composti anidri con formazione dei loro costituenti ionici nella fase acquosa e con successiva precipitazione di prodotti idratati solidi dalla soluzione acquosa soprassatura. A stagionature lunghe, quando diminuisce la mobilità degli ioni, l'idratazione del cemento anidro residuo avviene attraverso un meccanismo di reazione topochimico dove l'acqua dopo aver penetrato lo strato di prodotti idratati già precipitati intorno ai granuli di cemento, reagisce con il nucleo anidro dei granuli stessi depositando in situ i nuovi prodotti idratati. Il processo di idratazione, essendo il cemento portland costituito da una miscela eterogenea di diversi composti, consiste nelle reazioni dei costituenti anidri con l'acqua che avvengono alcune simultaneamente, altre in successione, infatti, ad esempio gli alluminati reagiscono molto più velocemente con l'acqua rispetto ai silicati. L'idratazione dei silicati nel cemento portland produce una famiglia di silicati di calcio idrati che sono strutturalmente simili, ma variano nel rapporto silice/calce e nel contenuto di acqua combinata. Le proprietà adesive della pasta di cemento idratata sono dovute alla formazione del C-S-H, in teoria la resistenza finale di cemento portland ad alto contenuto di C₃S dovrebbe essere più bassa di quella di un cemento ad alto contenuto di C₂S. Tuttavia, a tempi brevi (28 giorni) prevale l'aspetto cinetico e poiché la velocità di idratazione del C₃S è maggiore di quella del C₂S, la resistenza meccanica di un cemento portland aumenta con il suo contenuto di C₃S. La reazione dell'alluminato tricalcico (C₃A) con l'acqua è immediata, infatti, per questa proprietà, il cemento portland non è adatto ad essere utilizzato se non si rallenta in qualche modo la reazione stessa e cioè la formazione degli alluminati di calcio idrati (C-A-H), i quali fanno perdere troppo

velocemente l'iniziale plasticità all'impasto e ne provocano un rapido aumento di rigidità (presa rapida). Per frenare questa idratazione del C₃A si usa il gesso che ha funzione di regolatore della presa. Un cemento di miscela è un legante composto da clinker portland, da gesso e da un materiale inorganico. Questi cementi sono stati per vari motivi: per la necessità di utilizzare notevoli quantità di sottoprodotti industriali, risparmio energetico in quanto l'aggiunta di minerale costa meno del clinker. Le aggiunte minerali impiegate sono apparse di loppa d'altoforno oppure di materiali pozzolanici naturali (di origine vulcanica) e artificiali (cenere di carbone, fumo di silice ecc). I corrispondenti cementi di miscela ottenuti con queste aggiunte minerali sono chiamati rispettivamente cementi d'altoforno e pozzolanici. Nella recente normativa europea, i cementi d'altoforno sono identificati come cementi di tipo III e quelli pozzolanici come tipo IV (norma Uni-EN 197 I parte).

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		UNI EN 197/1:2001 - Composizione (Percentuale in massa) ^a										Costituenti secondari		
			Costituenti principali												
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare				
						Naturale	Naturale calcinata	Silicea	Calcica		L	LL			
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Cemento Portland al calcare	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
Cemento Portland composito ^c	CEM II/A-M	80-94	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	-	-	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	-	-	0-5	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico ^c	CEM IV/A	65-89	-	11-35	11-35	11-35	11-35	11-35	11-35	-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55	36-55	36-55	36-55	36-55	36-55	-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	18-30	18-30	18-30	18-30	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50	31-50	31-50	31-50	31-50	-	-	-	0-5	

Tabella 2.1 - Classificazione dei cementi (norma UNI EN 197-1)

2.3.1.2 Calce aerea

La calce è il classico legante dei materiali da costruzione dell'antichità. Viene preparata per cottura di rocce calcaree (CaCO₃). Queste rocce termicamente decomposte si dissociano in ossido di calcio (CaO) e anidride carbonica (CO₂). Il processo avviene verso 850°C dove la massa porosa della calce che si forma, posta in contatto con acqua, si trasforma in idrossido di calcio Ca(OH)₂ capace di indurire lentamente all'aria. Poiché la trasformazione dell'ossido nell'idrossido di calcio avviene con un forte sviluppo di calore, il primo viene chiamato calce "viva" e il secondo calce "spenta". L'idrossido di calcio mescolato con acqua e sabbia è in grado di formare una malta capace di indurire lentamente all'aria. La malta perde la sua plasticità originale a seguito dell'evaporazione di una parte dell'acqua dell'impasto. La resistenza meccanica a compressione di una malta di calce raggiunge valori di una decina di MPa molto lentamente. Se si aggiungesse

pozzolana alla calce, la malta sarebbe in grado di indurire più rapidamente specie a contatto con l'acqua, inoltre, sempre per il contatto con la pozzolana, la calce si trasforma da legante aereo in idraulico. L'impiego della pozzolana per il miglioramento della malta di calce nei confronti dell'azione dell'acqua fu una delle scoperte più rivoluzionarie degli antichi Romani nel settore delle costruzioni, soprattutto nelle opere idrauliche e marittime. La miscela di calce e pozzolana può indurire in presenza di acqua e in assenza di aria, ciò consentì lo sviluppo del primordiale calcestruzzo (stessa composizione della malta con aggiunta di ghiaia) impiegato molto spesso dai Romani come riempimento all'interno di paramenti in mattoni delle cosiddette murature a sacco.

2.3.1.3 Calce idraulica

Il trattamento termico a circa 900-1000 °C di una marna calcarea, miscela naturale di calcare e argilla, porta alla formazione dell'ossido di calcio che successivamente si combina con la silice e l'allumina dell'argilla formando prodotti (silicato bicalcico e alluminato monocalcico) capaci di indurire con l'acqua. La produzione di calce idraulica ha affrancato i costruttori dalla disponibilità di pozzolana, che non si reperiva facilmente, per la produzione di malte idrauliche meccanicamente più resistenti e capaci di indurire anche senza essere a contatto dell'aria. La calce idraulica, ottenuta con il processo descritto, è stata abbandonata a quasi totalmente rimpiazzata da prodotti ottenuti miscelando il cemento portland con una notevole percentuale di filler (materiale inerte macinato finemente), generalmente calcareo e piccole quantità di additivo aerante. Il mescolare insieme il cemento con il filler, consente di ottenere prestazioni fisico-meccaniche molto simili a quelle della calce idraulica originale, mentre lo sviluppo di aria conferisce alla malta quelle caratteristiche di plasticità necessarie per l'applicazione su superfici verticali (intonaci).

2.3.1.4 Gesso

Il gesso è un legante costituito da solfato di calcio bi idrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e si trova in natura sottoforma di selenite, sericolite, alabastro gessoso, pietra da gesso, ecc.. Per riscaldamento, a seconda della temperatura di cottura variabile tra 120-180°C, il solfato di calcio bi idrato è trasformato nel semidratato, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, o nella forma anidra, CaSO_4 , o in una miscela dei due. Il meccanismo secondo il quale un impasto di gesso legante con l'acqua indurisce si basa sulla maggiore solubilità a temperatura ambiente delle fasi metastabili rispetto alla fase stabile (gesso bi idrato). Le fasi metastabili si sciolgono nell'acqua di impasto dalla quale precipita il meno solubile solfato di calcio bi idrato in forma di cristalli fibrosi. Al termine del processo di indurimento si forma il gesso bi idrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) presente nella materia prima impiegata per l'eruzione del legante. La quantità di acqua che necessita per la completa idratazione del gesso legante è intorno al 20-25% in peso. Alla fine dell'indurimento una parte dell'acqua si è combinata chimicamente, mentre una parte è evaporata lasciando nel gesso indurito una struttura porosa più o meno riempita di acqua. Questa struttura porosa costituisce il punto debole dal punto di vista della resistenza meccanica a compressione che può raggiungere valori di qualche decina di MPa. Alla struttura porosa è da computare il comportamento di ammortizzatore dell'umidità ambientale esercitata dai pannelli di gesso negli ambienti chiusi. Le ottime caratteristiche di resistenza al fuoco mostrate dai

manufatti di gesso sono dovute alla sua intrinseca incombustibilità e all'azione opposta dall'acqua presente nel gesso indurito all'aumento della temperatura.

2.3.2 Sabbia

La sabbia, costituisce circa il 65-70% del volume ed è l'elemento portante della malta. Tra le sue proprietà si denota in particolare la provenienza, la purezza e la granulometria, queste sono decisive sulla qualità della malta. Le sabbie migliori sono quelle naturali provenienti da cave subacquee, da fiumi o da laghi, purché siano lavate, prive di sali e presentino una perdita per decantazione in acqua inferiore al 2%. Le sabbie artificiali provengono, invece, dalla frantumazione di rocce o di prodotti artificiali come le scorie. A seconda della roccia da cui derivano possono essere silicee o quarzose, granitiche, micacee, calcaree, gessose, ecc.. Le sabbie debbono essere prevalentemente silicee, cioè senza elementi calcarei teneri o chimicamente alterabili, esenti da argilla (che influisce sul rapporto acqua/cemento) e da sostanze organiche (che ritardano la presa). In ogni caso devono essere dure, vive, aspre al tatto. E' necessario anche valutare la compatibilità con i diversi leganti: le sabbie devono avere un contenuto di solfati e di cloruri molto bassi (soprattutto per malte a base di cemento) ed essere tali da non reagire chimicamente con la calce e con gli alcali del cemento, per evitare possibili rigonfiamenti e macchie superficiali. Le pezzature delle sabbie per intonaci devono corrispondere alle caratteristiche granulometriche stabilite dalle norme in materia tutt'ora vigenti. Nelle sabbie per conglomerati è ammessa una percentuale massima del 10% di materiale trattenuto rispettivamente sul crivello 7.1 mm, o sul setaccio 2 mm, a seconda si tratti di sabbia per conglomerati a base di leganti aerei o idraulici o di sabbia per conglomerati bituminosi; in ogni caso si devono avere dimensioni inferiori a mm 0.05. Per eseguire l'analisi granulometrica, atta a definire la pezzatura di pietrischi, graniglie, sabbie e additivi, si fa uso dei crivelli e dei setacci. Attualmente, sono presenti sul mercato delle sabbie speciali, vendute in sacchi, aventi caratteristiche di leggerezza ed isolamento, che consentono di realizzare intonaci per particolari destinazioni d'uso.

2.3.3 Acqua

La pasta di cemento è capace di trattenere un grado di quantità di acqua a seconda dell'umidità dell'ambiente e della porosità della pasta stessa. La classificazione dell'acqua è basata sul grado di difficoltà con il quale può essere rimossa dalla pasta. La rimozione dell'acqua dalla pasta cementizia al diminuire dell'umidità relativa all'ambiente avviene con continuità. L'acqua capillare è quella presente nei pori compresi circa tra i 10nm e i 6micron. Inoltre, l'acqua capillare si può dividere in due categorie: quella contenuta nei pori più grossi con dimensione tra 50nm e i 6micron e l'acqua trattenuta mediante tensione capillare nei pori più piccoli (da 10 a 50 nm) che, se rimossa, può causare contrazione del sistema. L'acqua adsorbita è quella che viene fisicamente trattenuta sulla superficie dei solidi nella pasta indurita. La perdita di questa acqua è responsabile del ritiro della pasta indurita per essiccazione. L'acqua interstratica è quella associata con la struttura reticolare del C-S-H formando uno strato di acqua monomolecolare tra gli strati di C-S-H. Questa acqua è persa solamente con una forte essiccazione e pertanto con la normale escursione igrometrica ambientale non viene coinvolta nei fenomeni di ritiro da essiccazione. L'acqua combinata chimicamente è parte integrante della struttura dei vari prodotti d'idratazione del cemento. Non è persa

per essiccazione e si libera solo quando gli idrati si decompongono per riscaldamento ad elevata temperatura, ad esempio durante un incendio.

2.3.4 Additivi

Vi sono molti tipi di additivo da utilizzare per il confezionamento di malte e calcestruzzi in grado di conferire alla miscela particolari requisiti prestazionali. Tra questi additivi vi sono, ad esempio:

- Additivi superfluidificanti a base di naftalinsolfonato, acrilica oppure di copolimeri acrilici per miscele preconfezionate ad alta lavorabilità in climi freddi, moderati ed estivi.
- Additivi superfluidificanti con azione viscosizzante per la produzione in climi freddi di miscele superfluide carenti di parti fini.
- Additivi superfluidificanti di nuova generazione a base di polimeri acrilici per conglomerati cementizi preconfezionati a ritiro ridotto e ad alta lavorabilità mantenuta nel tempo, in climi freddi, moderati ed estivi.
- Additivi superfluidificanti di ultima generazione a base di polimeri acrilici per la messa in opera di pavimentazioni in climi freddi, moderati ed estivi.
- Additivi plastificanti e riduttore d'acqua per malte lavorati con consistenza terra umida.
- Additivi aerante fluidificante per calcestruzzi leggeri e malte.
- Acceleranti di indurimento e di prese per conglomerati prefabbricati.
- Ritardante di presa con azione plastificante per malte cementizie.
- Additivi aeranti capaci di introdurre micro bolle d'aria estremamente stabili nel conglomerato al fine di proteggerlo dal degrado dovuto a cicli di gelo-disgelo.
- Trattamento idrorepellente per prevenire la deturpazione del faccia vista da applicare sulla superficie finita.

2.4 Classificazione delle malte

Le malte devono presentare allo stato fresco un'opportuna lavorabilità e allo stato indurito adeguate caratteristiche fisico-meccaniche (resistenza, deformabilità, aderenza, porosità, permeabilità all'acqua in fase vapore e in fase liquida, ecc.), estetiche, di durabilità. L'aggregato ha il compito di aumentare il volume dell'impasto e di impedirne il ritiro volumetrico con conseguente formazione di cavillature. I leganti, per trasformazione fisica o per reazione chimica, provocano l'unione delle particelle inerti altrimenti incoerenti. Occorre fare sempre molta attenzione all'impiego di cementi con costituenti secondari (loppe o ceneri volanti) che possono provocare indesiderati fenomeni di efflorescenza.

2.4.1 Classificazione in base ai componenti

Secondo i componenti utilizzati, le malte si possono classificare in:

- malte aeree, preparate con calce aerea;
- malte idrauliche, preparate con calce eminentemente idrauliche;
- malte cementizie, preparate con cementi;
- malte composte o bastarde, preparate con due o più leganti.

2.4.1.1 Malte di calce aerea

Sono ottenute mescolando insieme calce aerea, acqua e sabbia fino ad ottenere un impasto omogeneo e lavorabile. Viene utilizzata prevalentemente per la

realizzazione di intonaci e come legante nella costruzione di muri. Le quantità dei componenti utilizzati variano a seconda dell'impiego. Per gli intonaci fini i rapporti sono paritari cioè uno di sabbia, uno di calce e uno di acqua, mentre nella costruzione dei muri la malta deve essere ricca di aggregati, la sabbia deve essere duplicata o triplicata addirittura nell'impasto e si ha il seguente rapporto tra i componenti (1 di calce, 2 di sabbia e 1 di acqua). Nella corretta posa della malta è importante ricordare che il supporto su cui si interviene deve essere abbondantemente bagnato prima della lavorazione per evitare che vi sia un assorbimento troppo forte di acqua da parte dell'opera muraria prima della presa compromettendo la stessa. Per opere murarie esterne viene logicamente utilizzata calce idraulica. Le materie prime impiegate sono abbondanti in natura; le tecniche di lavorazione richiedono contenuti consumi energetici. Caratteristiche:

- Possiedono una permeabilità elevata al vapore acqueo grazie all'assetto poroso che lascia traspirare la muratura, permettendo lo smaltimento dell'umidità, migliorando così la qualità dell'aria negli ambienti interni.
- Sono atossiche, non contengono composti organici volatili, gas, fibre o particelle radioattive; inoltre essendo la calce un battericida naturale riduce lo sviluppo di anaerobi nell'edificio.
- Non si riscontrano effetti inquinanti o dannosi alla salute nelle fasi di posa, esercizio e dismissione.
- Il materiale dismesso può essere riciclato come inerte e utilizzato nel settore delle costruzioni stradali.
- Consentono il passaggio delle onde cosmiche e di tutte le energie naturali essenziali per la vita.
- Sono quindi adatte a garantire le condizioni di salubrità della costruzione e benessere per gli abitanti.

Una volta indurita, la malta da intonaco possiede una resistenza allo schiacciamento piuttosto bassa: 10-13 Kg/cm², secondo il tempo di stagionatura del grassello. Difetti:

- Indurimento molto lento.
- La cristallizzazione di sali può comportare lo sviluppo di inquinanti di natura microbiologica, putrescibilità, formazione di efflorescenze.
- Possibilità di rigonfiamento e screpolamento durante l'esecuzione del lavoro, a causa della formazione di calcinaroli, cioè di nuclei di ossido di calcio non spento.

2.4.1.2 Malte di calce idraulica

L'impiego di un intonaco a base calce romana è opportuno nel risanamento di qualsiasi tipo di struttura muraria (in laterizio, in calcestruzzo, in gasbeton, in pietra, in strutture miste, ecc.) degradata dal tempo e dall'umidità, sia fuori terra che interrata, sia all'esterno che all'interno; nei vecchi come nei nuovi edifici; quando si vogliono evitare problemi di condensa superficiale, accumuli di umidità, fenomeni di gelività. Caratteristiche:

- L'elevata traspirabilità degli intonaci a base di calce idraulica esalta le qualità delle murature in laterizio e preserva dall'umidità relativa la coibentazione termica che, rimanendo permanentemente asciutta, non perde di resistenza.
- Altra caratteristica della malta idraulica è la pastosità, che la rende di facile manipolazione, grazie al suo potere adesivo.

- Inoltre è dotata di plasticità ed elasticità; la sua struttura leggera ha una bassa densità (2,25 – 2,30 g/cm³) che le conferisce anche potere isolante, oltre a ridurre il rischio di fessurazioni, crepe e distacchi.
- Laddove la malta rimane a vista è anche esteticamente gradevole.
- Le malte idrauliche presentano caratteristiche di resistenza meccanica superiori a quelle delle malte aeree ma sempre inferiori a quelle del cemento (da 1/2 a 1/4), tali da renderle idonee all'uso in muri moderatamente sollecitati. Resistenza a flessione maggiore di 20Kg/cm²; resistenza a compressione maggiore di 70 Kg/cm².
- La calce idraulica risulta essere un ottimo coibente termico e il lento indurimento, dovuto alla presenza del silicato bicalcico permette all'intonaco un'eccellente resistenza agli sbalzi termici (estate-inverno, giorno-notte) e una perfetta adesione ai supporti.
- Durabilità e affidabilità.
- Si possono ottenere diversi tipi di finitura, da grezza a fine.

In un'ottica bioecologica è consigliato l'utilizzo di calce idraulica o eminentemente idraulica naturale, da non confondere con le calce idrauliche artificiali che sono a tutti gli effetti dei cementi diluiti con scarsa traspirabilità. Gli intonaci realizzati a base di pura calce idraulica romana, possedendo una maggiore porosità rispetto al cemento, costituiscono un vero e proprio polmone igrometrico migliorando la vivibilità degli ambienti interni. L'umidità dell'aria, viene assorbita per capillarità dalle murature e distribuita nell'intera struttura, così da permettere l'evaporazione verso l'esterno e l'interno dei locali. Tale diffusione dell'acqua consente un asciugamento costante in ogni stagione, evitando il ristagno in alcuni punti; inoltre, compensando la differenza di pressione in senso orizzontale, si determina una ventilazione diretta dal basso verso l'alto, definita corrente ascensionale neutrale. Al contrario, gli intonaci impermeabilizzanti ed idrorepellenti impiegati in alternativa per interventi di risanamento e deumidificazione, non risolvono il problema, anzi lo peggiorano in quanto, sigillando l'umidità all'interno delle murature stesse, oppure impedendone l'assorbimento, portano al degrado in breve tempo sia le strutture che l'intonaco.

Vantaggi:

- La completa assenza di sali solubili evita la formazione di efflorescenze e lo sviluppo di inquinanti di natura microbiologica.
- Le malte a base di calce idraulica naturale non contengono composti volatili dannosi, non presentano rilascio di polveri o sostanze nocive.
- Non si hanno livelli di tossicità in fase di posa, di esercizio e di dismissione.
- Una volta dismesso il materiale può essere riciclato come inerte e impiegato per sottofondi del manto stradale, contenimenti, ecc.
- La composizione naturale della calce idraulica non comporta disturbi al campo elettromagnetico naturale.
- Le materie prime impiegate sono abbondantemente reperibili in natura e il processo di lavorazione non richiede elevati consumi energetici.

Difetti:

- Scarsa resistenza al gelo.
- Scarsa impermeabilità all'acqua.

2.4.1.3 Malte cementizie

E' costituita da cemento acqua e sabbia mescolati tra loro in modo da formare un impasto omogeneo. Utilizzata nei lavori di muratura sia esterni che interni,

sconsigliata nella realizzazione di intonaci. L'impiego del cemento permette di ridurre notevolmente i tempi di presa rispetto alla calce offrendo al contempo una buona resistenza. Nella preparazione si seguono le stesse indicazioni della preparazione di malte a base di calce, le proporzioni dell'impasto "sabbia e cemento", sono di circa 4 di sabbia a 1 di cemento, con una parte di acqua. Le malte cementizie hanno scarsa permeabilità al vapore acqueo, bassa porosità dovuta alla notevole consistenza del materiale che impedisce l'evaporazione delle quantità di acqua e di vapore contenute all'interno della muratura, predisponendo il rivestimento a rigonfiamenti e fessurazioni. Caratteristiche tecniche:

- Si possono ottenere diversi tipi di superfici, da molto grezze a molto lisce.
- La superficie intonacata risulta impermeabile all'acqua.
- Ottima resistenza meccanica in quanto sono scarsamente deformabili.
- Facilità di posa in opera.
- Possono essere utilizzate anche in condizioni climatiche non ottimali, senza correre troppi rischi a causa di danni prematuri per il gelo o per una cattiva esecuzione.

Nelle costruzioni moderne l'uso del cemento è entrato in modo massiccio come legante idraulico, componente attivo per ottenere il calcestruzzo e la malta cementizia, dovuto alla caratteristica del prodotto di raggiungere elevati valori di resistenza meccanica in breve periodo, con notevoli vantaggi economici per i costruttori. Dal punto di vista della bioedilizia il cemento non è però un materiale idoneo alla salubrità della costruzione: nonostante le materie prime per la produzione dei cementi siano reperibili in abbondanza in natura, le tecnologie di fabbricazione (escavazione, frantumazione, granulazione, cottura in alto forno, trasporto) comportano un elevato costo energetico. Ai giorni nostri tutti i cementi in commercio sono prodotti esclusivamente da miscele artificiali. In assenza di apposite norme o certificazioni che obbligano i produttori a certificare la provenienza, la composizione chimica e la lavorazione dei cementi, in commercio vengono adoperati, come componenti del cemento, anche prodotti di scarto di lavorazione industriale (come la cenere di carbone) responsabili di emissione di gas radioattivo. Impedendo la traspirabilità delle strutture, influenzano negativamente il microclima degli ambienti e il benessere degli occupanti. Le miscele di malta di cemento e di calcestruzzo, vengono corrette per migliorare le prestazioni tecniche e meccaniche del prodotto (resistenza meccanica, ritiro, presa, ecc.) adoperando additivi sintetici come polimerici, fluidificanti, anticongelanti, ecc., tutte sostanze corrosive e dannose per la salute e l'ambiente. I fenomeni di carbonatazione e di aggressione degli agenti esterni vengono limitati normalmente dall'utilizzo di specifici additivi chimici che, seppur efficaci, sono nocivi nei confronti dell'ambiente. I campi elettromagnetici naturali potrebbero essere alterati dalla presenza di sostanze conduttrici come ad es. il quarzo. Dopo la dismissione le malte cementizie possono essere riciclate come inerti da demolizione. Attualmente è in fase sperimentale un tipo di cemento biologico composto di cemento di pozzolana, sabbia calcarea mista a ghiaia nelle dosi simili a quelle del cemento tradizionale. Questo cemento eviterebbe gli inconvenienti attualmente in uso, in special modo per quello che riguarda la piezoelettricità dovuta al quarzo quasi sempre contenuto. Se è necessario armare il cemento, si può sostituire il ferro con le nuove armature in fibra di vetro che cominciano ad essere lanciate sul mercato. Questi materiali sono così nuovi che l'esperienza acquisita non è sufficiente per poterli consigliare senza il beneficio del dubbio. Dati gli aspetti negativi riscontrati, si consiglia un uso limitato del cemento nella

costruzione. E' preferibile utilizzare cemento bianco naturale per la sua maggiore purezza rispetto agli altri tipi attualmente in commercio. Difetti:

- Le malte cementizie hanno scarsa permeabilità al vapore acqueo. Bassa porosità dovuta alla notevole consistenza del materiale che impedisce l'evaporazione delle quantità di acqua e di vapore contenute all'interno della muratura, predisponendo il rivestimento a rigonfiamenti e fessurazioni.
- L'elevata conducibilità impone onerose opere di isolamento termoacustico.
- La durabilità è variabile in funzione delle caratteristiche del supporto.
- Rigidezza del materiale, in funzione della quantità di legante adoperato, che risulterà determinante per l'efficienza dell'intonaco.

2.4.1.4 Malte composte o bastarde

La malta bastarda si ottiene utilizzando altri leganti nell'impasto oltre quello fondamentale (per esempio cemento e calce) in modo da conferire alla malta stessa particolari requisiti di idraulicità e di resistenza. Trovano largo impiego sostanzialmente nella realizzazione di intonaci esterni e muri (come collante per mattoni) e per la posa in opera di pavimentazioni e rivestimenti. Se la presenza del cemento contribuisce ad aumentare l'impermeabilità, la calce, nella giusta proporzione, aumenta i tempi di presa per una maggiore lavorabilità finale della malta. Caratteristiche:

- Le malte composte o bastarde si ottengono mescolando due o più leganti di diversa natura allo scopo di combinare i vantaggi di ciascuno di essi.
- Nella composizione è necessario tenere in seria considerazione le compatibilità chimiche dei diversi leganti impiegati, oltre alle loro giuste proporzioni valutate in base alle condizioni ambientali.
- Le malte bastarde, essendo una combinazione di calci diverse o calce e cemento, consentono una buona traspirabilità e una discreta impermeabilità all'acqua; inoltre hanno una notevole durabilità.
- Queste miscele artificiali spesso contengono componenti chimici e additivi sintetici necessari a garantire buone prestazioni tecniche e meccaniche, ma sono responsabili di emissioni di sostanze o gas potenzialmente dannosi alla salute sia in fase di posa che di esercizio e dismissione.
- Le resistenze meccaniche che si sviluppano dipendono proporzionalmente dalla quantità e qualità dei leganti idraulici presenti.
- Le malte più comuni sono quelle ottenute aggiungendo alla calce idraulica una percentuale variabile di cemento al fine di migliorarne progressivamente la resistenza meccanica.
- Un altro tipo di malta composta è ottenuta aggiungendo una piccola percentuale di calce idrata alla malta cementizia; questa combinazione rende la malta più lavorabile e meno soggetta al ritiro ed alle fessurazioni. Inoltre, se si aggiunge gesso al cemento si ottiene un rallentamento della presa.
- Un'altra miscela è data dalla calce idrata più la calce idraulica più il cemento, per ottenere ad esempio una malta adatta agli intonaci esterni.
- Inoltre, miscelando al grassello calce idraulica naturale, cioè ricavata da rocce marnose senza aggiunte artificiali di altri materiali argillosi o calcarei, si ottengono tempi più brevi di indurimento, ridotte operazioni di bagnatura dopo la posa e una certa economia nei costi del materiale.

- Per il rinzaffo, spesso si adopera una malta mista di calce idraulica e di grassello mescolati nelle proporzioni di 1:1, mentre per l'arriccio, a un volume di legante idraulico vengono mescolati 2-3 parti di calce grassa. La finitura, invece, viene eseguita con una malta di solo grassello, anche per malte di fondo miste, in quanto completamente compatibile con la calce idraulica.
- L'intonaco a base di malte miste risulta differente nell'effetto finale rispetto a quello tradizionale, ma la sua applicazione risulta molto più rapida ed elimina buona parte dei tempi intermedi tra l'applicazione di uno strato e l'altro.
- Altre versioni di malte miste sono ottenute miscelando al grassello di calce sostanze naturali o artificiali a comportamento idraulico, come la pozzolana o il cocciopesto, che possiedono una forte reattività nei confronti della calce. Queste malte induriscono con maggiore velocità rispetto a una malta di solo grassello e acquistano doti tecniche superiori, con una maggiore resistenza allo schiacciamento.

2.4.1.5 Malte additivate

Le malte additivate si compongono con l'aggiunta agli ingredienti di base quali il legante, la sabbia e l'acqua, di additivi di diversa natura, allo scopo di migliorare alcune loro prestazioni per impieghi specializzati. Questi additivi vengono aggiunti alla miscela in quantità variabili approssimativamente dallo 0,2 al 2% rispetto al peso del legante, per modificare determinate proprietà della malta allo stato fresco (facilitando le lavorazioni in ogni condizione climatica) e allo stato indurito (migliorando il livello qualitativo). Sul mercato si trova una molteplicità di questi prodotti, ma spesso la loro composizione non è chiara e inoltre, la loro efficacia è variabile, in quanto influenzata sia dalle caratteristiche specifiche del legante che dalla composizione degli intonaci. L'effetto di un preparato può comunque assolvere contemporaneamente a più funzioni: un fluidificante opera spesso anche come un aerante, un aerante come impermeabilizzante, ecc. Di seguito vengono elencati questi prodotti, raggruppandoli in base alle finalità che si prefiggono:

- Plastificanti, consentono di migliorare la viscosità, la stabilità e l'omogeneità delle malte, aumentando la coesione e la compattezza degli impasti. Spesso per migliorare la lavorabilità occorre un quantitativo di acqua superiore, il che comporta un indebolimento delle resistenze meccaniche che può essere compensato dall'aggiunta di un fluidificante.
- Fluidificanti, consentono di aumentare la fluidità degli impasti migliorando la coesione tra i vari componenti, diminuendo la quantità di acqua e favorendo la lavorabilità.
- Aeranti, hanno come scopo principale il miglioramento del comportamento al gelo della malta indurita. Questi additivi formano all'interno dell'impasto una struttura microporosa a bollicine, non comunicanti tra loro né con l'esterno; così da impedire, una volta indurito l'intonaco, qualsiasi penetrazione dall'esterno da parte dell'umidità e dell'acqua nella struttura microporosa. Gli aeranti inoltre, facilitano la lavorabilità ed evitano la sedimentazione della malta fresca nel periodo precedente all'indurimento. Occorre evitare però, eccessi di dosaggio e di miscelazione, in quanto l'eccessivo contenuto di aria causa perdita di aderenza e durezza.

- Ritardanti, tali additivi influenzano la velocità di indurimento tra legante e acqua, rallentando i tempi di presa. Facilitano la lavorabilità anche in condizioni climatiche sfavorevoli (specialmente nei climi caldi), e vengono impiegati soprattutto dove è importante evitare giunti di lavoro sul rivestimento.
- Acceleranti, possono essere utilizzati per sveltire i tempi di indurimento della malta. In questo modo vengono allontanati i pericoli derivanti dalla presenza dell'acqua di impasto. Per questo motivo, tali prodotti vengono usati anche come anticongelanti.
- Antigelo, sono prodotti che accelerano il processo di idratazione della malta e abbassano il punto di congelamento dell'acqua. Quindi permettono di effettuare lavorazioni anche in periodi molto freddi.
- Espandenti, servono a confezionare malte senza ritiro o con ritiro controllato, introducendo nella miscela una moderata espansione. L'aumento di volume migliora la lavorabilità allo stato fresco e riduce notevolmente il pericolo di fessurazioni allo stato indurito.
- Indurenti, migliorano le resistenze meccaniche di un intonaco ordinario.
- Impermeabilizzanti, sono sostanze idrofughe che potenziano la compattezza delle malte migliorandone l'impermeabilità. Gli idrofughi di massa vengono aggiunti alle miscele durante l'impasto in quantità controllata. Effetti secondari possono essere il rallentamento della presa e dell'indurimento. Gli idrofughi di superficie, invece agiscono come vernici o come impregnanti.
- Additivi organici, estremamente rari nella produzione dei nuovi intonaci, costituiscono un'importante conoscenza per intervenire sul restauro di malte degradate di edifici di un certo interesse storico e artistico. Le sostanze organiche venivano utilizzate allo stato naturale per rinforzare malte particolarmente deboli. Il sangue di bue, lo zucchero, il formaggio, il letame, offrivano varie soluzioni nell'esecuzione. Per facilitare la regolarizzazione della malta nell'indurimento e la posa in opera si aggiungeva nell'impasto succo di fico, latte cagliato, tuorlo d'uovo, segale, ecc.
In seguito, alcune sperimentazioni in laboratorio, hanno evidenziato vari problemi emersi dall'impiego di sostanze organiche nella malta quali: notevole vulnerabilità all'attacco biologico, solubilità nell'acqua ed effetti estetici indesiderati. Un'alternativa a tali prodotti può essere costituita dall'impiego di materiali sintetici.
- Additivi sintetici, si intendono sia materiali artificiali che naturali precedentemente trattati. Rispetto agli additivi organici, i loro requisiti possono essere controllati con più sicurezza. Le resine, epossidiche e di poliestere, sono un esempio di combinazione tra sostanze sintetiche che utilizzate nella malta determinano capacità adesive e protettive; inoltre aumentano la resistenza alla solubilità e all'azione degli acidi. Gli acetati acrilici e polivinilici hanno mostrato buoni comportamenti riguardo alla stabilità al calore e alla variazione della temperatura. Effetti collaterali nell'uso di additivi sintetici possono essere la formazione di sali solubili, con il manifestarsi di efflorescenze, esplosioni e distacchi. Altri inconvenienti possono essere l'irreversibilità di molti prodotti, l'eccessiva compattezza e durezza.

2.4.2 Classificazioni in base all'utilizzo

In base alla loro funzione le malte si distinguono in:

- malte per intonaci;
- malte per applicazione di rivestimenti: pavimentazioni, pareti, altri elementi architettonici;
- malte per decorazioni: a spessore, a rilievo;
- malte per murature: di allettamento, di riempimento;
- malte per usi particolari: impermeabilizzazioni, stuccature, sigillature, stilature.

Nei paragrafi successivi il dettaglio delle diverse tipologie di malta.

2.4.2.1 Malte per murature

Nella realizzazione delle murature, siano esse solo partizioni interne di edifici ad uso civile o murature esterne portanti e non, si possono usare varie fattispecie di malte purché le sue caratteristiche di lavorabilità, idraulicità e di resistenza fisico-chimica e meccanica siano adatte agli scopi a cui esse sono destinate. Quando si deve lavorare con strutture costituiti da pannelli leggeri di materiali composti o con pannelli di gesso (cartongesso), ovvero, quando le strutture non debbano assolvere nessuna funzione statica ma hanno solo la funzione di dividere ambienti contigui, spesso si fa uso di malte a base di gesso additivate; queste malte fungono da semplici collanti tra pannelli o tra i pannelli e le strutture a cui esse devono essere connesse. Diverso è l'utilizzo delle malte a base di calce aerea, oggi completamente sostituito dalle malte idrauliche o cementizie, venivano utilizzate molto in passato; per la costruzione di volte, muri di sostegno e muri fuori terra veniva preferita la malta cosiddetta grassa composta da cinque parti di sabbia e due parti di calce grassa, mentre la cosiddetta malta forte, costituita da tre parti di sabbia ed una di calce magra, veniva utilizzata per la costruzione di manufatti adibiti alla funzione statica quali per esempio fondazioni, pilastri in murature e volte. Oggi, invece, si preferisce utilizzare malte idrauliche o malte cementizie, che, di fatto, garantiscono una migliore resistenza alle sollecitazioni a cui sono soggetti. Vengono impiegate generalmente come malte di allettamento per la disposizione dei mattoni per murature sia interne che esterne portanti e non portanti. La normativa italiana indica le definizioni e i requisiti delle prestazioni finali delle malte prodotte in fabbrica destinate all'allettamento di elementi per muratura né da specifica definizione. Le malte, dal punto di vista normativo vengono definite in base ai concetti di prestazione e dosaggio e, inoltre, in relazione al modo con cui sono preparate e distribuite possono essere:

- preparate in fabbrica (finita e semifinita);
- pronte all'utilizzo, (malta fresca e malta umida);
- premiscelate e predosate.

Ed in riferimento alla loro destinazione d'uso si dividono in:

- malte generiche (G);
- leggere (L);
- sottile (T).

La UNI EN 998-2:2004 introduce un'innovazione in riferimento alla classificazione delle malte basata su una distinzione in classi di resistenza a compressione a 28 giorni.



Figura 2.1 – Malta per muratura usata per unire elementi in laterizio

Di seguito (tabella 2.2) viene proposta la differenza tra i due quadri normativi inerenti alle malte bastarde per murature. La norma, inoltre, stabilisce le condizioni per la marcatura CE delle malte da muratura destinate agli impieghi indicati nella norma stessa e riporta i punti pertinenti applicabili, ovvero, precisa lo scopo e campo di applicazione, ancora, stabilisce la procedura per l'attestazione di conformità delle malte da muratura definita come sistema di attestazione di conformità, precisa i criteri e i metodi per ottenere dichiarazione di conformità CE e marcatura ed etichettatura CE. Le malte utilizzate come allettamento per murature che hanno funzione portante devono essere poste in opera osservando particolare attenzione sulla realizzazione dello spessore del letto di malta, giunto tra i mattoni, il quale deve essere regolare in altezza, per ogni ricorso di mattoni, e non troppo spesso. Di fatti, il rischio che si corre è quello di creare zone a resistenza diversificata con successiva formazione di fessure tra i ricorsi di mattoni. È buona norma, soprattutto durante la stagione calda, bagnare i mattoni prima della posa; questa operazione serve per eliminare eventuale presenza di polvere, terriccio o altro, ma soprattutto per evitare un rapido assorbimento dell'acqua d'impasto della malta. La disidratazione troppo rapida della malta provoca una mancata aderenza della stessa sul mattone pregiudicando la resistenza meccanica della muratura e lasciando componenti non reagiti che possono dar luogo ad efflorescenze "recidive" favorendo la formazione di fessurazioni, che potrebbero essere causa di passaggio dell'acqua.

Categoria o classi	Resistenza a compressione a 28 giorni
M 1	1,0 (N/mm ²) - 10 (kg/cm ²)
M 2,5	2,5 (N/mm ²) - 25 (kg/cm ²)
M 5	5,0 (N/mm ²) - 50 (kg/cm ²)
M 10	10 (N/mm ²) - 100 (kg/cm ²)
M 15	15 (N/mm ²) - 150 (kg/cm ²)
M 20	20 (N/mm ²) - 200 (kg/cm ²)
M d	>25 (N/mm ²) - >250(kg/cm ²)

Tabella 2.2 – Classi di resistenza delle malte per muratura

2.4.2.2 Malte per intonaco

L'intonaco è la finitura delle pareti, dei soffitti, dei muri in genere per completare la definizione geometrica dell'elemento, dal punto di vista architettonico e per

sistemare igienicamente la superficie trattata, ovvero, ha la funzione di proteggere lo strato ad esso sottostante, che siano murature in mattoni o in pietra, da agenti aggressivi atmosferici che si producono all'esterno o all'interno degli ambienti dove quotidianamente l'uomo svolge le sue funzioni. Un intonaco deve possedere specifiche caratteristiche, quindi, la scelta della malta da utilizzare è fondamentale affinché vengano soddisfatti i requisiti prestazionali richiesti, ovvero:

- buona aderenza e compatibilità con il supporto sottostante (di pietre, laterizi, calcestruzzo e altri supporti);
- attitudine a consentire i processi di traspirazione delle murature;
- rispondenza alle esigenze di impermeabilità, di coibenza termica e acustica, di resistenza meccanica;
- planarità delle superfici, assenza di imperfezioni superficiali e squadro delle giunture tra pareti.

L'intonaco civile è un intonaco che ricade all'interno degli intonaci "ordinari" per le prestazioni e le caratteristiche dei materiali impiegati. Gli intonaci civili, eseguiti secondo i magisteri tradizionali, devono essere realizzati in due o, meglio, tre strati successivi, di cui il primo con funzione di "aggrappaggio", rinzaffo o intonaco rustico, il secondo per realizzare l'opportuno spessore, corpo o arriccio, e il terzo per la finitura, stabilitura, in particolare:

- rinzaffo, fatto con inerti a granulometria più grossa e con elevato dosaggio di leganti, regolarizza il supporto e lo prepara in modo da assicurare buona aderenza agli strati successivi. Questo tipo di intonaco viene definito rustico proprio per il fatto che il suo aspetto finale risulta scabro e irregolare, non prevede strato di finitura, nella maggior parte dei casi la malta viene lasciata così come viene applicata mediante cazzuola. L'intonaco rustico viene impiegato nell'edilizia di poco pregio. Il rinzaffo, quindi, costituisce il primo strato di intonaco che viene applicato direttamente sulla muratura con uno spessore che varia da 0,5 cm (se solo con funzione aggrappante) a 2 cm (se con funzione regolarizzante). La malta viene scagliata violentemente contro la parete mediante cazzuola per ottenere la massima aderenza. Viene poi stesa facendola penetrare nei giunti della muratura;
- arriccio, con prevalenti funzioni di tenuta e di impermeabilità con minore dosaggio di leganti consente di limitare il ritiro. La posa in opera di questo strato deve avvenire dopo essersi accertati che quello precedentemente applicato si sia indurito (circa 48 ore). Lo spessore di questo strato si aggira intorno a 1÷1,5 cm. Viene scagliato con la cazzuola sopra lo strato precedente viene successivamente spianato per ottenere lo spessore voluto cercando di lasciare la superficie ruvida e uniforme per assicurare l'adesione dello strato successivo. L'indurimento di questo strato avviene in circa 3/8 giorni;
- finitura, costituisce il terzo strato di tutto il complesso ha funzione prevalentemente estetica (in genere si usa sabbia fine, calce e cemento). Questo strato dovrà essere liscio strofinando la superficie mediante frattazzo con movimento rotatorio e spruzzando acqua pulita. Se l'intonaco non è già stato pigmentato in pasta bisogna attendere il completo asciugamento della malta prima di stendere un'eventuale coloritura.

Nella messa in opera degli strati che costituiscono l'intonaco bisogna osservare delle attenzioni particolari al fine di avere un prodotto finito eccellente, ad esempio: il secondo strato deve essere dato su di un rinzaffo di sufficiente

maturazione, quando cioè abbia espresso la maggior parte del ritiro, mentre la finitura deve essere data possibilmente sul corpo ancora fresco così da creare uno stabile collegamento. In seguito è necessaria un'accurata bagnatura per evitare che il laterizio assorba l'acqua di impasto dell'intonaco con rischio di distacco, ovvero, più spesso, con formazione di crepe da ritiro per eccessiva rapidità di asciugatura. Oltre alla bagnatura della parete, indispensabile, sono particolarmente importanti le condizioni ambientali al momento dell'intonacatura: pareti eccessivamente calde, soleggiate, battute dal vento e bassa umidità relativa dell'aria (il ritiro aumenta sensibilmente al diminuire dell'umidità ambiente) non sono certo condizioni ideali per eseguire buone intonacature. Queste cure devono essere applicate anche e soprattutto alle pareti realizzate in laterizio alveolato o in pietra naturale in quanto questi possono avere un assorbimento d'acqua superiore di qualche punto percentuale a quello di un laterizio normale. Se poi un intonaco, anche applicato secondo ogni magistero, viene tinteggiato prima che abbia completato la sua naturale maturazione e, quindi, esaurita tutta la fase di ritiro idraulico e di buona parte del ritiro di indurimento, le micro cavillature, prevedibili in funzione della natura stessa dell'impasto dell'intonaco, compariranno inevitabilmente sulla superficie tinteggiata. Per contenere le cavillature sugli intonaci è quindi necessario:

- per le nuove costruzioni, visto il probabile assestamento delle murature, è consigliabile costruire l'intonaco almeno dopo 40 giorni dalla realizzazione dei muri;
- costruire la muratura con giunti di malta verticali e orizzontali ben costipati, senza vuoti o rientranze rispetto ai blocchi;
- bagnare il muro prima delle operazioni di intonacatura;
- porre particolare attenzione alle condizioni termo igrometriche evitando di operare con temperature troppo elevate, vento, umidità ambiente troppo bassa (le condizioni ideali sono quelle comprese fra i 5 e i 20 °C, con UR pari al 50% circa); · realizzare l'intonaco almeno a due strati;
- consentire la maturazione dello strato di rinzaffo prima di posare lo strato di corpo e finitura;
- bagnare l'intonaco per qualche giorno;
- tinteggiare solo a indurimento avvenuto.

In ogni caso quando confezioniamo una malta per intonaco dobbiamo fare in modo che la malta sia in possesso di alcune caratteristiche che risultano delle invarianti del sistema a cui non possiamo rinunciare affinché il manufatto finito abbia tutte le caratteristiche sopra descritte, ovvero devono essere:

- impermeabili;
- deve opporsi ai fenomeni fessurativi;
- buona aderenza e compatibilità con il supporto sottostante;
- buona lavorabilità.

I requisiti dell'intonaco civile, quindi, dipendono dal tipo di materiale impiegato per la realizzazione della malta, per cui distinguiamo:

- intonaco premiscelato;
- intonaco di sola calce;
- intonaco di malta bastarda;

In questo tipo di intonaco, fatto di malta bastarda, la malta può essere realizzata aggregando i leganti nei seguenti modi:

- calce idraulica/ calce aerea;

- cemento/ calce aerea;
- cemento/ calce idraulica;
- calce aerea/ gesso;
- cemento/ calce idraulica/ calce aerea.

Vi sono poi degli intonaci definiti speciali quali possono essere: intonaci ignifughi, termoisolanti, fonoassorbenti, deumidificanti, impermeabilizzanti, ecc. Negli intonaci esterni, l'intonaco realizzato con sola calce aerea, si usa raramente a causa della scarsa resistenza alle sollecitazioni meccaniche, la cristallizzazione dei sali ed il tempo di indurimento relativamente lungo; ha, però, una buona stabilità all'acqua, restituendola repentinamente all'esterno. Questi inconvenienti possono essere eliminati o attenuati attraverso l'aggiunta moderata di leganti idraulici i quali non modificano le caratteristiche fondamentali di tale intonaco. Nel dosaggio della malta una parte in volume di grassello è rimpiazzata da un volume equivalente di legante idraulico. A seconda dei casi e delle esigenze si potranno utilizzare qualità diverse di leganti idraulici. Bisogna fare però attenzione nella scelta di cementi carenti il più possibile di alcali per evitare i danni dovuti alla solubilizzazione e alla cristallizzazione dei sali. Questo tipo di intonaco viene apprezzato per la rapidità di posa e di presa della calce idraulica rispetto alla calce aerea, paragonata alla quale, presenta caratteristiche di resistenza più elevate (miglior comportamento agli sbalzi termici, ma minore elasticità).



Figura 2.2 – Malta per intonaco

L'intonaco a base di cemento viene applicato su murature esterne di qualsiasi tipo e presenta una notevole velocità di applicazione e, a causa delle qualità del legante, presenta una notevole resistenza ed una bassa porosità. Caratteristiche che influiscono sensibilmente sul rivestimento rispetto alle altre malte sono: rigidità del materiale, permeabilità all'acqua, permeabilità al vapore, resistenza meccanica, buona tenuta al passaggio dell'acqua, ma sono poco indicati perché non consentono l'evaporazione dell'umidità contenuta nella muratura e, inoltre, presentano scarsa elasticità. A seconda dei dosaggi e dell'impiego del cemento, l'intonaco a base di leganti idraulici evidenzia una certa rigidità e, questa, in funzione della quantità del legante adoperato, risulterà determinante per l'efficienza dell'intonaco stesso. Gli intonaci premiscelati possono essere a base di calce e/o cemento; l'intonaco a base di calce-cemento risulta compatibile con la maggior parte dei supporti ed è adattabile a qualsiasi condizione ambientale. A

seconda del trattamento di finitura superficiale impiegato per stendere l'ultimo strato di intonaco, si possono distinguere:

- intonaco frattazzato, presenta una superficie liscia ottenuta passando il frattazzo, di legno o di plastica, con movimenti circolari, verticali o orizzontali;
- intonaco lamato, si ottiene passando sulla superficie il bordo di una lama o di una cazzuola; la superficie che ne risulta è liscia e uniforme;
- intonaco a punta di cazzuola, si ottiene premendo la punta della cazzuola sulla superficie appena stesa dell'intonaco;
- intonaco pettinato, presenta una superficie scavata da solchi paralleli ottenuti mediante pettine o tavola chiodata, passati sull'intonaco non indurito;
- intonaco spruzzato, presenta una superficie dall'aspetto granuloso e regolare, viene ottenuto tramite malta fluida che viene spruzzata per mezzo di cazzuola o apparecchiatura meccanica;
- intonaco strollato, si ottiene scagliando sulla superficie una malta contenente ghiaia, che viene gettata sempre nella stessa direzione.

La UNI EN 998-1 classifica le malte per intonaco secondo 4 categorie resistenziali in funzione della resistenza a compressione raggiunta dalla stessa dopo 28 giorni di maturazione (tabella 2.3).

PROPRIETA	CATEGORIE	VALORI
Resistenza a compressione a 28 giorni	CS I	0,4 ÷ 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 ÷ 5,0 N/mm ²
	CS III	3,5 ÷ 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²

Tabella 2.3 - Classi delle malte per intonaci: proprietà resistenziali allo stato indurito

2.4.2.3 Malte per sottofondi

Per definire cosa è un sottofondo e per descrivere quali sono le malte che vengono utilizzate per la loro realizzazione faremo riferimento solo ad alcuni elementi tecnici appartenenti al più complesso sistema edificio. Si definisce chiusura, l'insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio (in particolare tratteremo come esempio le chiusure orizzontali e le chiusure orizzontali superiori) aventi funzioni di separare e di conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno. Questi elementi tecnici hanno il compito di supportare sia carichi statici che carichi dinamici e di resistere all'attacco di agenti esterni aggressivi. Ognuno di questi elementi tecnici è formato da vari componenti quali: il sottofondo ed il rivestimento. Il sottofondo è comprensivo di vari strati ognuno ha delle funzioni specifiche, ovvero:

- funzione portante;
- funzione di ripartizione dei carichi (es. massetto);
- compensare le quote e le pendenze (es. massetto);
- incorporare le canalizzazioni degli impianti tecnologici;
- ancoraggio per il rivestimento (detto anche strato di allettamento);

- funzioni particolari (es. isolamento termoacustico ecc.).

Il rivestimento costituisce invece lo strato più superficiale del pacchetto stratificato, le sue funzioni sono:

- resistere alle sollecitazioni meccaniche;
- resistere all'attacco di agenti chimici;
- resistere ai fenomeni fisici;
- soddisfare i requisiti di benessere, di sicurezza, fruibilità, aspetto, gestione e funzionamento.

Analizzeremo in dettaglio solo alcuni degli strati del pacchetto funzionale sopra descritto, in particolare e, in accordo con l'obbiettivo che ha questo lavoro di tesi, porremo la nostra attenzione sullo strato di rivestimento, sullo strato allettamento e sul massetto di cui è composto il sottofondo. Lo strato di rivestimento è generalmente costituito dai pavimenti, dai rivestimenti verticali e dal manto di copertura, i primi ed i secondi sono deputati a soddisfare alcuni requisiti quali, il requisito di continuità, resistenza all'usura, impermeabilità, igienicità, aspetto estetico e coibenza termoacustica; gli ultimi devono invece soddisfare i requisiti di resistenza, impermeabilità, leggerezza e scarsa conduttività termica. Questi elementi possono essere disposti sul sottofondo mediante due tecniche differenti di posa ovvero: per allettamento o per incollaggio. Qualità e durabilità della superficie rivestita sono legate alla tecnica di posa impiegata nella sua realizzazione. Le operazioni da eseguire variano in funzione della tecnica utilizzata. Per il fissaggio al supporto (massetto di pavimento, parete, ecc.) vengono adottati due metodi: se lo strato di allettamento che attacca le piastrelle al massetto è composto da malta cementizia si ha la cosiddetta posa a malta, se è costituita da appositi collanti si ha la posa detta a colla. Nella posa a malta vengono utilizzate delle malte cementizie applicate in strato con spessore variabile da 3-5 cm, questa forma uno strato di allettamento che deve essere dotato almeno dei requisiti di: elevata resistenza meccanica, di elevata rigidità, di un'adeguata adesività, resistenza al gelo e di resistenza all'attacco chimico. La posa a colla, più raffinata e precisa, è anche più costosa, infatti, oltre al costo dei collanti, è necessario preparare sul supporto uno strato di cemento perfettamente orizzontale, caldana. Gli adesivi da utilizzare per la posa possono essere a base cementizia e a base organica. I primi sono sostanzialmente malte cementizie predosate e arricchite di additivi che ne aumentano il potere di trattenere l'acqua e sono particolarmente adatti per essere impiegati in spessori sottili ma sconsigliati per le strutture molto flessibili. Gli adesivi a base organica sono di due tipi: adesivi in dispersione acquosa (buone caratteristiche di flessibilità, ma il loro campo d'uso è limitato al rivestimento di pareti interne) e adesivi a base di resine reattive (consigliati per ambienti che richiedano speciali caratteristiche chimiche e meccaniche). In ogni caso è di fondamentale importanza un'adeguata progettazione al fine di realizzare una superficie correttamente rivestita. Per elaborare un buon progetto è necessario analizzare le caratteristiche della superficie da rivestire perché determinanti per la scelta di una corretta soluzione progettuale, e le tecniche di posa a disposizione:

- lo stato delle superfici, il cui esame permette di stabilire eventuali trattamenti di pulizia e di scegliere l'adesivo adatto;
- il comportamento dilatometrico, che può indurre delle tensioni dovute alla dilatazione di alcuni strati;
- il modulo di elasticità e il dimensionamento, che determinano il comportamento della struttura nelle reali condizioni di carico;

- la composizione e l'articolazione strutturale, che indica la posizione e la dimensione dei giunti di costruzione (che consentono spostamenti tra parti contigue della struttura);
- geometria della superficie da rivestire, che può influenzare la scelta del tipo di rivestimento, della loro disposizione e della tecnica di posa.

Il massetto che funge da supporto è uno strato che ha spessore variabile, nel caso, per esempio, delle partizioni orizzontali (solai) che varia tra i 4-6 cm, mentre può variare lungo la sezione trasversale se è progettato in maniera tale da creare una pendenza (es. coperture piane); la sua funzione principale è di distribuzione delle pressioni esercitate dai carichi che vi agiscono sullo strato inferiore che ha funzione strutturale. Le malte generalmente utilizzate per la realizzazione di massetti tradizionali possono essere a base di calce idraulica in polvere oppure a base di cemento, in generale, però, si preferisce utilizzare delle malte cementizie in quanto hanno caratteristiche intrinseche migliori in materia di resistenza meccanica e resistenza agli attacchi fisico – chimici rispetto alle malte a base di calce idraulica. Queste malte devono essere realizzate con aggregati di piccola granulometria; in alcuni casi è richiesto l'utilizzo di prodotti chimici, additivi, al fine di realizzare un prodotto che faccia presa ed indurisca in modo più rapido rispetto alle malte convenzionali (acceleranti di presa e di indurimento) e che sia tale da rendere trascurabile il fenomeno del ritiro che è la prima causa delle fessure. In sostituzione ai sottofondi tradizionali è possibile eseguire sottofondi speciali purché vengano corrisposte le seguenti prescrizioni:

- la stratificazione del conglomerato non dovrà screpolare anche se di spessore sottile;
- i conglomerati dovranno presentare determinate resistenze minime a compressione e a flessione a 2, 7 e 28 giorni di maturazione;
- l'inizio della presa dei conglomerati dovrà intervenire dopo un prestabilito tempo (circa tre ore dall'impasto);
- l'essiccamento dei conglomerati, seconda della stagione, dovrà verificarsi prestabiliti numeri di giorni;
- l'idratazione e l'indurimento dovrà aver luogo senza che la stratificazione del conglomerato subisca ritiri;
- la stratificazione del conglomerato dovrà essere insensibile alle variazioni di temperatura da 0 ad 80 °C;
- lo spessore minimo della stratificazione di sottofondo non dovrà essere inferiore a 2cm.

Oltre a queste prescrizioni generali ci sono altre osservanze da rispettare per ottenere un prodotto tale da garantire il soddisfacimento di tutti i requisiti prestazionali ad esso richiesto; nella fattispecie si dovrebbe:

- eseguire la messa in opera della malta durante le ore più fresche del mattino e della sera se si presentano temperature diurne notevolmente elevate;
- la messa in opera della malta, nel caso in cui le temperature scendano al di sotto dello zero, dovrà essere sospesa (evitare il rischio di gelo);
- i sottofondi posti all'esterno dovranno essere protetti dall'azione diretta dei raggi solari per il tempo necessario alla normale presa ed indurimento della malta, ed all'occorrenza dovranno essere mantenuti leggermente bagnati nei primi giorni; dovranno anche essere protetti, con idonei provvedimenti, sia dal vento che dalla pioggia violenta.

Entrambe le tipologie di malte devono formare un piano di posa regolare ed omogeneo senza irregolarità nella struttura per garantire la ripartizione uniforme dei carichi a cui saranno soggetti gli elementi del rivestimento e, inoltre, deve funzionare da collante per garantire l'aderenza tra la struttura e il rivestimento.



Figura 2.3 – Malta per sottofondo

2.4.2.4 Malta per decorazioni

Il termine “stucco” indica una tipologia di decorazione superficiale a rilievo, realizzata in materiale plastico bianco ed eventualmente colorato con pigmenti, che indurisce all'aria. È importante sottolineare che questa definizione si riferisce a un materiale realizzato sia con leganti derivati da rocce carbonatiche che solfatiche. Nel primo caso lo stucco può essere costituito da una malta di grassello di calce addizionata di polvere fine di marmo cristallino, impastata con acqua per raggiungere una consistenza plastica e malleabile. Lo stucco è quindi in genere di colore bianco, ma può essere anche pigmentato con tinte minerali, sia al momento della miscelazione che dopo la presa sulla parte finita. Il grassello di calce va scelto tra quello di migliore qualità, ricavato sempre dalla cottura di calcari bianchi puri a grana microcristallina, mentre le polveri di marmo che fungono da aggregato devono essere fini e ben classate. Prima dell'operazione di impasto, il legante viene "spatolato" con sola acqua, su una lastra piana per eliminare ogni parte grossolana e successivamente va aggiunto l'aggregato, mescolando accuratamente affinché non si formino grumi e i singoli grani aderiscano al grassello. L'impasto di finitura esterno (stucco vero e proprio) ha un rapporto legante/aggregato di 1/1 o 1/1.5, mentre per gli strati più interni di supporto (nel caso di strutture decorative in aggetto) il rapporto è variabile e come aggregato viene utilizzata sabbia silicea, cocchiopesto o pozzolana. Le tecniche di lavorazione dell'impasto possono essere di due tipi: modellamento a mano oppure formatura entro stampi; in entrambi i casi i particolari vengono aggiunti successivamente, adoperando spatole di varie dimensioni. Usati dai Greci di età classica, furono particolarmente diffusi dal IV sec. a. C. per la decorazione di case o di monumenti funerari. Per la realizzazione degli stucchi sembra che i Greci utilizzassero prevalentemente rocce calcaree e, in misura minore, solfatiche.

2.4.2.5 Malte da restauro

Una delle applicazioni più interessanti è quella relativa all'impiego negli interventi di restauro. E' facilmente comprensibile come nell'edilizia moderna sia necessario realizzare e mettere in opera impasti che conducano ad un prodotto finito con caratteristiche di durabilità e con un buon aspetto estetico. A maggior ragione ciò deve avvenire in un intervento di restauro dove, oltre alla durabilità e all'aspetto estetico è necessario non danneggiare l'oggetto su cui si interviene. Ciò comporta

che la malta da restauro debba essere compatibile con i materiali con cui viene a contatto che possono essere altre malte, laterizi, pietre ecc. La compatibilità in particolare deve soddisfare tre aspetti, quello compositivo, fisico e meccanico. A questo scopo, prima di realizzare e mettere in opera la nuova malta da restauro è indispensabile caratterizzare i tre aspetti sopra menzionati e i materiali antichi con cui questa verrà in contatto. La classificazione delle malte da restauro distingue:

- malte per restauro di murature;
- allettamento di elementi murari;
- stilatura;
- riempimento di vuoti o discontinuità del sistema murario;
- protezione del culmine dei muri;
- malte per restauro di intonaci (rifacimento di porzioni di intonaco con riproposizione dei diversi strati se presenti);
- malte per l'applicazione di rivestimenti, cioè malte da impiegarsi per ricollocare pavimentazioni, rivestimenti di pareti ed altri elementi architettonici;
- malte per il restauro di decorazioni, cioè malte per l'integrazione di elementi architettonici a spessore, in rilievo ecc.;
- malte per stuccature e sigillature, cioè malte utilizzate per il riempimento di fratture, fessure, piccole lacune che comunque non siano in movimento;
- malte per iniezione, cioè malte fluide caratterizzate da bassa viscosità applicabili a bassa pressione attraverso discontinuità o fori di piccole dimensioni con la prevalente finalità di riempire vuoti o discontinuità non superficiali o allo scopo di far aderire tra loro strati diversi.

Le malte da restauro possono inoltre essere distinte nei seguenti tipi:

- premiscelate secche;
- premiscelate umide;
- predosate;
- confezionate a piè d'opera.

Prima dell'impiego dovranno essere esaminate le seguenti caratteristiche: allo stato fresco la lavorabilità, la ritenzione d'acqua, la stabilità di volume, la massa volumica apparente e la consistenza, mentre allo stato indurito i sali solubili, la predisposizione alla formazione di efflorescenze, oltre a tutte le analisi fisiche relative all'assorbimento di acqua e alla porosità (massa volumica apparente e massa volumica reale, permeabilità al vapor d'acqua, assorbimento d'acqua per capillarità, assorbimento d'acqua per immersione totale, coefficiente di imbibizione, porosità totale). E' necessario sottolineare che le malte devono avere caratteristiche fisico meccaniche (porosità, carico di rottura, modulo elastico, coefficiente di dilatazione termica, permeabilità al vapor d'acqua) compatibili con quelle del materiale con cui vengono a contatto. Ciò significa che la malta da restauro deve "ricevere il degrado" e non fornirlo alla malta storica. A questo scopo è preferibile che la malta con cui si interviene abbia caratteristiche meccaniche inferiori rispetto al materiale su cui si applica, mentre per quanto riguarda la permeabilità al vapor d'acqua, questa deve essere inferiore in modo tale che il vapor d'acqua sia assorbito preferibilmente dalla malta antica che quindi lo può cedere, allo stato liquido, alla malta moderna trasportando così eventuali sali solubili. Riguardo ai leganti, nelle malte da restauro è frequente l'utilizzo di sostanze organiche.



Figura 2.4 – Malte da restauro

2.4.2.6 Malte a ritiro controllato

Malta idraulica composta di cemento, aggregati e additivo superfluidificante. Talvolta è presente anche un agente espansivo. Possono essere fibrorinforzate, a presa e indurimento rapido, a comportamento tixotropico. Alcune versioni sono formulate con prodotti elastomerici che garantiscono alla malta notevole flessibilità in opera. Nelle diverse versioni trova utilizzo:

- per rappezzi e rifacimenti corticali di superfici in calcestruzzo degradate;
- per regolarizzare superfici di calcestruzzo;
- per la formazione di massetti sia galleggianti sia aderenti.

2.4.2.7 Malta impermeabilizzante

Malta costituita da cemento, aggregati fini, additivi riduttori di acqua e additivi idrofughi. In molti casi si tratta di additivi polifunzionali o di miscele studiate per ottenere particolari prestazioni in termini di impermeabilità all'acqua, resistenza agli agenti chimici, adesività al supporto, compattezza finale. Nella versione elastica è indicata per proteggere il calcestruzzo con rivestimenti di elevata flessibilità.



Figura 2.5 – Malta impermeabilizzante

2.4.2.8 Malta espansiva

Malta idraulica tradizionale, con aggiunta di agente espansivo e di superfluidificante, utilizzata per ancoraggi nel calcestruzzo di macchinari, strutture metalliche prefabbricate, macchine utensili. Questa malta consente di realizzare conglomerati capaci di compensare sia il ritiro plastico sia il ritiro idraulico. E anche utilizzata per eseguire, mediante iniezione, riempimenti di cavità, fessure in calcestruzzo, rocce, murature. Il componente che conferisce alla malta l'espansione è l'agente espansivo, presente in percentuali variabili. Si tratta,

nella maggior parte dei casi, di formulati a base di solfoalluminati o di calce o magnesia stracotta o di polveri metalliche.

2.4.2.9 Malta a presa rapida

Sono oggi disponibili sul mercato malte a presa rapida o medio-rapida. Al di là delle differenze che possono contraddistinguere i diversi prodotti oggi in commercio, il componente principale è il legante composto da miscele di cemento portland e cemento alluminoso. Sono caratterizzati da tempi di presa molto brevi e prestazioni iniziali elevate, già nell'arco di poche decine di minuti. L'utilizzo delle malte a presa rapida va dal fissaggio di elementi metallici agli interventi di ripristino. Nella tixotropica è utilizzata per fissaggi rapidi su superfici verticali.

2.4.2.10 Malta a rapidissimo indurimento

E' a base cementizia, con aggiunte di alcali che accelerano la presa e l'indurimento. E' utilizzata per tamponare perdite di acqua, anche in pressione, in scantinati, gallerie e sottopassi.

2.4.2.11 Malta per incollaggio o per rivestimenti sottili

Malta adesiva, mono o bicomponente, costituita da aggregati a granulometria fine, cementi e polimeri sintetici. Esse consentono:

- l'incollaggio di elementi non strutturali (piastrelle, pannelli isolanti);
- la regolarizzazione di superfici di getti di calcestruzzo o pannelli di elementi prefabbricati con imperfezioni, porosità o zone erose o deteriorate di piccola profondità;
- la rasatura turapori del calcestruzzo per la successiva applicazione di verniciature o rivestimenti;
- il rivestimento di protezione del calcestruzzo non armato contro aggressioni di lieve entità (atmosfera marine e industriali);
- l'impermeabilizzazione di vasche e canali con limitata pressione idraulica positiva.

Nella versione autolivellante è utilizzabile per la finitura di massetti orizzontali e la successiva posa di pavimenti. Nella versione tixotropica per l'utilizzo su pareti verticali o inclinate.

2.4.2.12 Malta di asfalto per massetti

Si tratta di una massa applicata a caldo costituita da bitume, ghiaietta, sabbia e filler. Il massetto è posto in opera a una temperatura di 180-220 °C nello spessore di 2-3 cm. Questi massetti a base di asfalto presentano impermeabilità all'acqua e al vapore e buone caratteristiche isolanti.

2.4.2.13 Malta espansiva per demolizioni

Trattasi di malta molto espansiva da utilizzarsi, in alternativa a esplosivi, per demolire o tagliare rocce e calcestruzzi, con pressioni di spinta fino a 800 kg/cm². Consentono di lavorare in condizioni di assoluta sicurezza e precisione di taglio.

2.4.2.14 Malte per usi speciali

Le malte per usi speciali possono essere suddivise in: malte da iniezione, malte attivate e malte spruzzate. Le malte da iniezione si utilizzano per colmare fessure e vuoti (per esempio negli interventi di restauro e di consolidamento di rivestimenti e di strutture murarie), per consolidare e impermeabilizzare i terreni,

per riempire le guaine dei cavi di precompressione, ecc.. Esse sono ottenute con l'aggiunta di sostanze argillose finissime (bentonite) che le rendono molto fluide quando sono in movimento e le riducono a una sorta di gelatina quando sono ferme; tutto ciò a differenza delle paste di cemento che tendono a sedimentare, specialmente quando sono troppo fluide. Le malte attivate vengono utilizzate in quegli impieghi particolari nei quali occorre evitare in modo assoluto la formazione di grumi tra le particelle della miscela o la segregazione dei componenti della malta. Queste malte hanno una stabilità e un'omogeneità preservate per via chimica, attraverso speciali prodotti anticoagulanti, oppure per via meccanica, mediante l'uso di una particolare pompa centrifuga ad alta velocità per la miscelazione dei componenti. Le malte attivate sono usate per opere di consolidamento, fondazioni subacquee e speciali tipi di rivestimenti, nei quali vengono prima posati gli elementi, e poi riempiti i vuoti restanti con la malta fino a fissarli saldamente. Le malte spruzzate sono quelle malte trasportate pneumaticamente con tubazioni dall'impianto di mescolamento al luogo di posa in opera, dove vengono applicate sotto pressione. Sono impiegate per formare rivestimenti di pareti curve, serbatoi, canali, piscine, cunicoli, pozzi, ecc.. Esistono due sistemi di spruzzatura: nel primo sistema, detto per via secca, il legante e la sabbia sono mescolati intimamente tra di loro e spinti con aria compressa attraverso un iniettore, dove confluisce l'acqua, in modo che la malta così ottenuta colpisca con forza la superficie da rivestire aderendovi saldamente. Nel secondo sistema, detto per via umida, l'acqua viene subito aggiunta alla miscela e, dopo un accurato impasto, la malta viene proiettata con l'aria compressa con risultati analoghi a quelli descritti.

2.5 Tecniche di confezionamento

Come per tutti i conglomerati cementizi, l'ottenimento di manufatti di buona qualità dipende da una serie di fattori in grado di influenzare significativamente le caratteristiche prestazionali del prodotto allo stato fresco ed indurito. Oltre alla qualità dei singoli materiali, molto dipende anche dalla buona progettazione, dai dosaggi, dal corretto confezionamento, dalla corretta messa in opera, ecc.

2.5.1 Dosaggi

Il confezionamento delle malte, viene eseguito, in genere, dosando gli elementi costituenti in base al volume, che per alcuni di essi è influenzato dalle condizioni ambientali. E' conveniente per tanto precisare le condizioni termo - igrometriche in cui si sta lavorando. Generalmente si considera la sabbia umida e non viene fatta alcuna operazione per variare il potere volumizzante. Adoperando una sabbia più grossolana con l'aggiunta di calce idrata a secco, le proporzioni di calce devono essere aumentate a partire dal 50%, è possibile anche, aggiungere la calce con un plastificante. La dosatura deve avvenire mediante apposite casse di dosaggio, evitando metodi approssimativi che possono compromettere le caratteristiche del prodotto finito. Un altro sistema tradizionale è quello di esprimere le dosi delle malte in chilogrammi di legante per metro cubo di sabbia, dove l'acqua è espressa in litri. Nelle industrie di preparazione delle malte premiscelate i dosaggi sono effettuati ovviamente in peso.

2.5.2 Confezionamento delle malte

Le malte possono essere confezionate in laboratorio per fini sperimentali, ovvero in cantiere o industrie per fini pratici. In ogni caso la composizione dell'impasto

per la malta deve essere tale da permettere una facile applicazione, funzionalità e durabilità del materiale. Durante l'impasto non dovranno mai essere usati materiali induriti o in fase di indurimento, oppure gelati. La miscelazione deve essere continua fino all'ottenimento di un impasto omogeneo e lavorabile. Sul cantiere la preparazione della malta deve avvenire miscelando il grassello di calce con sabbia silicea non assorbente e di granulometria adeguata, cui deve essere aggiunta una quantità di acqua sufficiente per creare un impasto cremoso e facilmente lavorabile. L'inerte deve essere pulito e asciutto, privo di impurità e di sostanze organiche, a granulometria ben assortita. Deve possedere adeguate caratteristiche di resistenza, in quanto deve sostenere il legante e distribuire le tensioni dovute al ritiro durante la fase di indurimento. L'acqua di impasto deve essere pulita e trasparente, meglio se proveniente dalla rete idrica. La malta è pronta dopo poche rotazioni, quando ha raggiunto un aspetto cremoso e un colore omogeneo. La malta a base di legante aereo può essere conservata a lungo dopo la preparazione, purché venga isolata dall'aria mediante un sottile strato d'acqua.

2.5.3 Caratteristiche dell'impasto

Un buon impasto di malta deve possedere le seguenti caratteristiche:

- avere una consistenza tale da favorire l'applicazione;
- aderire alla struttura senza produrre l'effetto "crollo" e legarsi opportunamente a questa durante la presa;
- essere sufficientemente resistente per far fronte all'erosione, agli inconvenienti di origine meccanica e al degrado in genere;
- contenere il più possibile l'eventuale ritiro;
- opporsi al passaggio dell'acqua, senza essere completamente impermeabile, ma permettendo alla parete la necessaria traspirazione dall'interno all'esterno;
- avere un aspetto uniforme e gradevole.

2.5.4 Caratteristiche di biocompatibilità delle malte

Al fine di influenzare beneficamente il microclima abitativo e consentire l'interazione uomo-edificio-ambiente, le malte impiegate nell'edilizia devono possedere i seguenti requisiti:

- Naturale porosità, il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume totale del materiale deve consentire un'adeguata traspirabilità.
- Buona traspirabilità, capacità di avere un elevato scambio igrometrico con l'ambiente in grado di regolare le variazioni di umidità.
- Capacità igroscopica, potere di assorbire vapore acqueo o umidità dall'aria e di cederlo all'esterno.
- Buona coibenza termica, capacità di non disperdere il calore accumulato.
- Protezione acustica, protezione dai rumori in generale, con particolare riguardo alla risonanza, alla riflessione sonora ed al riverbero.
- Riciclabilità, possibilità di riutilizzo delle materie prime impiegate.
- Atossicità, assenza di sostanze tossiche nella composizione (composti organici volatili, gas, composti aromatici, fibre o particelle radioattive), che possono essere rilasciate nell'ambiente.
- Basso inquinamento, contaminazione dell'acqua, dell'atmosfera, ecc. nelle diverse fasi del ciclo di vita (pre-produzione, produzione, utilizzo e dismissione).

- Ridotto consumo energetico, nelle fasi del processo produttivo.
- Salvaguardia delle risorse naturali, diffusa reperibilità delle materie prime impiegate, basso impatto ambientale.
- Non schermanti, cioè non in grado di ostacolare il naturale campo elettromagnetico terrestre.

Manutenibilità, pulibilità del prodotto in uso.

2.6 Riferimenti normativi

Le norme tecniche per le costruzioni approvate con Decreto Ministeriale del 14.01.2008 (DM2008) rappresentano attualmente il principale strumento di progettazione, appunto, nell'ambito delle costruzioni civili. Queste norme, per quanto riguarda le malte, confermano il riferimento alla norma UNI EN 998-2, che prevede una classificazione delle malte per muratura. In particolare, secondo quest'ultimo disposto normativo, le malte devono possedere un attestato di conformità (marcatore CE) diverso in base all'uso della malta stessa: 2+ per malte ad uso strutturale, 4 per malte ad uso non strutturale. Il sistema di attestazione 2+ è la certificazione del controllo di produzione in fabbrica, mentre il sistema 4 si basa sull'autodichiarazione del produttore. Comunque, la durabilità delle malte per muratura deve essere garantita dall'assenza di sostanze organiche o grassi o terrose o argillose. La resistenza media a compressione è, invece, il parametro che caratterizza le prestazioni meccaniche di una malta; in base a tale parametro le malte sono classificate con una sigla composta dalla lettera M e da un numero che indica la resistenza a compressione espressa in N/mm^2 (M2.5, M5, M15, M20 e d per malte con resistenza superiore a $25N/mm^2$). Nel DM 2008 viene, inoltre, introdotta la definizione di "malta a composizione prescritta", con riferimento alla composizione in volume (tabella 2.4).

Classe	Tipo di malta	Composizione				
		Cemento	Calce aerea	Calce idraulica	Sabbia	Pozzolana
M 2,5	Idraulica	--	--	1	3	--
M 2,5	Pozzolonica	--	1	--	--	3
M 2,5	Bastarda	1	--	2	9	--
M 5	Bastarda	1	--	1	5	--
M 8	Cementizia	2	--	1	8	--
M 12	Cementizia	1	--	--	3	--

Tabella 2.4 – Classi di malte a composizione prescritta

Per quanto riguarda i materiali la normativa prescrive che:

- l'acqua degli impasti deve essere limpida, priva di sostanze organiche o grassi, non deve essere aggressiva né contenere solfati o cloruri in percentuale dannosa;
- la sabbia da impiegare per il confezionamento delle malte deve essere priva di sostanze organiche, terrose o argillose.

L'impiego di malte premiscelate pronte per l'uso è consentito purché ogni fornitura sia certificata dal fornitore con indicazione del gruppo della malta, il tipo e la quantità dei leganti e degli eventuali additivi. Alla malta si può aggiungere una piccola quantità di calce aerea con funzione plastificante. Oltre il DM 2008 esistono una serie di normative UNI, valide ai fini tecnici nel territorio italiano oppure le norme EN (oppure UNI EN) valide in ambito europeo. Esistono anche una serie di documenti tecnici con valenza di "raccomandazioni" da utilizzare per

ottenere dei manufatti a “perfetta regola d’arte”. Vi sono, infine, una serie di normative specifiche utilizzabili in alcuni campi specialistici. Ad ogni buon fine, si riportano di seguito i principali disposti normativi sulle malte:

- UNI EN 998-1: Specifiche per malte per opere murarie – Malte per intonaci interni ed esterni.
- UNI EN 998-2: Specifiche per malte per opere murarie – Malte da muratura.
- UNI EN 1015: Metodi di prova per malte per opere murarie.
- UNI 11088: Beni culturali - Malte storiche e da restauro - Caratterizzazione chimica di una malta.
- UNI 11089: Beni culturali - Malte storiche e da restauro - Stima della composizione di alcune tipologie di malte.
- UNI 11139: Beni culturali - Malte storiche - Determinazione del contenuto di calce libera e di magnesia libera.
- UNI 11139: Malte storiche - Determinazione della calce libera e di magnesio libero.
- UNI 11140: Beni culturali - Malte storiche - Determinazione del contenuto di anidride carbonica.
- UNI EN 13139: Aggregati per malta.

Capitolo 3

I Calcestruzzi

3.1 Cenni sul calcestruzzo ordinario

Il notevole pregio riconosciuto al calcestruzzo dai suoi primi utilizzatori è stata la possibilità di ottenere rocce artificiali di qualsivoglia forma durevoli nel tempo. Nella tecnica edilizia romana è stato inventato e adoperato per la prima volta il “cementizio”, ossia una miscela di malta (calce mescolata con sabbia o pozzolana) e “coementa”, ossia sassi o schegge di pietra. La notevole diffusione del calcestruzzo si è, però, avuta con l'avvento del “cemento armato” (calcestruzzo armato) ed in particolare con la scoperta del cemento così per come lo conosciamo noi oggi. Come è noto, il calcestruzzo da solo ha ottima resistenza a compressione, ma scadente resistenza a trazione e questo ne ha limitato l'uso per millenni. Durante la prima metà dell'800, però, si incominciò ad annegare barre di acciaio in una matrice di calcestruzzo ottenendo uno dei primi esempi di materiali compositi, in cui due differenti materiali partecipano insieme per contribuire in modo diverso nella resistenza alle varie sollecitazioni. L'acciaio conferisce al composto quella resistenza alla trazione ed alla flessione di cui è carente il calcestruzzo, mentre il conglomerato cementizio si occupa della resistenza agli sforzi normali di compressione. La svolta vera e propria si ha nel 1924 con un muratore inglese, Joseph Aspdin, con la scoperta del cemento Portland, così chiamato perché la massa ottenuta assomigliava alla roccia dell'isola di Portland. Negli ultimi decenni la tecnologia del calcestruzzo si è notevolmente evoluta in seguito all'introduzione di aggiunte e additivi, materiali che hanno modificato il comportamento e le prestazioni delle miscele. Oggi il calcestruzzo ed in particolare il calcestruzzo armato è sicuramente il materiale da costruzione più utilizzato in assoluto e moltissime sono le applicazioni, come moltissimi sono gli studi su questo materiale. Un'ulteriore decisa evoluzione nell'utilizzo del materiale si ha nel passaggio da un criterio quantitativo della caratterizzazione delle miscele (sostanzialmente il contenuto di cemento) ad un criterio prestazionale basato su prove di rottura e su una qualifica preliminare degli impasti.

3.2 Generalità

Le strutture in calcestruzzo sono formate con materiale composito costituito da una matrice lapidea tridimensionale. La matrice o getto è ottenuta con impasto di:

- aggregati naturali od artificiali di forma tondeggianti o spigolosa con dimensioni selezionate (ghiaia, ghiaietto, sabbia);
- di cemento, di diversa tipologia e classe di resistenza;
- di acqua;
- eventuali additivi.

La miscela è confezionata con appositi mescolatori ed è posta in opera all'interno delle casseforme che delimitano la geometria della struttura.

Condizione essenziale per la resistenza è la compattezza del getto che viene ottenuta mediante opportuni attrezzi meccanici (vibratori) ed agenti fisici e chimici (additivi); il rapporto acqua/cemento (a/c) deve risultare il più basso possibile per ridurre i fenomeni conseguenti alla cessione all'atmosfera dell'acqua in eccesso. Tuttavia, non deve risultare troppo basso in quanto, comunque, occorre idratare il cemento e dare all'impasto una sufficiente lavorabilità. I costituenti fondamentali del cemento sono dei silicati, alluminati e ferriti di calcio che, reagendo con l'acqua, danno luogo a prodotti idrati solubili e forniti di proprietà agglomeranti. Nella reazione tra cemento e acqua, si distinguono:

- una fase iniziale di consolidamento chiamata presa che è caratterizzata ancora da una certa plasticità e che inizia dopo circa 30-45 minuti dall'impasto e termina in genere dopo 10-12 ore;
- una fase di indurimento che segue la precedente e che può durare molto tempo (anche anni), ma i cui risultati pratici si possono ottenere entro alcune settimane.

Le percentuali dei componenti nella miscela, il contenuto di acqua e di cemento devono essere determinati in relazione alle condizioni di impiego del calcestruzzo (classi di esposizione del calcestruzzo). La lavorabilità è individuabile con numerose procedure di cui quella più nota è quella dello slump test, in cui si misura in centimetri l'abbassamento della sommità di un tronco di cono riempito di calcestruzzo dovuto alla rimozione del contenitore determinando, quindi, la consistenza dell'impasto. I composti vengono preventivamente miscelati a secco e successivamente vengono aggiunti l'acqua e gli additivi. Tale operazione, denominata betonaggio, viene effettuata spesso in miscelatori ad asse sub-orizzontale (betoniere) o verticale e richiede in genere almeno qualche minuto. La miscela può essere confezionata in un impianto fisso e convogliata in cantiere tramite auto-betoniera, il trasporto sulla posizione di getto avviene mediante mezzi meccanici quali nastri trasportatori, canali inclinati, apposite pompe. La posa in opera deve garantire la massima compattezza del getto perciò, dopo il getto, si interviene con mezzi meccanici che rendono momentaneamente fluido l'impasto consentendo l'espulsione delle grosse bolle d'aria ed il riempimento delle cavità; la vibrazione è essenziale nel caso di forte percentuale di armatura per assicurare il completo inglobamento della stessa nel calcestruzzo. Nel caso di clima molto caldo (oltre i 40°C) si devono impiegare cementi a basso calore di idratazione e, in certi casi, provvedere al raffreddamento della miscela con appositi impianti (per grandi masse) o introducendo ghiaccio invece di acqua nel mescolatore. La presa e l'inizio dell'indurimento del calcestruzzo devono avvenire in ambiente umido per prevenire la perdita di acqua che renderebbe incompleta l'idratazione del cemento; pertanto, i getti all'aperto dovrebbero essere protetti con teli o innaffiati frequentemente. Analoghe cautele devono essere prese con temperature prossime allo 0°C per evitare la formazione di ghiaccio all'interno della miscela con effetti distruttivi; non è consigliabile porre in opera calcestruzzo con temperature inferiori a -5°C. Il confezionamento del calcestruzzo è oggi effettuato nelle centrali di betonaggio, volgarmente dette

cementifici, o in appositi impianti in cantiere, ed è quasi scomparso il confezionamento artigianale, se non per piccolissime quantità. Oggi si tende, infatti, a richiedere un calcestruzzo con prestazioni ben definite e la sua composizione, in base ai requisiti che esso dovrà possedere, è oggetto di un apposito studio, chiamato mix design, che tiene conto di numerose variabili quali resistenza, durabilità, aggressività dell'ambiente, contenuto d'aria inglobata, rapporto acqua/cemento, additivi e via dicendo. Il calcestruzzo, una volta confezionato, ha l'apparenza di un fluido denso privo di forma: la cassaforma serve, appunto, a dare forma al materiale composito. Una volta messo a riposo nella cassaforma, il calcestruzzo ha bisogno di maturare per un certo periodo di tempo prima che queste possano essere rimosse (15-30 giorni). È questo il periodo in cui l'acqua reagisce con il cemento generando il fenomeno dell'idratazione che trasforma i granelli di cemento in cristalli che, interagendo tra loro, induriscono il manufatto. Durante la maturazione è bene non accelerare né rallentare eccessivamente l'evaporazione dell'acqua, perché il primo caso può generare lesioni, il secondo può impedire una corretta idratazione dell'intero conglomerato. Gli additivi nel conglomerato sono scelti anche in base al clima durante il quale dovrà avvenire la maturazione del calcestruzzo, onde evitare i predetti problemi. Si deve oltretutto fare attenzione allo spessore del manufatto: se l'elemento strutturale che stiamo gettando ha il lato minore molto grande (superiore a 60-70 cm) la parte centrale del conglomerato può non arrivare ad avere contatto con l'ossigeno, rimanendo, di fatto, molle. Questo fenomeno verificava spesso nelle strutture romane, che raggiungevano tranquillamente spessori superiori ai 2 m. Il Pantheon, per esempio, ha questa caratteristica: la parte centrale dei muri più spessi (spessore maggiore di 4 m) non ha mai completato il processo di idratazione ed è ancora allo stato semi-solido, dopo 1900 anni.



Figura 3.1 - Il Pantheon, Roma (27 a.c.) ed una moderna struttura in calcestruzzo armato

3.3 Materiali

Il calcestruzzo è essenzialmente composto da: cemento, acqua, aggregati ed eventualmente additivi. Il cemento fa parte della categoria dei leganti di tipo idraulico. Il cemento è un materiale inorganico finemente macinato che, mescolato con acqua, forma una pasta che rapprende e indurisce a seguito di

reazioni e processi di idratazione e che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott'acqua. L'indurimento idraulico del cemento è dovuto principalmente all'idratazione dei silicati di calcio, ma anche di altri composti chimici come ad esempio gli alluminati. La polvere di cemento è costituita da piccoli granuli di materiale differente ma di composizione statisticamente omogenea. Oggi, i cementi presenti sul mercato sono molteplici; il tipo di cemento dipende dagli ingredienti impiegati nella produzione e dalla loro proporzione. Ciascun tipo di cemento può essere fornito in diverse classi di resistenza: 32,5 N; 32,5 R; 42,5 N; 42,5 R; 52,5 N e 52,5 R. Il numero (32,5, 42,5 oppure 52,5) individua la soglia minima di resistenza meccanica a compressione a 28 giorni, in N/mm^2 , misurata secondo una procedura standard di confezionamento di malte, mentre la lettera N o R distingue, rispettivamente, i cementi a normale indurimento da quelli a rapido indurimento. Tutti i tipi di cemento possono essere utilizzati nella produzione di calcestruzzi. I cementi presenti sul mercato sono molteplici, ma si può affermare che il più diffuso è senza dubbio quello di tipo Portland ottenibile per calcinazione ad elevata temperatura (1400-1500°C) di miscele di calcare ed argille (Cemento Portland). Il cemento pozzolanico si ottiene aggiungendo al Clinker di cemento Portland della pozzolana, ossia un tipo di roccia sedimentaria di origine vulcanica che assume proprietà leganti in presenza del Clinker. I cementi pozzolanici sotto alcuni aspetti sono migliori dei cementi Portland; il motivo principale consiste nell'avere, a parità di altri fattori, una durabilità maggiore dovuta all'assenza di $Ca(OH)_2$ nella pasta indurita (20-25% nel cemento Portland, qualche % nel cemento pozzolanico) responsabile della reazione dei solfati con gli alluminati per la formazione di ettringite espansiva e del dilavamento. Inoltre, i cementi pozzolanici presentano un minor calore di idratazione che in alcune situazioni pratiche può essere di grande aiuto per la riuscita dell'opera. Affinché si abbia cemento pozzolanico è necessario utilizzare una quantità di pozzolana compresa tra 35-55%. Dalla lavorazione della ghisa si formano delle scorie dette "loppe" (loppa basica granulata d'altoforno) che in aggiunta al Clinker assumono proprietà leganti: da qui si ha il cemento alla loppa. La quantità di scorie utilizzate nella formazione del cemento varia in un intervallo tra 36 e 95% e per la preparazione si macinano insieme in maniera molto fine ed omogenea sia clinker che loppe a differenza del cemento pozzolanico dove l'aggiunta di pozzolana difficilmente arriva all'ordine del 50%. Ciò dipende dal fatto che la loppa può idratarsi da sola, a patto che la fase acquosa contenga sostanze capaci di innescare la reazione tra loppa e acqua (attivatori). I vantaggi di un cemento alla loppa sono assimilabili a quelli del cemento pozzolanico. Loppa e pozzolana si aggiungono al clinker per motivi economici e perché conferiscono al cemento un aumento di resistenza e durabilità. Il cemento bianco è utilizzato soprattutto per conferire all'opera di calcestruzzo un pregio architettonico superiore rispetto al "classico" colore grigio cupo dei cementi tradizionali. Per questo motivo il cemento bianco o colorato trovano impiego nei lavori decorativi. Il clinker bianco viene prodotto con la precauzione di limitare a non più dello 0,15% il contenuto dei composti di ferro e di quello di altri metalli pesanti che conferiscono al cemento Portland la tipica colorazione grigiastrea. I cementi espansivi sono, invece, utilizzati quando si intende ridurre al minimo gli effetti del ritiro del calcestruzzo. Con un cemento "normale", a causa del ritiro, risulta molto difficile mettere in opera manufatti monolitici quali strade, pensiline, ecc., e, inoltre, non consente un collegamento efficace tra getto nuovo e vecchio. In un cemento espansivo si cerca di sfruttare

l'effetto benevolo delle reazioni che avvengono nel cemento con aumento di volume, come ad esempio la formazione di ettringite. Per sfruttare queste proprietà occorre che queste si manifestino in un giusto intervallo di tempo, come per creare una pre-sollecitazione nel calcestruzzo (non velocemente perché l'energia si dissiperebbe nella massa plastica, non molto lentamente perché il fenomeno provocherebbe fessurazioni e disgregazione dell'opera). Il cemento alluminoso è un cemento più costoso ed è usato solo per usi particolari, come ad esempio il rivestimento di forni o come malte di giunzione per mattoni refrattari.

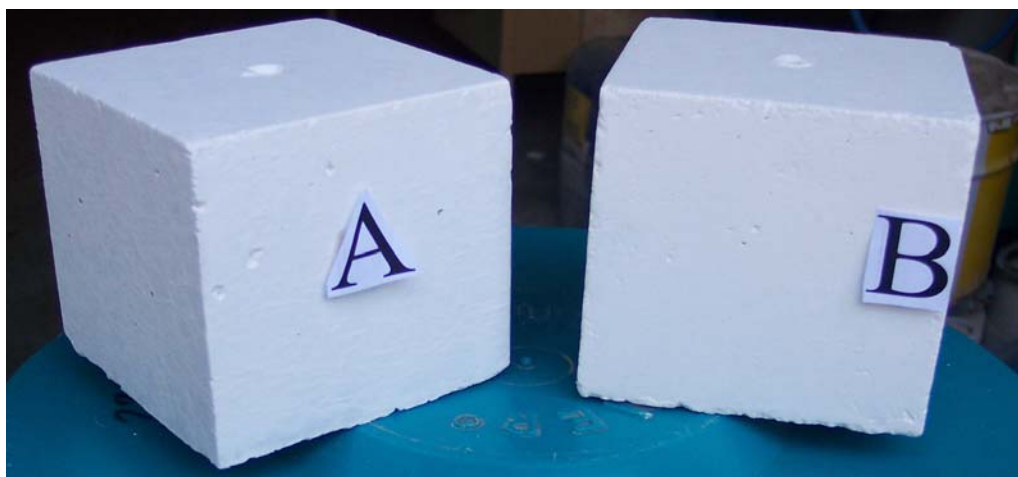


Figura 3.2 - Provini di calcestruzzo realizzati con cemento bianco

I cementi alluminosi possiedono un'elevata resistenza iniziale e elevata durabilità agli attacchi solfatici, ma a causa di diversi fallimenti dovuti alla perdita di resistenza nel tempo, l'uso è limitato. Il principale componente di questi cementi è l'alluminato monocalcico che ha un comportamento idraulico superiore rispetto a quello dei componenti del clinker. Il cemento alluminoso per via di queste caratteristiche è utilizzato spesso nelle opere a carattere provvisorio e di estrema urgenza in quanto possiede anche un tempo di presa assai ridotto. Gli aggregati occupano mediamente i due terzi dell'intero volume dell'impasto di calcestruzzo, quindi, ricoprono un ruolo molto importante. Per aggregati si intendono tutti quei materiali, naturali o di frantoio, che servono per dare corpo al conglomerato cementizio. All'interno degli aggregati si possono distinguere:

- sabbia (materiale litoide fine, naturale o ottenuto per frantumazione dei pietrischi o ghiaia con diametro compreso tra 0 e 5 mm con una curva granulometrica omogeneamente distribuita; generalmente è di natura silicatica);
- ghiaia e pietrisco (aggregati di dimensioni grossolane comunque di dimensioni superiori alla sabbia; devono avere curve granulometriche omogenee e ben assortite al fine di evitare la formazione di porosità eccessivamente grandi da compromettere le proprietà meccaniche del calcestruzzo).

Il termine "aggregato", senza alcuna precisazione, include sia la frazione fine, sabbia, che quella grossa, ghiaia o pietrisco. L'aggregato deve essere bene assortito, in modo tale che i granuli più fini si possano allocare nei vuoti interstiziali presenti tra quelli dei granuli più grossi: si deve creare così uno scheletro di elementi lapidei con un contenuto di vuoti interstiziali relativamente ridotto. I vuoti residui si riempiono con la pasta di cemento. Le ragioni

dell'aggiunta dell'aggregato all'interno dell'impasto cementizio sono molteplici: esiste innanzitutto un motivo di carattere economico, in quanto l'inerte è molto meno costoso della pasta cementizia. Esistono, però, altre ragioni di carattere tecnico. La più importante, forse, riguarda il ritiro della pasta cementizia che, per aggiunta dell'aggregato, diminuisce in maniera proporzionale. Non meno importante e sottovalutabile, è l'aspetto della durabilità del conglomerato, che può essere migliorata sostituendo gran parte della pasta cementizia, materiale relativamente aggredibile dall'ambiente, con un materiale più durevole, qual è l'aggregato, qualora questo venga scelto in base a determinati requisiti di carattere fisico, meccanico e chimico. Tutti gli aggregati naturali provengono da una massa rocciosa più grande che a seguito di numerosi processi naturali od artificiali, come la frantumazione, è stata trasformata in frammenti lapidei. Per cui, gli aggregati posseggono una serie di proprietà, come composizione chimica e mineralogica, caratteristiche petrografiche, peso specifico, porosità, resistenza meccanica, colore, ecc., che dipendono da quelle della roccia a cui appartengono. Gli aggregati possono anche essere di origine artificiale, ottenuti per frantumazione di loppe di alto forno raffreddate lentamente o per pellettizzazione e sinterizzazione di ceneri volanti, o sintetici, come il polistirolo espanso. La norma UNI EN 206 individua anche gli aggregati leggeri, caratterizzati da una densità apparente inferiore a 2000 kg/m^3 e da una elevata porosità; questa ultima tipologia di aggregato è utilizzata per il confezionamento di calcestruzzi leggeri. Dunque, si può affermare che le proprietà meccaniche del calcestruzzo allo stato indurito, in relazione ai requisiti prestazionali richiesti, dipendono in maniera rilevante dalla qualità degli aggregati utilizzati. L'uso di aggregati scadenti, infatti, porterebbe alla rottura del calcestruzzo proprio per frantumazione degli stessi e, quindi, prima ancora del raggiungimento del livello prestazionale richiesto. Gli aggregati¹ disponibili devono essere combinati, cioè mescolati in opportune proporzioni, allo scopo di ottenere una distribuzione granulometrica finale adeguata per garantire le proprietà richieste al calcestruzzo, soprattutto in relazione alla lavorabilità. La distribuzione granulometrica degli aggregati viene determinata per vagliatura, usando una serie di vagli di diverse aperture. La norma EN 933 propone come serie di crivelli di riferimento per ottenere una distribuzione granulometrica la seguente serie (dimensioni in mm): 0.063, 0.125, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125. La serie americana ASTM propone valori leggermente diversi. Per eseguire l'analisi granulometrica, i vagli vengono sovrapposti con apertura crescente verso l'alto in un apparecchio che genera delle scosse e delle vibrazioni. Partendo da un peso di materiale noto, avvenuta la separazione delle particelle, si determinano le percentuali in peso di aggregato rimasto nei vagli. I dati sono in genere riportati in tabelle e rappresentati all'interno di opportune curve in funzione dell'apertura delle maglie e della percentuale di aggregato in esso trattenuto o passante. L'assortimento granulometrico degli aggregati dovrebbe contemporaneamente:

- garantire un volume minimo di vuoti fra le particelle, cioè massima densità in mucchio;
- assicurare la massima lavorabilità del calcestruzzo fresco;
- evitare la segregazione dell'impasto.

Purtroppo le condizioni di massima densità non corrispondono a quelle di massima scorrevolezza delle particelle, per cui sorge il problema di ottenere un comportamento ottimale fra le varie esigenze. Nel 1907 Fuller ha determinato la

¹ L.Bertolini, Materiali da costruzione, Volume I, Città Studi Edizioni, 2006

distribuzione granulometrica che porta alla minima percentuale di vuoti (considerando gli aggregati di natura sferica), quindi, con criterio di massima densità. Una distribuzione granulometrica di questo tipo non assicura però un'elevata lavorabilità del calcestruzzo, in quanto le particelle sono troppo addensate. Successivamente Boolomey ha suggerito di modificare la distribuzione di Fuller proponendo, per avere un maggior contenuto di fine, un'equazione che tiene conto anche della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato a disposizione. La scelta della distribuzione granulometrica dell'aggregato è una fase cruciale nella tecnologia del calcestruzzo; una distribuzione non corretta può compromettere la lavorabilità del calcestruzzo oppure la possibilità di essere trasportato mediante pompaggio. La distribuzione granulometrica ottimale, cioè quella che riesce a mediare tra le varie esigenze, dipende dal tipo di getto, dai mezzi di costipazione e dalla distribuzione granulometrica dei diversi tipi di aggregato di cui si dispone. Non esiste dunque una distribuzione granulometrica ottimale di validità generale, la scelta spetta a chi si occupa del getto della miscela.



Figura 3.3 Aggregati di pezzatura differente

L'acqua all'interno del calcestruzzo ha una funzione insostituibile in quanto opera la trasformazione del cemento tramite una graduale idratazione dei suoi granuli. La presenza dell'acqua è, dunque, indispensabile e determinante sia riguardo alla quantità che alla qualità, ai fini della riuscita dell'impasto. L'acqua da utilizzare nel confezionamento del calcestruzzo deve essere quanto più possibile pura e priva di sostanze nocive quali limo, argilla, humus, acidi organici, alcali e sali. L'acqua più sicura è perciò quella potabile, anche se sono comunque accettate quella di diversa provenienza purché venga accertata la loro idoneità. I principali effetti nocivi che possono generarsi sono:

- Variazione dei tempi di presa;
- Riduzione delle resistenze finali;
- Macchie superficiali;

- Corrosione delle armature.

Gli additivi sono dei prodotti che vengono aggiunti in piccole quantità per migliorare le proprietà del calcestruzzo e, soprattutto, la sua durabilità. Si può affermare che gli additivi non sono indispensabili per preparare un qualsiasi calcestruzzo, ma essi diventano un elemento essenziale accanto al cemento, l'acqua e gli aggregati per l'ottenimento del miglior calcestruzzo, dal punto di vista tecnologico, nelle condizioni economicamente più vantaggiose. Ricordiamo che nei Paesi dove la tecnologia del calcestruzzo è notevolmente sviluppata (Francia, Giappone, USA, Germania) la percentuale di calcestruzzo additivato supera l'80%. Si può, pertanto, affermare che l'additivo può essere considerato a tutti gli effetti il quarto componente del calcestruzzo. I principali additivi reperibili sul mercato sono:

- Additivi acceleranti;
- Additivi fluidificanti;
- Additivi aeranti;
- Additivi aeranti per calcestruzzi leggeri;
- Additivi per pompaggio di calcestruzzi;
- Additivi impermeabilizzanti;
- Additivi rigeneratori.

Nella produzione di calcestruzzi un ruolo fondamentale è interpretato dalle aggiunte minerali. Infatti, il raggiungimento dei requisiti prestazionali si basa, fondamentalmente, sul miglioramento delle caratteristiche della zona di transizione che, in genere, si presenta più porosa e instabile, soprattutto alle brevi stagionature. L'aggiunta di materiali minerali consente, grazie alle piccole particelle che li compongono, di gran lunga inferiori rispetto a quelle del cemento stesso, di ridurre sensibilmente la porosità del calcestruzzo. Qualora si dovessero confezionare calcestruzzi con elevati dosaggi di cemento, la sostituzione di parte di esso con tali aggiunte apporta notevoli vantaggi in termini di ritiro e calore di idratazione. Nei calcestruzzi autocompattanti, poi, a questi benefici, si aggiungono quelli derivanti da una migliore lavorabilità e stabilità degli impasti, in virtù di un maggiore equilibrio della pasta cementizia e alla migliore scorrevolezza grazie alla forma sferica delle particelle che frapponendosi tra gli aggregati riducono sensibilmente i fenomeni di attrito. Tra le principali aggiunte minerali si possono citare:

- la silice fume, che si ottiene come sottoprodotto della fabbricazione di leghe metalliche, come ad esempio quella ferro-silicio. Si presenta sotto forma di polvere di colore grigiastro ed è costituita da silice amorfa (85-90%), molto reattiva, le cui particelle sferiche hanno un diametro variabile tra 0,1 e 2 μm . L'area superficiale specifica varia da 15000 a 25000 m^2/Kg , superiore quindi a quella del cemento Portland ordinario che è di circa 1500 m^2/Kg . Il suo peso specifico è di circa 2200 Kg/m^3 . In commercio la silice fume si può reperire sia in polvere, sia in sospensione acquosa al 50%, sia in forma di polvere addensata. A causa della sua elevata attività pozzolanica si è pensato di impiegarla per confezionare conglomerati cementizi ad alta resistenza e caratterizzati da una buona durabilità. L'attività pozzolanica rappresenta l'attitudine all'indurimento mediante reazioni con l'acqua e la calce di idrolisi dei materiali pozzolanici. In genere la resistenza offerta, a lunga stagionatura, da un calcestruzzo con cemento e materiale pozzolanico è superiore a quella del

conglomerato con solo cemento Portland. Con l'aggiunta di silice fume si ottengono resistenze elevate, buona lavorabilità e ridotta permeabilità. Questo è dovuto alle finezze delle particelle in grado di disperdersi uniformemente nell'impasto, allocandosi nei vuoti interstiziali, ottenendo un sistema meno poroso, più denso e quindi più resistente e impenetrabile. Il superfluidificante deve essere aggiunto poiché le piccole dimensioni delle particelle e l'elevata area superficiale specifica, provocano un aumento della richiesta di acqua per confezionare il calcestruzzo. Aggiungendo silice fume l'aderenza pasta/aggregato è migliore, la discontinuità microstrutturale rappresentata dalla zona di transizione all'interfaccia con l'aggregato grosso è ridotta, diminuisce la formazione di acqua di bleeding, aumentano viscosità e coesione. La forte riduzione di permeabilità consente un miglioramento complessivo nei riguardi della resistenza alle azioni chimiche derivate da acque acide e solfatiche ed altri prodotti aggressivi, della resistenza nei confronti della corrosione dei ferri di armatura del conglomerato armato. Il contenuto tipico per conseguire il massimo beneficio in termini di resistenza, durabilità ed economicità è di 8-10% in massa sul cemento. Quantità maggiori comportano un aumento del costo, che è 5-10 volte maggiore di quello del cemento e un incremento del tutto marginale delle proprietà;

- il filler calcareo, ottenuto per macinazione in un molino in genere ventilato a circuito chiuso di carbonato di calcio. La natura mineralogica e la curva granulometrica del filler devono permettere di ottenere miglioramenti reologici degli impasti di calcestruzzo senza penalizzare le resistenze meccaniche. Un buon filler calcareo deve risultare chimicamente inerte ed esente da materiale argilloso, silice amorfa e materiale organico. La superficie specifica Blaine dovrebbe essere compresa tra i 5700 e 6500 cm^2/g ;
- la cenere volante o fly ash, sottoprodotto ottenuto dalla combustione del carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche. Negli impianti vengono raggiunte temperature elevate, 1500°C, alle quali le impurità di origine minerale presenti nella polvere di carbone impiegata come combustibile, vengono fuse; in seguito sono trascinate dai fumi della combustione sotto forma di goccioline e a causa del rapido raffreddamento, cui vengono sottoposte, solidificano sotto forma di polvere e si agglomerano parzialmente. La cenere è costituita da piccole particelle sferiche di diametro compreso tra 1 μm e 100 μm , piene o più spesso cave, capaci di favorire la lavorabilità del calcestruzzo e la pozzolanicità del cemento. La natura chimica del materiale è prevalentemente silico-alluminosa ed ha una microstruttura di tipo vetrosa a causa del brusco raffreddamento subito durante la produzione, che non ha consentito la normale cristallizzazione della fase liquida. La cenere volante può influenzare parametri del calcestruzzo fresco quali: la lavorabilità, il bleeding e la reattività con gli additivi fluidificanti. Un uso di cenere volante modifica il fabbisogno di acqua di impasto. Le ceneri volanti possono essere usate anche in sostituzione degli aggregati fini ed in particolare delle sabbie. Si può usare anche come aggiunta ad un calcestruzzo che presenta fenomeni di segregazione, per ovviare a tale inconveniente. Una cenere volante avente buone prestazioni, nel

calcestruzzo ordinario può essere usata per ottenere conglomerati cementizi aventi resistenze elevate (70-75 MPa);

- le zeoliti, minerali appartenenti ad un gruppo di alluminosilicati idrati di metalli alcalini o alcalino-terrosi, caratterizzati dal fatto che le molecole d'acqua contenute (acqua zeolitica), sono debolmente legate e possono venire eliminate con il riscaldamento, senza che il reticolo cristallino si deformi e poi venire riassorbite. Si presentano in cristalli monometrici, rombici, o monoclini, con abito cubico, lamellare o fibroso o in masse pulverulente. Sono di colore variabile, dal bianco, al rosa, al rosso, al bruno e hanno un peso specifico basso. Fondono facilmente gonfiandosi e ribollendo per la perdita d'acqua (da cui il nome: dal greco zein, bollire e lithos, pietra), e sono facilmente attaccabili dagli acidi. Si trovano in geoidi o in spaccature di rocce eruttive o metamorfiche, quali graniti e basalti. Si formano direttamente da soluzioni acquose o per alterazione dei feldispadi e feldispatoidi. Sono denominate zeoliti artificiali, quelle sostanze amorfe o criptocristalline che si ottengono per fusione di miscele di silicato di alluminio con soda ed eventualmente silice, aventi proprietà simili alle zeoliti naturali. La struttura molecolare delle zeoliti è regolare, ed è costituita da un reticolo, di estensione infinita di atomi di silicio e di alluminio tetracoordinati con atomi di ossigeno. Sono, inoltre, presenti dei pori e dei canali in cui generalmente è presente acqua, ma in cui possono essere assorbiti ioni e molecole di diversa composizione e dimensione. L'unità di costruzione primaria è il tetraedro del tipo TO_4 , in cui T è l'atomo di silicio o alluminio, SiO_4 e AlO_4^- , legati tra loro da atomi di ossigeno, in modo tale che il rapporto O/T è sempre pari a due. Le zeoliti, in base alla loro struttura caratteristica, presentano proprietà peculiari. Le principali sono:

- struttura cristallina ben definita con una alta area superficiale interna ($> 400 \text{ m}^2/\text{g}$);
- microporosità, che offre una superficie maggiore rispetto ai catalizzatori convenzionali, in cui solo la parte esterna è accessibile ai reagenti;
- buona stabilità termica, anche oltre i 500°C ;
- alta concentrazione di siti acidi.

Tali proprietà fanno sì che le zeoliti siano usate in molte applicazioni industriali, come ad esempio nel campo della detergenza, in cui vengono usate come scambiatori di ioni per l'addolcimento dell'acqua all'inizio del ciclo di lavaggio. Molti di questi scambi avvengono rapidamente, dai 5 ai 30 minuti, a temperature moderate, da 20 a 80°C . L'applicazione più importante delle zeoliti è come catalizzatore. Le zeoliti combinano alta acidità, selettività di forma, alta area superficiale e alta stabilità termica per cui la catalisi zeolitica trova largo impiego nell'industria petrolchimica per i processi di cracking e idrocracking, l'alchilazione e l'isomerizzazione. Le zeoliti, per la loro capacità elevata di adsorbire e de-adsorbire l'acqua, vengono anche usate come deumidificanti. Negli anni settanta, è iniziata la produzione delle zeoliti sintetiche, dotate cioè di proprietà specifiche, individuate appositamente per la particolare applicazione per la quale devono essere utilizzate. Nella struttura delle zeoliti sono presenti pori di dimensioni ben definite, e ciò si rivela utile, poiché permette di operare

con una certa selettività scegliendo di volta in volta la zeolite sintetica che presenta i pori delle dimensioni più adatte all'adsorbimento di un determinato composto chimico. Le zeoliti sintetiche sono resistenti alla maggior parte degli acidi, sono chimicamente inerti e ignifughe. La zeolite LTA è un silico-alluminato sintetico cristallizzato nel sistema cubico. La struttura a tetraedri della zeolite A è costituita da due tipi di reticoli. Nelle cavità sono allocati gli ioni necessari per rendere la struttura nel complesso neutra. Questi ioni occupano siti ben definiti che minimizzano il loro stato coordinativo. In ogni struttura, individuate le posizioni, ne viene in genere valutata la percentuale di occupazione, che varia a seconda del contro ione presente.



Figura 3.4 - Silica Fume e zeolite

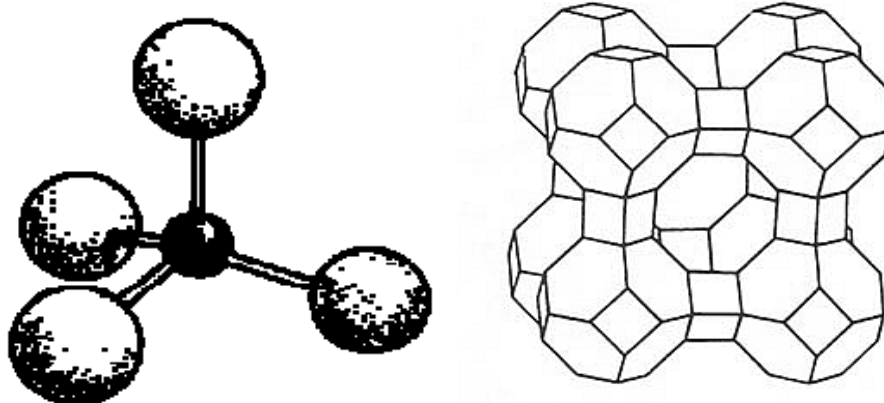


Figura 3.5 – Zeolite: Unità tetraedrica TO_4 e Rappresentazione della zeolite LTA

3.4 Degrado e durabilità

Con il termine durabilità (durevolezza) si intende la capacità di una materiale di durare nel tempo, di resistere cioè ai differenti fattori che ne possono promuovere il degrado, mantenendo inalterate le sue caratteristiche prestazionali. Le rapide modifiche cui l'ambiente è stato soggetto negli ultimi decenni, con un inquinamento progressivo ed un'aumentata aggressività, ha generato condizioni tali da intaccare seriamente la fama di eternità che nel tempo la natura composita del calcestruzzo aveva creato. Vista l'elevata incidenza di questo fenomeno, il degrado del calcestruzzo armato costituisce un rilevante aspetto dell'ampio problema della durabilità dei materiali. I fattori influenzano il comportamento del calcestruzzo mettendo in pericolo la durabilità delle strutture:

- la composizione dei differenti costituenti del calcestruzzo (cemento, sabbia, inerti, ecc.) e la sua età;

- le tecniche di posa in opera;
- le condizioni climatiche.

Le alterazioni che si possono presentare sono di ordine:

- meccanico;
- fisico;
- chimico-fisico;
- chimico.

I fenomeni chimici e fisici sono da associare sempre alla presenza di acqua che gioca un ruolo principale. Quindi, per garantire la durabilità delle strutture in cemento armato è fondamentale la conoscenza dei più importanti meccanismi di degrado e della determinazione dei fattori che influenzano la velocità degli stessi.

3.4.1 Tipologie di degrado del calcestruzzo

Il degrado del calcestruzzo è difficilmente attribuibile ad una sola causa poiché spesso più processi possono avvenire contemporaneamente, interagendo, a volte, in modo sinergico. Essi portano ad una diminuzione del carattere protettivo del calcestruzzo dal punto di vista fisico (aumento della permeabilità, formazione di fessure, distacchi di materiale) favorendo così la penetrazione di sostanze aggressive all'interno del materiale e promuovendo la corrosione dell'eventuale ferro di armatura. Le principali cause del degrado derivano dalla penetrazione di varie sostanze presenti nell'ambiente che possono essere di origine naturale o artificiale (aria umida, acqua marina i primi, ambienti industriali i secondi). Nella maggior parte dei casi questo attacco aggressivo viene esplicitato nei confronti delle armature metalliche; in questi casi, l'ingresso di sostanze aggressive promuove un'intensa corrosione delle armature metalliche e la conseguente espulsione del copriferro per effetto dell'aumento di volume connesso alla formazione dei più voluminosi prodotti di ossidazione. Inoltre, la penetrazione di questi agenti aggressivi nei confronti delle armature è favorita anche da fenomeni concomitanti, come il contatto della superficie del calcestruzzo con prodotti (come i solfati) che danneggiano la matrice cementizia del copriferro, oppure come l'erosione del calcestruzzo dovuta in inverno ai cicli del gelo e disgelo. In generale, il degrado del calcestruzzo può essere di tipo chimico, fisico e meccanico. Si riportano nei paragrafi seguenti le principali cause di degrado del calcestruzzo.

3.4.2 Cause di tipo chimico

3.4.2.1 Attacco da solfati

L'attacco solfatico consiste nell'iterazione tra lo ione SO_4^- con i prodotti presenti nella matrice cementizia quali sono ad esempio la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), e il gelo tobermoritico (C-S-H). Lo ione solfato può provenire dall'ambiente esterno o essere già presente all'interno del calcestruzzo. Si distinguono, allora, attacco solfatico esterno e attacco solfatico interno. Per quanto riguarda l'attacco solfatico esterno (ESA, External Sulphate Attack), si ha che l'aggressione si presenta nel calcestruzzo successivamente al contatto dello stesso con:

- acque selenitose (concentrazione di solfati superiore a 200 mg/l);
- terreni aventi tenori di solfato maggiori di 2g/Kg;
- acqua di mare;
- atmosfere industriali ricche di vapore d'acqua e anidridi solforose o solforiche.

Praticamente lo ione solfatico è già presente nei terreni e nelle acque a contatto delle strutture. Fondamentale comunque è la presenza di acqua che permette il trasporto dello ione all'interno della struttura cementizia. Il degrado può avvenire anche in ambienti non aggressivi dal punto di vista di presenza di solfati. Il deterioramento, ad esempio, può essere dovuto anche alla presenza nell'inerte di partenza di solfato di calcio anidro, che a contatto con l'acqua, per idratazione, passa a gesso con conseguente espansione. Questo è il caso di attacco solfatico interno (ISA, Internal Sulphate Attack). Quando nel cemento si riscontrano percentuali di solfati superiori allo 0,4-0,6% il degrado del calcestruzzo può essere imputato ad attacco solfatico.

3.4.2.2 Attacco da acque pure ad azione dilavante

Le acque pure, con contenuti di sostanze disciolte trascurabili, sono tipiche dei bacini montani dove si raccolgono le acque dei ghiacciai. La loro azione provoca l'asporto della calce di idrolisi Ca(OH)_2 che affiora poi in depositi esterni biancastri di idrossido e carbonato di calcio. Oltre a questa azione, se il contenuto di anidride carbonica dell'acqua supera la soglia di equilibrio con i carbonati, essa scioglie il carbonato e forma bicarbonati assai solubili. Se il pH dell'acqua si abbassa (acqua a carattere acido, $\text{pH} < 6$) per azione dell'anidride carbonica di sostanze acide presenti in acque di scarico industriale o di acido solforico di origine organica come le acque reflue delle fognature, si può verificare anche un attacco dei silicati e degli alluminati della pasta di cemento. La superficie di una struttura sottoposta ad un simile attacco presenta depositi di calcare con gli aggregati più o meno sporgenti.

3.4.2.3 Reazioni alcali-aggregati

Il cemento Portland è caratterizzato da un'elevata alcalinità dovuta alla presenza nella soluzione contenuta nei pori, oltre all'idrossido di calcio, di idrossidi di sodio e manganese. In questo ambiente l'aggregato, in genere costituito principalmente da silice amorfa e criptocristallina, forma un gel che rigonfiandosi può determinare sollecitazioni anche notevoli nel calcestruzzo. In realtà la reazione alcali-aggregati coinvolge sostanzialmente gli aggregati che contengono una particolare forma di silice (reazione alcali-silice, ASR, Alkali-Silica Reaction) capace di reagire con gli alcali, sodio e potassio. Il fenomeno di degrado è dovuto al fatto che i granuli degli aggregati costituiti da una silice mal cristallizzata o amorfa rigonfiano una volta a contatto con gli alcali e in presenza di acqua. L'effetto che si produce può essere molto violento, procurando nel calcestruzzo micro-fessurazioni disposte a ragnatela e macro fessurazioni diffuse a carattere irregolare sulla superficie del conglomerato cementizio. In uno strato che abbia appena subito una fessurazione per reazioni alcali-aggregati si può spesso osservare la presenza di tale gel che in breve tempo si carbonata, diventando così difficilmente riconoscibile. Le condizioni necessarie per una reazione alcali-aggregato si possono riassumere in:

- elevato contenuto di alcali nel calcestruzzo (in genere si considera come soglia critica 3 Kg di NaO equivalente ($\text{NaO} + 0,658\text{KO}$) per metro cubo di calcestruzzo);
- la presenza di un aggregato reattivo;
- la presenza di umidità superiore all'80%.

3.4.2.4 Carbonatazione

L'anidride carbonica presente nell'atmosfera (concentrazioni dell'ordine di 600-1000 mg/l) quando viene a contatto con il calcestruzzo neutralizza, a partire dagli strati più esterni, i suoi componenti alcalini. Il pH della soluzione contenuta nei pori si riduce dai valori usuali (attorno a 13-14) a valori inferiori a 9, cioè ben al di sotto del pH 11,5 che è il valore necessario per assicurare, in assenza di cloruri, le condizioni di passività dell'armatura. Il fenomeno della carbonatazione è dunque legato in maniera evidente al trasporto dell'anidride carbonica dell'atmosfera attraverso i pori del cemento. Una volta che l'armatura risulta depassivata e sono presenti sulla sua superficie acqua e ossigeno, si produce una corrosione di tipo generalizzato. La carbonatazione del calcestruzzo e la conseguente depassivazione delle armature non provocano, invece, corrosione se l'acqua e l'ossigeno non sono presenti sulla superficie delle armature o lo sono in tenori molto bassi. La carbonatazione inizia alla superficie esterna e penetra verso le regioni più interne con velocità decrescente. La legge che definisce la profondità di penetrazione nel tempo è una legge di potenza del tipo:

$$s = K \cdot t^{\frac{1}{n}}$$

dove s è lo spessore dello strato carbonato e t il tempo. In calcestruzzi non particolarmente impervi e in quelli porosi l'andamento è spesso parabolico per cui il valore di n è 2. In calcestruzzi compatti la velocità di penetrazione tende, però, a ridursi più velocemente ($n > 2$); in quelli molto impervi tende praticamente ad annullarsi. In ogni caso K , e quindi la velocità con cui il processo di carbonatazione avanza all'interno del calcestruzzo, dipende da fattori relativi al calcestruzzo stesso e da fattori ambientali:

- tra i fattori relativi al calcestruzzo: la sua permeabilità (e quindi i fattori che la determinano quali il rapporto acqua/cemento, la compattazione e maturazione del getto), la sua riserva di alcalinità (e quindi il tipo e la quantità di cemento impiegato);
- tra i fattori ambientali: l'umidità atmosferica (K è massimo nell'intervallo compreso tra il 50 e il 70%) e la presenza di bagnamenti intermittenti, come quelli provocati dalla pioggia, che riducono K .

In pratica una previsione sufficientemente esatta di K e, quindi, dello spessore carbonatato è complessa. Comunque indicativamente si può ritenere che K di un calcestruzzo impervio sia pari a 1, mentre K di calcestruzzi porosi possono avere valori anche di 10.

3.4.2.5 Penetrazione da cloruri

Il mantenimento della passività richiede una continua presenza di alti livelli di alcalinità nella soluzione a contatto con l'acciaio e l'assenza di ioni aggressivi. Una riduzione dell'alcalinità o la presenza di ioni aggressivi come i cloruri possono portare alla distruzione del film di passività, che ricopre il metallo nelle condizioni originarie, e alla propagazione della corrosione. Per effetto delle reazioni chimiche tra lo strato di ossido e i cloruri si forma, nello strato di idrossido di calcio della fascia più esterna, CaCl_2 a vari gradi di idratazione. Lo strato inferiore degli ossidi di ferro, più protettivo, subisce un fenomeno di distacco all'interfaccia con il metallo. L'attacco dei cloruri si manifesta con estrema frequenza soprattutto nelle zone costiere marine o sui viadotti montani a causa del massiccio uso di sali da disgelo. L'attacco dell'acqua marina è molto

aggressiva non solo perché è ricca di cloruri (attacco chimico), ma anche perché può esercitare un'azione meccanica di corrosione (attacco fisico) tramite le onde che frangono sulla struttura di calcestruzzo e un'azione di tipo chimico-fisico dovuta ai cicli gelo-disgelo che possono comunque verificarsi in presenza di acqua. La minima quantità di cloruri richiesta per ridurre l'intervallo di passività è funzione del rapporto tra ioni cloruro e ioni ossidrilici; ciò si può spiegare intuitivamente ricordando che la passivazione del ferro è collegata all'alcalinità, mentre l'attività alla presenza di cloruri. E' difficile individuare un valore comune per i vari cementi e per le differenti condizioni di messa in opera, tuttavia precedenti ricerche hanno individuato un probabile valore della soglia critica per la distruzione della passività nel sistema ferro-pasta di cemento pari ad un rapporto delle attività molari degli ioni Cl^- e OH^- in soluzioni di 0,6; secondo altri autori tale valore dipende dalle condizioni di adesione. La presenza di cloruri può anche essere dovuta alla loro esistenza nell'impasto, ad esempio nell'aggregato o nell'acqua, oppure all'uso di acceleranti per la presa contenenti questi ioni. Il cemento, prima dell'idratazione, è in grado di reagire con una certa quantità di cloruri formando composti incongruenti con gli alluminati e con la fase ferrica del cemento. Dal punto di vista morfologico l'attacco dei cloruri si presenta talvolta come generalizzato oppure più frequentemente come localizzato (pitting corrosion).

3.4.3 Cause di degrado di tipo fisico

3.4.3.1 Degrado promosso da cicli di gelo e disgelo

Le condizioni indispensabili perché il calcestruzzo subisca il degrado sotto l'azione del gelo e del disgelo sono:

- l'alternarsi della temperatura ambiente attorno a 0°C ;
- la presenza di umidità all'interno del cemento;
- l'assenza di microbolle di aria inglobate nella pasta cementizia.

Il procedere del degrado dipende ovviamente dalla qualità del calcestruzzo e cioè dalla porosità, dalla distribuzione dei pori, dalla permeabilità, dalla resistenza meccanica, nonché da fattori esterni quali il numero dei cicli di gelo e disgelo, la velocità di raffreddamento e le temperature raggiunte. Il danno è legato all'aumento di volume dovuto alla formazione di ghiaccio che provoca sforzi sul calcestruzzo. In presenza di sali disgelanti, in genere distribuiti negli strati superficiali in modo non omogeneo, si hanno le condizioni più severe, caratterizzate da congelamenti differenziali nel tempo che provocano distacchi superficiali e fessurazioni. L'attacco si ha per le strutture in calcestruzzo orizzontali sottoposte a traffico veicolare tipo strade in montagna: in caso di gelo è consuetudine spargere su tali opere dei sali disgelanti per favorire la circolazione. I sali normalmente impiegati sono il cloruro di sodio (NaCl) e quello di calcio (CaCl_2). L'azione di questi sali è molto dannosa sia per il calcestruzzo, sia per i ferri eventualmente presenti in essi. Il cloro (Cl^-) aggredisce i ferri delle armature mentre il sodio (Na^+) aggrava il degrado degli aggregati; inoltre per via del CaCl_2 , in presenza di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e di H_2O , si forma l'ossicloruro di calcio. In genere si migliora notevolmente il comportamento del calcestruzzo rispetto a questa azione consentendo la presenza al suo interno, di microbolle d'aria (di dimensioni 50-250 μm) disposte in modo omogeneo. Queste bolle, introdotte nell'impasto tramite un opportuno additivo aerante, hanno la funzione di espellere l'acqua dai pori capillari dove si sta formando il ghiaccio favorendo l'entrata

d'aria nelle bolle adiacenti. Se, comunque, si arriva ad una condizione di solidificazione dell'acqua all'interno dei pori, la presenza di aria nelle bolle adiacenti assume una funzione di cuscinetto per attutire il conseguente aumento di volume prodotto dalla formazione di ghiaccio, non facendo così raggiungere un elevato valore di pressione tale da degradare la pasta di cemento. Nella progettazione del calcestruzzo occorre considerare le perdite di resistenza meccanica conseguenti all'aumento di porosità all'interno del calcestruzzo. La resistenza al gelo di un calcestruzzo viene valutata attraverso il numero di cicli di gelo e disgelo che può sopportare prima di raggiungere un determinato livello di degrado. In genere si assumono come indici di degrado la perdita di massa o la diminuzione del modulo elastico dinamico (misurabile attraverso la velocità di propagazione degli ultrasuoni nel calcestruzzo).

3.4.3.2 Ritiro

Il fenomeno del ritiro è tipico del calcestruzzo, che per effetto della perdita d'acqua interstiziale che si verifica durante il fenomeno di presa, diminuisce di volume. In presenza delle armature, che tendono a contrastare il fenomeno, si verifica l'insorgere di tensioni di trazione nel calcestruzzo che portano alla formazione di fessure. Per evitare il fenomeno, o quanto meno ridurlo, è utile bagnare continuamente la superficie delle casseformi quando inizia il fenomeno di presa e durante il processo di indurimento. Questa formazione di fessure deve essere evitata soprattutto in ambienti aggressivi. Nel caso di ripristino oppure rinforzo strutturale conviene ricorrere all'impiego di malte tixotropiche a stabilità volumetrica.

3.4.3.3 Calore di idratazione

Durante le reazioni di idratazione del cemento si ha sviluppo di calore. Durante il fenomeno di presa, il calcestruzzo inizia a raffreddarsi in modo più rapido nella parte esposta all'aria rispetto alla parte interna. Questo può provocare tensioni di trazione nel calcestruzzo con la possibile formazione di fessure interne alla massa di conglomerato.

3.4.3.4 Incendio

I danni prodotti da un possibile incendio sul calcestruzzo possono essere molto gravi, tanto da rendere inutilizzabile la struttura. Gli effetti negativi prodotti sono di 2 tipi: spalling, ossia schiacciamento, esplosione interna e sfaldamento degli aggregati e riduzione della resistenza (alla temperatura di 3000°C il calcestruzzo subisce fenomeni che causano il degrado permanente della resistenza).

3.4.4 Cause di tipo meccanico

Le strutture in calcestruzzo, durante la loro vita utile, possono essere sottoposte ad altri tipi di aggressione rispetto a quelle trattate fino ad ora. Queste aggressioni possono produrre danni spesso irreparabili o portare addirittura la struttura al collasso. A questa tipologia di cause di degrado appartengono: abrasioni, erosioni, esplosioni, vibrazioni, urti e sisma.

3.4.5 Durabilità

La soluzione più ovvia al problema di come preservare e proteggere le strutture in cemento armato nel tempo è quella di bloccare la strada che conduce gli agenti aggressivi presenti nell'atmosfera verso l'interno della struttura; l'applicazione di

un rivestimento sulla superficie esterna del cemento è uno dei mezzi possibili e sicuramente l'unico applicabile in caso di strutture già esistenti e per cui non sia stato adottato, in fase di costruzione, alcun provvedimento per la protezione delle armature. Le altre tecnologie disponibili al giorno d'oggi per la prevenzione dei fenomeni di degrado del cemento armato devono, infatti, essere previste in fase di progetto. I parametri che agiscono sulla riuscita del calcestruzzo ed in particolare anche sulla durabilità dello stesso sono: il materiale di partenza (cemento, inerti, materiali speciali, acqua, additivi), il Mix design (curva granulometrica inerti, rapporto acqua/cemento, lavorabilità, rapporto cemento/inerti, rapporto materiali speciali/cemento, rapporto additivi/cemento), la confezione, il trasporto e la posa in opera (tempo di mescolamento, tempo di trasporto, procedura di scarico nelle casseforme, compattazione del materiale, copriferro minimo), la stagionatura e disarmo (tempo minimo di stagionatura umida, temperatura massima e minima del calcestruzzo fresco).

3.4.6 Approccio normativo: le classi di esposizione

Come molto spesso accade, con una norma si cerca di creare un modello analitico, numerico o probabilistico in grado di rappresentare il fenomeno fisico reale con le opportune semplificazioni, nell'ottica di riuscire a raggiungere un alto grado di sicurezza. Per quanto riguarda la durabilità del calcestruzzo, la norma vigente (UNI-EN 206 integrata dalla più recente 11104) schematizza l'ambiente dove l'opera è situata e dunque gli attacchi a cui può andare in contro il calcestruzzo, in 6 classi di esposizione ambientale, per ciascuna delle quali, ad eccezione della classe Xo, esistono più sottoclassi. Le azioni dell'ambiente sono classificate come classi di esposizioni. Le classi di esposizione da scegliere dipendono dalle disposizioni valide nel luogo d'impiego del calcestruzzo. Questa classificazione dell'esposizione non esclude considerazioni in merito a condizioni speciali che possano esistere nel luogo di impiego del calcestruzzo o di misure protettive quali l'uso di acciaio inossidabile o altri metalli resistenti alla corrosione e l'uso di rivestimenti protettivi per il calcestruzzo o per l'armatura. Il calcestruzzo può essere soggetto a più di una delle azioni descritte nelle classi di esposizione e può essere necessario esprimere le condizioni dell'ambiente alle quali esso è esposto come combinazione di classi di esposizione.

3.5 Evoluzione del calcestruzzo ordinario: calcestruzzi innovativi²

Negli ultimi 50 anni, la tecnologia dei calcestruzzi ha acquisito un notevole grado di sviluppo ed innovazione tecnica; attualmente, è in grado di offrire ai tecnici del settore una vasta gamma di prodotti dai nuovi requisiti strutturali e formali. Di seguito, si riportano le principali tipologie di calcestruzzi innovativi che, negli ultimi anni, sono stati impiegati nell'ambito delle costruzioni civili con una certa regolarità. Ognuna di queste tipologie possiede delle caratteristiche peculiari rispetto alle altre sia in termini di vantaggi che di svantaggi e tutte hanno ancora in atto sperimentazioni che mirano al perfezionamento delle tecniche di confezionamento, composizione ecc.. Tuttavia, tutte le tipologie affrontate si possono inquadrare sotto un'ottica di compatibilità ambientale. Il problema della salubrità degli ambienti ha assunto notevole rilievo anche per l'importanza delle applicazioni tecniche e progettuali nonché per i problemi di impatto. Accertata la

² W. Brameshuber, Calcestruzzi ad alte prestazioni, Detail – Rivista di architettura, 2004;

responsabilità dei prodotti edilizi come causa di inquinamento dell'ambiente, basti pensare alle sostanze volatili quali ad esempio polveri, radon, fibre e composti volatili rilasciate nell'aria, attualmente la tendenza è quella di diminuire quanto più possibile gli effetti negativi sull'ambiente in termini di inquinamento vero e proprio e in termini di impatto ambientale.

3.5.1 Calcestruzzo ad alta prestazione e alta resistenza

Le linee guida sui calcestruzzi ad alta resistenza³ definiscono:

- calcestruzzo ad alte prestazioni, come “conglomerato cementizio caratterizzato in generale da rapporto acqua/cemento minore di 0,45 avente resistenza caratteristica cubica superiore a 55 N/mm^2 ed inferiore o uguale a 75 N/mm^2 ”;
- calcestruzzo ad alta resistenza, quel “conglomerato cementizio caratterizzato in generale da rapporto acqua cemento minore di 0,35 avente resistenza caratteristica cubica superiore a 75 N/mm^2 ed inferiore o uguale a 115 N/mm^2 ”.

I calcestruzzi ad alta resistenza offrono la possibilità di risparmiare sia in termini di metri quadrati occupati da elementi edilizi portanti incrementando perciò le superfici utili da locare, sia in termini di rispetto verso l'ambiente, in quanto, si ha risparmio di materiale da costruzione a cui corrisponde una minore produzione di inquinamento. La resistenza caratteristica di compressione può salire fino ad un fattore 10 rispetto a quella dei calcestruzzi ordinari. I calcestruzzi ad alta resistenza hanno una lunga tradizione sia a livello nazionale sia internazionale. Grazie ad un rapporto acqua/cemento estremamente basso e l'aggiunta di reattivi pozzolanici per cemento come ad esempio polveri di silicati o metacaolino, si può ottenere una resistenza caratteristica di compressione fino a 150 N/mm^2 (che nel calcestruzzo tradizionale varia tra 20 e 50 N/mm^2). Con l'ausilio di indagini preliminari si possono trovare le combinazioni ideali di miscela di cemento e ceneri volatili che consentono di evitare la formazione di fessurazioni. Inoltre, il calcestruzzo ad alta resistenza presenta maggiori requisiti non solo di resistenza ma anche di ermeticità. Entrambe le proprietà sono pienamente sfruttate nella costruzione di ponti dove sono richieste un'elevata durabilità e profili particolarmente sottili⁴. In relazione ai requisiti prestazionali di materiali additivi del cemento, negli ultimi anni, si sono aperte nuove prospettive che ampliano notevolmente l'applicabilità del calcestruzzo. Si tratta di calcestruzzi ad alta resistenza con resistenza di compressione fino a 800 N/mm^2 . Attualmente con questo tipo di calcestruzzo si possono ridurre le sezioni delle costruzioni di calcestruzzo armato e precompresso, quindi realizzare elementi edilizi di minore spessore con incrementata durabilità, limitato peso e caratteristiche ecologiche (dato che la riduzione delle sezioni comporta la riduzione del consumo di materiali non rinnovabili). I calcestruzzi ad alte prestazioni, noti come HPC (High Performance Concrete) possiedono un elevato grado di resistenza e durabilità nei confronti degli agenti atmosferici. Gli HPC, quindi, rispetto ai calcestruzzi ordinari offrono prestazioni superiori in termini di resistenza meccanica, lavorabilità e durabilità in ambienti aggressivi. Tali calcestruzzi sono ottenuti con un ridotto rapporto acqua/cemento, utilizzando comunque degli additivi super

³ Presidenza del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio Tecnico Centrale, Raccolta di Linee Guida su Calcestruzzo preconfezionato, Calcestruzzo ad alta resistenza, Calcestruzzo strutturale, 2003.

⁴ Se aumenta la resistenza cubica a compressione del calcestruzzo, a parità di sollecitazione normale, ai fini progettuali, è possibile ridurre la sezione degli elementi strutturali e, quindi, si possono ottenere strutture più sottili.

riduttori di acqua, con l'impiego di aggiunte minerali ad alta reattività pozzolanica e/o elevata area superficiale specifica come ad esempio il fumo di silice e con inerti provenienti da frantumazione di alta qualità di tipo basaltico e capaci di assicurare un'elevata resistenza meccanica. Molte sono ai giorni le applicazioni degli HPC, basti pensare alle strutture off-shore, ai ponti con grandi luci o più comunemente agli edifici di grande altezza per contenere la dimensione dei pilastri ai livelli inferiori. Si riportano di seguito tipologie strutturali per le quali si sia mostrato di particolare interesse l'uso dell'HPC, con riferimento ai ponti ed ai viadotti. Nelle figure seguenti 3.6-3.8 sono riportati alcuni esempi di strutture realizzate con calcestruzzi HPC.



Figura 3.6 – Il “Storebaelt Bridge” ed il “Grande Arche de la Fraternité”



Figura 3.7 – Il “Second Severn Crossing” ed il “Pont de Normandie”



Figura 3.8 – Il “Great Belt East Bridge” ed il “Confederation Bridge”

3.5.2 Calcestruzzo autocompattante

Il calcestruzzo autocompattante, noto con il termine SCC (self compacting concrete), è un ulteriore sviluppo della tecnologia dei calcestruzzi ad alte prestazioni. Anche se si pensa all'SCC come un prodotto relativamente recente, alcuni tipi di miscele sono conosciute già da tempo. Oltre 70 anni fa, infatti, negli

USA, si mettevano in opera calcestruzzi molto fluidi detti “calcestruzzi colati”. Essi avevano delle buone caratteristiche autocompattanti e autolivellanti. La buona fluidità, tuttavia andava a scapito della durezza in quanto questi calcestruzzi potevano essere confezionati solo con rapporti acqua/cemento molto elevati. I calcestruzzi che oggi sono classificati come SCC, comunemente attribuiti all’invenzione del prof. Nakamura, sono stati impiegati a partire dal 1988 in Giappone e Canada. L’introduzione in Europa (Francia e Svezia) è ancora più recente e risale al 1996⁵. Un prototipo di SCC fu sperimentato per la prima volta nel 1988 e realizzato utilizzando solo materiali facilmente reperibili sul mercato. Il calcestruzzo autocompattante, a causa della sua elevata fluidità, è idoneo a riempire le casseforme anche in presenza di armature fitte, senza rischi di segregazione, di essudazione d’acqua o formazione di biacca superficiale e non necessita di vibrazione. Il raggiungimento di tali caratteristiche è reso possibile dall’opportuna formulazione della miscela e dall’impiego combinato di particolari additivi superfluidificanti di ultima generazione della famiglia degli eteri policarbossilati ad alto potere disperdente e di additivi stabilizzatori in grado di ridurre la tendenza alla segregazione. Un altro metodo per incrementare la fluidità è quello di affiancare ai superfluidificanti l’incremento delle parti fini, intese sia come cemento, sia come aggiunte minerali idraulicamente attive (tipo silica fume o zeolite) o inattive (tipo filler calcareo). L’impiego di questi additivi consente, ove richiesta: una forte riduzione del rapporto acqua/cemento, lavorabilità elevatissime e buona resistenza alla segregazione. Il mantenimento di queste proprietà reologiche è garantito per un tempo sufficientemente lungo. L’SCC, per i suoi costi relativamente elevati (costo al metro cubo di calcestruzzo), è in genere associato ai calcestruzzi HPC. Però la sua lavorabilità è elevatissima e ben si adatta anche alla confezione di calcestruzzi di medie resistenze. Sono molteplici i vantaggi che giustificano l’impiego dei calcestruzzi SCC:

- qualità del calcestruzzo omogeneamente distribuita sull’intera sezione dell’elemento;
- migliore qualità del calcestruzzo con conseguente aumento della snellezza degli elementi costruttivi portanti;
- messa in opera senza problemi laddove i casseri hanno una forma complicata e la maglia d’armatura è molto fitta;
- miglior rendimento e velocità nella messa in opera;
- riduzione del numero di persone necessario per il getto;
- riduzione dei rischi di insorgenza di malattie professionali;
- igiene e sicurezza ambientale.

La confezione dei calcestruzzi SCC⁶ avviene, come accennato, con elevata fluidità con valori del rapporto acqua/cemento minori, in genere, di 0,50 e aggiunta di superfluidificanti da soli o combinati con altri prodotti come stabilizzatori. E’ molto importante la precisa regolazione dell’impianto di produzione. Dallo sviluppo del primo prototipo nel 1988, l’uso di SCC nelle costruzioni recenti ha man mano avuto un graduale incremento. Gli SCC sono proiettati ad assorbire buona parte della produzione attuale di calcestruzzi, siano essi destinati alla produzione in opera o alla prefabbricazione. Esempi tipici di realizzazioni in SCC

⁵ S.Tavano, E.Albiero: “Parametri utili alla valutazione delle proprietà reologiche del calcestruzzo SCC”, Congresso CTE, Pisa, 2000;

⁶ Ivano Pigni: “Vantaggi derivanti dall’impiego del calcestruzzo autocompattante confezionato con filler calcareo”, Comitato Tecnico ASSIAD, 2004

sono, ad esempio, i 2 ancoraggi del ponte Akashi-Kaiko costituito da una struttura in un'unica campata di 1991 metri (la più lunga al mondo), il serbatoio dell'Osaka Gas Company (figura 3.9), la realizzazione di parti strutturali della Millennium Tower in Austria e del Nelson Mandela Bridge in Sud Africa (figura 3.10).



Figura 3.9 - Il "Ponte Akashi-Kaiko" ed il "Serbatoio Osaka Gas"



Figura 3.10 - La "Millennium Tower" ed il "Nelson Mandela Bridge"

Le proprietà che maggiormente distinguono il calcestruzzo SCC, sono quelle allo stato fresco quali fluidità, coesione, resistenza alla segregazione e al bleeding. Per valutare tali caratteristiche reologiche in laboratorio e/o in cantiere e i parametri utili per identificare il calcestruzzo SCC, oltre alla consueta misura dello slump-flow con il cono di Abrams è necessario fare ulteriori prove con l'ausilio di alcune speciali apparecchiature di misura in accordo delle norme vigenti in materia. Si descrivono brevemente di seguito apparecchiature, prove e criteri di accettazione da condurre sul calcestruzzo SCC allo stato fresco al fine di dare un'etichetta di qualità al conglomerato cementizio. La fluidità è indicata in termini di spandimento mediante la prova UNI 11041. La prova (slump flow test) stabilisce un metodo per la determinazione della consistenza dell'SCC fresco mediante la misura dello spandimento e del tempo necessario a raggiungere il diametro di 500 mm. Da norma la prova è valida su calcestruzzi autocompattanti con aggregati aventi dimensione massima di 25mm. La prova si svolge versando del calcestruzzo fresco in uno stampo a forma di cono (cono di Abrams) per poi sfilarlo e misurare la consistenza e il tempo impiegato dal calcestruzzo per espandersi fino a raggiungere il diametro desiderato. Bisogna osservare la distribuzione degli aggregati grossi valutando se risulta omogenea tra la periferia

e la parte centrale e se risulta presente dell'acqua di bleeding. Si misura anche lo spandimento massimo valutato come media rispetto ad almeno due direzioni ortogonali. La prova è accettata se lo spandimento massimo $>600\text{mm}$ ed il tempo di spandimento per raggiungere i $500\text{mm} \leq 12$ secondi. La capacità dell'SCC nello scorrimento confinato è valutabile tramite la prova con la scatola ad L (UNI 11043), ad U (UNI 11044) o con l'anello a J (UNI 11045). Nelle esperienze progettuali eseguite si è fatto ricorso alla prova ad anello a J (J ring). Per eseguire tale prova si versa il calcestruzzo autocompattante in uno stampo troncoconico poggiante su una piastra dove è disposta in posizione centrata l'anello a J. Sollevando lo stampo il calcestruzzo inizia a scorrere superando l'ostacolo rappresentato dall'anello a J. Quando il movimento dell'SCC si è arrestato si rilevano due misure del diametro in direzioni ortogonali tra loro e si osserva se l'altezza all'interno dell'anello è visibilmente più alta del calcestruzzo all'esterno che deve essere di entità contenuta. La prova è accettabile se la variazione di diametro rispetto allo slump flow test risulta ≤ 50 mm. L'anello a J è costituito da un profilato metallico circolare a sezione rettangolare $30\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ di diametro medio pari a 300 mm . Lungo tale circonferenza sono fissate trasversalmente delle barre cilindriche aventi diametro nominale di 10 mm e lunghezza di circa 100mm . Il passo delle barre è di $48 \pm 2\text{ mm}$. La resistenza alla segregazione si valuta visivamente nella prova di spandimento facendo attenzione nel valutare che le particelle di aggregato grosso non siano concentrate al centro ma distribuite uniformemente e che non si formi ai bordi il fenomeno dell'acqua di bleeding. La stabilità alla sedimentazione si determina misurando il tempo di efflusso dall'imbuto a V prima e dopo 5 minuti seguendo la prova descritta nella UNI 11042. Questa prova, eseguibile su calcestruzzi aventi diametro massimo di 25 mm , si svolge riempiendo l'imbuto con il calcestruzzo fresco, per poi svuotarlo dopo un tempo massimo di 10 secondi dal termine del riempimento. Si misura il tempo di svuotamento dell'imbuto dal momento in cui si apre la valvola fino a quando tutto l'impasto esce fuori dallo strumento. La prova viene rieseguita dopo 5 minuti senza che l'imbuto sia ripulito o umidificato ed ha esito positivo se la differenza tra il secondo valore di tempo registrato ed il primo è intorno a 3 secondi. L'imbuto è fatto in acciaio ed è montato su un supporto che costituisce parte integrante dell'apparecchiatura. La sua capienza in termini di capacità è di 10 litri. La sezione di efflusso ha una superficie di $65\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ e procede verso l'alto con questa sezione per 150 mm ; dopo di che la sezione tende via via ad allargarsi fino a raggiungere la superficie in sommità di $510\text{ mm} \times 75\text{ mm}$. Lo sviluppo totale in altezza è di 600 mm . L'orifizio di efflusso dell'imbuto è corredato di una valvola a tenuta in grado di essere aperta completamente ed istantaneamente. Il bordo superiore dello strumento deve avere bordi lisci e rinforzati per permettere il livellamento del calcestruzzo dopo il riempimento.

3.5.3 Calcestruzzi autocompattanti ad alte prestazioni

Il primo prototipo di SCC fu completato nel 1988 usando i comuni materiali reperibili sul mercato. Il prototipo soddisfaceva appieno i requisiti di stagionatura, ritiro, calore di idratazione, compattezza dopo l'indurimento e elevata resistenza, e fu chiamato HPSCC (High Performance Self Compacting Concrete), per distinguerlo dai calcestruzzi HPC (High performance Concrete), confezionati con un basso rapporto acqua/cemento e dotati di elevata durabilità. Il calcestruzzo autocompattante ad alte prestazioni deve soddisfare i requisiti dei calcestruzzi ad

alte prestazioni in generale, infatti, deve essere caratterizzato da un rapporto acqua/cemento minore di 0,45 e avere una resistenza caratteristica cubica a compressione superiore a 55 N/mm^2 ed inferiore o uguale a 75 N/mm^2 . Per la preparazione dei calcestruzzi SCC di elevata qualità si può procedere come segue:

- contenuto maggiorato di leganti (cemento + filler);
- contenuto maggiorato di parti fini, materiali aggiuntivi e sabbia;
- grano massimo di diametro $\Phi 20 \text{ mm}$;
- aggregati ricchi di sabbia (almeno 50% con grani da 0-4 mm);
- contenuto d'acqua di circa 180 litri/m^3 .

Il calcestruzzo HPSCC, nasce dall'unione dei calcestruzzi innovativi HPC ed SCC e costituiscono la recente tendenza di sviluppo dei materiali a base cementizia. Il significato dei termini alte prestazioni ed autocompattante includono elevata durabilità e fluidità, elevata durezza e resistenza meccanica. I materiali primari, cemento, aggregati, acqua, sono gli stessi del calcestruzzo tradizionale, i quali necessariamente devono essere combinati con aggiunte minerali e additivi superfluidificanti. Il risultato è il raggiungimento di una microstruttura molto compatta, caratterizzata da un legame molto più stretto, e da un sistema di pori capillari molto piccoli, tali che le proprietà quali resistenza meccanica e durabilità risultano essere superiori al calcestruzzo ordinario. Questi conglomerati, perciò, sono destinati a strutture per le quali è prevista una lunga vita di servizio, per opere esposte ad attacchi chimici, di difficile realizzazione come ad esempio per ponti di grande luce situati in condizioni ambientali severe e per piattaforme off-shore per l'estrazione del petrolio.

3.5.4 Calcestruzzo con aggregato riciclato

I materiali provenienti dal riciclo dell'edilizia opportunamente trattati possono trovare un largo campo d'impiego nelle costruzioni civili, quali opere stradali, ferroviarie ed aeroportuali come magroni, calcestruzzi armati e non e nella prefabbricazione come elementi strutturali, d'arredo stradale od ambientale. Per ognuno di questi impieghi occorrerà garantire determinati requisiti meccanici, di compatibilità ambientale, ecc.. Da indagini scientifiche su riviste del settore si può evidenziare che il tema degli aggregati riciclati usati nel confezionamento del calcestruzzo è un tema molto attuale. È comunque possibile riuscire ad evincere alcune caratteristiche peculiari di questa tipologia di calcestruzzo:

- le resistenze a compressione dei calcestruzzi confezionati con aggregati da costruzione e demolizione (riciclati) sono inferiori rispetto al caso in cui si impieghino aggregati naturali; impiegando solo aggregati di granulometria relativamente grossa si può avere una caduta prestazionale dell'ordine del 25%;
- la resistenza a trazione ed a flessione di questi calcestruzzi con aggregati di granulometria grossa subiscono lievi cadute prestazionali che diventano più significative quanto più si utilizzano aggregati a granulometria fine;
- il modulo di elasticità dei calcestruzzi è più basso rispetto a quello dei calcestruzzi tradizionali;
- la quantità di acqua assorbita dai calcestruzzi con aggregato riciclato è superiore rispetto a quella dei calcestruzzi tradizionali;
- in fatto di durabilità, i calcestruzzi riciclati ed ordinari, presentano delle caratteristiche analoghe. La resistenza al gelo è equivalente se non

migliore per i calcestruzzi riciclati. La permeabilità e la carbonatazione mostrano nei prodotti riciclati prestazioni inferiori;

- i calcestruzzi con aggregati riciclati, ove possibile, sono da preferirsi rispetto ai calcestruzzi tradizionali in un'ottica di compatibilità ambientale e di riduzione di inquinamento.



Figura 3.11- Aggregato riciclato e applicazione come misto granulometrico per sottofondo stradale



Figura 3.12 – Esempi di utilizzo degli aggregati riciclati in calcestruzzi a bassa resistenza e come materiale granulometrico per sottofondo ferroviario

3.5.5 Calcestruzzo leggero strutturale

I calcestruzzi con inerti leggeri⁷ consentono di coniugare il requisito di “leggerezza” con le esigenze di carattere strutturale richieste per un conglomerato cementizio da destinare alla realizzazione di strutture armate e precomprese; questi calcestruzzi sono in genere caratterizzati da una massa volumica variabile tra i 1400 e 2000 kg/m³ e da resistenze meccaniche a compressione tra 18 e 70 MPa. Il costo dei calcestruzzi leggeri è superiore rispetto ai calcestruzzi tradizionali in quanto è maggiore il costo di produzione degli aggregati, ma in alcune circostanze risulta più economico in quanto, diminuendo i carichi permanenti sulla struttura, consente di risparmiare in termini di metri cubi di calcestruzzo necessari per la realizzazione dell'opera. Il principale difetto del calcestruzzo leggero consiste nel fatto di essere meno duttile dei calcestruzzi ordinari, quindi è poco idoneo il suo utilizzo in ambiti territoriali interessati da rischio sismico. L'uso più frequente dei calcestruzzi leggeri si ha nelle strutture precomprese dove a causa del peso ridotto si possono usare meno cavi di precompressione. Attualmente i calcestruzzi leggeri sono molto utilizzati nelle tramezzature e murature portanti consentendo, fra l'altro, di migliorare l'isolamento termico e la resistenza al fuoco degli edifici.

⁷ M. Collepari, Il nuovo calcestruzzo, 3° edizione, Tintoretto, 2002

3.5.6 Calcestruzzo fibro-rinforzato

Il calcestruzzo fibro-rinforzato è un materiale composito relativamente nuovo. Esistono diversi tipi di fibre per composizione, forma e geometria. A parità di composizione e di dosaggio, l'efficacia delle fibre migliora se aumenta il cosiddetto rapporto d'aspetto (lunghezza/diametro) e se la forma assume un contorno irregolare che favorisca l'adesione alla matrice cementizia. Le fibre possono essere polimeriche, di vetro o acciaio. Le fibre polimeriche sono per lo più impiegate per ridurre le fessurazioni dovute al ritiro plastico del calcestruzzo. Le fibre polimeriche (polipropilene) trovano applicazione anche nell'incremento dei requisiti antincendio ad esempio del calcestruzzo ad alte prestazioni. L'azione delle fibre di polipropilene consiste nella creazione di un vuoto determinato dall'evaporazione delle fibre stesse; il fenomeno si realizza solo se la superficie è esposta a temperature elevate. Attualmente non sono ben chiare le cause di tale fenomeno. Accanto alla riduzione della formazione di fessurazioni del materiale, le fibre di vetro hanno funzione di stabilizzazione statica di elementi di piccole dimensioni. Tale proprietà ha portato alla sostituzione negli elementi di piccole dimensioni con contenuto di amianto con elementi cementiti con fibre di vetro. L'impiego di calcestruzzi con fibre di vetro è molteplice, dai pezzi semi-finiti fino ai davanzali prefabbricati per finestre. Grazie alla elevata duttilità e stabilità in associazione con una elevata durabilità, il calcestruzzo con fibre di vetro offre in molteplici settori una buona alternativa rispetto ad altri materiali costruttivi. L'uso di calcestruzzo con fibre d'acciaio è applicabile anche nelle opere di ingegneria. Accanto ad applicazioni come nel campo dell'industria dei pavimenti prefabbricati o negli scavi di sicurezza nella costruzione di tunnel, si affermano anche tecnologie costruttive di pareti portanti prive di armature d'acciaio. Il calcestruzzo con fibre d'acciaio (stirate o ad aderenza migliorata), in relazione alla proprietà di duttilità e stabilità può essere usata in maniera molto mirata. Ai fini della definizione di un'immagine architettonica, con l'introduzione di fibre d'acciaio si verifica un grande problema: le fibre che si trovano superficialmente sul calcestruzzo, anche in caso di una carbonatazione minima dello strato superficiale del calcestruzzo dovuto all'infiltrazione di umidità e di ossigeno, sono soggette ad un processo di corrosione. Le conseguenze sono quindi irrilevanti per le proprietà portanti e per quelle di durabilità, tuttavia dal punto di vista estetico non è sempre desiderabile la colorazione bruna assunta dalla superficie di calcestruzzo. Un ulteriore sviluppo del calcestruzzo fibro-rinforzato è il calcestruzzo rinforzato con tessuto che garantisce un orientamento regolare delle fibre di rinforzo oltre ad assumere implicitamente la funzione di interfaccia protettiva dei ferri dell'armatura. L'introduzione dei tessuti tecnici di vetro e carbonio consente la riduzione delle sezioni di calcestruzzo e di conseguenza la produzione di elementi a parete sottile applicabili in tecnologie complesse come le strutture a guscio.

3.5.7 Calcestruzzo a ritiro compensato

Il calcestruzzo a ritiro compensato o espansivo è un conglomerato cementizio speciale, contenente un particolare ingrediente (agente espansivo) grazie al quale il ritiro, che subisce normalmente un calcestruzzo ordinario in ambienti insaturi di vapori (umidità relativa < 95%), è in parte compensato da un fenomeno espansivo controllato nella durata e nella sua entità. Tra le principali applicazioni del calcestruzzo espansivo nel settore dell'ingegneria Civile o della Architettura si

possono segnalare i pavimenti e i lavori di restauro o consolidamento, e il riempimento di cavità per giunzioni tra due strutture.

3.5.8 Calcestruzzo proiettato

Il calcestruzzo proiettato è utilizzato nel campo delle opere di ingegneria civile ed in particolare in condizioni quali: assenza di casseforme, applicazione in strati successivi, qualora siano necessarie resistenze a breve termine in speciali tecniche di costruzione. Ai fini della pianificazione e dell'esecuzione delle costruzioni, il calcestruzzo proiettato può avere funzioni strutturali ed essere destinato ad opere permanenti o temporanee. Esempi di applicazioni di calcestruzzo proiettato strutturale sono: supporto per fronti rocciosi, per fronti di scavo e per rivestimenti senza cassatura e/o di grandi superfici. Il calcestruzzo proiettato può essere prodotto ed applicato in formulazioni speciali quali:

- premiscelati proiettati per riparazioni e consolidamenti;
- calcestruzzi con aggiunta di fibre;
- calcestruzzi con aggregati leggeri.

Il calcestruzzo proiettato può essere armato o non armato. Il calcestruzzo proiettato viene definito gunite nel caso vengano impiegati aggregati di dimensione massima uguale o minore di 4 mm (sabbia). Il conglomerato cementizio trattato è costituito da una miscela tipica di cemento, inerti (con diametro massimo < di 25 mm) e acqua, con l'aggiunta di additivo accelerante (intorno al 5%) se è richiesta una resistenza iniziale elevata per la presa. Il calcestruzzo proiettato, spruzzato ad alta pressione sulla parete, garantisce una presa rapida sulla parete e presenta una flessibilità che gli consente di adattarsi alle deformazioni provocate dall'ammasso che ricopre. La resistenza caratteristica a compressione di questi calcestruzzi, se strutturali, deve risultare maggiore o uguale a 15 MPa.

3.6 Normativa

Le nuove norme tecniche per le costruzioni approvate con D.M. del 14.01.2008, attualmente vigenti definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità. In particolare, il capitolo 11 di tale normativa, affronta la problematica relativa ai "Materiali e prodotti per uso strutturale" e tra questi, ovviamente, riporta il materiale "Calcestruzzo" da utilizzare per usi strutturali, armato e non, normale e precompresso. Come specifica per il calcestruzzo vi è la prescrizione del calcestruzzo che all'atto del progetto deve essere caratterizzata almeno mediante la classe di resistenza, la classe di consistenza ed il diametro massimo dell'aggregato. La classe di resistenza è contraddistinta dai valori caratteristici delle resistenze cubica R_{ck} e cilindrica f_{ck} a compressione uniaassiale, misurate su provini normalizzati e cioè rispettivamente su cilindri di diametro 150 mm e di altezza 300 mm e su cubi di spigolo 150 mm. Al fine delle verifiche sperimentali i provini prismatici di base 150x150 mm e di altezza 300 mm sono equiparati ai cilindri di cui sopra. Al fine di ottenere le prestazioni richieste, si devono dare indicazioni in merito alla composizione, ai processi di maturazione ed alle procedure di posa in opera, facendo utile riferimento alla norma UNI ENV 13670-1:2001 ed alle Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del

calcestruzzo pubblicate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, nonché dare indicazioni in merito alla composizione della miscela, compresi gli eventuali additivi, tenuto conto anche delle previste classi di esposizione ambientale (di cui, ad esempio, alla norma UNI EN 206-1: 2006) e del requisito di durabilità delle opere. La resistenza caratteristica a compressione è definita come la resistenza per la quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori inferiori. Nelle norme la resistenza caratteristica designa quella dedotta da prove su provini come sopra descritti, confezionati e stagionati in maniera idonea, eseguite a 28 giorni di maturazione. Si deve tener conto degli effetti prodotti da eventuali processi accelerati di maturazione. In tal caso possono essere indicati altri tempi di maturazione a cui riferire le misure di resistenza ed il corrispondente valore caratteristico. Il conglomerato per il getto delle strutture di un'opera o di parte di essa si considera omogeneo se confezionato con la stessa miscela e prodotto con medesime procedure. Il calcestruzzo va prodotto in regime di controllo di qualità, con lo scopo di garantire che rispetti le prescrizioni definite in sede di progetto. Il controllo si articola nelle seguenti fasi:

- valutazione preliminare della resistenza. Serve a determinare, prima dell'inizio della costruzione delle opere, la miscela per produrre il calcestruzzo con la resistenza caratteristica di progetto;
- controllo di produzione. Riguarda il controllo da eseguire sul calcestruzzo durante la produzione del calcestruzzo stesso;
- controllo di accettazione. Riguarda il controllo da eseguire sul calcestruzzo prodotto durante l'esecuzione dell'opera, con prelievo effettuato contestualmente al getto dei relativi elementi strutturali;
- prove complementari. Sono prove che vengono eseguite, ove necessario, a complemento delle prove di accettazione.

Le prove di accettazione e le eventuali prove complementari sono eseguite e certificate dai laboratori di cui all'art. 59 del DPR n. 380/2001. Il costruttore, prima dell'inizio della costruzione di un'opera, deve effettuare idonee prove preliminari di studio, per ciascuna miscela omogenea di calcestruzzo da utilizzare, al fine di ottenere le prestazioni richieste dal progetto. Il costruttore resta comunque responsabile della qualità del calcestruzzo, che sarà controllata dal Direttore dei Lavori. Un prelievo consiste nel prelevare dagli impasti, al momento della posa in opera ed alla presenza del Direttore dei Lavori o di persona di sua fiducia, il calcestruzzo necessario per la confezione di un gruppo di due provini. La media delle resistenze a compressione dei due provini di un prelievo rappresenta la "Resistenza di prelievo" che costituisce il valore mediante il quale vengono eseguiti i controlli del calcestruzzo. È obbligo del Direttore dei Lavori prescrivere ulteriori prelievi rispetto al numero minimo, di cui ai successivi paragrafi, tutte le volte che variazioni di qualità e/o provenienza dei costituenti dell'impasto possano far presumere una variazione di qualità del calcestruzzo stesso, tale da non poter più essere considerato omogeneo. Per la preparazione, la forma, le dimensioni e la stagionatura dei provini di calcestruzzo vale quanto indicato nelle norme UNI EN 12390-1:2002 e UNI EN 12390-2:2002. Circa il procedimento da seguire per la determinazione della resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo vale quanto indicato nelle norme UNI EN 12390-3:2003 e UNI EN 12390-4:2002. Circa il procedimento da seguire per la determinazione della massa volumica vale quanto indicato nella norma UNI EN 12390-7:2002. Il Direttore dei Lavori ha l'obbligo di eseguire controlli sistematici in corso d'opera

per verificare la conformità delle caratteristiche del calcestruzzo messo in opera rispetto a quello stabilito dal progetto e sperimentalmente verificato in sede di valutazione preliminare. Il controllo di accettazione va eseguito su miscele omogenee e si configura, in funzione del quantitativo di calcestruzzo in accettazione, nel controllo di tipo A e nel controllo di tipo B. Ogni controllo di accettazione di tipo A è rappresentato da tre prelievi, ciascuno dei quali eseguito su un massimo di 100 m³ di getto di miscela omogenea. Risulta quindi un controllo di accettazione ogni 300 m³ massimo di getto. Per ogni giorno di getto va comunque effettuato almeno un prelievo. Nelle costruzioni con meno di 100 m³ di getto di miscela omogenea, fermo restando l'obbligo di almeno 3 prelievi e del rispetto delle limitazioni di cui sopra, è consentito derogare dall'obbligo di prelievo giornaliero. omogenea è obbligatorio il controllo di accettazione di tipo statistico (tipo B). Il controllo è riferito ad una definita miscela omogenea e va eseguito con frequenza non minore di un controllo ogni 1500 m³ di calcestruzzo. Per ogni giorno di getto di miscela omogenea va effettuato almeno un prelievo, e complessivamente almeno 15 prelievi sui 1500 m³. Se si eseguono controlli statistici accurati, l'interpretazione dei risultati sperimentali può essere svolta con i metodi completi dell'analisi statistica assumendo anche distribuzioni diverse dalla normale. Si deve individuare la legge di distribuzione più corretta e il valor medio unitamente al coefficiente di variazione (rapporto tra deviazione standard e valore medio). In questo caso la resistenza minima di prelievo R_l dovrà essere maggiore del valore corrispondente al frattile inferiore 1%. Per calcestruzzi con coefficiente di variazione (s/R_m) superiore a 0,15 occorrono controlli più accurati, integrati con prove complementari. Non sono accettabili calcestruzzi con coefficiente di variazione superiore a 0,3. In entrambi i casi, il prelievo dei provini per il controllo di accettazione va eseguito alla presenza del Direttore dei Lavori o di un tecnico di sua fiducia che provvede alla redazione di apposito verbale di prelievo e dispone l'identificazione dei provini mediante sigle, etichettature indelebili, ecc.; la certificazione effettuata dal laboratorio prove materiali deve riportare riferimento a tale verbale. La domanda di prove al laboratorio deve essere sottoscritta dal Direttore dei Lavori e deve contenere precise indicazioni sulla posizione delle strutture interessate da ciascun prelievo. Le prove non richieste dal Direttore dei Lavori non possono fare parte dell'insieme statistico che serve per la determinazione della resistenza caratteristica del materiale. Le prove a compressione vanno eseguite conformemente alle norme UNI EN 12390-3:2003. La non conformità non è stata definitivamente rimossa dal costruttore, il quale deve procedere ad una verifica delle caratteristiche del calcestruzzo messo in opera mediante l'impiego di altri mezzi d'indagine, secondo quanto prescritto dal Direttore dei Lavori. Qualora gli ulteriori controlli confermino i risultati ottenuti, si dovrà procedere ad un controllo teorico e/o sperimentale della sicurezza della struttura interessata dal quantitativo di calcestruzzo non conforme, sulla base della resistenza ridotta del calcestruzzo. Ove ciò non fosse possibile, ovvero i risultati di tale indagine non risultassero soddisfacenti si può dequalificare l'opera, eseguire lavori di consolidamento ovvero demolire l'opera stessa. I "controlli di accettazione" sono obbligatori ed il collaudatore è tenuto a controllarne la validità, qualitativa e quantitativa; ove ciò non fosse, il collaudatore è tenuto a far eseguire delle prove che attestino le caratteristiche del calcestruzzo, seguendo la medesima procedura che si applica quando non risultino rispettati i limiti fissati dai "controlli di accettazione". Nel caso in cui le resistenze a compressione dei provini prelevati durante il getto non soddisfino i criteri di

accettazione della classe di resistenza caratteristica prevista nel progetto, oppure sorgano dubbi sulla qualità e rispondenza del calcestruzzo ai valori di resistenza determinati nel corso della qualificazione della miscela, oppure si renda necessario valutare a posteriori le proprietà di un calcestruzzo precedentemente messo in opera, si può procedere ad una valutazione delle caratteristiche di resistenza attraverso una serie di prove sia distruttive che non distruttive. Tali prove non devono, in ogni caso, intendersi sostitutive dei controlli di accettazione. Il valor medio della resistenza del calcestruzzo in opera (definita come resistenza strutturale) è in genere inferiore al valor medio della resistenza dei prelievi in fase di getto maturati in condizioni di laboratorio (definita come resistenza potenziale). È accettabile un valore medio della resistenza strutturale, misurata con tecniche opportune (distruttive e non distruttive) e debitamente trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85% del valore medio definito in fase di progetto. Per la modalità di determinazione della resistenza strutturale si potrà fare utile riferimento alle norme UNI EN 12504-1:2002, UNI EN 12504-2:2001, UNI EN 12504-3:2005, UNI EN 12504-4:2005 nonché alle Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo pubblicate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Per calcestruzzo confezionato con processo industrializzato si intende quello prodotto mediante impianti, strutture e tecniche organizzate sia in cantiere che in uno stabilimento esterno al cantiere stesso. Gli impianti per la produzione con processo industrializzato del calcestruzzo disciplinato dalle presenti norme devono essere idonei ad una produzione costante, disporre di apparecchiature adeguate per il confezionamento, nonché di personale esperto e di attrezzature idonee a provare, valutare e mantenere la qualità del prodotto. Gli impianti devono dotarsi di un sistema permanente di controllo interno della produzione allo scopo di assicurare che il prodotto risponda ai requisiti previsti dalle presenti norme e che tale rispondenza sia costantemente mantenuta fino all'impiego. Il sistema di controllo della produzione di calcestruzzo confezionato con processo industrializzato in impianti di un fornitore, predisposto in coerenza con la norma UNI EN ISO 9001:2000, deve fare riferimento alle specifiche indicazioni contenute nelle Linee guida sul calcestruzzo preconfezionato elaborato dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei LL.PP. Detto sistema di controllo deve essere certificato da organismi terzi indipendenti che operano in coerenza con la norma UNI CEI EN ISO/IEC 17021:2006, autorizzati dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei LL.PP. sulla base dei criteri di cui al DM 9/5/2003 n. 156. I documenti che accompagnano ogni fornitura di calcestruzzo confezionato con processo industrializzato devono indicare gli estremi di tale certificazione. Nel caso in cui l'impianto di produzione industrializzata appartenga al costruttore nell'ambito di uno specifico cantiere, il sistema di gestione della qualità del costruttore, predisposto in coerenza con la norma UNI EN ISO 9001:2000, certificato da un organismo accreditato, deve comprendere l'esistenza e l'applicazione di un sistema di controllo della produzione dell'impianto, conformemente alle specifiche indicazioni contenute nelle Linee Guida sul calcestruzzo preconfezionato elaborato dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei LL.PP. Il Direttore dei Lavori, che è tenuto a verificare quanto sopra indicato ed a rifiutare le eventuali forniture provenienti da impianti non conformi; dovrà comunque effettuare le prove di accettazione e ricevere, prima dell'inizio della fornitura, copia della certificazione del controllo di

processo produttivo. Per produzioni di calcestruzzo inferiori a 1500 m³ di miscela omogenea, effettuate direttamente in cantiere, mediante processi di produzione temporanei e non industrializzati, la stessa deve essere confezionata sotto la diretta responsabilità del costruttore. Il Direttore dei Lavori deve avere, prima dell'inizio delle forniture, evidenza documentata dei criteri e delle prove che hanno portato alla determinazione della resistenza caratteristica di ciascuna miscela omogenea di conglomerato. Nelle opere oggetto della norma devono impiegarsi esclusivamente i leganti idraulici previsti dalle disposizioni vigenti in materia, dotati di certificato di conformità - rilasciato da un organismo europeo notificato - ad una norma armonizzata della serie UNI EN 197 ovvero ad uno specifico Benestare Tecnico Europeo (ETA), purché idonei all'impiego previsto nonché, per quanto non in contrasto, conformi alle prescrizioni di cui alla Legge 26/05/1965 n.595. È escluso l'impiego di cementi alluminosi. L'impiego dei cementi richiamati all'art.1, lettera C della legge 26/5/1965 n. 595, è limitato ai calcestruzzi per sbarramenti di ritenuta. Per la realizzazione di dighe ed altre simili opere massive dove è richiesto un basso calore di idratazione devono essere utilizzati i cementi speciali con calore di idratazione molto basso conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 14216, in possesso di un certificato di conformità rilasciato da un Organismo di Certificazione europeo Notificato. Qualora il calcestruzzo risulti esposto a condizioni ambientali chimicamente aggressive si devono utilizzare cementi per i quali siano prescritte, da norme armonizzate europee e fino alla disponibilità di esse, da norme nazionali, adeguate proprietà di resistenza ai solfati e/o al dilavamento o ad eventuali altre specifiche azioni aggressive. Sono idonei alla produzione di calcestruzzo per uso strutturale gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali, ovvero provenienti da processi di riciclo conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 12620 e, per gli aggregati leggeri, alla norma europea armonizzata UNI EN 13055-1. È consentito l'uso di aggregati grossi provenienti da riciclo a condizione che la miscela di calcestruzzo confezionata con aggregati riciclati, venga preliminarmente qualificata e documentata attraverso idonee prove di laboratorio. Per tali aggregati, le prove di controllo di produzione in fabbrica di cui ai prospetti H1, H2 ed H3 dell'annesso ZA della norma europea armonizzata UNI EN 12620, per le parti rilevanti, devono essere effettuate ogni 100 tonnellate di aggregato prodotto e, comunque, negli impianti di riciclo, per ogni giorno di produzione. Nelle prescrizioni di progetto si potrà fare utile riferimento alle norme UNI 8520-1:2005 e UNI 8520-2:2005 al fine di individuare i requisiti chimico-fisici, aggiuntivi rispetto a quelli fissati per gli aggregati naturali, che gli aggregati riciclati devono rispettare, in funzione della destinazione finale del calcestruzzo e delle sue proprietà prestazionali (meccaniche, di durabilità e pericolosità ambientale, ecc.), nonché quantità percentuali massime di impiego per gli aggregati di riciclo, o classi di resistenza del calcestruzzo. Nei calcestruzzi è ammesso l'impiego di aggiunte, in particolare di ceneri volanti, loppe granulate d'altoforno e fumi di silice, purché non ne vengano modificate negativamente le caratteristiche prestazionali. Le ceneri volanti devono soddisfare i requisiti della norma europea armonizzata UNI EN 450-1. Per quanto riguarda l'impiego si potrà fare utile riferimento ai criteri stabiliti dalle norme UNI EN 206-1:2006 ed UNI 11104:2004. I fumi di silice devono soddisfare i requisiti della norma europea armonizzata UNI EN 13263-1. Gli additivi devono essere conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 934-2. L'acqua di impasto, ivi compresa l'acqua di riciclo, dovrà essere conforme alla norma UNI EN 1008: 2003. Per garantire la

durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e derivante dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo. A tal fine in fase di progetto la prescrizione, valutate opportunamente le condizioni ambientali del sito ove sorgerà la costruzione o quelle di impiego, deve fissare le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare (composizione e resistenza meccanica), i valori del copriferro e le regole di maturazione. Ai fini della valutazione della durabilità, nella formulazione delle prescrizioni sul calcestruzzo, si potranno prescrivere anche prove per la verifica della resistenza alla penetrazione agli agenti aggressivi, ad esempio si può tener conto del grado di impermeabilità del calcestruzzo. A tal fine può essere determinato il valore della profondità di penetrazione dell'acqua in pressione in mm. Per la prova di determinazione della profondità della penetrazione dell'acqua in pressione nel calcestruzzo indurito vale quanto indicato nella norma UNI EN 12390-8:2002. Al fine di ottenere la prestazione richiesta in funzione delle condizioni ambientali, nonché per la definizione della relativa classe, si potrà fare utile riferimento alle indicazioni contenute nelle Linee Guida sul calcestruzzo strutturale edite dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ovvero alle norme UNI EN 206-1:2006 ed UNI 11104:2004.

Capitolo 4

Strumentazioni e metodologie di prova

4.1 Premessa

Prima di eseguire gli impasti di malta e di calcestruzzo e prima di eseguire i test di caratterizzazione, su tutti i materiali adoperati nel lavoro di ricerca sono stati condotti opportune indagini. Nel presente capitolo sono descritte le strumentazioni, le diverse metodologie di indagine, nonché i riferimenti normativi usati per caratterizzare sia i singoli materiali, che le miscele allo stato fresco ed indurito.

4.2 Caratterizzazione dei materiali usati negli impasti

Come accennato in precedenza, i materiali usati nella sperimentazione, prima dell'utilizzo, sono stati testati tramite le prove prescritte a livello normativo e tramite indagini aggiuntive opportune. Nei successivi paragrafi sono descritti nel dettaglio i diversi metodi di prova utilizzati.

4.2.1 Analisi diffrattometrica ai raggi X

La determinazione della struttura di sistemi molecolari può essere effettuato attraverso l'utilizzo di metodologie tra loro notevolmente diversificate. Attualmente i metodi più utilizzati per definire parametri molecolari e strutturali di un elemento sono la risonanza nucleare NMR, l'assorbimento UV e la diffrazione dei Raggi X; quest'ultima è una metodologia impiegata soprattutto nel settore della ricerca farmaceutica e chimica, appunto per la determinazione della struttura di composti inorganici e organici per la comprensione delle funzioni e dei meccanismi molecolari. La diffrazione ai Raggi X studia e misura gli effetti di interazione tra un fascio di Raggi X e la materia che può essere cristallina o policristallina. La cristallografia, dall'analisi dei dati di diffrazione dei Raggi X, permette la determinazione della struttura, dove con il termine struttura è da intendersi gli aspetti costituzionali, ovvero il modo in cui gli atomi sono interconnessi tra loro. La diffrazione dei Raggi X è una tecnica non distruttiva ormai consolidata nell'ambito della chimica dello stato solido¹. La tecnica della diffrazione di raggi X si basa sullo scattering elastico coerente: il fenomeno macroscopico della diffrazione nasce, infatti, dalla somma coerente di tutte le onde elettromagnetiche diffuse dagli atomi che si trovano lungo una stessa famiglia di piani reticolari. Per manifestarsi, richiede necessariamente la presenza di un ordine a lungo raggio, come si riscontra nei cristalli. L'analisi oggi è condotta in apparecchiature a controllo elettronico dette diffrattometri. Il risultato dell'analisi diffrattometrica è un grafico detto spettro di diffrazione, con un listato contenente posizione angolare ed intensità dei picchi misurati; la posizione angolare dipende dalle distanze tra gli atomi, l'intensità dei picchi, invece, è funzione degli atomi presenti nella cella elementare e delle loro posizioni. Questa prova fornisce uno spettro caratteristico per ogni tipo di materiale analizzato. Tali spettri di rifrazione vengono poi confrontati con altri spettri, caratteristici di ogni sostanza, riuscendo così a caratterizzare il materiale analizzato. Nel nostro caso per studiare il fenomeno faremo riferimento alla legge di Bragg, che difatti fornisce un'interpretazione del fenomeno della diffrazione da un reticolo cristallino semplice sostanzialmente basato su un'approssimazione dell'evento

¹ www.sa.unina2.it/download/appunti/appunto.../Lab_Int_Iacovino.pdf;

come se fosse una semplice riflessione. Nell'interpretazione dei Bragg (W. H. e W. L. Bragg, Relazione dei Bragg, 1913) la diffrazione dei raggi X viene considerata pari ad una riflessione da parte di un fascio di piani reticolari equidistanti. Due raggi i e i' che colpiscono un fascio di piani paralleli del cristallo sotto l'angolo θ , danno due raggi riflessi r ed r' , in condizioni di interferire positivamente, se la loro differenza di cammino è pari ad un numero intero di lunghezze d'onda. La differenza di cammino è $MB + BN$, dove $MB = BN$. Nel triangolo rettangolo ABM il cateto BM è uguale all'ipotenusa $AB \cdot \sin \theta = d \cdot \sin \theta$, quindi la differenza di cammino totale è $2d \cdot \sin \theta$. Facendo questo pari a $k\lambda$ dove $k = 1, 2, 3, \dots$ cioè un intero, si ha la relazione dei Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

E' solo quando la differenza di cammino è pari a un numero intero di lunghezze d'onda che le onde riflesse sono in fase e si rafforzano interferendo positivamente. Altrimenti sono fuori fase oppure in opposizione di fase e interferiscono negativamente, attenuandosi o elidendosi completamente. Per l'analisi diffrattometrica ai raggi X, nello studio in esame, si è utilizzato un diffrattometro Philips PW 1730/10 dotato di goniometro verticale PW 1050/70 per la misura dell'angolo di diffrazione. Il diffrattometro è controllato da un computer Olivetti PC corredato di software applicativo per diffrattometria a raggi su polveri della Ital Structures di Riva del Garda. I raggi X sono generati da un anticatodo di rame sotto vuoto alimentato da una corrente elettronica di 20 mA che arroventa elettricamente il catodo provocando l'emissione di elettroni successivamente accelerati da una differenza di potenziale di 40 kV tra anodo e catodo. Con un diffrattometro ben tarato si possono misurare angoli di diffrazione fino ad una precisione di $\pm 0.005^\circ 2\theta$ nell'intervallo angolare da 3 a $140^\circ 2\theta$, anche se di solito non si esplora più dei primi angoli, da 5 a $60^\circ 2\theta$.

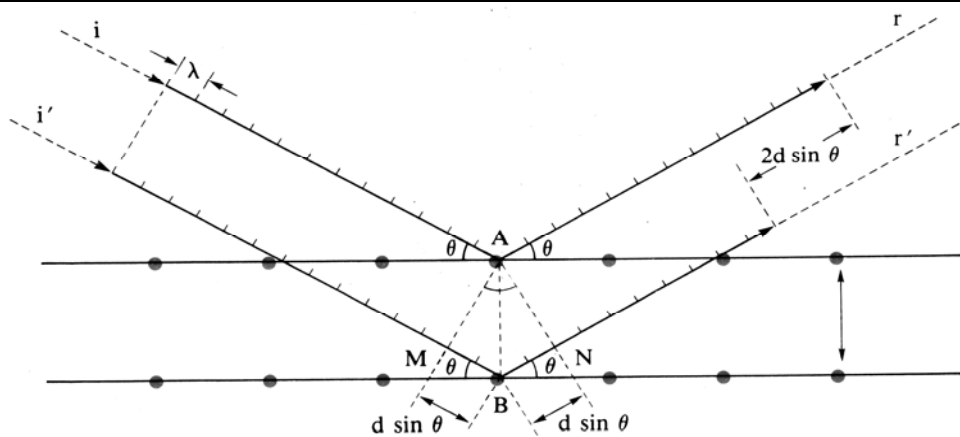


Figura 4.1 - Condizione geometrica di diffrazione dei raggi X

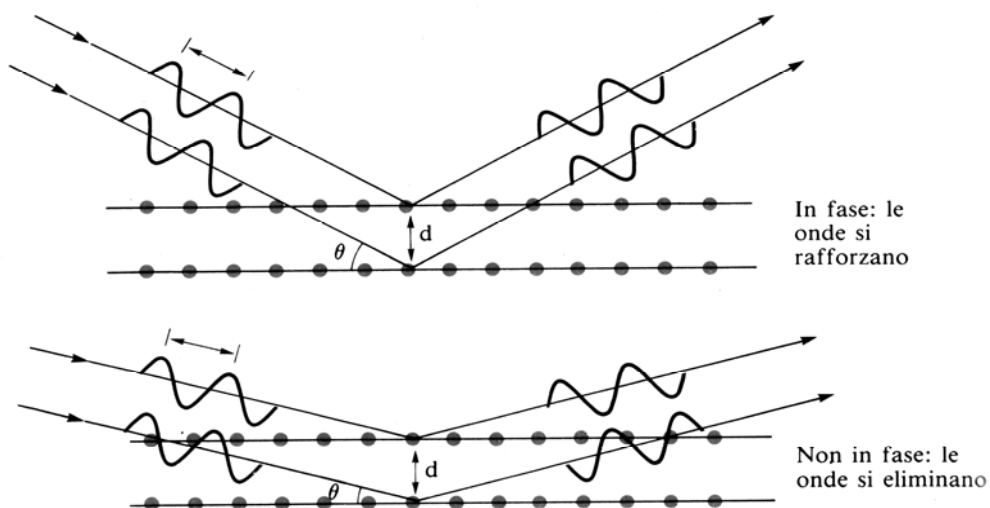


Figura 4.2 - Condizioni in cui non si verifica la diffrazione

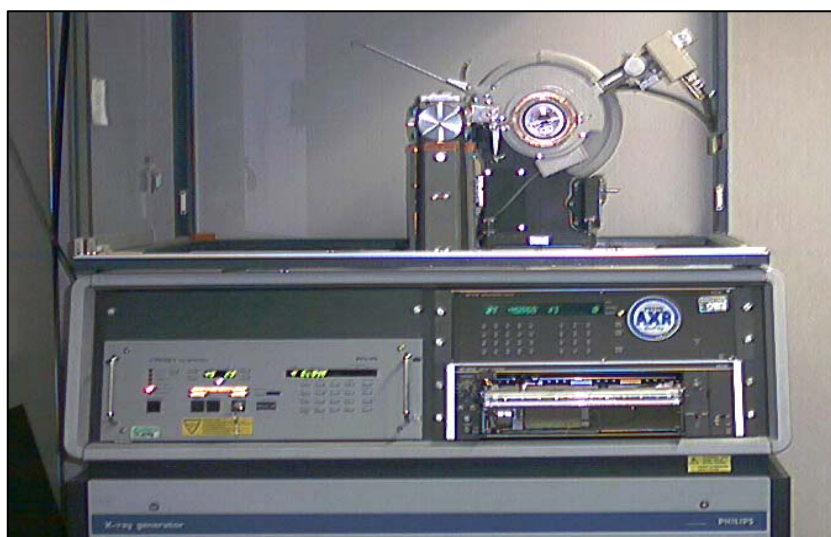


Figura 4.3 – Diffrattometro a raggi X Philips PW 1730/10

4.2.2 Microscopia elettronica a scansione (SEM)

Il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) è uno strumento elettro-ottico che permette, in seguito all'emissione di un fascio di elettroni, di analizzare i vari segnali prodotti dall'interazione degli elettroni del fascio con il campione in esame. L'elaborazione di questi segnali consente di ottenere un'ampia gamma di informazioni non solo morfologiche, ma anche compositive e strutturali relative alle varie parti di cui è costituito il campione. Il SEM, infatti, pur essendo nato con una vocazione di microscopio ad elevata risoluzione e tridimensionalità, negli ultimi anni si è rivelato assai efficace anche nell'analisi della composizione chimica e dell'orientazione cristallografica di un campione, permettendo analisi puntuali e areali, sia qualitative che quantitative. L'estrema versatilità di questo strumento è, inoltre, garantita dalla varietà tipologica dei campioni che possono essere analizzati, sia per quanto riguarda la loro natura (solo materiali contenenti fluidi non sono analizzabili) che la loro forma e dimensioni (di qualunque forma, fino a circa un decimetro cubo), nonché per la facile preparazione dei campioni stessi, che, qualora non siano naturalmente conduttivi (metalli), devono solo essere ricoperti da un sottilissimo strato di un elemento conduttore (grafite o oro). In questo studio vengono illustrati in maniera schematica e generale l'apparato

sperimentale e i principi basilari del funzionamento dell'apparato SEM, un tradizionale apparato sperimentale generale è composto da:

- una colonna elettronica, dove viene creato il fascio di elettroni;
- una camera da vuoto, ove il fascio elettronico interagisce con il campione;
- vari tipi di rivelatori, che acquisiscono i segnali dell'interazione fascio campione e li trasferiscono agli elaboratori;
- uno schermo, in cui si ricostruisce l'immagine dal segnale.

La sorgente elettronica in cima alla colonna genera il fascio elettronico, mediante un filamento (comunemente di tungsteno) che, portato ad elevata temperatura, produce elettroni per effetto termoionico. Gli elettroni vengono, quindi, fatti accelerare ad energia variabile tra alcune centinaia ed alcune decine di migliaia di eV (in genere da 200 eV a 30 keV) grazie ad un anodo posto sotto il filamento. Il fascio che emerge dalla sorgente è divergente, ma viene fatto convergere ed è focalizzato da una serie di lenti elettromagnetiche e di fenditure all'interno della colonna. All'estremità inferiore della colonna, una serie di bobine di scansione deflette il fascio fornendogli un movimento alternato lungo linee parallele ed equidistanti, in modo che, una volta raggiunta la superficie del campione, vada a ricoprirne un'area predefinita. Il fascio, infine, focalizzato dalla lente finale, esce dalla colonna e va a colpire il campione all'interno della camera da vuoto. Come gli elettroni del fascio penetrano all'interno del campione, essi perdono energia, che viene riemessa dal campione sotto varie forme. Ogni tipo di emissione è potenzialmente un segnale dal quale creare un'immagine². Dall'istante in cui il fascio elettronico colpisce la superficie del campione gli elettroni del fascio iniziano ad interagire con i nuclei e le nuvole elettroniche degli atomi di cui è costituito il campione, attraverso due meccanismi principali: diffusione elastica e diffusione anelastica. Il risultato di questi processi è la produzione di una notevole varietà di segnali:

- elettroni secondari;
- elettroni retro diffusi;
- elettroni assorbiti;
- elettroni trasmessi;
- elettroni Auger;
- coppie elettrone-lacuna;
- radiazione elettromagnetica (nello spettro UV-IR);
- radiazione X.

La regione del campione da cui si originano i segnali di interazione con il fascio e da cui questi escono per venire rivelati è chiamata volume di interazione. La forma e le dimensioni di tale volume dipendono dalle caratteristiche del fascio incidente e dalla composizione del campione e, in molti casi, risultano più estese del diametro del fascio determinando così il limite di risoluzione, variabile a secondo del microscopio utilizzato. A differenza del microscopio ottico, che fornisce un'immagine reale del preparato in esame, il SEM, grazie alla scansione del fascio elettronico, restituisce un'immagine virtuale a partire dai segnali emessi dal campione. La scansione, infatti, consente al fascio di colpire la superficie del campione linea per linea, fino a coprire l'area da esaminare, e i segnali così generati variano di intensità, punto per punto, in funzione delle anisotropie morfologiche, chimiche e strutturali del campione. Tali segnali vengono raccolti dagli appositi rivelatori e da analogici sono poi convertiti in segnali digitali per

² <http://www.geoscienze.unipd.it/~luca/Sem/LaboratorioSEM.pdf>;

poter essere elaborati in maniera opportuna. Per visualizzare i segnali in un'immagine attraverso uno schermo a tubo catodico (CRT), la deflessione del fascio avviene in sincronia con il pennello del CRT, che è modulato con l'intensità del segnale. In questo modo il sistema riporta il segnale punto per punto sul monitor, facendo corrispondere ad ogni punto un pixel, creando così l'immagine. La microscopia elettronica è una tecnica che permette l'osservazione di campioni con ingrandimenti e risoluzione 1000 volte superiori alla microscopia ottica ordinaria. Il SEM dà indicazioni su:

- la morfologia della superficie del campione;
- la composizione chimico fisica;
- le difettosità elettriche;
- la contaminazione delle superfici;
- la misura dei potenziali superficiali.

Inoltre tra i suoi pregi, si possono citare:

- l'alta risoluzione (limite 2nm);
- gli alti ingrandimenti (fino a 100000x);
- l'alta profondità di campo;
- la facile preparazione del campione.

La combinazione di alti ingrandimenti, alta risoluzione, larga ampiezza del fuoco e facile preparazione e osservazione del campione rende il SEM uno degli strumenti più affidabili e più semplici da utilizzare anche per lo studio e la diagnostica delle difettosità nei componenti elettronici. Il microscopio elettronico a scansione utilizzato è quello della ditta FEI modello INSPECT, con caratteristiche analoghe al Quanta 200 della stessa ditta. Esso è uno strumento dell'ultima generazione corre dato di un'ampia gamma di accessori. La sorgente è di tipo convenzionale (filamento di tungsteno), ma la particolare configurazione (tetraedro) consente una brillantezza superiore alle sorgenti standard. La risoluzione massima nominale è di 3.5 nm a 30KV. La camera, di grandi dimensioni, è dotata di una telecamera interna CCD per facilitare il posizionamento del campione. Lo stage porta campione è eucentrico, con movimenti X-Y-Z motorizzati (all'occorrenza, manuali) e tilt manuale. Esso è costituito da una colonna sotto vuoto che comprende un cannone elettronico e una serie di lenti. Il cannone elettronico emette elettroni fortemente accelerati che colpiscono la superficie del campione. Inoltre, il microscopio può operare in tre modalità: modalità "ad alto vuoto", modalità "a basso vuoto", modalità "ambientale".

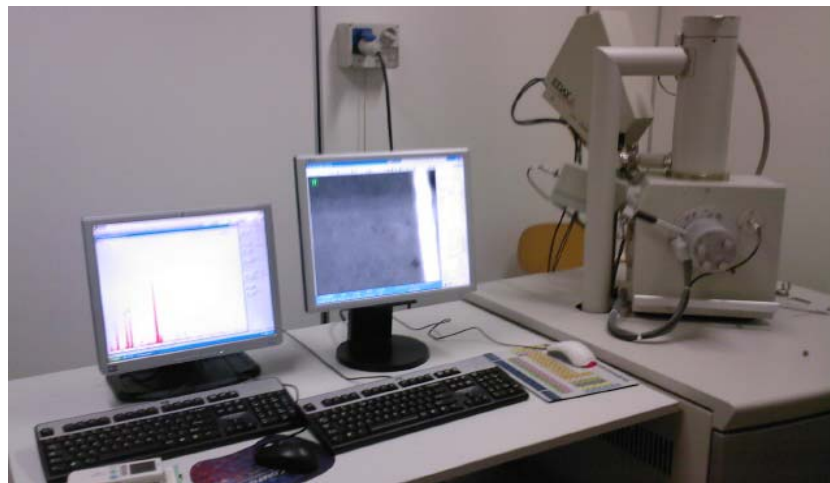


Figura 4.4 - Microscopio elettronico a scansione S.E.M. della FEI modello Inspect con sonda per microanalisi (EDAX) INCA Energy 300

4.2.3 Microanalisi a dispersione di energia (EDAX)

La microanalisi, interfacciata al microscopio elettronico a scansione, permette di effettuare analisi elementari qualitative e quantitative estremamente precise su porzioni di campione. La sorgente di radiazioni è sempre un filamento che emette un fascio di elettroni per effetto Richardson. Essi vengono collimati ed accelerati dalla serie di lenti presenti nella colonna del microscopio e colpiscono la superficie del campione reso conduttrice da un sottile strato di oro. A differenza della microscopia elettronica a scansione, si privilegia la rivelazione e l'analisi dei raggi X caratteristici emessi dalle diverse specie atomiche presenti nel campione. L'analisi sui campioni è stata condotta con il modello INCA Energy 300 (Figura 4.4) con processore microanalitico digitale e controllo digitale della scansione.

4.2.4 Analisi termica

L'analisi termica, in linea generale, comprende un insieme di metodi che consentono di determinare le proprietà chimico-fisiche di una sostanza, di un composto e/o di un composto di reazione. Si misurano tali proprietà in funzione della temperatura o del tempo. Il campione viene sottoposto ad un programma controllato di temperatura che può avere fasi di riscaldamento, raffreddamento e mantenimento di una temperatura costante (isoterma) o una combinazione di esse. Tale tipo di analisi si basa, fondamentale, sul principio in base al quale ogni materiale presenta una determinata temperatura di decomposizione, a livello del quale le molecole che lo costituiscono tendono a dissociarsi per creare composti più semplici. Il grafico che si ottiene da questa prova è detto curva di analisi termica. Per eseguire le analisi termiche si è utilizzato un analizzatore Netzsch STA 409, che permette la simultanea registrazione delle curve di DSC, TG e DTG con le seguenti condizioni operative:

- flusso $5 \text{ cm}^3/\text{min}$;
- intervallo di temperatura 25-1000 °C;
- sostanza di riferimento caolino calcinato.



Figura 4.5 - Analizzatore termico Netzsch STA 409

4.2.5 Prove di resistenza a flessione e a compressione per la caratterizzazione meccanica dei cementi

La norma UNI EN 197-1 “Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni”, prescrive che la resistenza normalizzata di un cemento deve essere determinata in accordo alla UNI EN 196-1, e deve essere conforme ai requisiti riportati nella tabella 4.1.

Classe	Resistenza alla compressione N/mm ²				Tempo di inizio presa min	Espansione mm
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata			
	2 giorni	7 giorni	28 giorni			
32,5	-	≥ 16				
32,5 R	≥ 10	-	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 60	≤ 10
42,5	≥ 10	-				
42,5 R	≥ 20	-	≥ 42,5	≤ 62,5		
52,5	≥ 20	-				
52,5 R	≥ 30	-	≥ 52,5	-	≥ 45	

Tabella 4.1 - Requisiti meccanici e fisici definiti come valori caratteristici

La EN 196-1, per la caratterizzazione meccanica dei cementi, prevede la realizzazione di malte standard in cui occorre:

- utilizzare sabbie normalizzate CEN e acqua distillata, oltre al cemento da esaminare;
- adoperare macchinari ed attrezzature conformi a tale norma;
- usare la metodologia di miscelazione imposta dalla norma;
- conservare le casseforme prima e i provini poi nelle condizioni previste nel disposto normativo.

I provini prismatici di malta standard di dimensione 40mm x 40mm x 160mm a 2, 7, 28 giorni vengono sottoposti a prova di flessione che li divide in due parti e su ognuna delle frazioni ottenute, sono eseguite prove di compressione sulle facce laterali di formatura sotto una sezione di 40mm x 40mm.

Dimensioni in mm

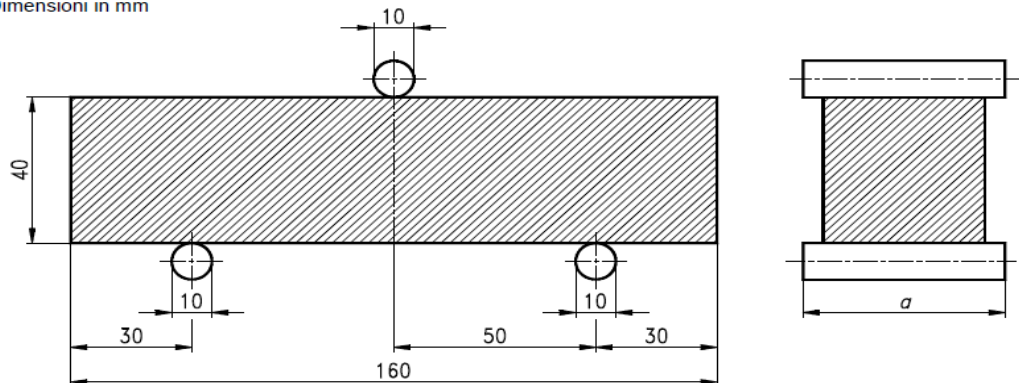
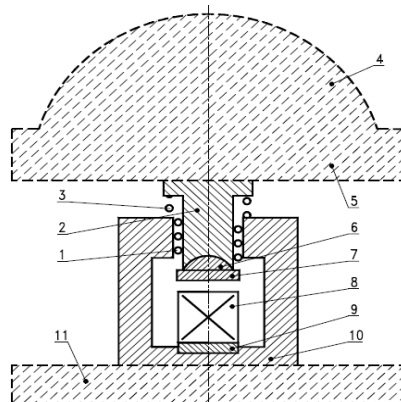


Figura 4.6 - Disposizione del carico per la determinazione della resistenza alla flessione



Legenda

- 1 Cuscinetti a sfera
- 2 Gruppo scorrevole
- 3 Molla di richiamo
- 4 Supporto sferico della macchina
- 5 Piastra superiore della macchina
- 6 Supporto sferico del compressore
- 7 Piastra superiore del compressore
- 8 Provino
- 9 Piastra inferiore
- 10 Piastra inferiore del compressore
- 11 Piastra inferiore della macchina

Figura 4.7 - Compressore tipico per la prova di resistenza alla compressione

Come previsto a livello normativo, la macchina di prova per la determinazione della resistenza alla flessione è in grado di applicare carichi fino a 10 kN con accuratezza di $\pm 1,0\%$ del carico registrato nei quattro, quindi, superiori del campo utilizzato a una velocità di carico di 50 N/s. La macchina è dotata di un dispositivo di flessione comprendente due rulli di supporto di acciaio del diametro di 10,0mm a una distanza reciproca di 100,0mm e un terzo rullo di caricamento avente lo stesso diametro collocato in mezzo agli altri due. La lunghezza di questi rulli è compresa tra 45 e 50mm. I tre piani verticali passanti per gli assi dei tre rulli devono essere paralleli e rimanere paralleli, equidistanti e normali all'asse del provino di prova. Uno dei rulli di supporto e quello di caricamento devono essere in grado di inclinarsi leggermente per consentire una distribuzione uniforme del carico sulla larghezza del provino senza assoggettarlo a sollecitazioni di torsione.

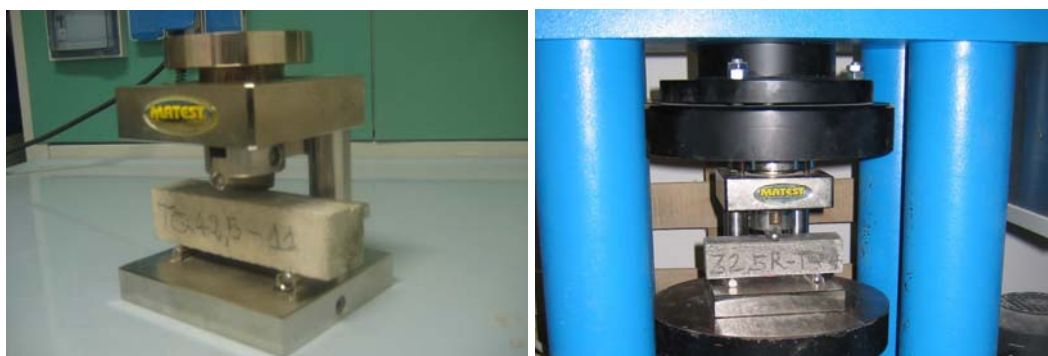


Figura 4.8 – Dispositivo utilizzato per le prove di flessione delle malte standard



Figura 4.9 – Dispositivo utilizzato per le prove di compressione delle malte standard

4.2.6 Perdita al fuoco

Per il cemento di tipo III/A utilizzato è stato necessario, in conformità con la norma UNI EN 197-1, verificare che la perdita a fuoco sia stata inferiore al 5% in massa. Il procedimento di prova è consistito:

- nella pesatura in un crogiolo precedentemente calcinato e tarato di 1g di cemento;
- nel posizionamento in forno elettrico alla temperatura di 975°C del crogiolo coperto precedentemente preparato per 5 minuti;
- nella rimozione del coperchio, lasciando comunque il crogiolo in forno per altri 10 minuti;
- nella ripesata del cemento.

La perdita al fuoco è determinata rapportando il prodotto tra la massa in grammi della porzione per analisi e la massa in grammi della porzione per analisi calcinata

(numeratore) rispetto alla massa in grammi della porzione per analisi (denominatore). Il tutto espresso in termini percentuali.

4.2.7 Residuo insolubile

Per i cementi di tipo I e di tipo III per tutte le classi di resistenza è necessario eseguire la prova del residuo insolubile. A 1g di cemento posto in un bicchiere da 250ml sono stati aggiunti 90ml di acqua e 10ml di acido cloridrico concentrato, agitando vigorosamente la miscela. Scaldata la soluzione a temperatura moderata e rompendo i grumi del campione con l'estremità piatta di una bacchetta di vetro fino a completa disgregazione del cemento e lasciato decantare la soluzione per 15minuti a una temperatura appena al di sotto di quella di ebollizione, si è poi filtrato il residuo su una carta da filtro media e lavato il tutto con acqua quasi bollente. A questo punto è stata trasferita la carta da filtro ed il suo contenuto nel bicchiere di attacco iniziale ed è stato aggiunto 100g di soluzione di carbonato di sodio. Si fa bollire il tutto per 15minuti e, quindi, si è lavato per 4 volte con acido cloridrico fino ad ottenere un PH < 2 ed infine si è sciacquato 1 volta con acqua quasi bollente fino alla completa scomparsa degli ioni cloruro. Ultima operazione è la calcinazione a 975°C e successivamente la misura del peso del campione. Il residuo insolubile che deve essere minore al 5% si ottiene rapportando la massa in grammi della porzione per analisi (denominatore) con la massa in grammi del residuo insolubile calcinato (numeratore).

4.2.8 Tenore in cloruro

Tutti i tipi di cementi conformi agli standard devono avere un tenore in cloruro non superiore allo 0,1% in massa. La prova utilizzata per misurare tale quantità è prevista nella UNI EN 196-21. Per ogni indagine è stato pesato 5g di cemento ed è stato versato in un bicchiere da 250ml. Si è aggiunta 50ml di acqua e, mescolando con un agitatore di vetro, è stato aggiunto 50ml di acido nitrico diluito. Si è riscaldata la soluzione fino a bollitura (1minuto). Quindi, è stato aggiunto con una pipetta 5ml della soluzione titolata di nitrato d'argento e si è fatto bollire per un altro minuto al massimo. Poi si è filtrato con carta da filtro, precedentemente lavata con acido nitrico diluito, in un matraccio da 500ml, e si è sciacquato il bicchiere, l'agitatore e la carta da filtro con lo stesso acido, finché il volume del filtrato e delle acque di lavaggio siano state pari a 200ml. Raffreddato il filtrato e le acque di lavaggio fino ad una temperatura minore di 2°C, è stato aggiunto 5ml di soluzione indicatore ed il tutto è stato titolato con la soluzione di tiocianato d'ammonio, agitando a tale scopo, vigorosamente la soluzione finché una goccia della soluzione di tiocianato ha prodotto una leggera colorazione rosso-bruna che non scompare più dopo agitazione. A questo punto è stato registrato il volume. Se il contenuto di cloruro nel cemento supera la percentuale dello 0,17%, è necessario ricominciare la misurazione con una quantità di cemento minore. E' necessario ripetere la procedura senza il campione di cemento e registrare il volume di soluzione di tiocianato d'ammonio necessaria alla titolazione. Il contenuto di cloruro è stato calcolato (in per cento) con la seguente formula:

$$Cl^- = \frac{1,773}{1000} \cdot (V_2 - V_1) \cdot \frac{100}{M_1}$$

dove:

- M_1 è la massa della porzione di prova del cemento;
- V_1 è il volume della soluzione di tiocianato d'ammonio necessaria per la titolazione della soluzione di prova;

- V_2 è il volume della soluzione di tiocianato d'ammonio necessario per la titolazione del bianco.

4.2.9 Tenore in solfato

Il procedimento di prova utilizzato è riportato nella norma UNI EN 196-2. Il procedimento di prova ha previsto l'utilizzo di 1g di cemento posto in un bicchiere da 250ml, al quale è stato aggiunto 90ml di acqua fredda. Successivamente, agitando vigorosamente, è stato aggiunto 10ml di acido cloridrico concentrato. La soluzione è stata scaldata a calore moderato. A questo punto si è lasciato decantare la soluzione per 15minuti a una temperatura appena al di sotto di quella di ebollizione e si è poi filtrato il residuo su una carta da filtro media in un bicchiere da 400ml. Si è lavato con acqua calda e si è accertato la scomparsa degli ioni cloruro con la prova al nitrato d'argento. Portato il volume a 250ml circa, correggendo eventualmente il PH della soluzione tra 1 e 1,5 con acido cloridrico o con idrossido di ammonio, si è portato il tutto ad ebollizione e si è lasciato bollire per 5minuti. E' stato controllato che la soluzione risultasse limpida, altrimenti sarebbe stato necessario ripetere la prova con una nuova porzione di campione. Mantenuta al punto di ebollizione la soluzione e agitando vigorosamente è stato aggiunta, a goccia a goccia, 10ml di soluzione di cloruro di bario. Quindi, si è portata la soluzione ad ebollizione per 15minuti affinché possa formarsi il precipitato. La soluzione è stata mantenuta ad una temperatura al disotto di quella di ebollizione (comunque maggiore di 60°C) per 12-24ore, avendo cura di evitare la concentrazione per evaporazione. Il precipitato è stato, poi, filtrato su di una carta da filtro fine ed il tutto è stato sciacquato con acqua bollente fino alla completa scomparsa degli ioni cloruro, comprovata dalla prova al nitrato d'argento. Si è poi calcinato a 925°C. Il contenuto di solfati, espresso come SO_3 , è stato calcolato in percentuale in base alla formula:

$$Cl^- = \frac{M_1 \cdot 0,343 \cdot 100}{Mg}$$

dove:

- Mg è la massa in grammi della porzione per analisi;
- M_1 è la massa in grammi del solfato di bario.

4.2.10 Determinazione del tempo di presa e della stabilità

La determinazione del tempo di inizio presa è effettuata utilizzando "l'ago di Vicat". Il procedimento di prova prevede inizialmente la taratura dell'apparecchio di Vicat attrezzato con l'ago, collegato prima dell'inizio della prova, abbassando l'ago stesso finché poggia sulla lastra di base in questione e regolando l'indice sullo zero della scala. Riempito uno stampo Vicat con un impasto di consistenza normalizzata e spianato, si è collocato lo stampo pieno con la piastra di base nel locale o nell'armadio umido come precisato e dopo un periodo di tempo adeguato è stato trasferito all'apparecchio di Vicat e posizionandolo sotto l'ago. Si è abbassato con precauzione l'ago fino al contatto con l'impasto. Si è atteso in tale posizione per 1, 2s per evitare la velocità iniziale o l'accelerazione forzata delle parti in movimento. Quindi, si è liberato rapidamente le parti mobili al fine di permettere all'ago di penetrare verticalmente nell'impasto. Si è letta la scala quando è cessata la penetrazione o, qualora essa continui, 30 s dopo la liberazione dell'ago. Si è preso nota della lettura sulla scala che indica la distanza tra l'estremità dell'ago e la base, congiuntamente col tempo trascorso dopo l'istante zero. La prova di penetrazione è stata ripetuta sullo stesso provino in posizioni opportunamente distanziate a non meno di 10 mm dal bordo dello stampo e tra di

loro, a intervalli di tempo opportunamente distanziati (a intervalli di 10 minuti). Tra una prova di penetrazione e l'altra è stato mantenuto il campione in un locale o armadio saturo di umidità. E' stato pulito l'ago di Vicat immediatamente dopo ciascuna penetrazione e si è registrato come tempo di inizio presa del cemento con tolleranza di 5 min il tempo trascorso dall'istante zero a quello quando la distanza tra l'ago e la piastra di base è di 4mm. Per misurare il tempo di fine presa si è capovolto lo stampo utilizzato sulla piastra di base in modo che le prove di fine presa siano eseguite sulla faccia del provino originariamente a contatto con la piastra di base. Si è munire l'ago di un accessorio anulare per facilitare l'osservazione precisa di piccole penetrazioni. Gli intervalli di tempo tra le prove di penetrazione sono stati aumentati fino a 30 min. Tra una prova di penetrazione e l'altra il provino è stato mantenuto in un locale o armadio saturo di umidità. Dopo ciascuna penetrazione è stato pulito l'ago di Vicat immediatamente ed è stato registrato come tempo di fine presa del cemento con approssimazione di 15 minuti, il tempo trascorso dall'istante zero a quello quando l'ago per la prima volta non penetra nel provino più di 0,5 mm. Questo è stato il momento in cui l'accessorio anulare non è riuscito più a segnare il provino ed è stato stabilito con precisione riducendo l'intervallo di tempo tra le prove all'approssimarsi di questo momento finale e accertando che le letture che si succedono non presentino eccessive fluttuazioni.

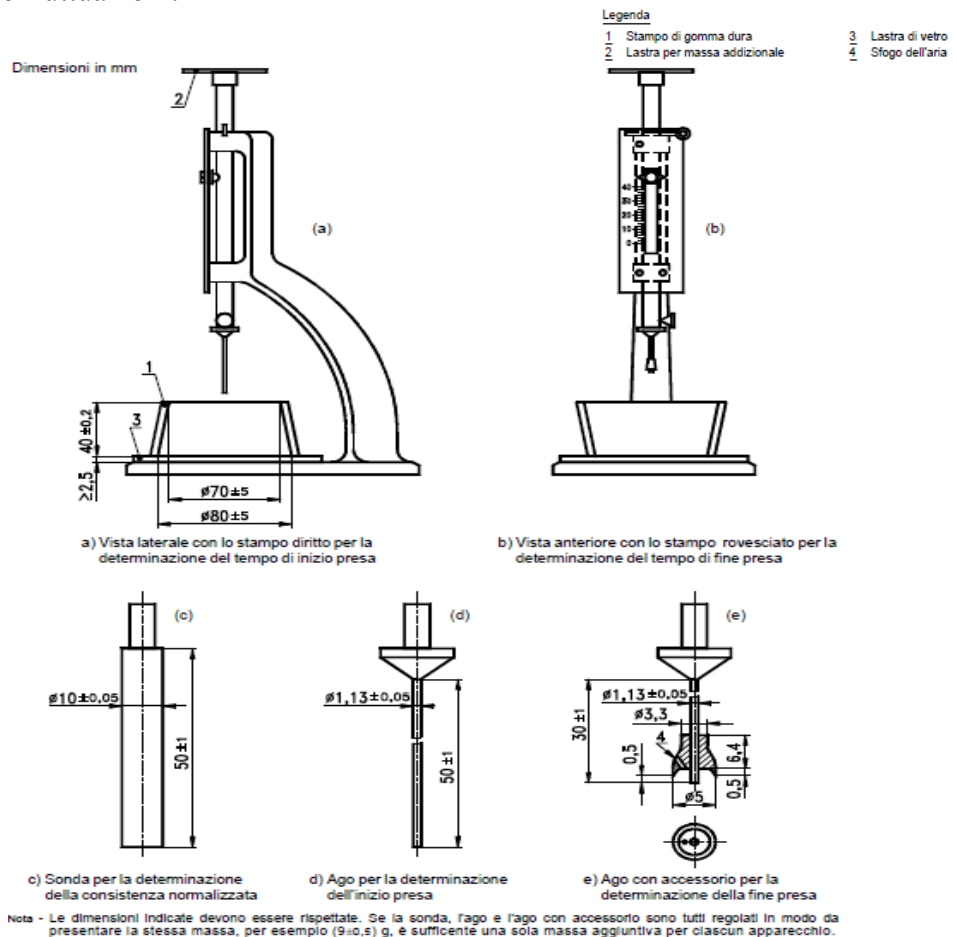


Figura 4.10 - Apparecchio Vicat per la determinazione della consistenza normalizzata e del tempo di presa del cemento

La determinazione della stabilità è stata eseguita con l'apparecchiatura denominata "Pinza di Le Chatelier". La prova va eseguita simultaneamente su due provini provenienti dallo stesso impasto. Preparata una pasta cementizia di

consistenza normalizzata e collocata la stessa in uno stampo Le Chatelier leggermente lubrificato sulla base leggermente lubrificata. Il riempimento è stato eseguito immediatamente senza eccessiva compattazione o vibrazione, utilizzando soltanto le mani ed eventualmente un attrezzo a bordi diritti per livellare la superficie superiore. Durante il riempimento è stato evitato che la fessura nello stampo si aprisse inavvertitamente, per esempio, mediante leggera pressione delle dita, legandolo o bloccandolo con una cinghia di gomma adatta. E' stato, quindi, coperto lo stampo con la piastra di copertura leggermente lubrificata, aggiungendo l'eventuale massa supplementare. Il campione è stato poi collocato immediatamente lo stampo completo nell'armadio a umido ed è stato mantenuto per 24h a 20°C e a non meno del 98% di umidità relativa. Infine, si è misurato la distanza tra le punte degli aghi indicatori con tolleranza di 0,5mm e si è poi scaldato gradatamente fino all'ebollizione lo stampo in 30minuti e mantenuto il bagno d'acqua a temperatura di ebollizione per 3ore. Al termine del periodo di ebollizione si può misurare la distanza tra le punte degli aghi indicatori con tolleranza di 0,5 mm. Raffreddato lo stampo a 20°C, si è misurata nuovamente la distanza tra le punte degli aghi indicatori con tolleranza di 0,5 mm. Infine, si è calcolata la media dei due valori della differenza tra il terzo ed il primo valore registrato con approssimazione di 0,5 mm. La UNI EN 197-1 prescrive che tale valore debba essere inferiore a 10mm.

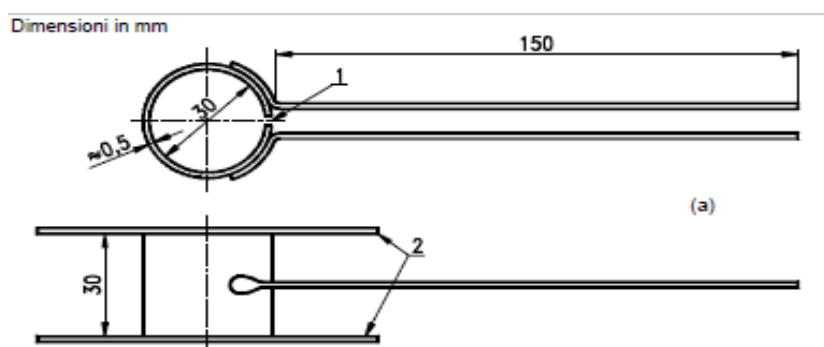


Figura 4.11 - Apparecchio di "Le Chatelier"

4.2.11 Analisi granulometrica

La norma UNI EN 933-1 stabilisce un metodo per la determinazione della distribuzione granulometrica degli aggregati mediante staccatura. Si applica agli aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi gli aggregati leggeri, fino ad una dimensione nominale di 63 mm, esclusi i filler. La prova consiste nel dividere, per mezzo di una serie di stacci, un materiale in numerose classi granulometriche di dimensioni decrescenti. Le dimensioni delle maglie e il numero degli stacci sono scelti in base alla natura del campione ed alla precisione richiesta. Il procedimento adottato è il lavaggio seguito da staccatura a secco. I campioni devono essere ridotti conformemente al prEN 932-2 per ottenere il numero richiesto di porzioni di prova. Potrebbe essere necessario inumidire i campioni contenenti quantità apprezzabili di particelle fini prima di procedere alla loro riduzione, al fine di ridurre al minimo la segregazione e la perdita di polvere. La massa di ciascuna porzione di prova deve essere conforme a quanto riportato nella tabella 4.2, per aggregati di massa volumica compresa fra 2,00 Mg/m³ e 3,00 Mg/m³. La riduzione del campione deve permettere di ottenere una porzione di prova di massa maggiore del minimo, ma senza valore esatto predeterminato. Il procedimento della prova prevede di far essiccare la porzione di prova portandola

ad una temperatura di 110°C fino a massa costante. Lasciata poi raffreddare, si effettuano delle pesate che sono opportunamente registrate. Per alcuni tipi di aggregati, l'essiccazione a 110°C lega insieme le particelle in modo sufficientemente forte da impedire la separazione durante i successivi processi di lavaggio e/o stacciatura. Per questo tipo di aggregati si deve seguire un diverso procedimento.

Dimensione massima dell'aggregato <i>D</i> mm	Massa della porzione di prova (minimo) kg
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Tabella 4.2 Massa della porzione di prova per aggregati di massa volumica normale

In particolare, la procedura prevede di porre la porzione di prova in un recipiente e aggiungere acqua fino a coprirlo. L'immersione per 24 h in acqua facilita lo scioglimento dei grumi, ma è ammesso anche l'uso di un agente disperdente. Si agita vigorosamente la porzione di prova per ottenere una completa separazione e sospensione delle frazioni fini. Dopo di che si inumidisce uno staccio di 63 micron, riservato all'uso per questa prova e si adatta uno staccio di protezione (per esempio 1 mm o 2 mm) al disopra del primo. Si sistemano gli stacci in modo tale che la sospensione, passando attraverso lo staccio di prova, possa essere eliminata o, se necessario, raccolta in un recipiente adeguato. A questo punto, si versa il contenuto del recipiente nello staccio superiore e si prosegue fino a che le acque di lavaggio, passando attraverso lo staccio di 63micron, escano limpide. Si deve fare particolare attenzione al fine di prevenire sovraccarichi, tracimazioni o danneggiamenti dello staccio di 63micron o dello staccio di protezione. Per alcuni aggregati, potrebbe essere necessario versare soltanto le particelle fini in sospensione dal recipiente sullo staccio di protezione di 63micron, seguitando a lavare il residuo grosso nel recipiente e travasando soltanto le particelle fini nello staccio di protezione fino a quando l'acqua, passando attraverso lo staccio di prova di 63micron, risulti limpida. Il residuo trattenuto sullo staccio di 63micron viene essiccato a 110°C fino a massa costante. Quindi, si lascia raffreddare e successivamente si determina la massa. Il materiale lavato ed essiccato (o direttamente il campione essiccato) si versa nella colonna degli stacci sovrapposti. La colonna comprende un certo numero di stacci sovrapposti e disposti dal maggiore verso il minore, in ordine di dimensione decrescente di maglia, oltre a coperchio e recipiente di fondo. L'esperienza ha dimostrato che il lavaggio non elimina necessariamente la totalità delle particelle fini. È dunque necessario che uno staccio di prova di 63micron faccia parte della colonna di stacci. Si fa agitare la colonna, manualmente o meccanicamente, quindi vengono rimossi gli stacci uno per uno cominciando da quello che presenta l'apertura più grande. Si travasa tutto il materiale che passa attraverso ciascuno staccio sullo staccio successivo della colonna, prima di proseguire l'operazione. L'operazione di stacciatura può essere considerata completata quando la quantità di materiale trattenuto non subisce variazioni maggiori dell'1,0% durante 1 min di stacciatura. Onde evitare il sovraccarico degli stacci, la frazione trattenuta al termine della stacciatura su ciascuno staccio (espressa in grammi) non deve superare:

$$\frac{A \cdot \sqrt{d}}{200}$$

dove:

- A è la superficie dello staccio, in millimetri quadrati;
- d è la dimensione delle maglie dello staccio, in millimetri.

Se qualcuna delle frazioni trattenute supera tale massa, si deve adottare uno dei seguenti procedimenti:

- si divide il trattenuto in parti più piccole del massimo specificato e stacciarle l'una dopo l'altra;
- si divide la porzione del campione passante attraverso lo staccio con maglia di apertura immediatamente maggiore con l'aiuto di un divisore per campioni o mediante quartatura e proseguire la stacciatura sul campione ridotto, tenendo conto delle riduzioni nei calcoli ulteriori.

E' ora possibile determinare la massa del trattenuto nello staccio con maglia di dimensione più grande. La stessa operazione si effettua per lo staccio immediatamente sottostante. Si prosegue con la stessa operazione per tutti gli stacci che si trovano nella colonna per ottenere le masse delle diverse parti di materiale trattenuto. Si determina la massa del materiale vagliato, se del caso, rimasto nel recipiente. Si può ora calcolare la massa del trattenuto su ciascuno staccio, espressa come percentuale della massa essiccata d'origine, si può anche calcolare la percentuale cumulativa rispetto alla massa essiccata d'origine del passante attraverso ogni staccio, fino a quello di 63micron non compreso ed infine, si può calcolare la percentuale delle particelle fini che passano attraverso lo staccio di 63micron. I valori ottenuti si possono diagrammare in un grafico percentuale di passante (ordinate) – diametro (ascisse), ottenendo la cosiddetta curva granulometrica.



Figura 4.12 – Dispositivo elettrico e setacci utilizzati per eseguire le analisi granulometriche

4.3 Caratterizzazione delle malte

Sulle diverse tipologie di malta cementizia confezionate in questo lavoro sperimentale sono state eseguite soprattutto allo stato indurito una serie di indagini in laboratorio al fine di caratterizzarle e capire l'influenza dell'utilizzo del materiale PFU sulle loro prestazioni. Nei paragrafi successivi sono state riportate nel dettaglio le descrizioni delle tecniche di indagine eseguite.

4.3.1 Rilevazione del Peso

Prima di eseguire i test meccanici sui provini di malta, per ognuno, alle diverse stagionature, è stato rilevato il peso tramite una bilancia di precisione. La bilancia usata per la misurazione del peso dei manufatti è riportata in figura 4.13. Trattasi di una bilancia di precisione con portata massima 15kg e accuratezza 0,5g.



Figura 4.13 – bilancia di precisione utilizzata per la rilevazione del peso dei provini

4.3.2 Prove meccaniche di resistenza a flessione e a compressione

La norma europea UNI EN 12190 definisce un metodo per la determinazione della resistenza alla compressione di malte e calcestruzzi per riparazioni strutturali e non strutturali, come definiti nella EN 1504-1. Il metodo è applicabile a tutti i tipi di malta e calcestruzzo da riparazione aventi un aggregato con dimensione massima di 8 mm. Esso fa distinzione tra malte con leganti idraulici e polimerici. Per la preparazione dei provini di malta 40mm x 40mm x 160mm si può utilizzare la tecnica di impasto, di formatura, di stagionatura e le attrezzature previste nella UNI EN 196-1. Per la determinazione della resistenza a compressione e a flessione sono state utilizzate le tecniche previste nella medesima norma. Ogni provino è stato sottoposto a prova di flessione e le due metà ottenute a prove di compressione.

4.3.3 Cicli termici

E' stata analizzata la risposta dei diversi tipi di miscele eseguiti in seguito all'esposizione a particolari condizioni ambientali creati mediante trattamenti termici. Questi sono stati compiuti per mezzo di un apposito forno con il quale è stata raggiunta la temperatura massima di 300°C. Per i trattamenti termici sono stati usati provini che hanno raggiunto i 90 giorni di stagionatura. Tra un ciclo e l'altro, la temperatura del forno è stata aumentata di 50°C, a partire dalla 100°C fino ad arrivare a 300°C. In definitiva i provini di malta cementizia sono stati soggetti a 5 step termici: 100°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C. In figura 4.14 sono riportate alcune fasi del trattamento termico dei provini.



Figura 4.14 – Fasi delle prove di trattamento termico dei provini di malta cementizia

4.3.4 Indagine ultrasonora

L'impiego degli ultrasuoni per applicazioni su elementi in conglomerato cementizio rientra tra i controlli non distruttivi. Con i controlli non distruttivi (non destructive testing o non destructive evaluation), com'è noto, le caratteristiche ricercate vengono messe in evidenza o misurate sulla struttura attraverso l'influenza che esse esercitano su alcune proprietà fisiche del materiale. Questa metodologia non altera i materiali nelle loro caratteristiche. Nel caso specifico la metodologia viene applicata a provini di malta cementizia sapendo che, sul conglomerato cementizio il metodo ultrasonico, è utilizzato per valutare l'omogeneità in situ e stimare la resistenza degli elementi strutturali. Il metodo si basa sulla determinazione della velocità di transito degli ultrasuoni attraverso il materiale, nonché sull'esame del segnale ricevuto, opportunamente visualizzato. La grandezza che viene misurata (in microsecondi) è il tempo di transito (t) degli impulsi ultrasonici (detto anche tempo di volo - TOF: time off light) impiegato a percorrere la distanza geometrica (s in mm) tra punti di rilievo sull'unità da saggiare. Il parametro non distruttivo è la velocità (V) virtuale o apparente cioè:

$$V = \frac{s}{t}$$

dove s viene misurata in metri e t in microsecondi.

Pertanto:

$$V = \frac{s (m)}{10^{-6} (\text{sec})} = 10^6 \frac{s}{t} \cdot m \cdot \text{sec}^{-1}$$

Per la misura di t viene richiesta una precisione di $\pm 1 \%$.

L'apparecchio ad ultrasuoni è sostanzialmente costituito da:

- un dispositivo che a comando emette impulsi di vibrazioni meccaniche (emettitore o sonda emittente) in sincronismo con un segnale elettrico. Il generatore di impulsi è costituito da un thyatron (valvola rettificatrice a griglia pilota) il quale carica il condensatore che, a sua volta, scaricando improvvisamente, genera l'impulso;
- sull'uscita è collocata una resistenza che regola l'ampiezza e contemporaneamente anche la durata dell'impulso. Un sincronizzatore emette, con frequenza prefissata, il segnale necessario a comandare l'emissione di un impulso e l'inizio di un ciclo di scansione. L'emittitrice oltre ad avviare un'unità di misura di intervalli di tempo attiva un'unità di visualizzazione della vibrazione in ricezione. Di seguito si riporta lo schema di funzionamento di un rilevatore mediante diagramma a blocchi.
- un dispositivo che, ricevendo le vibrazioni meccaniche, le trasforma in segnali elettrici (ricevitore o sonda ricevente);
- un dispositivo di amplificazione regolabile e di trattamento del segnale emesso dalla sonda ricevente;

L'impulso di vibrazione che perviene alla sonda ricevente, trasformato in un segnale elettrico, opportunamente amplificato, viene visualizzato sullo schermo a raggi catodici (CRT, apparecchio tradizionale) o su uno schermo a cristalli liquidi (moderni apparecchi digitali) o equivalente di un oscilloscopio. Sullo schermo dell'oscilloscopio il segnale elettrico, eventualmente filtrato, entro bande preselezionate, viene rappresentato in modo da misurare il tempo (t) intercorso tra l'emissione e la ricezione, ed in modo da valutare altri importanti parametri (frequenza, ampiezza, smorzamento, riflessione, etc.). E' opportuno che sull'oscilloscopio vengano visualizzati anche gli istanti di partenza e di arresto

dell'unità di misura dell'intervallo di tempo, per una mutua precisa correlazione ed una continua verifica da parte dell'operatore. La malta cementizia presenta buone caratteristiche di trasmissione delle onde elastiche ed una velocità di propagazione intorno ai 4000÷4300 m/sec in uno spettro che arriva fino a 50 kHz. I segnali utilizzati per le prove sulle malte, a differenza di quelli correnti nel controllo dei metalli, sono di tipo impulso e quindi a banda molto larga. Si preferisce usare impulsi a frequenze ultrasoniche (20+150 Hz) fondamentalmente per due ragioni: per produrre un impulso con una partenza netta, il che equivale ad una migliore precisione nella misura del tempo e per produrre l'energia meccanica di vibrazione massima nella direzione di propagazione, in altre parole, avere la massima sensibilità. La prova è stata eseguita, come accennato, su provini di malta cementizia di dimensioni 40mm x 40mm x 160mm e la rilevazione della velocità ultrasonora è stata effettuata longitudinalmente al lato lungo del provino. Maggiori dettagli sono stati riportati nel paragrafo “4.4.2.4.2 Prova ultrasonora”.

4.4 Caratterizzazione dei calcestruzzi

Per le miscele di calcestruzzo eseguite è stata compiuta una caratterizzazione più completa ed approfondita rispetto alle malte cementizie. Infatti, sono state effettuate prove sia allo stato fresco che indurito. La caratterizzazione è stata rivolta, inoltre, ad accertare particolari requisiti fisici, chimici e meccanici.

4.4.1 Prove allo stato fresco

Confezionate le miscele di calcestruzzi, prima di formare i provini, si è provveduto ad eseguire sulle stesse idonee prove per stimare le relative prestazioni in termini di lavorabilità. Alcune prove sono necessarie per classificare le diverse tipologie di conglomerato realizzato: ad esempio, per realizzare calcestruzzi autocompattanti è necessario eseguire alcune prove quali lo slump flow test, j-ring test, ecc., ed il rispetto di alcuni limiti per l'accettazione.

4.4.1.1 Prova al cono di Abrams

La norma UNI EN 12350 specifica un metodo per determinare la consistenza del calcestruzzo fresco mediante la misurazione dell'abbassamento al cono di Abrams. La prova di abbassamento al cono è sensibile alle variazioni di consistenza del calcestruzzo corrispondenti ad abbassamenti compresi tra i 10 mm ed i 200 mm. Oltre questi due limiti, la misurazione dell'abbassamento può risultare inadeguata e si dovrebbero prendere in considerazione altri metodi per la determinazione della consistenza. Se l'abbassamento continua a variare sensibilmente durante il primo minuto dopo il sollevamento dello stampo, questo metodo di prova non è adeguato come misura della consistenza. La prova non è adatta se la dimensione massima dell'aggregato del calcestruzzo è maggiore di 40 mm. L'apparecchiatura per eseguire la prova è essenzialmente uno stampo per formare il campione, di metallo non facilmente aggredibile dalla pasta cementizia e con spessore di almeno 1,5 mm. Il suo interno deve essere liscio ed esente da sporgenze quali chiodature ed ammaccature. Lo stampo deve avere forma di tronco di cono cavo con le dimensioni interne seguenti:

- diametro della base inferiore 200mm;
- diametro della base superiore 100mm;
- altezza 300mm.

Le basi inferiore e superiore dello stampo devono essere aperte, parallele fra di loro e ad angolo retto con l'asse del cono. Per poter tenere fermo lo stampo,

questo deve essere munito di due maniglie nella parte superiore e di ganci di fissaggio alla piastra di base oppure di staffe sulle quali appoggiare i piedi. Lo sblocco degli eventuali ganci di fissaggio deve avvenire senza che si determini alcun movimento dello stampo stesso o alcuna interferenza con il calcestruzzo che si sta abbassando. Occorre utilizzare anche una barra di costipazione, a sezione circolare, diritta, di acciaio, avente diametro di 16mm, lunghezza di 600mm ed estremità arrotondate. Il procedimento di prova prevede l'inumidimento dello stampo e della piastra di base e di porre lo stampo sulla piastra/superficie di base posta orizzontalmente. Durante il riempimento occorre mantenere fermo lo stampo contro la piastra/superficie di base utilizzando i ganci di fissaggio o gravando con i piedi sulle due staffe di base. Poi, occorre riempire lo stampo in 3 strati successivi pari ciascuno, una volta assestato, a circa un terzo dell'altezza dello stampo. Si assesta, quindi, ciascuno strato con 25 colpi di barra di costipazione distribuendo uniformemente i colpi sulla sezione trasversale di ciascuno strato. Per assestare lo strato inferiore è necessario distribuire circa la metà dei colpi a spirale dal perimetro verso il centro, inclinando leggermente la barra di costipazione. La compattazione dello strato intermedio e di quello superiore avviene facendo penetrare il pestello per tutta la sua profondità, in modo che i colpi penetrino nello strato immediatamente sottostante. Quando si riempie e compatta lo strato superiore, si deve aggiungere calcestruzzo in eccesso prima di iniziare l'assestamento. Se nonostante ciò l'assestamento provocasse l'abbassamento del livello del calcestruzzo al disotto del bordo superiore dello stampo, occorre aggiungere ancora calcestruzzo in modo da mantenere sempre un eccesso di calcestruzzo sopra la sommità. Subito dopo l'assestamento dell'ultimo strato, si deve rasare e lisciare la superficie del calcestruzzo usando la barra di costipazione con movimento di va e vieni e di rotolamento. Si rimuove dalla piastra/superficie di base il calcestruzzo versato e lo stampo dal calcestruzzo sollevandolo verticalmente con cura. L'operazione di rimozione dello stampo deve essere compiuta in un tempo compreso fra 5s e 10s con un sollevamento regolare senza impartire al calcestruzzo movimenti laterali o torsionali. L'intera operazione, dall'inizio del riempimento alla rimozione dello stampo, deve essere compiuta senza interruzione e completata entro 150 s. Immediatamente dopo aver rimosso lo stampo si deve misurare e registrare l'abbassamento determinando la differenza tra l'altezza dello stampo e quella del punto più alto del campione di calcestruzzo in esame. La consistenza di un impasto di calcestruzzo varia al trascorrere del tempo in conseguenza del procedere dell'idratazione del cemento e della possibile perdita di umidità. Pertanto, se si vogliono ottenere risultati rigorosamente confrontabili, le prove dovrebbero essere eseguite sui differenti campioni mantenendo costante l'intervallo di tempo dall'inizio della miscelazione. La prova è valida solo se dà luogo ad un abbassamento vero, in cui il calcestruzzo rimane sostanzialmente intatto e simmetrico. Se il provino cede per taglio deve essere preso un altro campione e ripetere la prova. Se due prove consecutive mostrano un cedimento per taglio di una porzione di calcestruzzo rispetto alla massa del campione di prova, il calcestruzzo manca della plasticità e coesione necessarie affinché possa essere ritenuta idonea la prova di cedimento al cono.

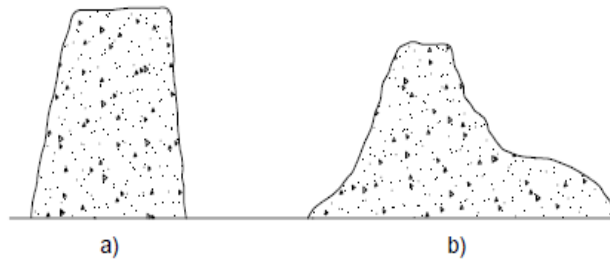


Figura 4.15 – Tipi di abbassamento al cono: a) abbassamento vero; b) abbassamento con scorrimento

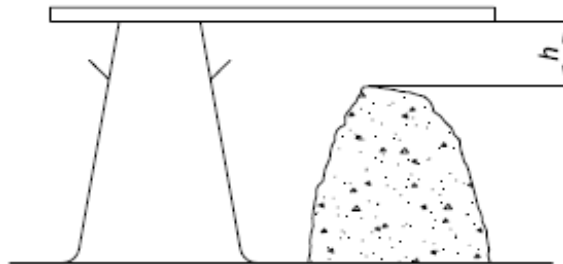


Figura 4.16 – Misura dell'abbassamento al cono

4.4.1.2 Slump Flow Test

La prova si esegue su calcestruzzi autocompattanti. La norma UNI 11041 stabilisce un metodo per la determinazione della consistenza del calcestruzzo autocompattante fresco mediante la misura dello spandimento e del tempo necessario a raggiungere il diametro di 500 mm. L'attrezzatura da utilizzare nella prova consiste essenzialmente in: uno stampo troncoconico, conforme alla UNI EN 12350-2 (lo stampo non deve essere corredato di ganci di fissaggio o di staffe, una piastra quadrata piana, non assorbente, avente dimensioni di circa 800 mm x 800 mm su cui viene collocato lo stampo (sulla superficie di lavoro della piastra sono disegnate due circonferenze, una avente diametro di 200 mm ed una di diametro di 500 mm, un recipiente di campionamento rigido (costruito con materiale non assorbente e non facilmente aggredibile dalla pasta cementizia, adatto a raccogliere i prelievi elementari di calcestruzzo e a rimescolarli). La prova si effettua eseguendo preliminarmente le seguenti operazioni:

- disporre la piastra su un piano orizzontale;
- inumidire lo stampo troncoconico e la superficie della piastra quadrata piana con un panno umido;
- porre lo stampo sulla piastra centrandolo sulla circonferenza più piccola ed agendo sulle maniglie per mantenerlo fermo durante il riempimento con il calcestruzzo;

Lo stampo è riempito mediante la sessola e/o il secchio in un'unica soluzione. Subito dopo il riempimento si raso e si liscia la superficie del calcestruzzo usando una cazzuola, queste fasi devono essere effettuate in un tempo non maggiore di 2 min. Si ripulisce, se necessario, la superficie della piastra ai bordi dello stampo e si rimuove lo stampo sollevandolo con cura in direzione verticale. Lo stampo troncoconico è sollevato in un tempo compreso tra 2s e 3s e contemporaneamente a questa azione si fa partire il cronometro. Si rileva con il cronometro il tempo che il calcestruzzo, nel suo libero fluire, impiega a raggiungere la circonferenza di 500 mm; la misurazione è effettuata e registrata con accuratezza di 0,1 s. Quando il calcestruzzo ha terminato il suo libero movimento, si rileva il diametro medio di

spandimento, determinando le dimensioni del calcestruzzo lungo due direzioni ortogonali; la misurazione è effettuata e registrata con approssimazione di 5 mm. La prova non è ritenuta valida se le dimensioni dei diametri del calcestruzzo differiscono più di 50 mm. La consistenza di un impasto di calcestruzzo varia al trascorrere del tempo in conseguenza del procedere dell'idratazione del cemento e dell'eventuale perdita di umidità. Pertanto, se si vogliono ottenere risultati confrontabili, è necessario che le prove su differenti campioni vengano effettuate mantenendo costante l'intervallo di tempo trascorso fra l'inizio della miscelazione e la misurazione dello spandimento. Si deve registrare il diametro medio di spandimento e se richiesto, il tempo che il calcestruzzo ha impiegato per raggiungere la circonferenza da 500 mm. Si osserva la forma del calcestruzzo ottenuta al termine dello spandimento valutando se la distribuzione degli aggregati grossi risulta omogenea tra parte centrale e periferia o concentrata nella parte centrale (valutazione qualitativa di segregazione) e se al bordo del calcestruzzo c'è presenza di acqua o boiaccia molto fluida (valutazione qualitativa di sedimentazione o bleeding). In conformità con quanto imposto dalla norma UNI 11040, la prova risulta accettata se il valore di fluidità (spandimento massimo) è superiore a 600mm e se il tempo di spandimento per raggiungere il diametro di 500mm è non superiore a 12s. Nella figura 4.17 sono mostrate una serie di immagini relative all'esecuzione di una prova dello slump flow test.

4.4.1.3 J-Ring Test

La prova si esegue su calcestruzzi autocompattanti. La norma UNI 11045 stabilisce un metodo per determinare la capacità del calcestruzzo autocompattante fresco ad attraversare gli ostacoli. L'attrezzatura da utilizzare nella prova consiste essenzialmente in:

- uno stampo troncoconico, di metallo non aggredibile dalla pasta cementizia e con spessore di almeno 1,5 mm (lo stampo corrisponde a quello previsto dalla UNI EN 12350-2), lo stampo non deve essere corredato di ganci di fissaggio o di staffe;
- una piastra quadrata piana, non assorbente, avente dimensioni di circa 800mm x 800mm su cui si colloca lo stampo troncoconico e l'anello a J. Sulla superficie di lavoro è opportuno siano tracciati dei riscontri per poter centrare sia lo stampo sia l'anello;
- un anello a J, costituito da un anello di sezione rettangolare 30mm x 25mm ed un diametro medio di 300 mm. L'anello lungo la circonferenza mediana è forato, entro i fori sono fissate delle barre cilindriche aventi diametro nominale di 10 mm e lunghezza di circa 100mm. Le barre distano tra di loro 48mm. Se richiesto all'anello possono essere applicate barre di diversa dimensione e con diversa spaziatura rispetto a quelle indicate nella presente norma.

La prova si effettua eseguendo le seguenti operazioni:

- inumidire con un panno umido sia la superficie della piastra sia la parte interna dello stampo troncoconico;
- disporre sulla piastra in posizione centrata l'anello a J e lo stampo troncoconico, riempire con la sessola lo stampo mantenendo in posizione sia lo stampo sia l'anello a J. Eliminare il calcestruzzo eccedente utilizzando la cazzuola e la barra;
- sollevare rapidamente lo stampo con movimento verticale e regolare e lasciare che il calcestruzzo scorra liberamente. Quando il movimento del

calcestruzzo si è arrestato si rilevano le misure di 2 diametri ortogonali di spandimento.

Queste operazioni devono essere eseguite senza muovere l'anello. Osservare se l'altezza all'interno dell'anello è visibilmente più alta del calcestruzzo all'esterno dell'anello. Le proprietà reologiche di un impasto di calcestruzzo variano al trascorrere del tempo per il procedere dell'idratazione del cemento e dell'eventuale perdita di umidità. Pertanto, se si vogliono ottenere risultati confrontabili, bisogna che le prove, su differenti campioni o prelievi, vengano effettuate mantenendo costante l'intervallo di tempo trascorso fra l'inizio della miscelazione e la misurazione dello spandimento. Infine, occorre calcolare la media (in millimetri) della lunghezza di due diametri ortogonali di spandimento. La norma UNI 11040 prescrive, al fine dell'accettazione della miscela di calcestruzzo autocompattante, di verificare che la differenza di diametro rispetto allo scorrimento senza anello sia non superiore a 50mm. Nella figura 4.18 sono mostrate una serie di immagini relative all'esecuzione di una prova del j-ring test.

4.4.1.4 V-Funnel Test

La prova si esegue su calcestruzzi autocompattanti. La norma UNI 11042 stabilisce un metodo per la determinazione del tempo di efflusso del calcestruzzo autocompattante fresco da un imbuto avente caratteristiche geometriche prefissate. La norma può essere utilizzata per valutare la segregazione ed il metodo si applica a calcestruzzi con aggregati aventi dimensione massima dei granuli non maggiore di 25 mm. L'attrezzatura da utilizzare nella prova consiste essenzialmente in:

- imbuto di acciaio con capacità nominale dell'imbuto di 10 litri e la sezione del condotto di deflusso di 65mm x 75mm nominali. L'imbuto è montato su un supporto che costituisce parte integrante dell'apparecchiatura. L'orifizio di efflusso dell'imbuto è corredato di una valvola a tenuta in grado di essere aperta completamente ed istantaneamente. Il bordo superiore dell'imbuto ha bordi lisci e rinforzati in modo da permettere il livellamento del calcestruzzo dopo il riempimento;
- recipiente atto a ricevere il calcestruzzo allo scarico dell'imbuto avente un volume di almeno 12 litri;
- recipiente di campionamento rigido, costruito con materiale non assorbente e non facilmente aggredibile dalla pasta cementizia, adatto a raccogliere i prelievi elementari di calcestruzzo e a rimescolarli.

Per la determinazione del tempo di efflusso iniziale, occorre lavare e, quindi, inumidire la superficie interna dell'imbuto, posizionare l'imbuto sul suo appoggio in modo che il bordo superiore sia orizzontale e l'asse (condotto di scarico) verticale. Si dispone sotto l'imbuto il recipiente e, dopo avere verificato che la valvola di scarico dell'imbuto sia chiusa, riempire con il calcestruzzo in un'unica soluzione l'imbuto con la sessola o il recipiente. Livellare con la barra il calcestruzzo rispetto al bordo superiore, senza imporre vibrazioni al calcestruzzo. Si apre la valvola d'efflusso entro 10s dal termine del riempimento e contemporaneamente, all'inizio del deflusso del calcestruzzo, iniziare il conteggio del tempo con il cronometro. Arrestare il cronometro quando termina l'efflusso del calcestruzzo che corrisponde a quando dal sopra dell'imbuto si scorge la luce attraversare il fondo. L'intera prova, comprensiva di riempimento, livellamento ed efflusso, non deve durare più di 2 min. La ripetizione della prova su due differenti campioni, se richiesta, deve essere eseguita entro un tempo non maggiore di 10 min. La prova per la determinazione del tempo di efflusso dopo 5min di riposo

deve essere eseguita in rapida sequenza alla determinazione del tempo di efflusso iniziale. L'imbuto non deve né essere ripulito né umidificato. Dopo avere richiuso la valvola di scarico si riempie con l'imbuto con nuovo calcestruzzo prelevato dal recipiente di campionamento. Dopo aver livellato con la barra la superficie del calcestruzzo rispetto al bordo si attendono 5 min. La valvola di efflusso deve essere aperta rapidamente e, contemporaneamente all'inizio del deflusso del calcestruzzo, si inizia il conteggio del tempo d'efflusso con il cronometro. Il cronometro è arrestato quando termina l'efflusso del calcestruzzo che corrisponde a quando dal sopra dell'imbuto si scorge la luce attraversare il fondo. Prima di iniziare la prova è opportuno verificare il corretto funzionamento della valvola di apertura dell'imbuto. Nel caso di calcestruzzi molto viscosi può risultare difficile valutare il tempo di inizio di efflusso. In ogni caso, si può assumere che il tempo di inizio corrisponda con l'apertura della valvola. Le proprietà reologiche di un impasto di calcestruzzo variano al trascorrere del tempo per il procedere dell'idratazione del cemento e dell'eventuale perdita di umidità. Pertanto, se si volessero ottenere risultati confrontabili, bisognerebbe che le prove, su differenti campioni, o prelievi, vengano effettuate mantenendo costante l'intervallo di tempo trascorso fra l'inizio della miscelazione e la misura del tempo di efflusso. Come previsto dalla norma UNI 11040, affinché la miscela di calcestruzzo possa superare la prova, occorre verificare che la deformabilità (tempo di efflusso dall'imbuto a V) rientri nell'intervallo 4-12s e che la Stabilità alla sedimentazione (imbuto a V dopo 5 min) sia al massimo 3s più lenta della misurazione della deformabilità. Nella figura 4.19 sono mostrate una serie di immagini relative all'esecuzione di una prova del v-funnel test.

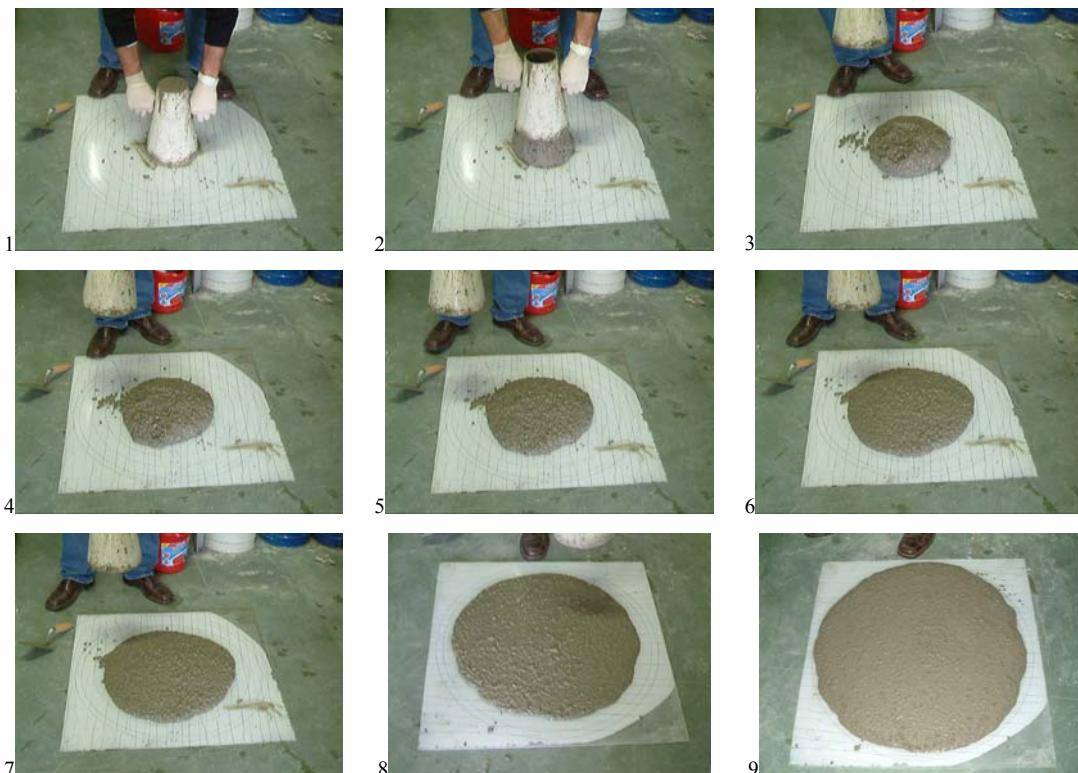


Figura 4.17 – Slump Flow Test

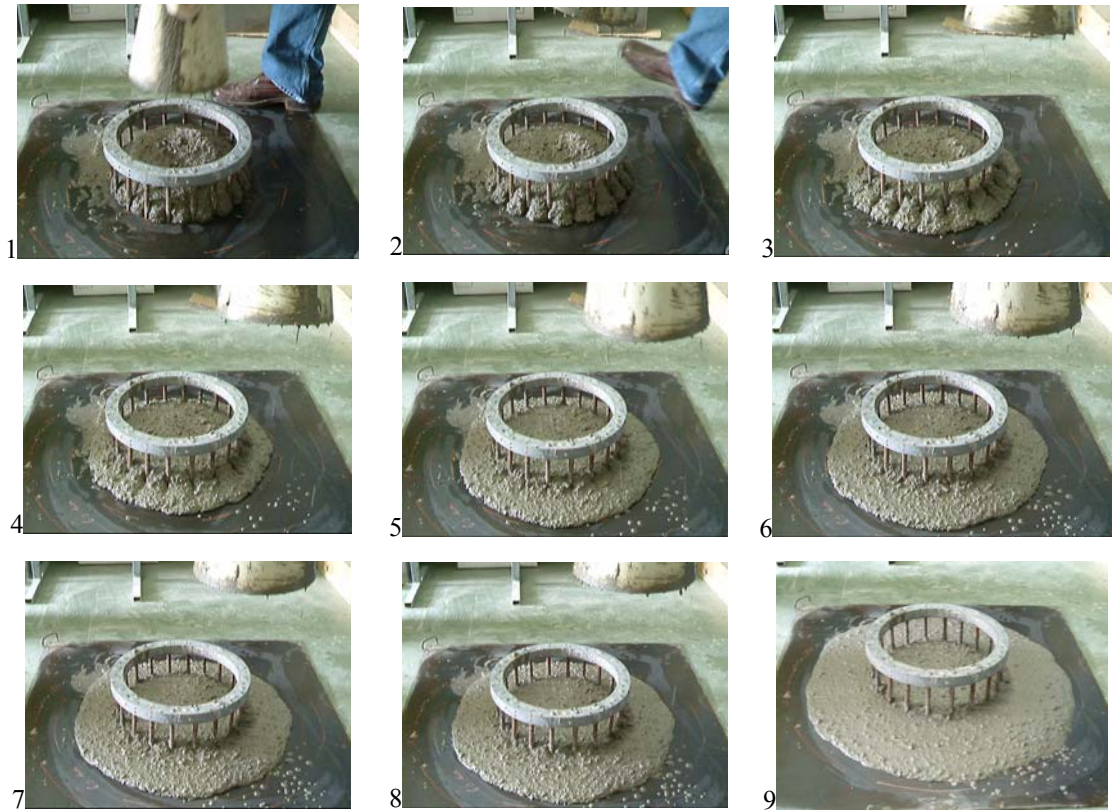


Figura 4.18 – J Ring Test

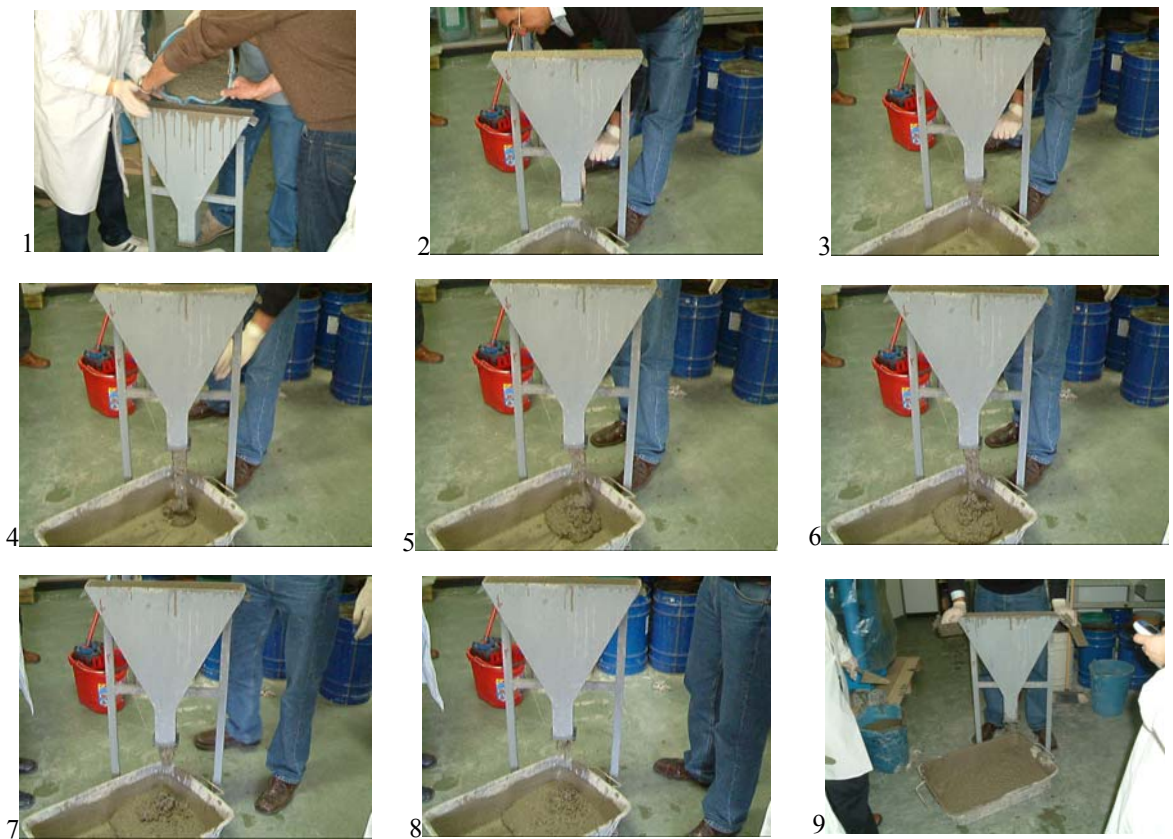


Figura 4.19 – V Funnel Test

4.4.2 Prove allo stato indurito

Dopo i test allo stato fresco, sono stati confezionati per ogni miscela di calcestruzzo realizzata un elevato numero di provini, in genere di dimensione 100mm x 100mm x 100mm. L'operazione di formatura, così come le operazioni di sformatura e di stagionatura dei provini è avvenuta in conformità a quanto disposto da specifiche norme UNI. A diverse scadenze sono stati eseguiti su di essi opportuni test di natura chimica, fisica e meccanica per caratterizzare opportunamente le miscele realizzate. Nei paragrafi seguenti sono riportati le metodologie di indagine eseguite.

4.4.2.1 Prova meccanica di resistenza a compressione

Le prove meccaniche di resistenza alla compressione sono state condotte in conformità alla UNI EN 12390-3. La norma specifica, appunto, un metodo per la determinazione della resistenza alla compressione dei provini di calcestruzzo indurito. Per la preparazione e per il posizionamento dei provini occorre asciugare l'eccesso di umidità dalla superficie del provino prima di posizionarlo nella macchina di prova. Occorre asciugare tutte le superfici portanti della macchina, pulirle e rimuovere eventuali residui di particelle o altri materiali estranei dalle superfici del provino che entrano in contatto con i piatti della macchina di prova. Non occorre utilizzare dispositivi diversi dai piatti ausiliari o blocchetti distanziatori tra il provino e i piatti di carico della macchina di prova. Bisogna, però, posizionare i provini cubici in modo che il carico sia applicato perpendicolarmente alla direzione di getto e centrare il provino rispetto al piatto inferiore con accuratezza di $\pm 1\%$ della dimensione nominale dei provini cubici o del diametro nominale dei provini cilindrici. Se si utilizzano piatti ausiliari, occorre allinearli alla faccia superiore e alla faccia inferiore del provino. Con macchine di prova a due colonne, i provini cubici dovrebbero essere posizionati con la superficie spianata rivolta verso una colonna. La velocità di carico costante deve essere compresa tra 0,2 MPa/s e 1,0 MPa/s ed il carico va applicato al provino senza colpi e aumentarlo in modo continuo, alla velocità costante selezionata $\pm 10\%$, fino a quando non può più essere sopportato un ulteriore carico. Quando si utilizzano macchine di prova a controllo manuale, correggere l'eventuale tendenza a diminuire la velocità di carico selezionata mediante l'appropriata regolazione dei comandi, mano a mano che si avvicina la rottura del provino, quindi registrare il carico massimo indicato. Esempi di rottura del provino che dimostrano che le prove sono state eseguite in modo soddisfacente sono riportati nella figura 4.20 per i provini cubici. Esempi di rottura non soddisfacente dei provini sono riportati nella figura 4.21 per i provini cubici. Se la rottura non è soddisfacente, ciò deve essere registrato facendo riferimento alla forma di rottura che più si avvicina al tipo di rottura osservata. Le rotture non soddisfacenti possono essere provocate da:

- insufficiente attenzione ai procedimenti di prova, in particolare al posizionamento del provino;
- un difetto della macchina di prova.

Per l'esecuzione della prova di resistenza a compressione è stata utilizzata una pressa idraulica Matest idonea ad eseguire prove meccaniche su materiali fragili.

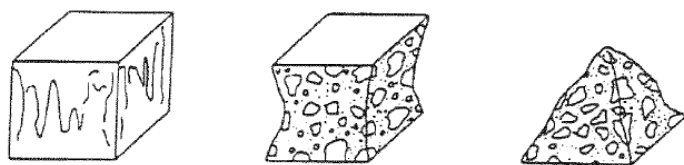


Figura 4.20 – Rotture soddisfacenti di provini cubici

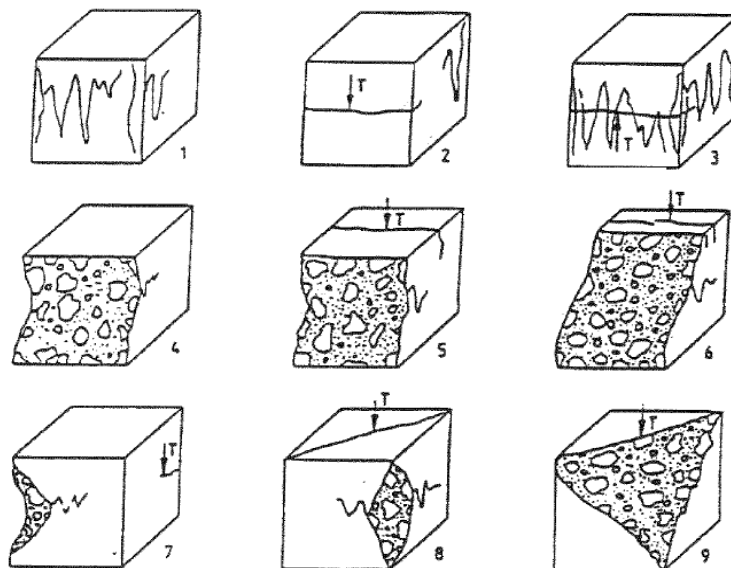


Figura 4.21 – Rotture non soddisfacenti di provini cubici

4.4.2.2 Prova di gelo-disgelo

La norma utilizzata è la UNI 7087 che definisce le modalità di prova per determinare la resistenza al degrado interno dovuto a cicli di gelo e disgelo di provini di calcestruzzo preparati in laboratorio, in cantiere o prelevati in situ. I provini di dimensioni 100mm x 100mm x 100mm sottoposti a prova sono stati realizzati in laboratorio. L'apparecchiatura di prova è costituita da una cella in cui si introducono i provini corredata dai seguenti dispositivi:

- impianto di raffreddamento e riscaldamento atto a realizzare nell'interno della cella temperature comprese tra -25 e +5°C;
- programmatore ciclico in grado di provocare le alternanze di gelo e disgelo;
- contatore di cicli;
- impianto di termo statizzazione per l'acqua da immettere all'interno della cella durante la fase di disgelo;
- misuratori di temperatura;
- dispositivi atti a consentire una adeguata circolazione dell'aria e dell'acqua.

Il ciclo di gelo e disgelo consiste:

- nell'abbassare la temperatura dei provini immersi in aria raffreddata a velocità costante da +5 a -25°C;
- nel mantenere la temperatura a -25°C;
- nel riportare e mantenere la temperatura dei provini a +5°C mediante cella di acqua termo statizzata.

Il procedimento di prova ha previsto immissione dei provini nella cella, previa rilevazione del peso, ed il riempimento con acqua a 5°C. I provini devono essere distanziati tra loro di almeno 5cm. Allo scadere dei primi 5 cicli si effettua la seconda misura, mentre le successive ogni 20 cicli. Contemporaneamente è stata effettuata la misura dei campioni di confronto non sottoposti a cicli di gelo/disgelo ed immersi in acqua a 20°C. Le misure sono state effettuate al termine del periodo di disgelo (+5°C), dopo aver portato i provini alla temperatura di 20°C mediante bagno in acqua. La prova prosegue fino a raggiungere 300 cicli e si può arrestare qualora il materiale subisca una perdita della sua massa maggiore del 3%.

4.4.2.3 Determinazione del modulo elastico secante

Modulo elastico e' il rapporto tra la tensione e la corrispondente deformazione misurata nella direzione della tensione. Per i materiali, come il calcestruzzo, per cui il diagramma sforzi - deformazioni non e' rettilineo, si definisce:

- modulo elastico secante fra due tensioni quello determinato dalla pendenza della secante al diagramma sforzi - deformazioni tra le due tensioni considerate;
- modulo elastico tangente per una data tensione quello determinato dalla pendenza della tangente geometrica del diagramma sforzi - deformazioni in corrispondenza di quella tensione.

Nella norma UNI 6556 si considera la determinazione del modulo elastico secante fra due tensioni dopo un certo numero di cicli di carico (ripetute fino a stabilizzazione); per le proprietà del materiale in esame e per le modalità di prova è opportuno partire da una tensione di base diversa da zero. Il modulo elastico secante a compressione può essere determinato su provini di calcestruzzo:

- confezionati in laboratorio con calcestruzzo fresco (UNI 6128 e UNI 6129);
- confezionati in cantiere con calcestruzzo fresco (vedere UNI 6126 e UNI prelevati da strutture (UNI 6131).

I provini sono cilindri con rapporto h/l tra altezza e diametro del provino compreso tra 2,5 e 4,0. La ricerca del modulo elastico deve essere eseguita su almeno 3 provini. I provini necessari alla prova normalizzata devono essere in numero tale da consentire la prova su altri 3 provini alla stessa stagionatura dei 3 provini su cui si esegue la ricerca del modulo. Secondo il tipo di cemento impiegato e le finalità della prova, le scadenze devono essere preferibilmente scelte tra le seguenti: 7, 14, 28, 90, 180, 365 giorni. In genere si utilizza la stagionatura relativa a 28 giorni. L'apparecchiatura di prova consiste nella macchina di prova, occorrente per l'applicazione e la misura dei carichi applicati e negli strumenti per la misura delle deformazioni. La macchina di prova è una pressa idraulica in grado di misurare ad ogni tensione la relativa deformazione. Per la misura delle deformazioni si impiegano estensimetri. La base di misura delle deformazioni non deve superare $1/3$ dell'altezza del provino e non deve essere minore di 2 volte la dimensione massima dell'aggregato. In relazione alla base di misura ed all'amplificazione lo strumento deve consentire la misura delle deformazioni unitarie con soglia di sensibilità pari a $5,0 \times 10^{-6}$. I provini, prima delle prove, devono essere stabilizzati alla temperatura ed all'umidità dell'ambiente di prova, condizioni che devono essere mantenute per tutta la durata della prova. Gli estensimetri, per provini cilindrici, devono essere piazzati a 120° tra loro e devono essere centrati sul piatto inferiore della pressa. La tensione minima di prova deve essere fissata in relazione alle finalità della ricerca ed, in

genere è pari a circa 1/3 della resistenza a compressione del calcestruzzo determinata preventivamente alla stessa scadenza su almeno 3 provini aventi le stesse dimensioni di quelli destinati alla misura del modulo elastico secante, confezionati e stagionati nelle identiche condizioni. La tensione massima non deve comunque superare quest'ultimo valore. La tensione di base, che è opportuno sia diversa da 0, deve essere fissata pari a circa 1/10 della tensione massima. L'intervallo tra la tensione massima e la tensione di base viene diviso in tre o più parti uguali, in modo tale da consentire letture e tensioni intermedie. Quindi, si effettuano i cicli di carico alle diverse tensioni ottenute. La tensione deve essere applicata gradualmente, senza scosse fin dall'inizio. La media delle deformazioni delle diverse basi di misura è presa come risultato della misura stessa. I cicli di carico sono ripetuti fino a che lo scarto tra i valori medi delle deformazioni, in 2 misure successive, non sia maggiore di 10×10^{-6} . Per la valutazione del modulo elastico secante è opportuno far riferimento alle letture di ritorno dei cicli stabilizzati. Si determina, infine, il carico di rottura dei 3 provini usati per tale determinazione: la media di questi valori non deve differire più del 20% di quella dei 3 provini provati soltanto a compressione. Il modulo di elasticità secante a compressione fra due valori di tensione è dato dal rapporto tra la variazione di tensione (numeratore) e la variazione di deformazione (denominatore).



Figura 5.22 – Prova di determinazione del modulo elastico

4.4.2.4 Prove non distruttive

Le prove non distruttive³ consistono in test di carattere prevalentemente fisico o fisico meccanico da eseguire in situ o sulla struttura. In generale, è molto difficile che con le sole prove non distruttive si possa arrivare ad una diagnosi corretta del

³M. Collepardi, Il nuovo calcestruzzo, terza edizione, Tintoretto, 2003

degrado di una struttura. Molto spesso, esse debbono essere completate da quelle distruttive. L'accoppiamento distruttivo e non, oltre al carattere di complementarità e di completezza dell'informazione desunta, presenta anche il vantaggio di ridurre globalmente il numero totale delle prove da eseguire e, quindi, il costo generale della diagnosi: infatti, in linea di massima, il costo della singola prova di laboratorio è relativamente basso, ma si richiede un numero relativamente elevato di prove sui diversi prelievi, rispetto alle prove non distruttive, per potere emettere una diagnosi. Esistono anche prove semi distruttive (adottate soprattutto per misurare la prestazione meccanica in situ in corso d'opera) che provocano un danno trascurabile sulla superficie della struttura che può essere comunque facilmente riparata. Lo scopo principale delle prove non distruttive in situ è quello di fornire elementi utili non tanto e non solo per emettere direttamente una diagnosi, quando e soprattutto per guidare il tecnico in un prelievo ben finalizzato dei campioni e dei provini da sottoporre a successive prove di laboratorio. Le prove non distruttive sono in genere caratterizzate dalle seguenti proprietà:

- mantengono integra (o quasi) la struttura indagata;
- informano in modo globale, rapido e semplice;
- forniscono risultati sia qualitativi che quantitativi o comunque comparativi.

Il grande vantaggio dei rilevamenti con tecniche non distruttive è quello di lasciare le parti esplorate integre o con "lesioni" sostanzialmente ininfluenti sulla qualità prestazionale e sull'aspetto. La qualità e la quantità di informazioni e dati che possono essere ricavati con le attuali strumentazioni di rilevamento non distruttivo sono generalmente soddisfacenti e da costituire così materia per l'elaborazione del progetto d'intervento con ridotta necessità di decidere affrettatamente e di compiere retroazioni sul progetto come potrebbe accadere quando molte o anche appena poche soluzioni debbano essere prese in corso d'opera. Sulla base dei rilevamenti strumentali sono possibili calcoli di verifica convenzionali e calcoli di simulazioni al computer che consentono di ottenere non solo delle verifiche numeriche, ma delle rappresentazioni grafiche per scale di colori o di grigi delle intensità del fenomeno espresso per le grandezze considerate e valutate (di grande interesse per la facilità e immediatezza della lettura). Nei paragrafi seguenti si descriveranno le prove distruttive trattate nella successiva parte sperimentale.

4.4.2.4.1 Prova sclerometrica

La prova sclerometrica è un tipo di controllo estremamente rapido ed agile che permette, senza danneggiamenti, l'esame di numerose strutture in breve tempo. Essa consente la valutazione della probabile resistenza a compressione del calcestruzzo in opera mediante la determinazione della relativa durezza d'urto superficiale fornita dalle battute sclerometriche. La prova si esegue posizionando lo strumento (sclerometro) a contatto con la superficie ed in direzione perpendicolare e misurando i valori dei rimbalzi di un cursore d'acciaio spinto con forza contro tale superficie. Una molla graduata ed il relativo ago danno l'indicazione dell'indice di rimbalzo su una scala graduata. I limiti, insiti nel metodo stesso, sono parzialmente superabili mediante opportune tarature eseguibili con i tradizionali controlli distruttivi (carotaggi e relative prove di compressione). La prova è standardizzata dalla norma UNI 12504 (che prevede l'effettuazione di almeno 10 battute per ogni zona della struttura presa in esame)

che specifica un metodo per la determinazione dell'indice sclerometrico di un'area di calcestruzzo indurito utilizzando un martello di acciaio azionato da una molla. Il principio di funzionamento dello sclerometro è il seguente: una massa scagliata per mezzo di una molla colpisce un pistone a contatto con la superficie di indagine ed il risultato della prova viene espresso in termini di distanza di rimbalzo della massa. L'apparecchiatura è costituita da una massa mobile con una certa energia iniziale, che urta la superficie di una massa di calcestruzzo. Dopo urto si ha una ridistribuzione dell'energia cinetica iniziale e cioè, una parte dell'energia è assorbita dal calcestruzzo sotto forma di energia di deformazione plastica oppure permanente ed un'altra parte è restituita alla massa mobile che rimbalza per un tratto proporzionale all'energia rimasta disponibile. Condizione essenziale è che la massa del calcestruzzo sia praticamente infinita in rapporto con la massa dell'equipaggio mobile, altrimenti una parte dell'energia iniziale, essendo dipendente dalle masse relative dei due corpi che si scontrano, sarebbe trasferita al calcestruzzo sotto forma di energia cinetica. La condizione di massa infinita del calcestruzzo si realizza usando masse d'impatto molto piccole. Per ottenere l'energia necessaria per l'impatto si usa, come accennato, un sistema di molle. La corsa di rimbalzo è determinata dall'energia di rimbalzo in seguito all'urto con il calcestruzzo e dalle caratteristiche del sistema di molle. Tutti i dispositivi di prova che si basano sull'utilizzazione dei risultati dovuti all'energia d'impatto, devono essere provvisti di controllo della taratura in quanto, dopo un uso prolungato, le molle modificano le loro costanti elastiche. Ciascun tipo e formato di sclerometro dovrebbe essere utilizzato solo con la classe di resistenza ed il tipo di calcestruzzo per il quale è stato progettato. Il campo di applicazione del metodo sclerometrico o dell'indice di rimbalzo I è rivolto soprattutto alla valutazione delle seguenti proprietà:

- controllo dell'uniformità del calcestruzzo nelle diverse parti della struttura;
- valutazione attraverso delle curve di correlazione specifiche, della qualità del calcestruzzo in opera;
- valutazione delle variazioni delle proprietà del calcestruzzo nel tempo.

Le applicazioni sopra indicate possono essere, quindi, riassunte affermando che le prove sclerometriche sono utilizzate per stimare la resistenza a compressione del calcestruzzo in strutture già realizzate. Infatti, la norma UNI EN 12504 prescrive che “.. il metodo sclerometrico non è inteso come un'alternativa per la determinazione della resistenza alla compressione del calcestruzzo ma, con un'opportuna correlazione, può fornire una stima della resistenza in sito. L'indice sclerometrico determinato mediante questo metodo può essere utilizzato per la valutazione dell'uniformità del calcestruzzo in sito, per delineare le zone o le aree di calcestruzzo di scarsa qualità o deteriorato presenti nelle strutture..”. Va, inoltre, ricordato che la stessa norma informa che ciascun tipo e formato di sclerometro deve possedere delle proprie curve di correlazione e dovrebbe essere utilizzato solo con la classe di resistenza ed il tipo di calcestruzzo per il quale è stato progettato. In commercio esistono diversi tipi di sclerometro:

- sclerometro standard o meccanico (martello di Schmidt);
- sclerometro elettrico;
- sclerometro a pendolo.

L'apparecchio esige manutenzione e verifiche periodiche mediante verifica di taratura (operazione con la quale si determina, entro limiti noti di precisione, la legge di corrispondenza fra le indicazioni dello strumento ed i valori dell'indice di

rimbalzo che lo strumento deve misurare), per cui è necessario che gli sclerometri siano provvisti di un sistema di controllo di taratura (incudine di taratura) in quanto, dopo un uso prolungato, le molle modificano le loro costanti elastiche. In particolare la verifica di taratura, a cura dell'utilizzatore dello strumento, non va confusa con la taratura che, al contrario, è a cura della casa costruttrice dello strumento e va effettuata al momento in cui la verifica di taratura dà esito negativo. L'indagine sclerometrica per poter fornire dati attendibili sullo stato di salute del calcestruzzo sottoposto a prova deve essere eseguita come descritto di seguito:

- 1) Preparazione superficiale della prova. Nel selezionare l'area di prova si devono considerare i seguenti fattori:
 - è necessario evitare di eseguire le battute sclerometriche nelle aree interessate al passaggio delle armature ed in vicinanza dei cavi e dei fili di precompressione, questo è possibile eseguendo una preliminare indagine pacometrica;
 - gli elementi di calcestruzzo devono essere di spessore maggiore o uguale a 100 mm e rigidamente fissati;
 - consigliabile evitare le aree che presentano difetti superficiali, come nidi di ghiaia, sfaldature, tessitura grossolana o alte porosità, ed in prossimità di grossi inerti;
 - tipo di calcestruzzo e resistenza;
 - tipo di superficie e stato di umidità della stessa;
 - carbonatazione ecc.;
- 2) Esecuzione della prova. I campioni utilizzati nella campagna sperimentale devono essere nelle condizioni ideali richieste dal metodo sclerometrico per la realizzazione di curve di correlazione:
 - superficie del provino asciutta; un provino viene considerato asciutto quando viene lasciato per 24 ore in ambiente con umidità relativa non maggiore del 65% e con temperatura media compresa tra 10° e 30°C;
 - omogeneità della qualità del calcestruzzo tra superficie e strati profondi;
 - assenza di fenomeni di carbonatazione degli strati superficiali;
 - assenza di difetti interni;
 - temperatura del calcestruzzo maggiore di 0°C per evitare risultati anomali dovuti all'azione del gelo;
 - temperatura dello sclerometro maggiore di 10°C per eliminare attriti anomali sul cursore dello strumento stesso.

Ciascun provino cubico, a maturazione avvenuta, deve essere sottoposto:

- ad accurata pulitura delle superfici mediante pietra abrasiva a grana media in carburo di silicio, al fine di evitare che le facce del campione presentino scalfitture o nidi di ghiaia o tessitura superficiale grossolana. Preventivamente si deve controllare che la superficie del provino risulti asciutta, in modo da evitare fattori che possono alterare il risultato della prova;
- ad accurato controllo dimensionale e relativa pesatura.



Figura 5.23 – Sclerometro e incudine di taratura

Di ogni campione devono essere considerate, ai fini delle misure, tre facce escludendo sempre quella libera del getto. Per rendere i risultati delle prove sclerometriche il più possibile indipendente dall'operatore, il provino deve essere messo tra i piatti di una pressa e sottoposta ad una sollecitazione di 10MPa. Dopo aver azionato più volte lo strumento per verificare un corretto funzionamento, eseguire una sequenza di battute utilizzando l'incudine di riferimento, registrare le misure e verificare che rientrino nei limiti indicati. In caso contrario pulire o tarare lo strumento. Per quanto riguarda l'area di prova bisogna assicurarsi che la distanza tra due punti di impatto non sia inferiore a 25 mm e che nessuno sia meno di 25 mm dal bordo dell'elemento da verificare. E' consigliabile disegnare una regolare griglia dove le linee siano distanti 25/30 mm e considerare le intersezioni come punti di prova, o utilizzare una riga di misura dove sono già indicate i punti di battuta. Una volta disegnata la faccia di prova, tenere saldamente lo sclerometro in una posizione che consenta al pistone di avere un impatto perpendicolare alla superficie, aumentare gradualmente la pressione sul pistone fino all'impatto del martello e registrare il dato. Per ottenere una stima affidabile bisogna avvalersi di un minimo di 9 battute. Il risultato va calcolato come media di tutte le misure, ed espressa come numero intero. Se oltre il 20% di tutte le misure si discosta dalla media per più di 6 unità, deve essere scartata l'intera serie di misure. Il dato di misura va completato indicando la posizione e l'orientamento dello strumento. Terminata la prova, bisogna esaminare le impronte lasciate nella superficie a seguito dell'impatto, e se ha frantumato o sforato a causa di un vuoto vicino alla superficie, scartare il risultato. Si conclude effettuando le letture utilizzando l'incudine in acciaio di riferimento, registrando i valori e confrontandoli con quelli ottenuti prima della prova. Se il risultato è diverso, bisogna sistemare lo strumento (centro autorizzato) e ripetere la prova. Bisogna evitare di eseguire la prova su intonaco, se necessario conviene asportarlo. Nel caso di strutture esistenti, la miscela una volta gettata, subisce una stratificazione dovuta alla quota, pertanto, le zone più alte del getto hanno un rapporto acqua/cemento più elevato di quelle sottostanti, dove si vanno a depositare inevitabilmente gli inerti a causa della differenza di peso. Si rende quindi necessario, durante un'indagine sclerometrica, analizzare lo strato di calcestruzzo a diverse altezze, attraverso diverse stazioni di misura ed operare una media generale dei valori di misura al fine di ottenere una stima affidabile della resistenza a compressione dell'elemento. Al termine di un'indagine sclerometrica, è necessario redigere un resoconto o certificato di prova indicando le seguenti nozioni:

- identificazione della struttura in calcestruzzo o dell'elemento verificato;
- identificazione della posizione della/e area/e di prova;
- identificazione dello strumento utilizzato (matricola, produttore, data ultima taratura ecc.);
- descrizione delle operazioni eseguite nella preparazione della/e area/e di prova;
- dettagli sulle condizioni del calcestruzzo;
- data e ora in cui è stata eseguita la prova;
- indicare il risultato, come valore medio delle battute su ogni area di prova;
- indicare l'orientamento dello strumento per ogni area di prova, ed eventualmente i risultati aggiustati in base all'orientamento dello stesso;
- indicare eventuali variazioni del metodo di prova da quello normalizzato;
- dichiarazione da parte di chi ha eseguito la prova, che la stessa è stata eseguita in conformità alla UNI EN 12504.

4.4.2.4.2 Prova ultrasonora

Le prove con ultrasuoni, di tipo in situ e non distruttive, sono finalizzate ad accertare la densità, l'omogeneità e la compattezza dei calcestruzzi costituenti le strutture esaminate. Esse sono basate sul principio che una struttura omogenea e compatta trasmette treni di onde elastiche meglio di una struttura disomogenea, fratturata o anelastica. Le indagini vengono condotte applicando due sonde, di cui una sorgente di ultrasuoni, cioè con frequenze superiori a 20.000 Hz, l'altra ricevente posta a distanza determinata e conosciuta L ; rilevando il tempo T intercorso dall'istante della trasmissione a quello della ricezione del treno di onde, si otterrà la velocità V di propagazione nel mezzo elastico attraverso la nota relazione $V = L/T$. Gli studi e le rilevazioni effettuate permettono di evidenziare che migliore è la qualità del calcestruzzo più elevata sarà la velocità di trasmissione nel mezzo. L'attrezzatura impiegata consiste in uno strumento di facile trasporto e di dimensioni contenute. Le metodiche di prova sono del tipo:

- diretta, applicando le sonde su facce contrapposte della struttura indagata (esempio facce pilastro);
- semidiretta, applicando le sonde su facce contigue di uno spigolo (esempio faccia inferiore e laterale di una trave);
- indiretta, applicando le sonde sulla stessa faccia di un manufatto, rilevando le onde riflesse.

Normalmente viene adottata la tabella, riportata in seguito, elaborata in base agli studi di Neville. Trattasi sostanzialmente di una classificazione qualitativa, in quanto parametri numerici debbono essere ricavati da altre tipologie di prove. Si evidenzia che nel caso di velocità comprese tra 3 e 3.5 m/s, Neville propone la classificazione di "dubbia qualità"; in tale caso occorrono certamente altre tipologie di indagine poiché è indispensabile accertare l'effettiva qualità del calcestruzzo. Il metodo permette anche di evidenziare l'esistenza di soluzioni di continuità del tessuto strutturale quali cavità, nidi di ghiaia, fratture interne, difetti di ripresa, ecc. Si deve tener presente, nella valutazione finale dei risultati, che le armature influenzano la velocità di trasmissione, incrementandola da 1,3 fino a circa 1,9 volte. A tal fine, nel caso non siano direttamente visibili segni di presenza d'armatura, è opportuna un'indagine preliminare mediante pacometro, onde eseguire le misurazioni in zone il più possibilmente lontane, oppure tenendo presente che i risultati ottenuti vanno depurati dei fattori incrementativi. Il metodo

può essere ripetuto nel tempo onde accertare l'eventuale accentuarsi di difetti riscontrati o di degrado della qualità del calcestruzzo. La maggior parte degli studiosi delle onde si occupano esclusivamente della velocità ultrasonica di impulso (UPV) e dell'ampiezza di impulso ultrasonica (UPA). Il rapporto fra l'UPV, l'UPA ed il metodo combinato di UPA e di UPV è stato studiato soltanto da alcuni autori. Essenzialmente, la formula empirica ottenuta per l'UPV è realmente abbastanza differente da quella ottenuta per l'UPA. La formula empirica del metodo combinato dell'UPA e dell'UPV è fornita da Tharmaratnam e da Tan. Il metodo UPV, anche conosciuto come il metodo di tempo di transito, usa un rivelatore per misurare il tempo che impiega un impulso ultrasonico nell'attraversare uno spessore noto. Il metodo UPA usa una ricevente per misurare l'ampiezza di un'onda riflessa. Il rapporto relativo di ampiezza, A_r , è definito come l'ampiezza riflessa dell'onda divisa l'ampiezza originale. La previsione della resistenza a compressione del calcestruzzo è ottenuta solitamente usando un metodo probabilistico dopo che siano state determinate le resistenze a compressione delle strutture in cemento armato rilevate per mezzo dell'apparecchio ultrasonico. Quindi, le formule empiriche sia per i metodi UPA che UPV sono ottenute da risultati sperimentali connessi con regressione statistica.

V (Km/s)	Qualità c.l.s.
> 4.5	Eccellente
3.5 - 4.5	Buona
3.0 - 3.5	Dubbia
2.0 - 3.0	Mediocre
< 2.0	Pessima

Tabella 4.3 - Correlazione Velocità/Qualità del calcestruzzo

Durante l'utilizzo dei metodi (controlli) non distruttivi, le caratteristiche ricercate vengono evidenziate o misurate sulla struttura (in situ) attraverso l'influenza che esse esercitano su alcune proprietà fisiche del materiale. Lo strumento ad ultrasuoni si basa sulla determinazione della velocità di transito attraverso il materiale opportunamente misurato. Nel caso delle strutture in conglomerato cementizio il metodo ultrasonico è utilizzato per valutare l'omogeneità in situ e stimare la resistenza degli elementi strutturali. Con il metodo di indagine ad ultrasuoni si possono inoltre determinare:

- omogeneità del calcestruzzo;
- difetti di getto;
- variazioni delle proprietà causate dalla storia dell'elemento (manutenzione, sollecitazione, degrado, ecc.);
- coefficiente di Poisson dinamico;
- in combinazione con altre determinazioni, per stimare la resistenza del calcestruzzo in situ.

Il metodo si basa sulla determinazione della velocità di transito degli ultrasuoni attraverso il materiale, nonché sull'esame del segnale ricevuto, opportunamente visualizzato. La grandezza che viene misurata (in microsecondi) è il tempo di transito t degli impulsi ultrasonici (detto anche tempo di volo TOF, time of flight) impiegato a percorrere la distanza geometrica s , in mm, tra punti di rilievo

sull'unità da saggiare. Il parametro non distruttivo è la velocità V virtuale o apparente:

$$V = \frac{s}{t}$$

dove s viene misurata in m e t in microsecondi μs . Un $\mu s = 10^{-6}$ sec.

Pertanto:

$$V = \frac{s(m)}{10^{-6} \text{ sec}} = 10^6 \frac{s}{t} \cdot m \cdot \text{sec}^{-1}$$

L'apparecchio ad ultrasuoni per il calcestruzzo è sostanzialmente costituito da:

- un dispositivo che a comando emette impulsi di vibrazioni meccaniche (emettitore o sonda emittente) in sincronismo con un segnale elettrico. Il generatore di impulsi è costituito da un thyatron (valvola rettificatrice a griglia pilota) il quale carica il condensatore che, a sua volta, scaricando improvvisamente, genera l'impulso. Sull'uscita è collocata una resistenza che regola l'ampiezza e contemporaneamente anche la durata dell'impulso. Un sincronizzatore emette, con frequenza prefissata, il segnale necessario a comandare l'emissione di un impulso e l'inizio di un ciclo di scansione. L'emettitrice oltre ad avviare un'unità di misura di intervalli di tempo attiva un'unità di visualizzazione della vibrazione in ricezione;
- un dispositivo che, ricevendo le vibrazioni meccaniche, le trasforma in segnali elettrici (ricevitore o sonda ricevente);
- un dispositivo di amplificazione regolabile e di trattamento del segnale emesso dalla sonda ricevente;
- un dispositivo elettronico di misura dell'intervallo di tempo fra istante di emissione ed istante di ricezione dell'impulso o della parte di esso che si analizza.

L'impulso di vibrazione che perviene alla sonda ricevente, trasformato in un segnale elettrico, opportunamente amplificato, viene visualizzato sullo schermo a raggi catodici (CRT, apparecchio tradizionale) o su uno schermo a cristalli liquidi (moderni apparecchi digitali) o equivalente di un oscilloscopio. Sullo schermo dell'oscilloscopio il segnale elettrico, eventualmente filtrato entro bande preselezionate, viene rappresentato in modo da misurare il tempo t intercorso tra l'emissione e la ricezione, ed in modo da valutare altri importanti parametri (frequenza, ampiezza, smorzamento, riflessione, etc.). E' opportuno che sull'oscilloscopio vengano visualizzati anche gli istanti di partenza e di arresto dell'unità di misura dell'intervallo di tempo, per una mutua precisa correlazione ed una continua verifica da parte dell'operatore. Il calcestruzzo cementizio presenta buone caratteristiche di trasmissione delle onde elastiche ed una velocità di propagazione intorno ai 400 m/sec in uno spettro che arriva fino a 50 kHz. I segnali utilizzati per l'auscultazione dinamica dei calcestruzzi, a differenza di quelli correnti nel controllo dei metalli, sono di tipo impulsionale e, quindi, a banda molto larga. Si preferisce usare impulsi a frequenze ultrasoniche tra 20÷150 Hz fondamentalmente per due ragioni:

- per produrre un impulso con una partenza netta, il che equivale ad una migliore precisione nella misura del tempo;
- per produrre l'energia meccanica di vibrazione massima nella direzione di propagazione, ovvero avere la massima sensibilità.

Per gli impieghi più usuali (per spessori fino ad un massimo di 3 m) vengono consigliati trasduttori con frequenza di $50 \div 60$ KHz. In genere per questi tipi di controllo non si usano ultrasuoni di frequenza più elevata perché altrimenti le lunghezze d'onda sarebbero di molto inferiori alle discontinuità naturali del calcestruzzo e l'onda verrebbe rapidamente smorzata nel materiale stesso. Inoltre vi sarebbero gravi problemi di accoppiamento fra trasduttori e materiali. Per le misure in cantiere su superfici di calcestruzzo abbastanza irregolari è da preferirsi l'uso di un apparecchio con display su tubo catodico e misura dei tempi controllata dall'operatore. Per le misure in laboratorio, con cubetti con superficie molto piana e regolare, conviene un apparecchio con clock automatico interno e display digitale automatico, per la massima sicurezza e riproducibilità della misura. La sonda emittente riceve dal sincronizzatore un impulso di tensione molto breve con valore di picco di 600 V che viene inviato da un lato alla sonda e dall'altro al ricevitore. L'impulso inviato alla sonda eccita il trasduttore che si deforma istantaneamente ritornando quindi a riposo con delle oscillazioni libere e smorzate. Queste vibrazioni producono un gruppo di onde ultrasonore nel mezzo accoppiato al trasduttore. L'apparecchiatura consente di regolare la rapidità di smorzamento delle oscillazioni (damping) da cui dipende l'energia di vibrazione della sonda e quindi l'entità del fascio ultrasonico emesso. Normalmente è di tipo piezoelettrico ma può anche essere di tipo elettrodinamico. Se si utilizza come emittitore un trasduttore elettrodinamico di una data frequenza, per la massima sensibilità di ricezione si utilizza come sonda ricevente un trasduttore accordato all'emittente e cioè con la stessa frequenza di risonanza. Ciò vale soprattutto per i casi in cui lunghezza della traiettoria nel mezzo in esame e caratteristiche di assorbimento di questi non alterano sensibilmente le caratteristiche in frequenza dell'impulso meccanico immesso. Percorsi lunghi e/o materiali con elevate caratteristiche di assorbimento portano ad un'attenuazione delle vibrazioni. Tale attenuazione è tanto più intensa quanto più elevata è la frequenza. In tali casi la frequenza dell'onda di vibrazione in ricezione può risultare notevolmente minore rispetto a quella dell'emissione. Dopo un accurato studio preliminare si ritiene opportuno impiegare per la ricezione sonde di frequenza propria più bassa della sonda emittente, se questa è del tipo elettrodinamico. La scelta della frequenza più idonea per la sonda ricevente deve essere sempre effettuata se l'emittitore è di tipo meccanico. Il segnale emesso dalla sonda ricevente entra in un opportuno amplificatore, il cui guadagno, regolabile con la risoluzione di 1 dB, può essere variato a volontà, per quantità nota; eventualmente filtrato e trattato per ridurre la componente di rumore ed esaltarne le componenti ripetitive. Scopo dell'amplificazione variabile è di effettuare sia la regolazione di tempo "zero", sia i vari rilievi sull'elemento in esame con segnale alla misura di ampiezza sensibilmente costante. Ciò permette inoltre di valutare, al variare dei punti di misura, sia il tempo di propagazione, sia le relative variazioni dell'amplificazione necessarie per avere un segnale di ampiezza costante sullo schermo dell'oscilloscopio. Per ridurre il livello di rumore del segnale ricevuto è desiderabile che il dispositivo di amplificazione e trattamento del segnale sia fornito di un dispositivo elettronico di "media", cioè di un dispositivo che sommi e dia il valore medio di una molteplicità prefissata di segnali, in modo da evidenziarne le caratteristiche ripetitive e ridurre le caratteristiche casuali. Tutto l'apparato di amplificazione in ricezione deve avere una frequenza di taglio maggiore di almeno cinque volte la frequenza naturale più elevata delle sonde che si intendono utilizzare. E' ammessa una certa attenuazione alle basse frequenze

come mezzo per aumentare il rapporto segnale-rumore, ma la curva di risposta deve rimanere piatta fino a frequenze di circa 1/5 della frequenza naturale minima dei trasduttori che si intende utilizzare. Mentre è ammesso, elevando il guadagno della catena di amplificazione, elevare i valori di picco del segnale in ricezione, non è ammesso aumentare il rapporto segnale-rumore o rendere il segnale stesso più nitido e definito, utilizzando tecniche di condizionamento del segnale noto come grass-cutting. Per quanto riguarda le condizioni operative ambientali, l'apparato deve poter operare con le prescritte caratteristiche entro l'intervallo di temperatura compreso tra - 10 °C e + 45 °C con umidità relativa fino al 90% e con variazioni di tensione di alimentazione del 10%.



Figura 5.24 - Strumentazione per indagine ultrasonica

Gli ultrasuoni possono propagarsi attraverso il conglomerato secondo due diverse tecniche una è quella per riflessione e l'altra è quella per trasmissione. La prima utilizza un unico trasduttore per trasmettere un fascio di ultrasuoni, la seconda, invece, si avvale di due trasduttori un emittente ed un ricevente che, posizionati in modi differenti, danno origine a tre diverse tecniche di trasmissione: trasmissione diretta, trasmissione semidiretta e trasmissione indiretta. Nel metodo per riflessione il fascio di ultrasuoni viene trasmesso da un trasduttore e nel suo cammino attraverso il campione subisce riflessione e ritorna al trasduttore stesso. Questa tecnica consente di evidenziare i piccoli difetti cioè quelli che sono comparabili con la lunghezza d'onda degli ultrasuoni e di misurare lo spessore di un campione; quest'ultimo e anche le corrosioni in superfici interne possono, infatti, essere determinati in base al tempo di transito dell'eco rispetto alla superficie posteriore. Il metodo per trasmissione richiede l'impiego di una coppia di sonde: una sonda trasmittente piezoelettrica posta a contatto con la superficie del calcestruzzo che invia le onde ultrasoniche, ed una sonda ricevente che le raccoglie e le converte in un segnale elettrico. L'apparecchiatura collegata alle due sonde misura il tempo di transito che, insieme alla lunghezza del percorso del suono, consente di determinare la velocità di propagazione degli ultrasuoni. Gli schemi di indagine usati sono tre: trasmissione semidiretta, diretta e indiretta.

- Trasmissione semidiretta. Prevede che le sonde siano applicate sull'oggetto da indagare, in due punti posti su allineamenti perpendicolari tra loro. Questo tipo di indagine non è molto precisa in quanto solo una parte dell'energia emessa dalla sonda emittente è diretta a quella ricevente.

Sarà necessario misurare con la massima accuratezza la distanza da centro a centro delle facce dei trasduttori.

- Trasmissione diretta. Prevede che le sonde siano applicate sull'oggetto da indagare, in due punti speculari tra loro (facce opposte). Questo tipo di indagine è certamente il più sensibile dei tre in quanto la maggior parte dell'energia emessa dalla sonda emittente è diretta a quella ricevente.
- Trasmissione indiretta. Prevede che le sonde siano applicate sull'oggetto da indagare, in due punti allineati della medesima superficie. Questo tipo di indagine è meno precisa della precedente in quanto solo una minima parte dell'energia emessa dalla sonda emittente è diretta a quella ricevente.

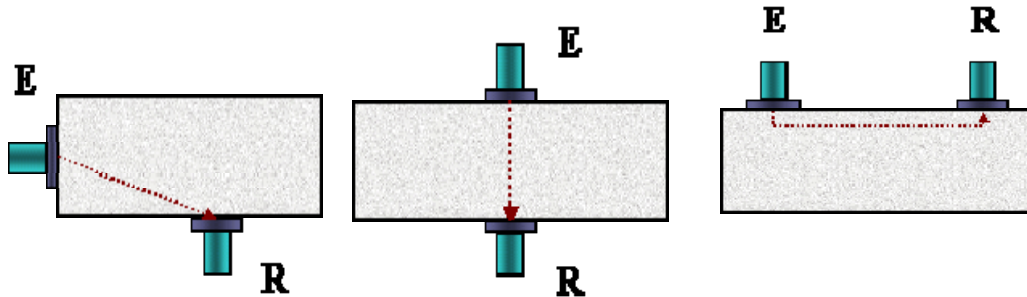


Figura 5.25 – Schemi di indagine per la prova ultrasonora: semidiretta, diretta indiretta

La velocità dell'impulso di solito è influenzata dallo strato superficiale del materiale, che solitamente presenta caratteristiche diverse dagli strati profondi. Per tale motivo si rende necessario effettuare una serie di misure con la sonda posta a varie distanze. La sonda trasmittente deve essere mantenuta fissa in una determinata posizione, mentre si fa variare la posizione di quella ricevente che deve essere posta a distanze successive uguali lungo una linea prestabilita. I tempi di trasmissione misurati permetteranno di stabilire una velocità media dell'impulso. Il segnale che raggiunge il ricevitore è quello che proviene dalla riflessione e dalla rifrazione dell'onda ed ha valori d'intensità molto bassi pari all'incirca al 2% del segnale originario. Se tra trasduttore emittente e ricevente è presente una cricca superficiale la sua profondità può essere valutata in base alla differenza di tempo che l'onda rifratta impiega nell'aggirare il difetto rispetto a quello che impiegherebbe attraversando semplicemente la superficie. Nel sistema indiretto assume un'importanza fondamentale la posizione delle due sonde ai fini della determinazione dell'effettivo percorso del fascio; la sistemazione migliore è quella che pone il trasduttore emittente in un punto idoneo della struttura ed il ricevente in successive postazioni allineate, prendendo come distanze i vari interassi. In figura 5.25 è riportato in un grafico l'andamento della distanza in millimetri in funzione del tempo in μs . In base all'andamento della retta nel piano si possono avere differenti condizioni del conglomerato. Nel caso in cui i punti del diagramma si collochino su di una linea retta il calcestruzzo è uniforme; si ha, invece, fessurazione del copriferro quando la retta non possiede una sola pendenza ma è costituita da due spezzate di diversa inclinazione ed, infine, si è in presenza di un calcestruzzo povero nel caso in cui i punti del diagramma siano sparsi nel piano. Le figure 5.26 – 5.28 descrivono i casi esposti. In genere, la tecnica indiretta è preferibile alle altre nei casi in cui l'elemento da esaminare sia accessibile da un solo lato. Si può notare che la velocità che si ricava da questo metodo è inferiore a quella stabilita con il metodo diretto. Per ovviare a questo inconveniente la soluzione più adatta è quella che stabilisce che le misure debbano essere eseguite con entrambe le tecniche indirette e dirette e una volta ottenuti i

risultati si possa stabilire una relazione ed introdurre un fattore correttivo. Il metodo semidiretto (diagonale) che si utilizza quando è richiesto l'esame del calcestruzzo mediante percorsi a diagonale, presenta un'efficacia che risulta essere intermedia tra il metodo diretto e indiretto e prevede che i due trasduttori vengano posti su due facce adiacenti di solito ortogonali l'una all'altra. L'esecuzione della prova con tutte e tre le tecniche richiede che all'inizio di ogni campagna di misura si debba eseguire la taratura della strumentazione con il blocco di calibrazione in dotazione per il quale è stato pre-determinato il tempo di transito delle onde ultrasoniche; inoltre ci si deve accertare che le onde vengano effettivamente trasmesse alla superficie in esame e, pertanto, si devono effettuare più letture del tempo di transito finché non si raggiunga il valore minimo.

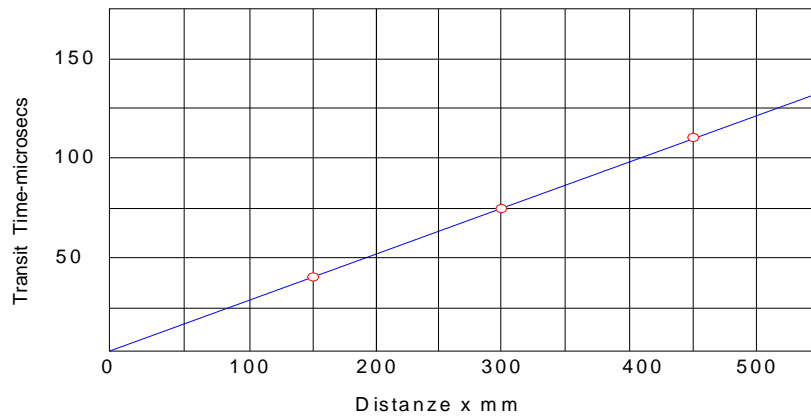


Figura 5.25 - Determinazione della velocità d'impulso con il metodo indiretto o superficiale

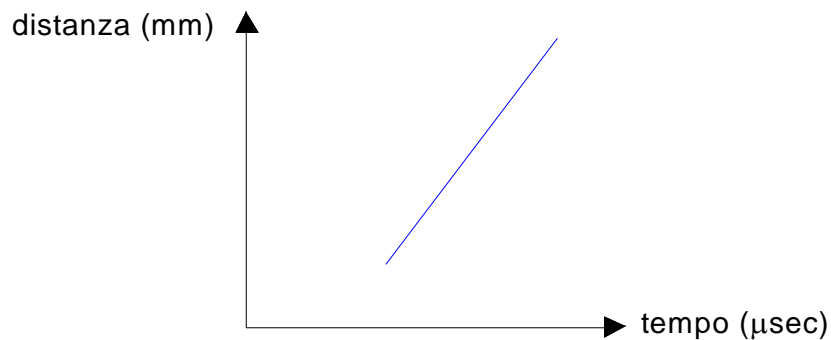


Figura 5.26 - Andamento distanza-tempo: il calcestruzzo è uniforme poiché i punti si dispongono su di una retta

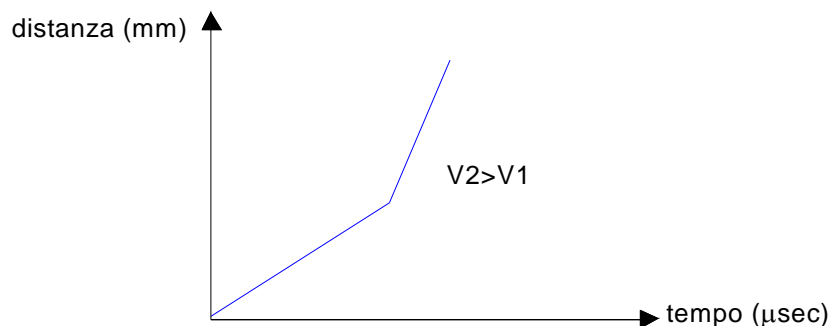


Figura 5.27 - Andamento distanza-tempo: sono presenti fessurazioni nel copriferro poiché la retta non è unica ma composta da due tratti separati di differenti fessurazioni

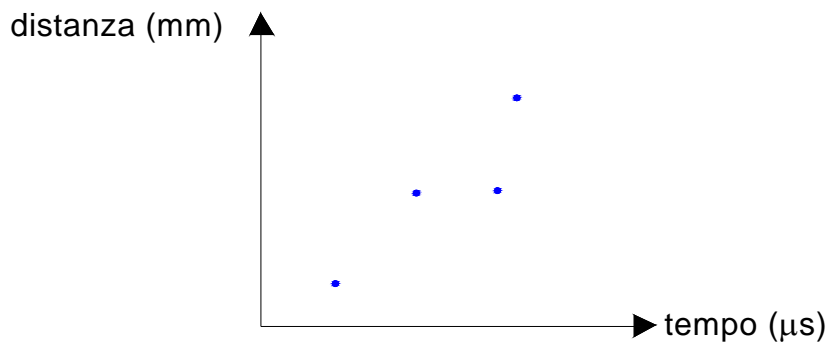


Figura 5.28 - Andamento distanza-tempo: il conglomerato è povero a causa della presenza di fratture e nidi di ghiaia pertanto i punti non si dispongono lungo una retta ma casualmente nel piano

La superficie di calcestruzzo dell'elemento di prova deve essere pulita, levigata e resa piana in modo da permettere un contatto uniforme con le sonde proprio nei punti di applicazione delle sonde stesse. Le sonde trasmittente e ricevente devono essere accoppiate alla superficie da esaminare cercando di evitare che la presenza di aria possa attenuare il segnale; è possibile anche usare il grasso di vaselina, della plastilina, o sapone liquido per evitare che ciò si verifichi. La misura della velocità deve essere effettuata in direzione perpendicolare al getto dello stampo. Le norme che regolano la propagazione degli ultrasuoni nel calcestruzzo sono la BS4408 e la ASTM C597-71 che stabiliscono le caratteristiche che i provini, lo strumento ed il calcestruzzo devono possedere. In particolare la ASTM C597 prescrive che la frequenza sia compresa tra 50 e 60 KHz. La misura della velocità degli ultrasuoni nel calcestruzzo è influenzata da una serie di fattori; la velocità degli ultrasuoni, infatti, aumenta con la maturazione del calcestruzzo, e ad uno stesso valore di velocità la resistenza di calcestruzzo maturato in acqua è minore di quella ottenuta con maturazione in aria. Anche la presenza di armature influenza la misura della velocità che risulta maggiore in prossimità delle barre stesse proprio per la maggior velocità nell'acciaio. E' allora opportuno fare in modo che le misure vengono effettuate su tratti non attraversati dalle barre, e nei casi in cui ciò non sia possibile occorre applicare un coefficiente di riduzione. La forma e la dimensione della struttura non sono determinanti ai fini della misura della velocità degli ultrasuoni purché la dimensione minima laterale non sia inferiore a 80 mm e la frequenza di trasmissione sia di 50 KHz; per valori inferiori a questi la velocità si riduce sensibilmente. La velocità degli ultrasuoni si riduce all'aumentare del rapporto acqua/cemento e varia di qualche unità percentuale per una temperatura ambientale tra 0° e 40°C. Nell'intervallo di temperatura compreso tra 5° e 30°C, invece, la velocità non varia in modo significativo. Solo nel caso di percorsi molto brevi la lunghezza del percorso influenza la velocità a causa della natura eterogenea del calcestruzzo; se si fa variare il percorso da 150 mm a 500 mm la variazione di velocità è pari al 4% per calcestruzzo secco e al 2,5% per calcestruzzo saturo. L'influenza dell'umidità del calcestruzzo ha effetti modesti sulla velocità degli ultrasuoni, solo per i provini in condizioni sature presentano velocità maggiori del 2% ed in casi eccezionali del 5% rispetto a quelli in condizioni secche. Le fasi che devono procedere la misura vera e propria devono essere innanzi tutto:

- levigare e rendere piane le superfici mediante una pietra abrasiva a base di carburo di silicio;
- di catalogare i provini numerandoli in ordine crescente;
- di individuare le facce contrassegnandole sempre con i numeri da 1 a 4;

- procedere a tracciare le diagonali sulle facce del provino allo scopo di evidenziare, in modo più preciso, il centro delle facce dove posizionare la sonda.

Alla sonda deve essere applicata una pressione costante al fine di migliorare la stabilità della lettura del tempo di transito delle onde ultrasonore. I valori V delle velocità ottenuti con la prova ultrasonora devono essere utilizzati per determinare la curva di regressione V/R utilizzabile per stimare la resistenza R del conglomerato. Durante l'utilizzo dei metodi non distruttivi, le caratteristiche ricercate vengono evidenziate o misurate sulla struttura (in sito) attraverso l'influenza che esse esercitano su alcune proprietà fisiche del materiale. Lo strumento ad ultrasuoni si basa sulla determinazione della velocità di transito attraverso il materiale opportunamente misurato. Nel caso delle strutture in conglomerato cementizio il metodo ultrasonico è utilizzato per valutare l'omogeneità in sito e stimare la resistenza degli elementi strutturali. Il metodo di indagine ad ultrasuoni può essere utilizzato per: ricerca in laboratorio, strutture in corso d'opera, strutture già esistenti, prefabbricazione di elementi strutturali di calcestruzzo.

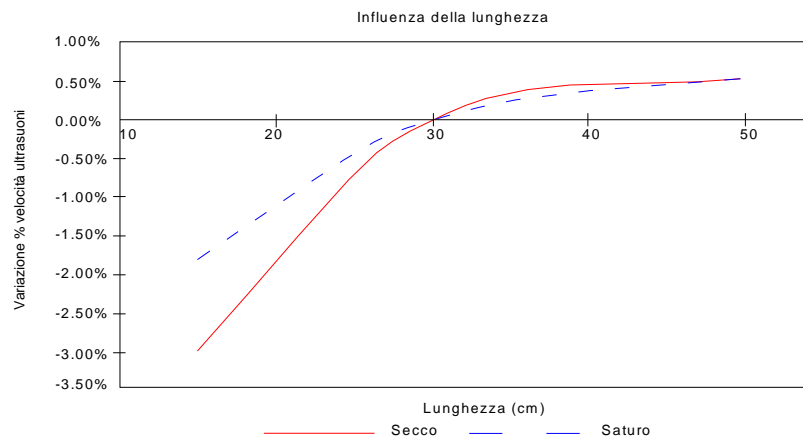


Figura 5.29 - Influenza della lunghezza del percorso sulla velocità degli ultrasuoni

4.4.2.4.3 Metodo SonReb

L'utilizzo di metodi combinati nasce dall'esigenza di ridurre le incertezze e gli errori di misura che si verificano quando si utilizza un singolo metodo. A tal proposito i metodi utilizzabili per la combinazione dei risultati devono dipendere da parametri che sono influenzati in modo diverso dalle caratteristiche fisiche del calcestruzzo impiegato. Secondo quanto contenuto sulle raccomandazioni RILEM 43-CND, la stima delle proprietà del calcestruzzo può essere migliorata utilizzando più metodi non distruttivi simultaneamente a condizione che:

- ciascun metodo misuri parametri correlati alla resistenza;
- ciascun metodo sia applicabile ad elementi strutturali di varie dimensioni;
- le prove siano semplici e rapide e non richiedano particolari preparazioni;
- i metodi abbiano un simile livello di accuratezza;
- i metodi applicati non modifichino le prestazioni degli elementi strutturali indagati

In genere, per valutare la resistenza a compressione in situ, si utilizzano i risultati ottenuti combinando solo 2 metodi. Le raccomandazioni RILEM 43-CND contengono un'appendice dove sono indicati i metodi a 2 e 3 parametri che rispettano le condizioni precedenti:

- velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo;
- velocità ultrasonica longitudinale + pull-out;
- velocità ultrasonica longitudinale + attenuazione dell'onda ultrasonica;
- velocità ultrasonica longitudinale + attenuazione dei raggi gamma;
- velocità ultrasonica longitudinale + smorzamento delle vibrazioni;
- velocità ultrasonica longitudinale + velocità ultrasonica trasversale;
- indice di rimbalzo + pull-out;
- velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo + pull-out;
- velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo + attenuazione dell'onda ultrasonica;
- velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo + velocità ultrasonica trasversale.

Il più diffuso metodo combinato a due parametri è quello che utilizza i risultati ottenuti combinando insieme le prove ultrasoniche e sclerometriche, noto come metodo SonReb. Combinando i due metodi non distruttivi è possibile ridurre gli errori, ottenendo una stima più attendibile della resistenza tramite correlazioni che mettono insieme le due misure effettuate. I vantaggi del metodo possono essere così riassunti: mentre l'indice sclerometrico è influenzato dalle proprietà dello strato superficiale del calcestruzzo, la velocità degli ultrasuoni lo è da quelle della parte interna del campione; d'altro canto, la presenza di un significativo contenuto d'umidità produce una stima per eccesso dell'indice ad ultrasuoni provocando errori, compensati o comunque ridotti, dall'indice sclerometrico che subisce una riduzione della sua stima dell'indice. Quindi, il particolare utilizzo del metodo è dovuto al fatto che la variazione di alcune proprietà producono effetti opposti sui risultati delle misure dei 2 strumenti. In particolare, il metodo SonReb risente poco degli effetti dovuti alla variazione di: contenuto di umidità, contenuto e tipo di cemento, rapporto acqua/cemento, dimensione degli aggregati. Dalla misura della velocità di propagazione delle onde ultrasoniche e dell'indice di rimbalzo, si può entrare in un grafico sperimentale di correlazione costituito da famiglie di curve di iso-resistenza in un piano con avente I_r (indice di rimbalzo) sull'ordinata e V (velocità ultrasonica) in ascissa. Esistono in bibliografia almeno tre differenti formulazioni corrispondenti alle curve di iso-resistenza, dalle quali dati i valori di I_r e V , si ottiene il valore di resistenza del calcestruzzo, R_c :

- $R_c = 0,0286 \cdot I_r^{1,246} \cdot V^{1,85}$
(con R_c in N/mm^2 e V in km/sec)⁴
- $R_c = 1,2 \cdot 10^{-9} \cdot I_r^{1,058} \cdot V^{2,446}$
(con R_c in N/mm^2 e V in m/sec)⁵
- $R_c = 7,695 \cdot 10^{-10} \cdot I_r^{1,4} \cdot V^{2,6}$
(con R_c in Kg/cm^2 e V in m/sec)⁶

Nelle tre formule, come si può notare, i parametri presenti, pur rimanendo sempre gli stessi, presentano differenti valori degli indici esponenziali e ciò in base

⁴J. Gasparik, "Prove non distruttive in edilizia", Quaderno didattico A.I.P.N.D., Brescia 1992;

⁵A. Di Leo, G. Pascale, "Prove non distruttive sulle costruzioni in cemento armato", Convegno Sistema Qualità e Prove non distruttive per l'Affidabilità e la Sicurezza delle strutture Civili, Bologna, Saie 1994;

⁶R. Giacchetti, L. Lacquaniti, "Controlli non distruttivi su impalcati da ponte in calcestruzzo armato" Nota tecnica 04, 18980, Università degli Studi di Ancona.

all'importanza conferita da ogni autore ai vari fattori perturbativi connessi all'impiego del metodo combinato Sonreb. Il metodo può essere calibrato per raffronto utilizzando i risultati ottenuti mediante almeno una prova di compressione su carota estratta o almeno tre prove di estrazione (pull – out) eseguite nella stessa zona (o in una zona con caratteristiche uniformi del calcestruzzo già saggiate per via non distruttiva ad esempio può esser dedotto dalle prove sclerometriche o ultrasoniche). In letteratura sono comunque presenti molte altre espressioni per la determinazione della resistenza a compressione dei calcestruzzi mediante l'utilizzo del metodo SonReb. La correlazione tra indice di rimbalzo e velocità ultrasonica con la resistenza a compressione sembra essere fortemente influenzata dalla qualità della struttura. Si fa comunque osservare che le leggi di correlazione che legano la resistenza reale in situ dell'elemento indagato non hanno una validità generale. Di volta in volta, in funzione del caso specifico (del tipo di calcestruzzo e della struttura sottoposta ad indagine), è importante stabilire la legge di correlazione più idonea (da ritenere valida solo per quella occasione). Il vero vantaggio della tecnica è rappresentato dalla possibilità di avere un grande numero di risultati a costi relativamente bassi e senza compromettere l'integrità degli elementi strutturali indagati.

4.4.2.5 Prova di ritiro

La norma UNI 6555 stabilisce le modalità per la determinazione del ritiro assiale di provini di dimensioni di 10 cm x 10 cm x 50 cm confezionati in calcestruzzo con inerti della dimensione massima fino a 30 mm. Il ritiro è la variazione di lunghezza espressa in micrometri e riferita al metro di lunghezza. La preparazione dei provini consiste nell'assemblare il calcestruzzo preparato in stampi metallici composti da 2 fiancate, 2 testate e una piastra. Le parti dello stampo devono essere saldamente collegate fra di loro. Alle estremità dello stampo sono inserite 2 spine. Subito dopo la confezione, i provini devono essere mantenuti negli stampi alla temperatura di 20°C in ambiente saturo di umidità o in mancanza di questo si devono coprire con un telo mantenuto umido. Dopo 24 ore i provini sono sformati e posti in ambiente di stagionatura condizionato a 20°C e umidità relativa del 50%, in cui viene eseguita subito la prima misura (misura di riferimento). Ogni provino deve essere collocato su appoggi e tutto intorno ad esso deve essere mantenuto uno spazio libero di almeno 2,5cm per permettere una libera circolazione dell'aria. Le misure successive normalmente vengono eseguite alle scadenze di 1, 2, 3, 7, 14, 28, 60 e 90 giorni dalla prima. La misura del ritiro dei provini confezionati in calcestruzzo deve essere effettuata mediante apparecchi che consentano di valutare le variazioni di lunghezza fra le estremità delle spine, con precisione non minore di 5micron. La misura deve essere eseguita su almeno 3 provini e si considera come valore del ritiro ad una data scadenza la media dei valori ottenuti. Nella figura 5.30 è riportato il particolare della spina inserita alle estremità dello stampo, mentre in figura 5.31 il particolare dello stampo metallico prescritto a livello normativo ed utilizzato nelle prove sperimentali.

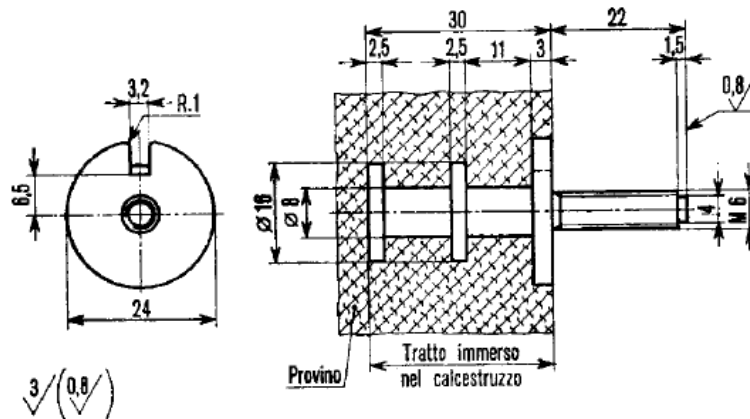
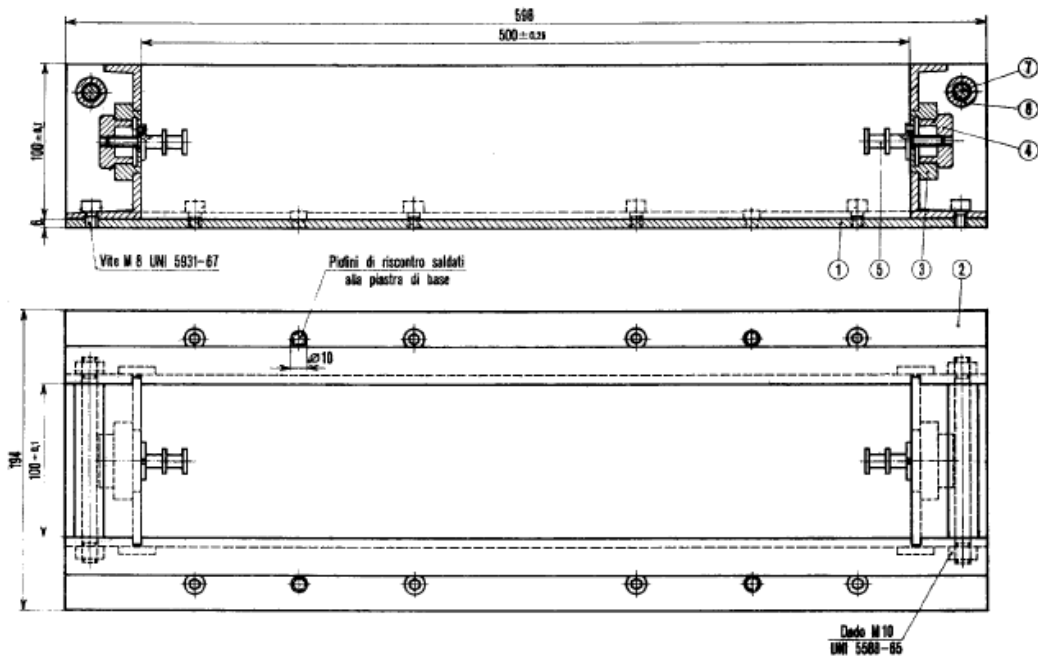


Figura 5.30 – Particolare della spina inserita alle estremità dello stampo



N° d'ordine	N° pezzi	Denominazione	Materiale
①	1	Piastra di base	Acciaio Fe 42 B UNI 7070-72
②	2	Fiancata	
③	2	Testata (portaspina)	
④	2	Ghiera	Acciaio X 10 Cr Ni 1809 UNI 6900-71
⑤	2	Spina (vedere figura del punto 3.)	
⑥	2	Distanziatore	Acciaio Fe 42 B UNI 7070-72
⑦	2	Tirante	

Figura 5.31 – Stampo per la confezione dei provini

4.4.2.6 Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro

Al termine della stagionatura in acqua a 28 giorni di stagionatura, rilevato il peso a secco, i provini di calcestruzzo di dimensioni 10cm x 10cm x 10cm sono stati inseriti in un recipiente contenente una soluzione acquosa in cui sono stati versati e sciolti 0,27 mol/l di cloruro di calcio (CaCl_2). La permanenza in questa soluzione, è avvenuta per 12 mesi, allo scadere della quale, i provini sono stati prelevati, messi ad asciugare per due giorni e, infine, ognuno di essi è stato diviso

in due metà. Per la valutazione della profondità di penetrazione dello ione Cl^- sono stati utilizzati due composti chimici: nitrato d'argento e fluoresceina. La normativa prescrive per il nitrato d'argento (AgNO_3) una soluzione titolata di concentrazione pari a 0,1 mol/l, mentre per la fluoresceina una soluzione composta di 0,1 g in 100 cm^3 d'alcool etilico al 70%. Per quanto riguarda l'esecuzione della prova, una volta prelevati i provini dal recipiente, asciugati e divisi a metà, si è proceduto all'esecuzione della prova necessaria per determinare l'avanzamento dello ione cloro nel calcestruzzo. Metà provino è stata spruzzata mediante un nebulizzatore, con una soluzione di fluoresceina e si è lasciata asciugare. Dopo aver ripetuto questo procedimento per 5 volte è stata spruzzata per due volte una soluzione di nitrato d'argento. In presenza di ioni Cl^- si ha formazione di cloruro di argento che diventa progressivamente più scuro per azione della luce. La zona di calcestruzzo non permeata dalla soluzione salina assorbe la fluoresceina mantenendo persistente in superficie la colorazione caratteristica rossa del colorante. Il metodo di verifica utilizzato per l'esecuzione della prova di penetrabilità dello ione cloruro è regolamentato dalla UNI 7928.

4.4.2.7 Determinazione della penetrabilità dello ione solfato

Il metodo di verifica adottato per l'esecuzione della prova di penetrabilità dello ione solfato è disciplinato dalla norma UNI 8019. Al termine dei 28 giorni di stagionatura, previa rilevazione del peso a secco dei provini, gli stessi sono stati inseriti in un recipiente contenente una soluzione acquosa in cui sono stati versati e sciolti 0,5 mol/l di solfato di sodio (Na_2SO_4). La permanenza in questa soluzione dei provini è stata di 12 mesi, allo scadere dei quali sono stati prelevati, asciugati e divisi in 2 metà. Per valutare la profondità di penetrazione sono stati utilizzati due composti chimici: cloruro di bario e permanganato di potassio. La normativa prevede l'impiego di una soluzione titolata di concentrazione pari a 2,1 mol/l di cloruro di bario (BaCl_2) e una concentrazione di 2,1 mol/l di permanganato di potassio (KMnO_4). Prescrive, inoltre, di miscelare 3 parti di soluzione titolata di BaCl_2 con 1 parte di soluzione titolata di KMnO_4 . Prelevati dal recipiente, asciugati e divisi a metà, sulle superfici dei provini, al fine di rendere evidente la profondità della penetrazione dello ione solfato, è stata spruzzata mediante un nebulizzatore una soluzione di cloruro di bario e permanganato di potassio. Dopo aver eseguito per una sola volta questa operazione, il provino viene immerso per 1 minuto in acqua distillata, allo scopo di eliminare l'eccesso della soluzione in precedenza spruzzata. In presenza di ioni SO_4^{2-} si ha formazione di solfato di bario che ingloba il permanganato di potassio, assumendo e conservando la sua colorazione violetta. La zona di conglomerato non permeata dalla soluzione salina di solfato di sodio si decolora durante il lavaggio con l'acqua distillata. E' così possibile tracciare una linea di demarcazione sulla superficie del provino, corrispondente al fronte d'avanzamento dello ione solfato e, quindi, determinarne la profondità di penetrazione.

4.4.2.8 Prove termiche ad alte temperature

Il procedimento di prova utilizzato per l'esecuzione dei cicli termici non è un procedimento standardizzato a livello normativo. Confezionati i provini di calcestruzzi e lasciati stagionare nelle condizioni previste dalle norme UNI, non prima della scadenza di 28 giorni di stagionatura, questi sono stati prelevati dall'ambiente di stagionatura e sono stati sottoposti a cicli termici. In particolare, sono stati effettuati 5 cicli termici a 80°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C. Durante

i cicli si è provveduto anche alla rilevazione delle velocità ultrasonore e del peso su ogni provino sottoposto a trattamento. Nel dettaglio, per ogni provino, la procedura eseguita ad ogni ciclo termico è stata:

- pesatura mediante bilancia elettronica;
- rilevazione della velocità di transito delle onde ultrasonore;
- allocazione in forno per 48 ore a temperatura costante (i provini sono stati disposti in modo da non venire a contatto tra di loro e in posizione orizzontale);
- prelievo dal forno (per evitare una brusca escursione termica, allo scadere delle 48 ore, il forno è stato lasciato aperto per 2 ore circa e solo successivamente i provini sono stati tolti);
- pesatura a secco, subito dopo aver tolto i provini dal forno;
- esposizione a temperatura ambiente per 48 ore.

Al termine dei cicli termici i provini sono stati sottoposti a test meccanici di tipo distruttivo.

Capitolo 5

Materiali

5.1 Premessa

Durante la sperimentazione condotta sono stati utilizzati diversi materiali. Ognuno di essi, prima di essere impiegato nella preparazione dei diversi impasti cementizi, è stato caratterizzato tramite opportune prove di tipo chimico, fisico e meccanico al fine di attestarne le qualità e le prestazioni. In questo capitolo sono stati riportati i risultati di tali test raggruppati per tipologia di materiale.

5.2 Gomma PFU

Nella sperimentazione è stata utilizzata gomma triturata proveniente dalla triturazione meccanica di pneumatici fuori uso o a fine vita (PFU) di autovetture, in diverse frazioni granulometriche. I dettagli delle prove di caratterizzazione eseguite in laboratorio del materiale sono riportati nei paragrafi seguenti.

5.2.1 Frazioni granulometriche

Essenzialmente sono state utilizzate 3 diverse granulometrie denominate, ai fini della ricerca, nel seguente modo:

- Polverino;
- Grana fina;
- Grana grossa.

A seconda del tipo di miscela realizzata è stata adoperata l'una o l'altra tipologia. In molti casi è stata utilizzata una combinazione tra le diverse frazioni.

5.2.2 Analisi granulometriche

Nelle figure 5.1-5.2 sono riportate le analisi granulometriche di ogni tipologia di gomma PFU utilizzata. Dalle analisi effettuate è stato constatato che il diametro massimo del polverino è di 1mm, quello della grana fina di 2,8mm, mentre la grana grossa presenta un diametro massimo di 16mm. La grana grossa, rispetto alla grana fina, è risultata più assortita granulometricamente.

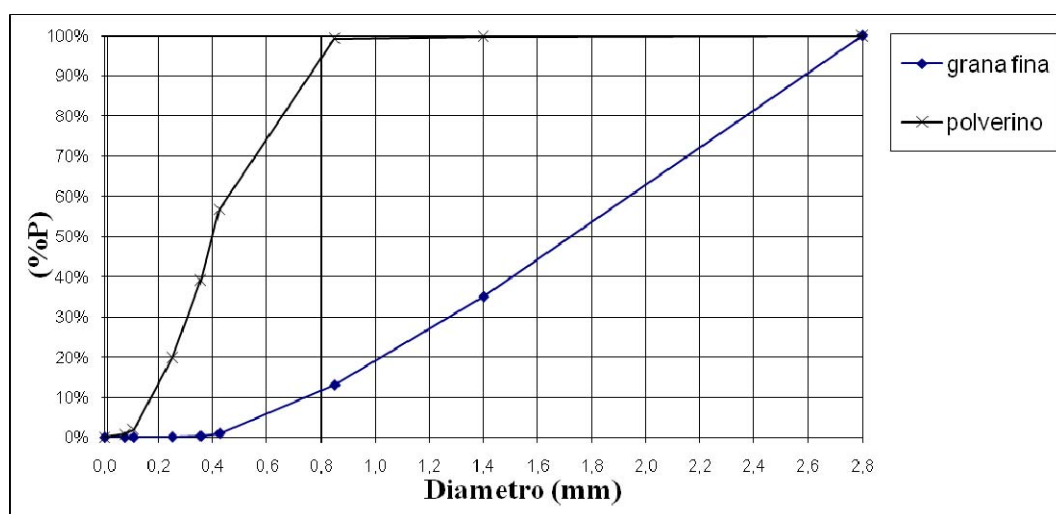


Figura 5.1 – Analisi granulometrica media della frazione polverino e della frazione grana fina (grani)

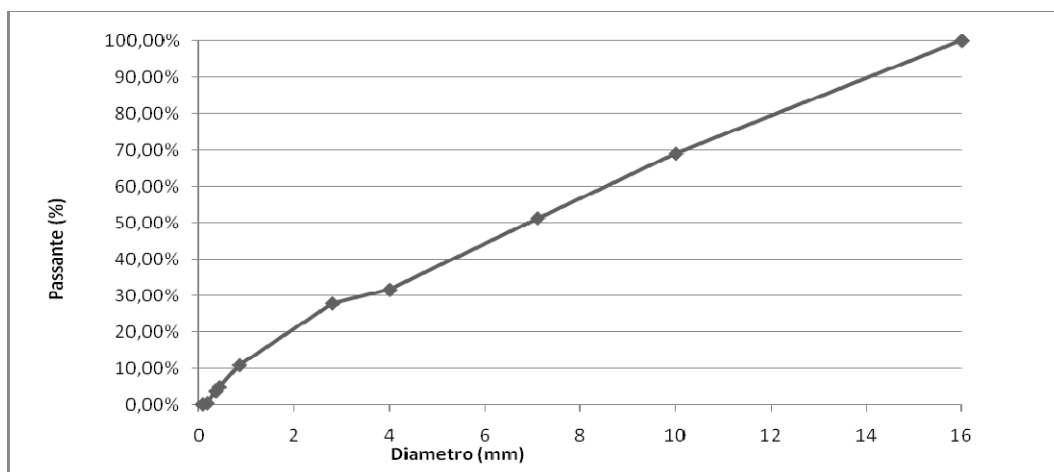


Figura 5.2 – Analisi granulometrica media della frazione grana grossa

5.2.3 Microscopia e fotografia

L'analisi al microscopio a scansione elettronica (SEM) è stata condotta soltanto sulla frazione polverino di gomma (figura 5.3). Per le altre frazioni è stata effettuata un'indagine tramite fotografia elettronica digitale (figura 5.4). Dalla micrografia sul polverino è possibile osservare che la dimensione massima delle particelle è dell'ordine del millimetro di grandezza e la presenza di fibre metalliche.

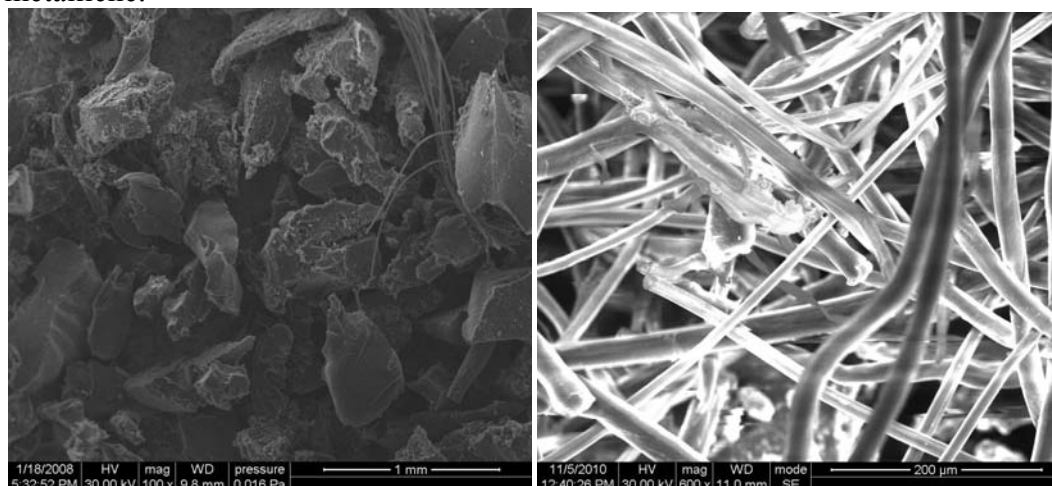


Figura 5.3 - Micrografia del polverino e della fibra tessile



(a)

(b)

Figura 5.4 – Fotografie della grana grossa (a) e della grana fina (b)

5.2.4 Analisi chimica elementare

La microanalisi è stata effettuata su campioni di polverino PFU. In figura 5.5 è riportata la percentuale in peso di ciascun elemento chimico presente, dove si evince che il principale costituente della gomma PFU è, ovviamente, il carbonio (C). Le percentuali di elementi metallici (Al, Fe e Zn) è dovuta alla presenza di piccole quantità di armatura metallica non rimosse completamente durante la fase di triturazione meccanica e separazione dei componenti. La presenza di tali fibre metalliche è più elevata nella frazione grana grossa.

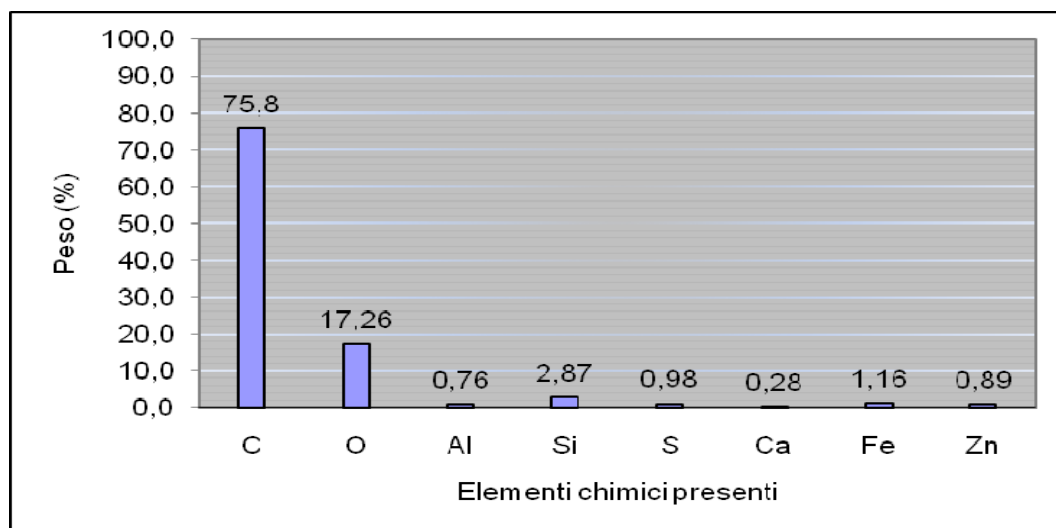


Figura 5.5 – Microanalisi della gomma PFU (polverino)

5.3 Cementi

Nelle indagini sperimentali condotte su malte e calcestruzzi sono stati utilizzati diverse tipologie di cemento. In particolare, si è fatto uso di cementi CEM III/A 32,5N, CEM II/A-LL 32,5R e CEM II/A-S 42,5R. Prima di essere utilizzati negli impasti, ovviamente sui cementi è stata effettuata una caratterizzazione chimica, fisica e meccanica per verificare il rispetto di quanto previsto a livello normativo e quanto dichiarato dal produttore. La caratterizzazione non si è limitata ad accertare le prescrizioni normative, ma si è proceduto con l'effettuazione di analisi più dettagliate.

5.3.1 Cemento CEM III/A 32.5N

Il cemento CEM III/A 32.5N è un cemento d'altoforno, conforme alla EN 197-1, contenente tra il 36% e il 65% in massa di loppa granulata d'altoforno (S), della classe di resistenza 32,5 con una resistenza iniziale ordinaria e un basso calore di idratazione. La percentuale di clinker di conseguenza varia tra 35% ed il 64%. La loppa granulata d'altoforno si ottiene mediante raffreddamento rapido di una scoria fusa di composizione appropriata proveniente dalla fusione in altoforno di minerali di ferro e contiene almeno due terzi in massa di loppa vetrosa e presenta proprietà idrauliche quando è attivata opportunamente. La loppa granulata d'altoforno deve essere costituita da almeno due terzi in massa della somma di ossido di calcio (CaO), ossido di magnesio (MgO) e biossido di silicio (SiO₂). Il resto contiene ossido di alluminio (Al₂O₃) insieme a modeste quantità di altri composti. Il rapporto in massa (CaO + MgO)/(SiO₂) deve essere maggiore di 1,0.

5.3.1.1 Prove chimiche

Il valore della perdita al fuoco eseguita in conformità della EN 196-2 è stata inferiore al 5,0% in massa del cemento finale, come prescritto a livello normativo e come confermato dall'analisi termica. Il residuo insolubile in acido cloridrico e carbonato di sodio è stato inferiore rispetto al limite del 5% in massa del cemento finale prescritto dalla EN 196-1 (prospetto 3 della norma). La norma EN 197-1 prescrive, inoltre di verificare il tenore in solfato (come SO_3) ed il tenore in cloruro del cemento. Per un cemento di tipo III, per tutte le classi di resistenza è previsto il valore massimo del 4% di solfati e dello 0,1% di cloruri. Il cemento esaminato è rientrato in entrambi i requisiti.

5.3.1.2 Prove fisiche

E' stato misurato tramite l'apparecchio ago di Vicat il tempo di inizio presa, in accordo con la EN 196-3, ed è stato misurato un tempo di inizio presa maggiore dei 75 minuti (tempo minimo imposto dalla EN 196-1 per cementi di classe di resistenza 32,5 N). Tramite le pinze di Le Chatelier è stata valutata la stabilità in termini di espansione del cemento verificando un valore appunto di espansione minore ai 10mm, come prescritto al prospetto 2 della EN 197-1. Per quanto riguarda il calore di idratazione, il produttore ha dichiarato che il cemento abbia un valore caratteristico determinato in accordo con la EN 196-8 a 7 giorni oppure in accordo alla EN 196-9 a 41 ore, inferiore a 270 J/g, per cui il legante è stato definito come un cemento a basso calore di idratazione (LH).

5.3.1.3 Prove meccaniche

Sono state valutate, in accordo con la EN 197-1, la resistenza normalizzata e quella iniziale del cemento. Per un cemento di classe di resistenza 32,5N è stato necessario verificare che, a 7 giorni di stagionatura, la resistenza a compressione di provini di malta standard (come previsto dalla EN 196-1) fosse superiore a 16MPa e a 28giorni di stagionatura superiore a 32,5MPa. Tali valori sono stati verificati sperimentalmente in laboratorio. In Figura 5.6 sono riportati i valori di resistenza a compressione medi registrati in funzione del tempo di stagionatura.

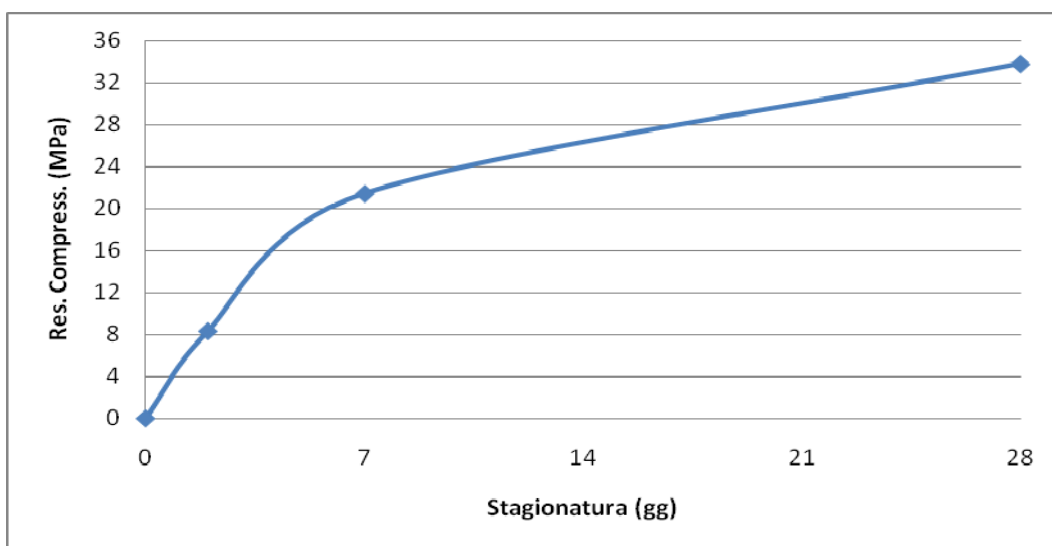


Figura 5.6 – Resistenza a compressione media di malte standard confezionate con il cemento CEM III/A 32,5N

5.3.1.4 Altre Prove

Sul cemento oggetto di sperimentazione sono state condotte ulteriori indagini rispetto al minimo proposto a livello normativo tramite l'utilizzo di opportune indagini strumentali. Nei capitoli seguenti sono riportati i risultati ottenuti.

5.3.1.4.1 Microscopia

In figura 5.7 è riportata la micrografia ottenuta mediante l'utilizzo di un microscopio a scansione elettronica (SEM) relativa al cemento CEM III/A 32,5N. Osservando l'immagine è possibile constatare che la maggior parte delle particelle ha dimensione di qualche decina di micron, tuttavia sono visibili particelle più grosse dell'ordine dei 50-90 micron, a dimostrazione del fatto che i cementi di classe 32,5 hanno una più bassa finezza di macinazione rispetto ai cementi con classe di resistenza più elevata.

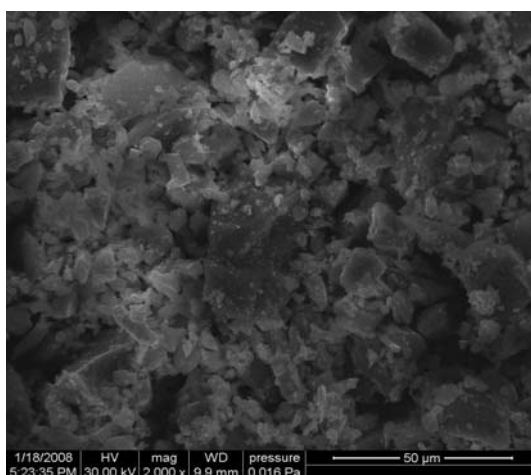


Figura 5.7 - Micrografia del CEM III/A 32,5 N

5.3.1.4.2 Analisi chimica elementare

Tramite un'opportuna sonda EDX, mentre il campione di cemento è stato sottoposto ad analisi SEM, è stato possibile ottenere, a livello più qualitativo che quantitativo, la composizione chimica del campione stesso. Nella figura 5.8 è riportato il diagramma ottenuto. E' evidente la presenza di Calcio (Ca) e Silicio (Si), principali costituenti chimici del cemento. Assente il Cloro (Cl), opportunamente bassa la percentuale di Zolfo (S).

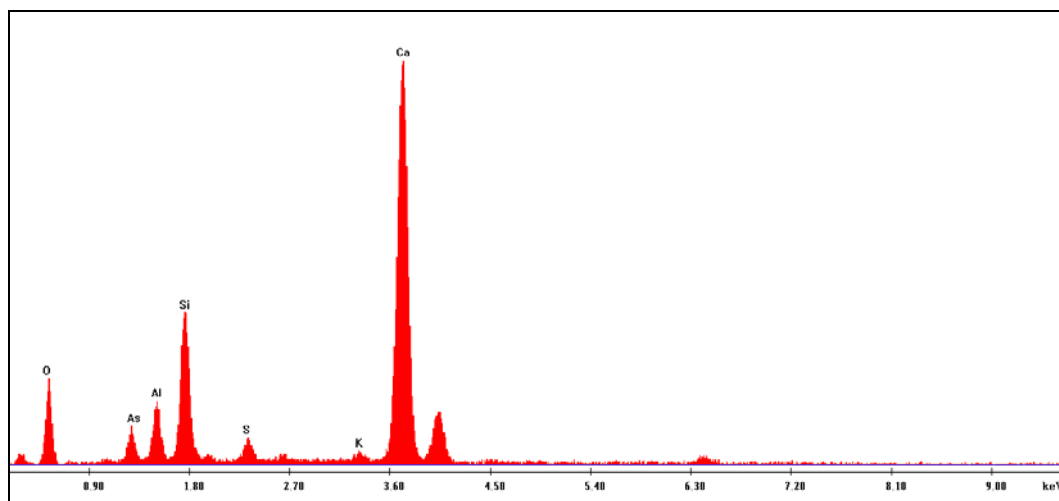


Figura 5.8 – Microanalisi di un campione di cemento CEM III/A 32,5N

5.3.1.4.3 Analisi diffrattometrica

Sono stati preparati una serie di campioni di cemento da sottoporre ad indagine diffrattometrica ai raggi X. Nella figura 5.9 è riportato un tipico diffrattogramma ottenuto. Risultano visibili i principali costituenti del clinker.

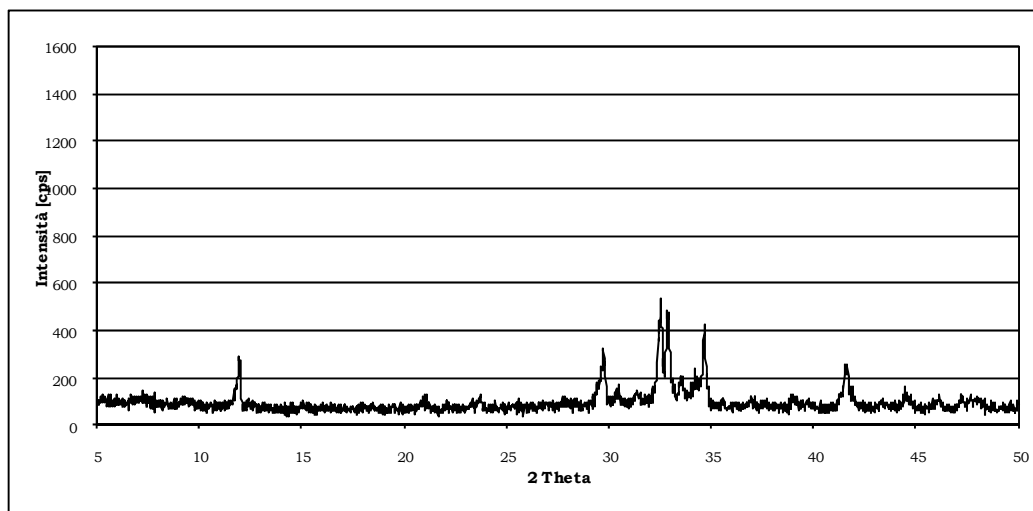


Figura 5.9 – Diffrattogramma di un campione di cemento CEM III/A 32,5N

5.3.1.4.4 Analisi termica

Nella figura 5.10 è riportata l'analisi termica di un campione di cemento CEM III/A 32,5N. Ovviamente non è stata registrata un'eccessiva perdita di massa del campione.

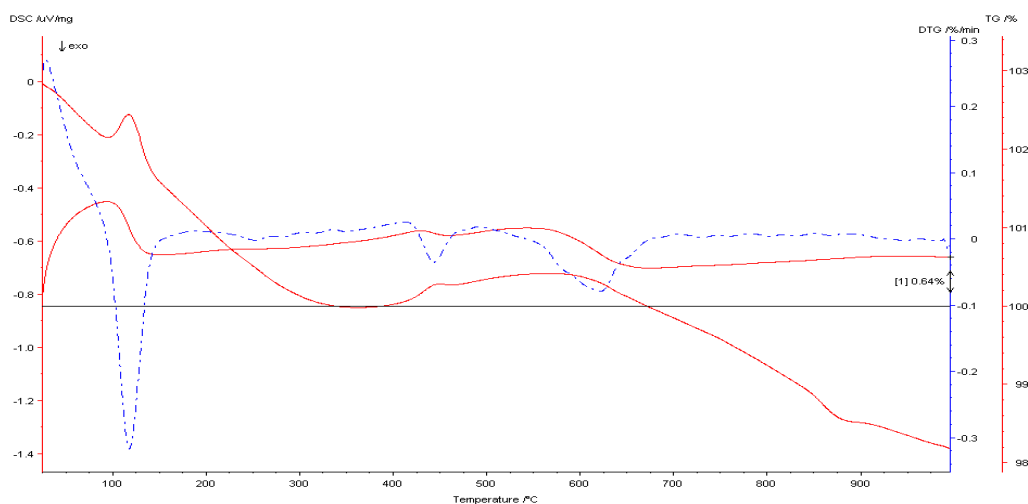


Figura 5.10 – Analisi termica di un campione di cemento CEM III/A 32,5N

5.3.2 Cemento CEM II/A-LL 32.5R

Il cemento CEM II/A-LL 32.5R è un cemento portland al calcare, conforme alla EN 197-1, contenente tra il 6% e il 20% in massa di calcare (LL), della classe di resistenza 32,5 con un'elevata resistenza iniziale. La percentuale di clinker di conseguenza varia tra l'80% ed il 94%. Il calcare deve soddisfare i requisiti seguenti:

- il tenore in carbonato di calcio (CaCO_3), calcolato in base al tenore in ossido di calcio, deve essere almeno del 75% in massa;
- il tenore in argilla, determinato dalla prova al blu di metilene in accordo alla EN 933-9, non deve essere maggiore di 1,20 g/100 g. Per questa prova

il calcare deve essere macinato a una finezza di circa 5000 cm²/g determinata come superficie specifica in accordo alla EN 196-6;

- il tenore in carbonio organico totale (TOC), quando viene determinato in accordo al prEN 13639:1999, non deve essere maggiore di 0,20% in massa (LL).

5.3.2.1 Prove chimiche

La norma EN 197-1 prescrive per i cementi di tipo II di verificare il tenore in solfato (come SO₃) ed il tenore in cloruro del cemento. Per un cemento di tipo II, è previsto il rispetto del valore massimo del 3,5% di solfati per classe di resistenza 32,5R e dello 0,1% di cloruri. Il cemento esaminato è rientrato in entrambi i requisiti.

5.3.2.2 Prove fisiche

E' stato misurato tramite l'apparecchio ago di Vicat il tempo di inizio presa, in accordo con la EN 196-3, ed è stato misurato un tempo di inizio presa maggiore dei 75 minuti (tempo minimo imposto dalla EN 196-1 per cementi di classe di resistenza 32,5 R). Tramite le pinze di Le Chatelier è stata valutata la stabilità in termini di espansione del cemento verificando un valore di espansione minore ai 10mm, come prescritto al prospetto 2 della EN 197-1.

5.3.2.3 Prove meccaniche

Sono state valutate, in accordo con la EN 197-1, la resistenza normalizzata e quella iniziale del cemento. Per un cemento di classe di resistenza 32,5R è stato necessario verificare che, a 2 giorni di stagionatura, la resistenza a compressione di provini di malta standard (come previsto dalla EN 196-1) fosse superiore a 10MPa e a 28giorni di stagionatura superiore a 32,5MPa. Tali valori sono stati verificati sperimentalmente in laboratorio. In Figura 5.11 sono riportati i valori di resistenza a compressione medi registrati in funzione del tempo di stagionatura.

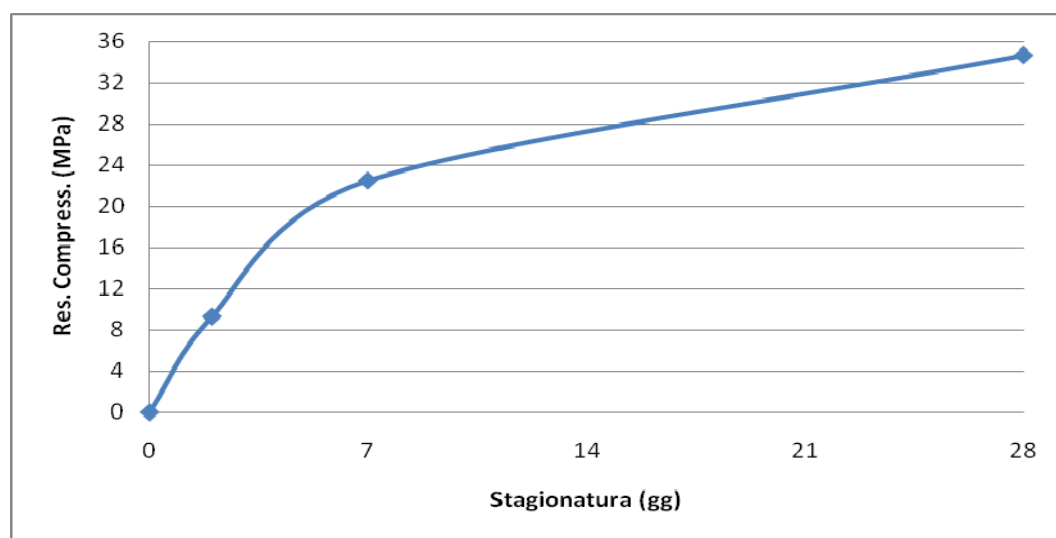


Figura 5.11 – Resistenza a compressione media di malte standard confezionate con il cemento CEM II/A-LL 32,5R

5.3.2.4 Altre Prove

Sul cemento oggetto di sperimentazione sono state condotte ulteriori indagini rispetto al minimo proposto a livello normativo tramite l'utilizzo di opportune indagini strumentali. Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati ottenuti.

5.3.2.4.1 Microscopia

In figura 5.12 è riportata la micrografia ottenuta mediante l'utilizzo di un microscopio a scansione elettronica (SEM) relativa al cemento CEM II/A-LL 32,5R. Osservando l'immagine è possibile constatare che la maggior parte delle particelle ha dimensione di qualche decina di micron, tuttavia sono visibili particelle più grosse dell'ordine anche di 50 micron. Rispetto al CEM III/A 32,5N le particelle sono generalmente più piccole.

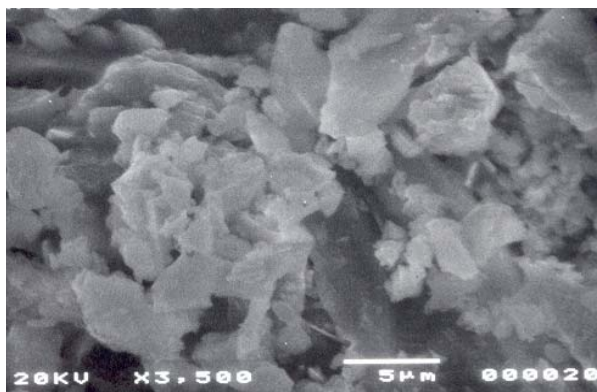


Figura 5.12 - Micrografia del CEM II/A-LL 32,5R

5.3.2.4.2 Analisi chimica elementare

Tramite un'opportuna sonda EDX, mentre il campione di cemento è sottoposto ad analisi SEM, è possibile ottenere, a livello più qualitativo che quantitativo, la composizione chimica del campione stesso. Nella figura 5.13 è riportato il diagramma ottenuto. E' evidente la presenza di Calcio (Ca) e Silicio (Si), principali costituenti chimici del cemento. Assente il Cloro (Cl), opportunamente bassa la percentuale di Zolfo (S).

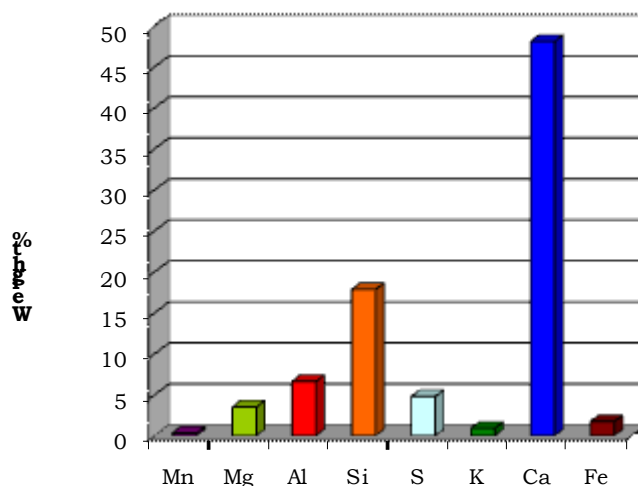


Figura 5.13 – Microanalisi di un campione di cemento CEM II/A-LL 32,5R

5.3.2.4.3 Analisi diffrattometrica

Sono stati opportunamente preparati una serie di campioni di cemento da sottoporre ad indagine diffrattometrica ai raggi X. Nella figura 5.14 è riportato un tipico diffrattogramma ottenuto. Risultano più pronunciati i principali costituenti del clinker, in quanto la relativa percentuale nel cemento è maggiore rispetto al CEM III/A 32,5N, oltre naturalmente al picco del carbonato.

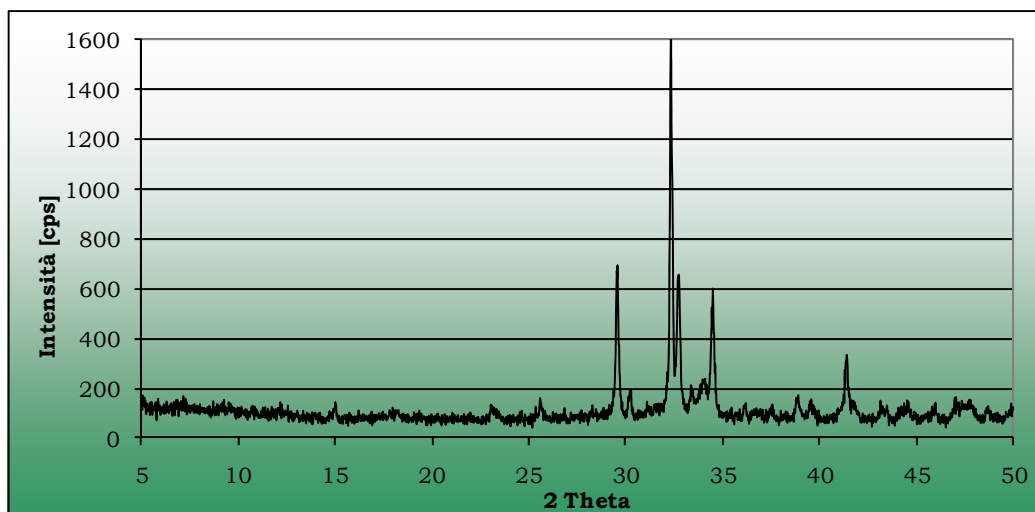


Figura 5.14 – Diffratogramma di un campione di cemento CEM II/A-LL 32,5R

5.3.2.4.4 Analisi termica

Nella figura 5.15 è riportata l'analisi termica di un campione di cemento CEM II/A-LL 32,5R. Ovviamente non è stata registrata un'eccessiva perdita di massa del campione.

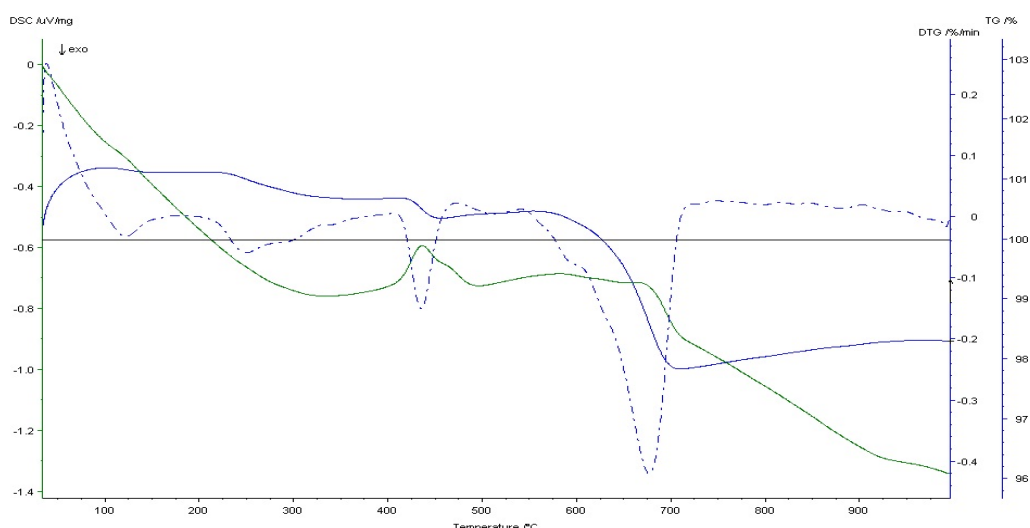


Figura 5.15 – Analisi termica di un campione di cemento CEM II/A-LL 32,5R

5.3.3 Cemento CEM II/A-S 42.5R

Il cemento CEM II/A-S 42.5R è un cemento portland composito alla loppa, conforme alla EN 197-1, contenente tra il 6% e il 20% in massa di loppa granulata d'altoforno (S), della classe di resistenza 42,5 con un'elevata resistenza iniziale. La percentuale di clinker di conseguenza varia tra l'80% ed il 94%. La loppa granulata d'altoforno si ottiene mediante raffreddamento rapido di una scoria fusa di composizione appropriata proveniente dalla fusione in altoforno di minerali di ferro e contiene almeno due terzi in massa di loppa vetrosa e presenta proprietà idrauliche quando è attivata opportunamente. La loppa granulata d'altoforno deve essere costituita da almeno due terzi in massa della somma di ossido di calcio (CaO), ossido di magnesio (MgO) e biossido di silicio (SiO₂). Il resto contiene ossido di alluminio (Al₂O₃) insieme a modeste quantità di altri composti. Il rapporto in massa (CaO + MgO)/(SiO₂) deve essere maggiore di 1,0.

5.3.3.1 Prove chimiche

La norma EN 197-1 prescrive per i cementi di tipo II di verificare il tenore in solfato (come SO_3) ed il tenore in cloruro del cemento. Per un cemento di tipo II, è previsto il rispetto del valore massimo del 4,0% di solfati per classe di resistenza 42,5R e dello 0,1% di cloruri. Il cemento esaminato è rientrato in entrambi i requisiti.

5.3.3.2 Prove fisiche

E' stato misurato tramite l'apparecchio ago di Vicat il tempo di inizio presa, in accordo con la EN 196-3, ed è stato misurato un tempo di inizio presa maggiore dei 60 minuti (tempo minimo imposto dalla EN 196-1 per cementi di classe di resistenza 42,5 R). Tramite le pinze di Le Chatelier è stata valutata la stabilità in termini di espansione del cemento verificando un valore appunto di espansione minore ai 10mm, come prescritto al prospetto 2 della EN 197-1.

5.3.3.3 Prove meccaniche

Sono state valutate, in accordo con la EN 197-1, la resistenza normalizzata e quella iniziale del cemento. Per un cemento di classe di resistenza 42,5R è stato necessario verificare che, a 2 giorni di stagionatura, la resistenza a compressione di provini di malta standard (come previsto dalla EN 196-1) fosse superiore a 20MPa e a 28giorni di stagionatura superiore a 42,5MPa e inferiore a 62,5MPa. Tali valori sono stati verificati sperimentalmente in laboratorio. In Figura 5.16 sono riportati i valori di resistenza a compressione medi registrati in funzione del tempo di stagionatura.

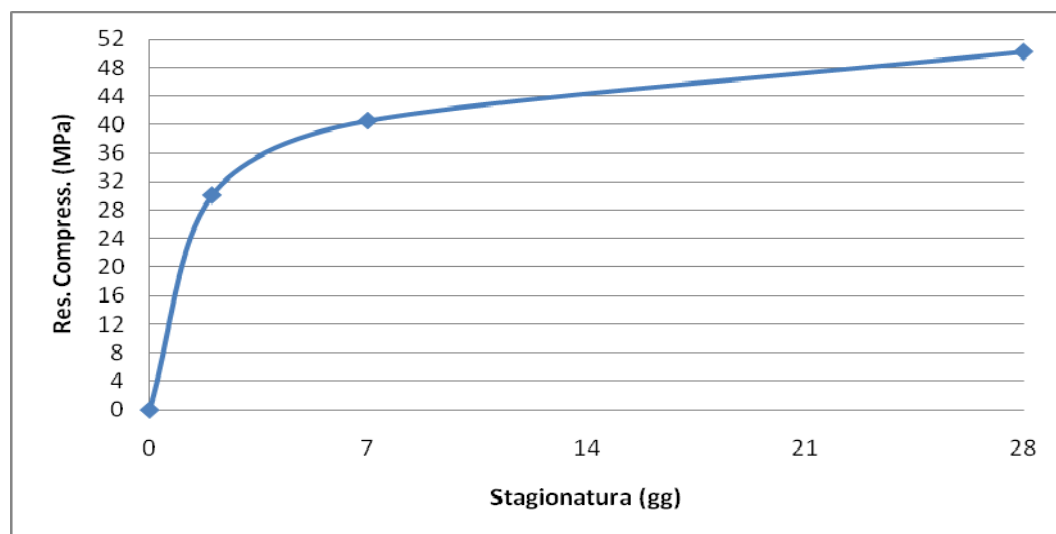


Figura 5.16 – Resistenza a compressione media di malte standard confezionate con il cemento CEM II/A-S 42,5R

5.3.1.4 Altre Prove

Sul cemento oggetto di sperimentazione sono state condotte ulteriori indagini rispetto al minimo proposto a livello normativo tramite l'utilizzo di opportune indagini strumentali. Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati ottenuti.

5.3.1.4.1 Microscopia

In figura 5.17 è riportata la micrografia ottenuta mediante l'utilizzo di un microscopio a scansione elettronica (SEM) relativa al cemento CEM II/A-S 42,5R. Osservando l'immagine è possibile constatare che la maggior parte delle

particelle ha dimensione di qualche decina di micron, per cui è avvenuto un processo di macinazione più lungo rispetto alle altre due tipologie finora esaminate.

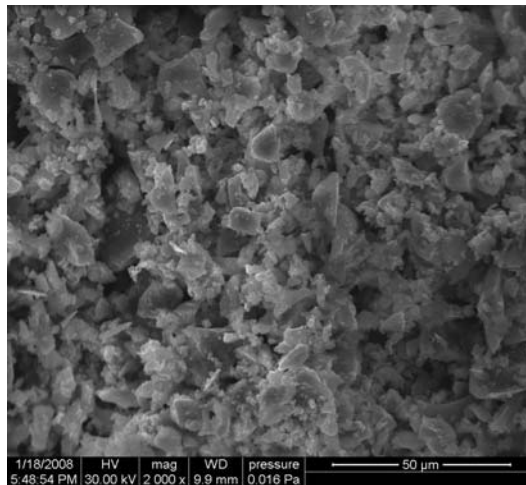


Figura 5.17 - Micrografia del CEM II/A-S 42,5 R

5.3.1.4.2 Analisi chimica elementare

Tramite un'opportuna sonda EDX, mentre il campione di cemento è sottoposto ad analisi SEM, è stato possibile ottenere, a livello più qualitativo che quantitativo, la composizione chimica del campione stesso. Nella figura 5.18 è riportato il diagramma ottenuto. E' evidente la presenza di Calcio (Ca) e Silicio (Si), principali costituenti chimici del cemento. Assente il Cloro (Cl) e lo Zolfo (S).

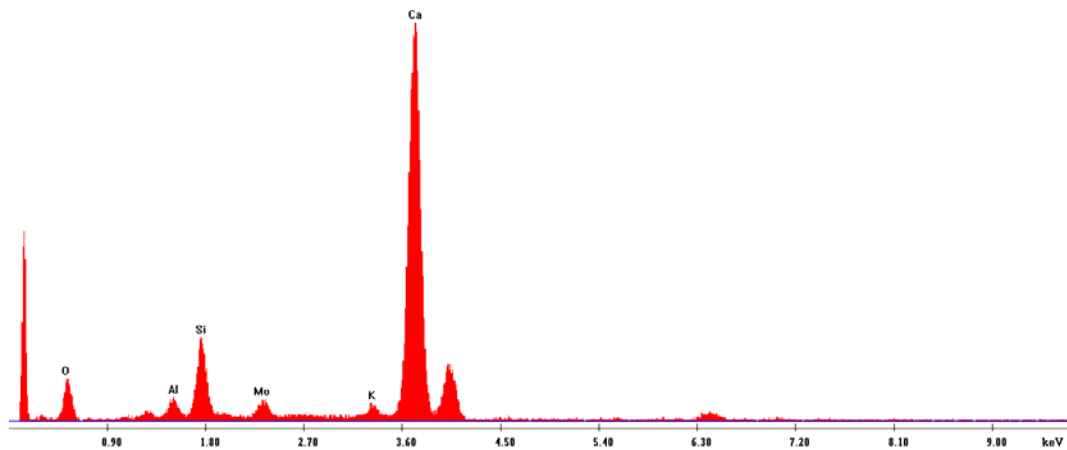


Figura 5.18 – Microanalisi di un campione di cemento CEM II/A-S 42,5R

5.3.1.4.3 Analisi diffrattometrica

Sono stati opportunamente preparati una serie di campioni di cemento da sottoporre ad indagine diffrattometrica ai raggi X. Nella figura 5.19 è riportato un tipico diffrattogramma ottenuto. Risultano visibili i principali costituenti del clinker.

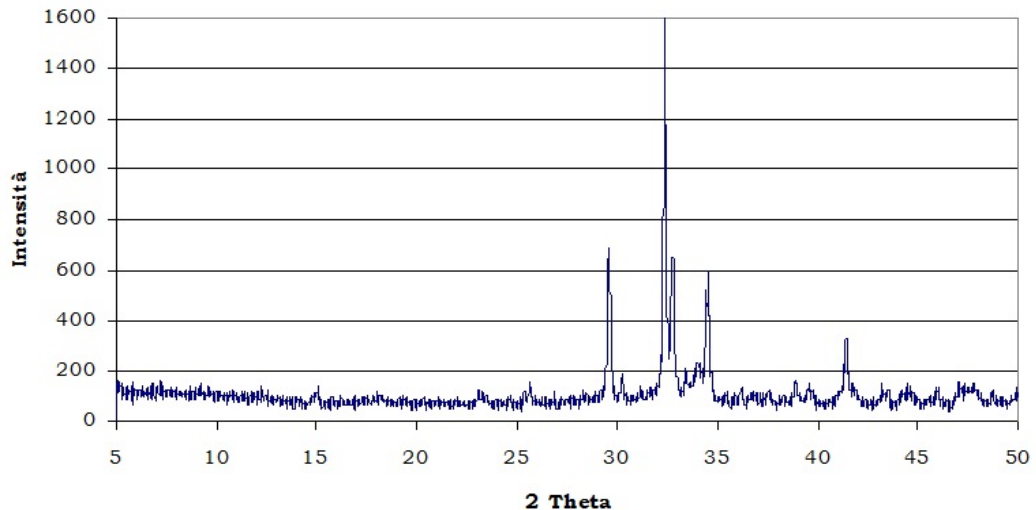


Figura 5.19 – Diffratogramma di un campione di cemento CEM II/A-S 42,5R

5.3.1.4.4 Analisi termica

Nella figura 5.20 è riportata l'analisi termica di un campione di cemento CEM II/A-S 42,5R. Ovviamente non è stata registrata un'eccessiva perdita di massa del campione.

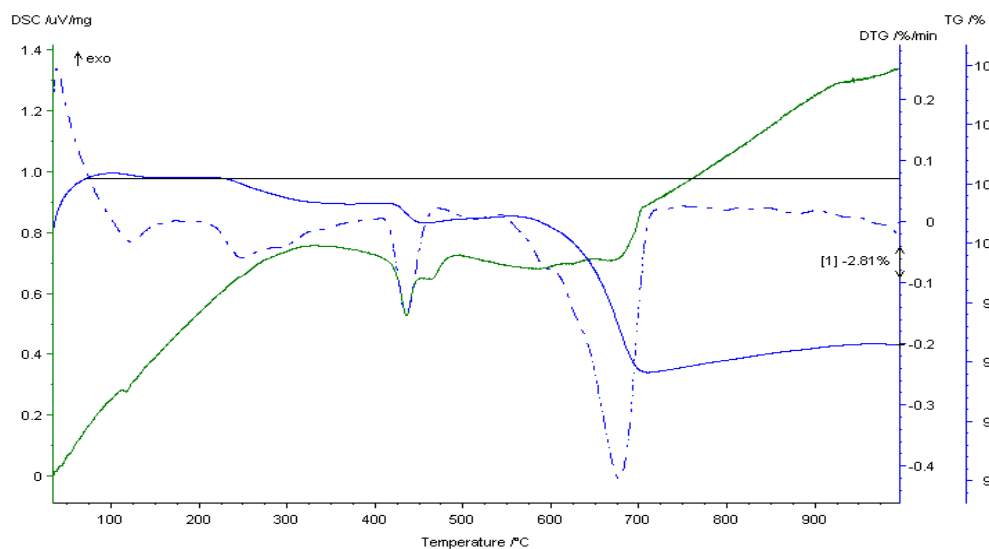


Figura 5.20 – Analisi termica di un campione di cemento CEM II/A-S 42,5R

5.4 Aggregati

Gli aggregati utilizzati nella sperimentazione sono risultati conformi alle norme vigenti: UNI EN 12620, UNI 8520 e UNI EN 13139. Nella ricerca scientifica condotta si è fatto riferimento ad aggregati di facile reperibilità a livello locale, utilizzando materiali comunemente utilizzati nel campo delle costruzioni. La caratterizzazione degli aggregati è stata suddivisa essenzialmente in due parti: caratterizzazione delle sabbie e caratterizzazione degli aggregati grossi. Nei paragrafi successivi sono riportati, nello specifico, i risultati ottenuti.

5.4.1 Sabbie

Durante la sperimentazione si è fatto riferimento a sabbie di diversa granulometria, ma della stessa natura silicea. Ciò è essenzialmente dovuto al fatto

di aver condotto indagini su diverse tipologie di conglomerati cementizi eseguiti in tempi diversi.

5.4.1.1 Analisi granulometriche

In figura 5.21 è riportata l'analisi granulometrica media della sabbia utilizzata nella preparazione delle malte di prima e di seconda serie e nei calcestruzzi ordinari. Questa si presenta come una sabbia abbastanza "grossa" in quanto, come si può osservare dal relativo grafico, il diametro massimo è di 7.1mm. In figura 5.22 è riportata la curva granulometrica modificata usata nelle malte di terza serie, mentre in figura 5.23, invece, è stata riportata la curva granulometrica della sabbia usata per gli impasti di calcestruzzo autocompattante. Infine, in figura 5.25 è illustrata la curva granulometrica adoperata nelle miscele di calcestruzzo autocompattante ottimizzata

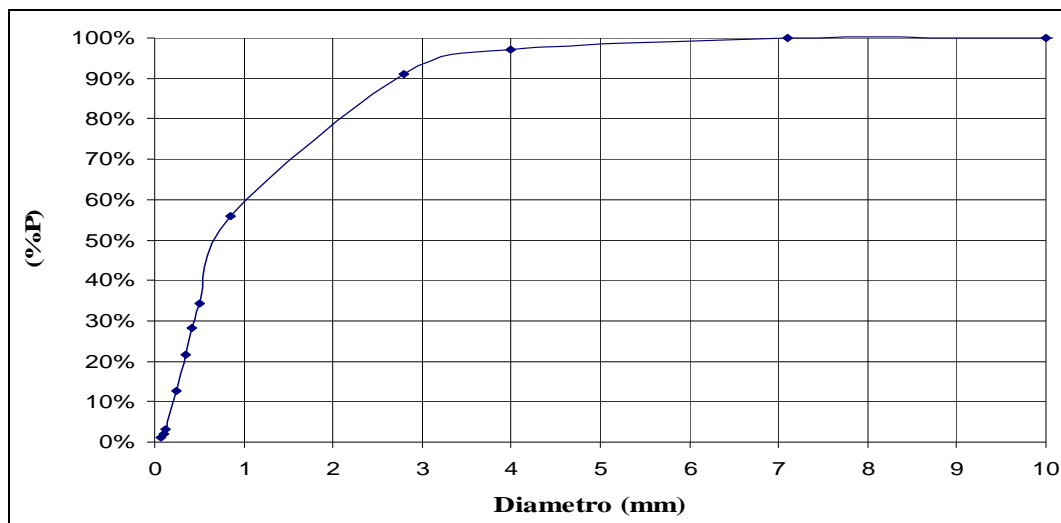


Figura 5.21 – Analisi granulometrica media della sabbia usata per le miscele di malta di prima e di seconda serie e per le miscele di calcestruzzo ordinario

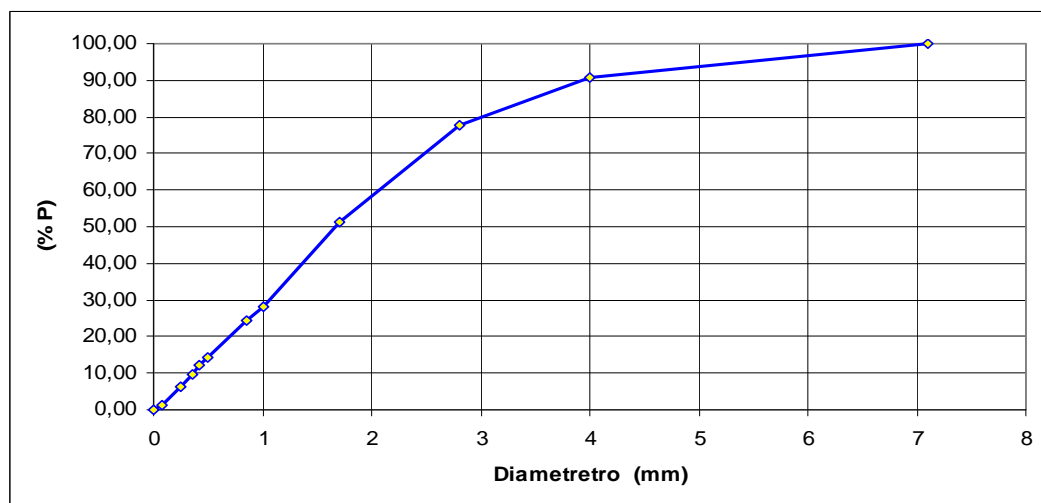


Figura 5.22 – Analisi granulometrica media della sabbia usata per le miscele di malta di terza serie

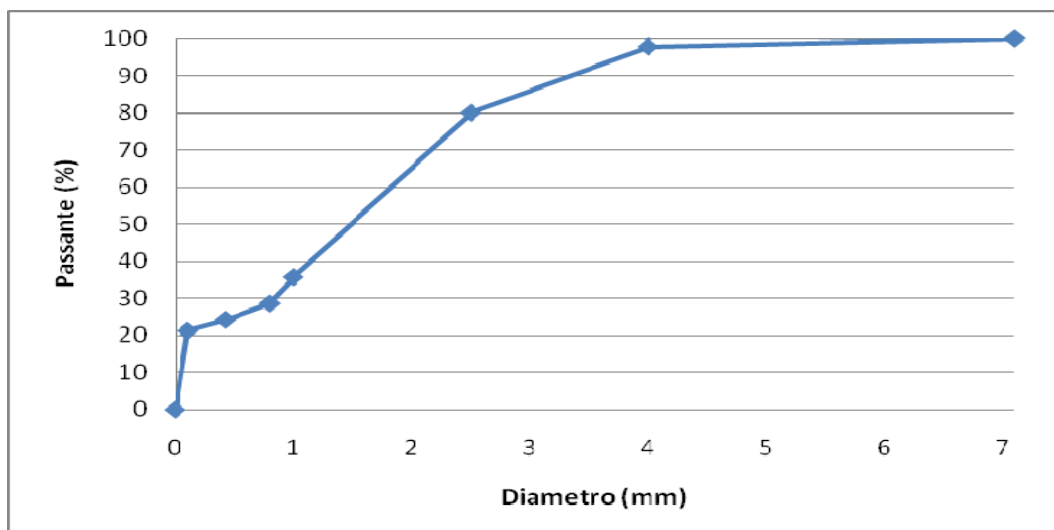


Figura 5.23 – Analisi granulometrica media della sabbia usata per le miscele di calcestruzzo autocompattante

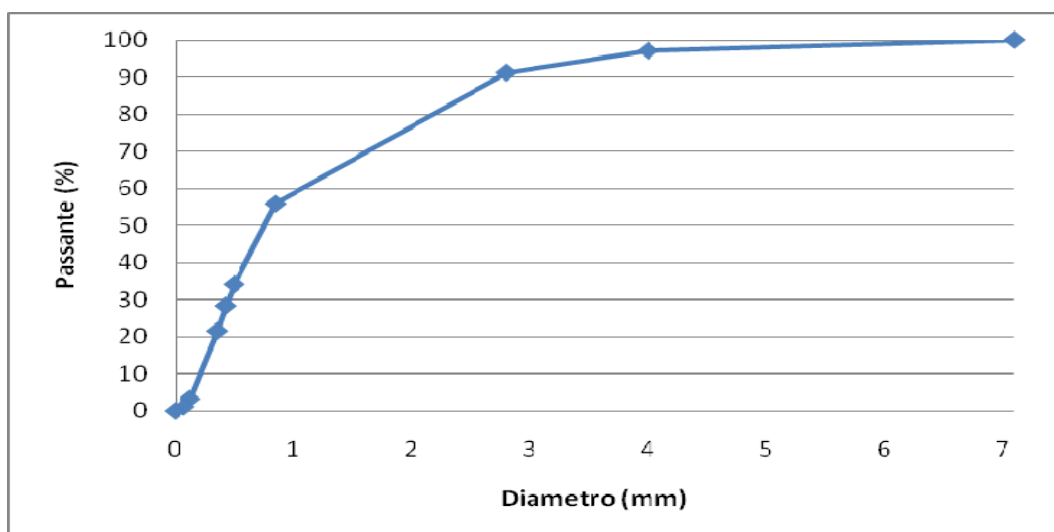


Figura 5.24– Analisi granulometrica media della sabbia usata per le miscele di calcestruzzo autocompattante ottimizzate

Tutte le curve utilizzate nella produzione dei conglomerati cementizi sono abbastanza simili tra loro. Tuttavia, consentono di ottenere significative variazioni soprattutto in termini di prestazioni meccaniche tra i manufatti realizzati, come si avrà modo di evidenziare nei successivi capitoli.

5.4.1.2 Analisi diffrattometriche

Le diverse sabbie utilizzate nelle sperimentazioni sono molto simili tra loro, non solo per la curva granulometrica di ognuna, bensì anche nella composizione. Difatti, le sabbie utilizzate sono tutte composte da quarzo e silico-alluminati, con tracce di materiale di natura carbonatica. Nelle figure 5.25 è riportato, come esempio, un diffrattogramma di una sabbia usata nella preparazione delle miscele cementizie dove risulta evidente uno dei picchi tipici del quarzo a circa 26,60 gradi 2θ .

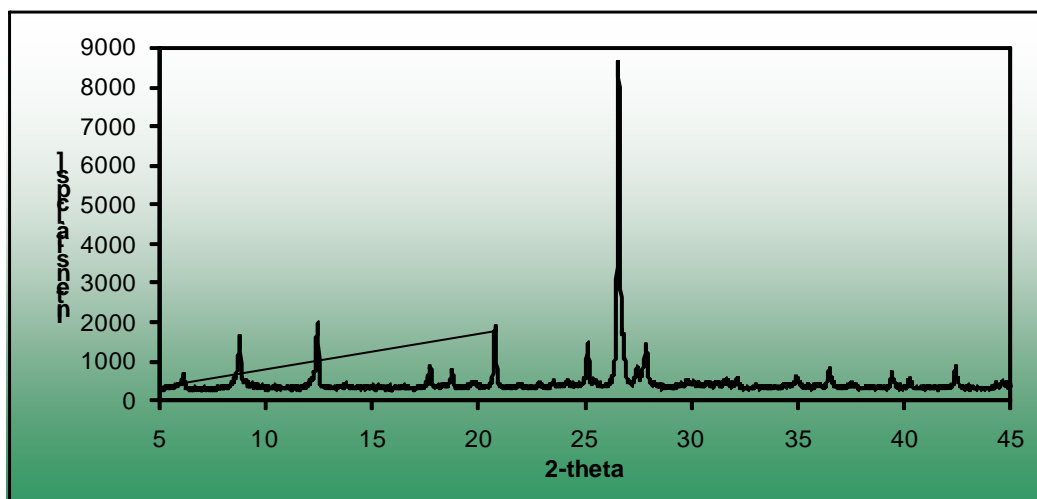


Figura 5.25 – Diffratogramma di un campione di sabbia trattenuto a 0,106 mm

5.4.2 Aggregati “Grossi”

Come per le sabbie anche per gli aggregati grossi sono state utilizzate diverse granulometrie, pur non variando significativamente la composizione. Spesso le curve granulometriche di partenza sono state progettate opportunamente al fine di consentire una distribuzione ottimale dei grani all’interno della matrice cementizia e, quindi, un miglioramento delle prestazioni meccaniche e di durabilità. In tutti i casi, però, sono stati usati aggregati di facile reperibilità che ordinariamente sono utilizzati per il confezionamento di calcestruzzi. Gli aggregati sono stati sia di natura alluvionale (tondeggianti) che frantumata (spigolosi).

5.4.2.1 Distribuzioni granulometriche

In figura 5.26 è riportata la distribuzione granulometrica usata per la realizzazione delle miscele di calcestruzzo ordinario di prima approssimazione, mentre in figura 5.27 è riportata la distribuzione usata per gli impasti di calcestruzzo ordinari definitivi. Seguono le distribuzioni utilizzate rispettivamente nel confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti di prova e definitive (figura 5.28) e nel confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti ottimizzati.

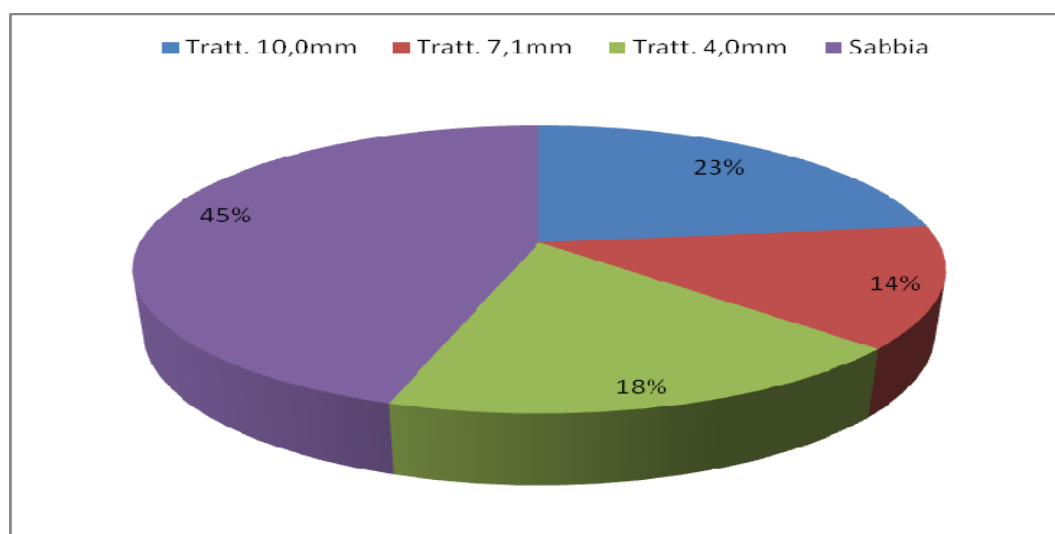


Figura 5.26 – Distribuzione granulometrica degli aggregati usati per le miscele di calcestruzzo ordinario di prima approssimazione

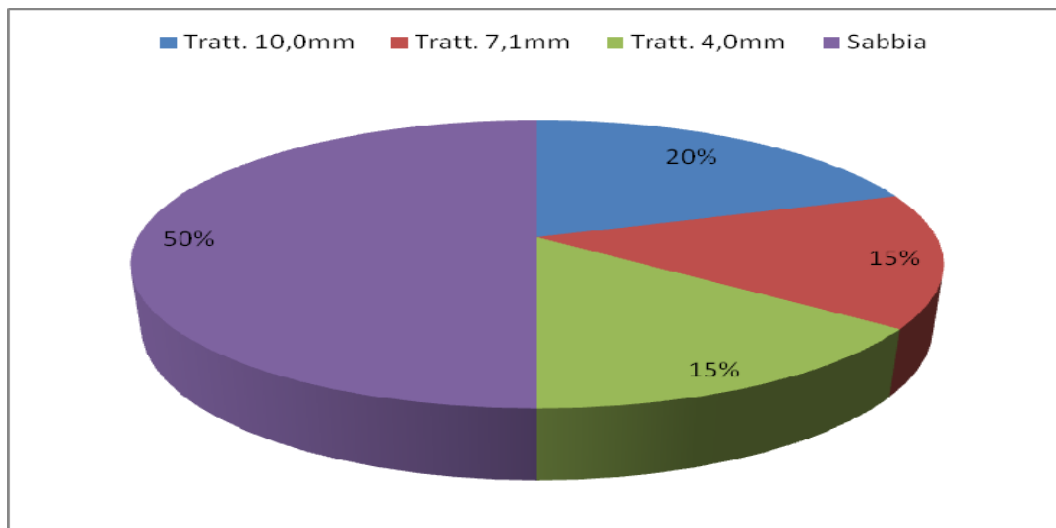


Figura 5.27 – Distribuzione granulometrica degli aggregati usati per le miscele definitive di calcestruzzo ordinario

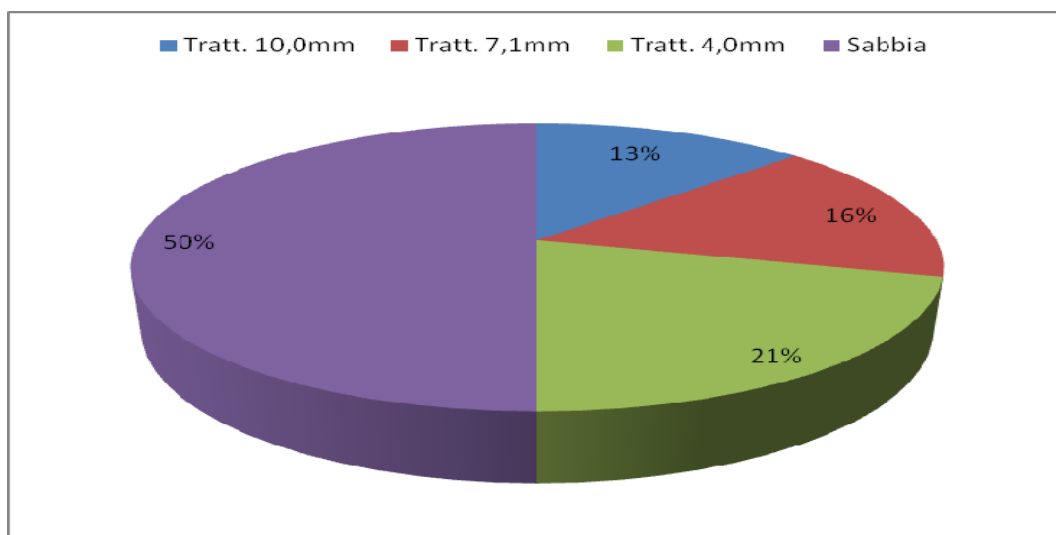


Figura 5.28 – Distribuzione granulometrica degli aggregati usati per le miscele di prova e definitive di calcestruzzo autocompattante

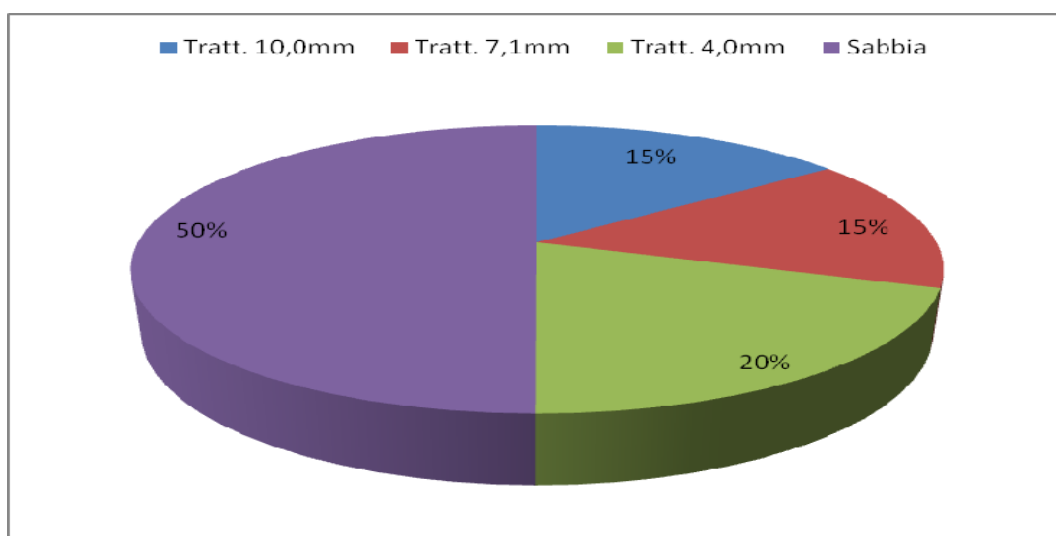


Figura 5.29 – Distribuzione granulometrica degli aggregati usati per le miscele ottimizzate di calcestruzzo autocompattante

5.4.2.2 Analisi diffrattometriche

Sono state riportate di seguito alcune analisi diffrattometriche delle diverse frazioni granulometriche usate negli impasti di calcestruzzo: trattenuto a 10 mm, a 7,1 mm e del trattenuto a 4 mm.

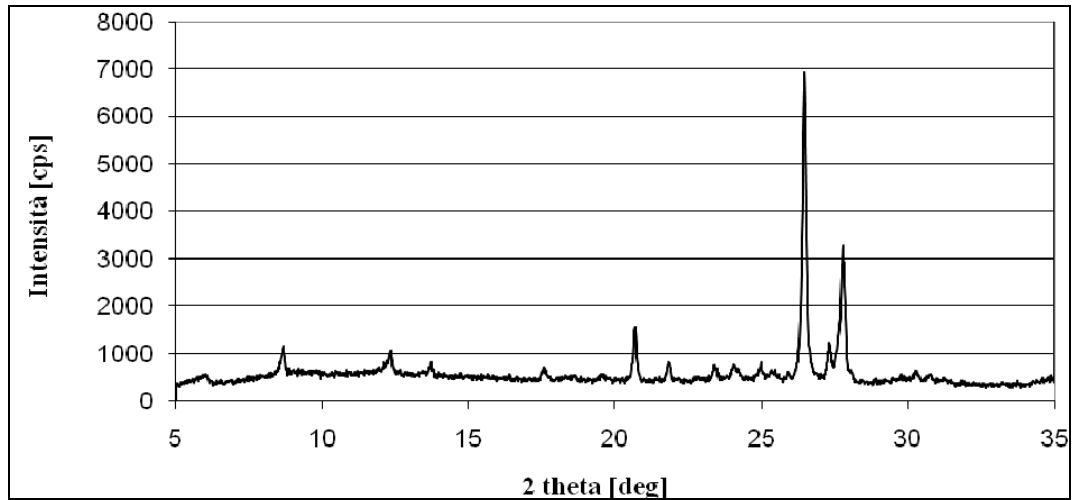


Figura 5.30 - Diffrattogramma del campione di trattenuto a 10 mm utilizzato negli impasti

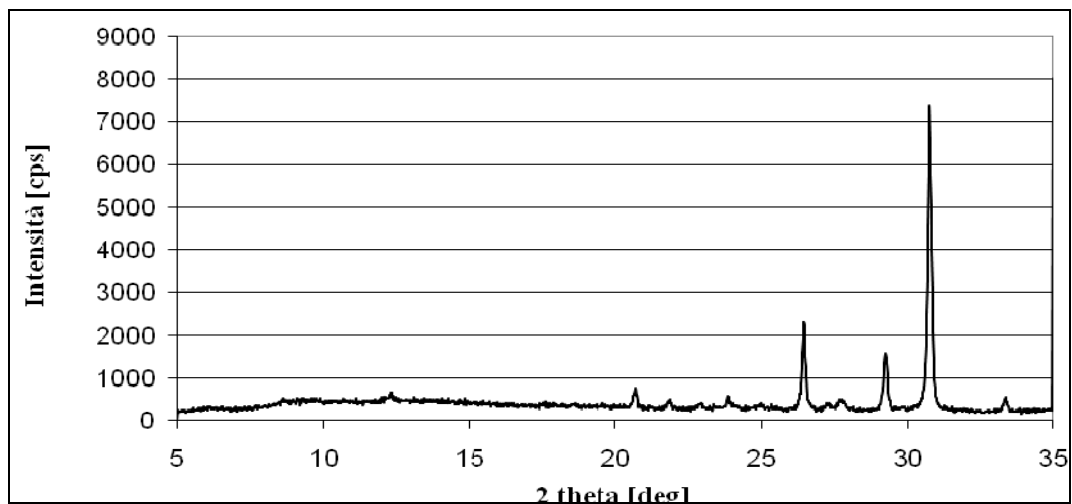


Figura 5.31 - Diffrattogramma del campione di trattenuto a 7.1 mm utilizzato negli impasti

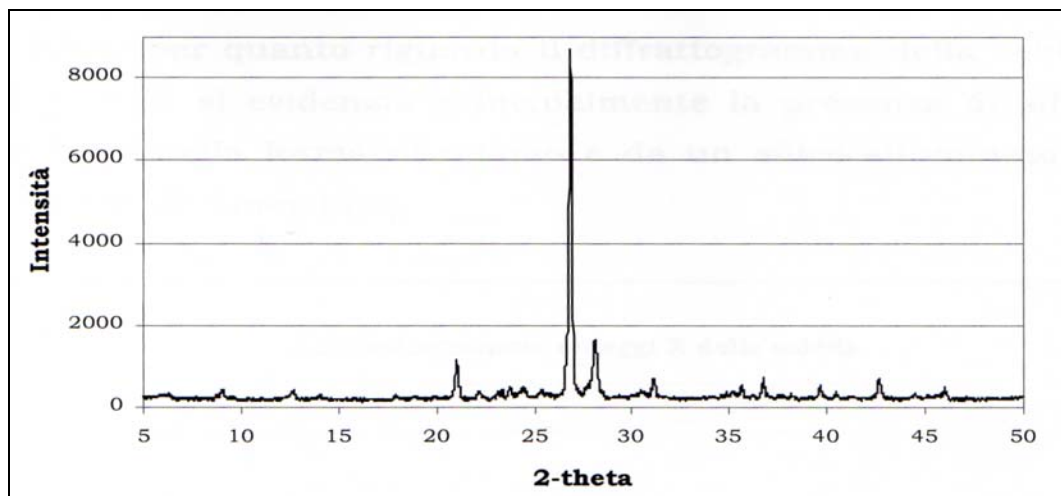


Figura 5.32 - Diffrattogramma del campione di trattenuto a 4 mm utilizzato negli impasti

Dai diffrattogrammi è possibile constatare la ricca presenza di quarzo e silico alluminati e, soprattutto nel trattenuto a 7,1mm, la presenza di carbonati.

5.5 Zeolite

E' stato somministrato in alcuni impasti sia di malta che di calcestruzzo, un determinato quantitativo di zeolite di tipo 5A industriale. Le zeoliti sono dei silico-alluminati idrati che si presentano come un insieme di gabbie (cavità interne) di forma e di dimensioni diverse secondo i vari tipi, collegate tra loro e con l'esterno grazie ad una rete di canali, dove le aperture di questi ultimi, permettono l'entrata di molecole di dimensioni inferiori ed escludono quelle che hanno dimensioni superiori, è per tale motivo che vengono chiamate "setacci molecolari". Le aperture dei pori o dei canali hanno, nel nostro caso, un diametro che può variare di 5Å. Ulteriore caratteristica della zeolite è l'elevato potere adsorbente che tale materiale esplica. Da numerosi esperimenti condotti sull'utilizzo della zeolite negli impasti contenenti cemento (malte, calcestruzzi, paste di cemento) è risultato che l'utilizzo della zeolite, comporta i seguenti principali effetti:

- diminuzione della porosità. La porosità diminuisce con il diminuire delle dimensioni delle particelle di zeolite e con il progredire del tempo. Ciò comporta un miglioramento in termini prestazionali del manufatto cementizio, diminuendo la dimensione dei pori aumenta la resistenza alla penetrazione degli agenti aggressivi, salvaguardando dalla corrosione eventuali armature. Conferisce, quindi, una maggiore durabilità al manufatto;
- aumento della resistenza meccanica a compressione. La reazione degli alluminosilicati presenti nella zeolite con la calce Ca(OH)_2 forma dei composti altamente cementanti. La percentuale di zeolite utilizzabile è stimata intorno al 10% in aggiunta al peso del cemento; ulteriori incrementi percentuali intaccano la lavorabilità degli impasti.

La zeolite è facilmente reperibile sul territorio calabrese in quanto la Calabria è tra le principali regioni produttrici a livello europeo di zeoliti. Prima di essere utilizzata è stata sottoposta ad un processo di essiccazione, infatti, è stata messa in forno per 24 ore alla temperatura di circa 110°C, successivamente è stata lasciata raffreddare a temperatura ambiente per altre 24 ore. Solo dopo questo processo, che consente di eliminare l'acqua in eccesso è stata utilizzata negli impasti cementizi.

5.5.1 Micrografia

Nelle immagini di figura 5.33 sono mostrate alcune micrografie a diversa scala della zeolite 5A industriale usata nella sperimentazione sui conglomerati cementizi. Da notare la tipica struttura morfologica cristallina cubica regolare ed il tipico colore bianco puro del materiale. La dimensione massima delle particelle non supera, in genere, i 5micron di grandezza.

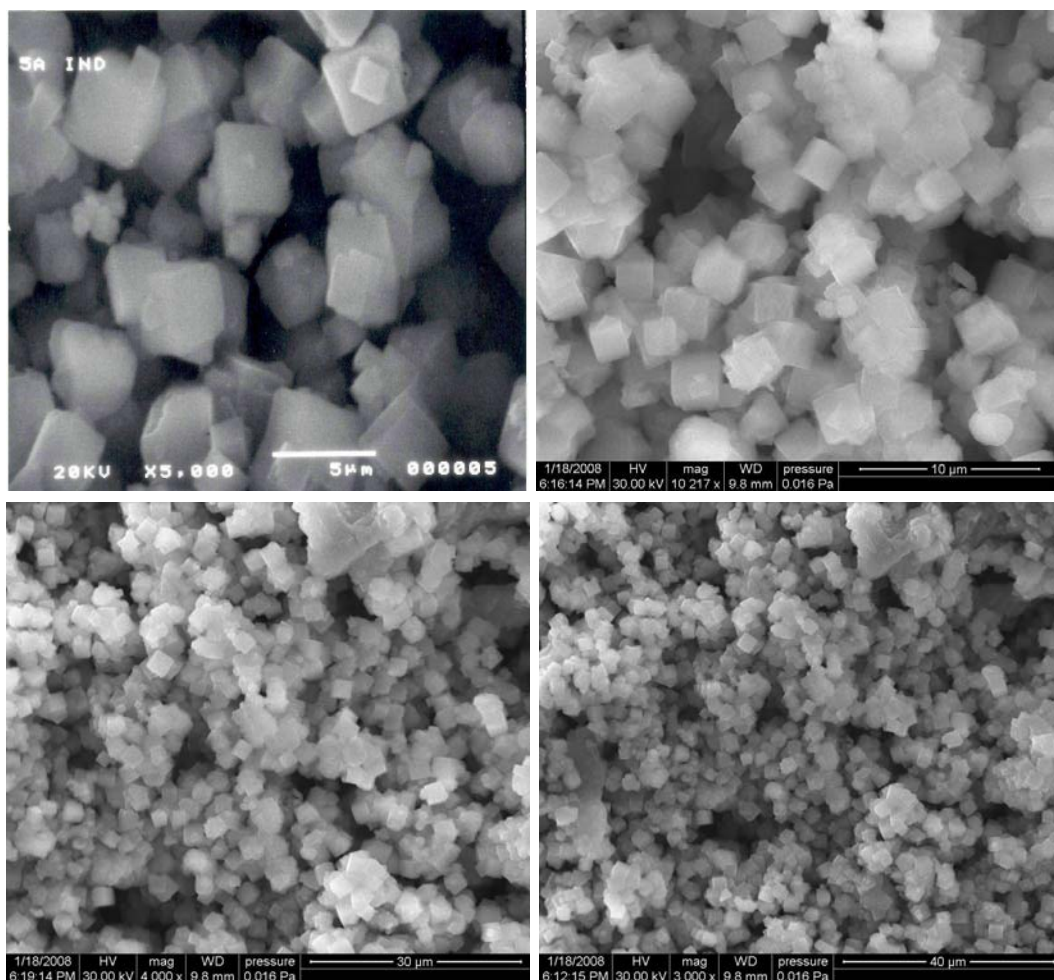


Figura 5.33 – Micrografie della zeolite 5A industriale

5.5.2 Analisi chimica elementare

Nella figura 5.34 e nella figura 5.35 è mostrata un esempio di analisi chimica eseguita sulla zeolite 5A in due differenti modi di rappresentazione. In entrambi i casi si osserva la presenza predominante di silicio e alluminio (principali costituenti) e di più piccole percentuali di sodio (Na) e calcio (Ca).

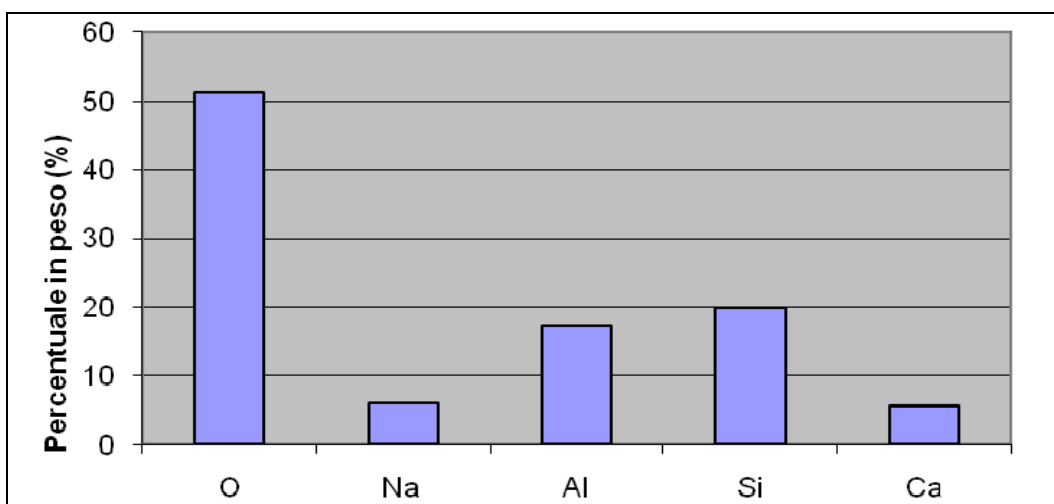


Figura 5.34 – Microanalisi della zeolite 5A industriale

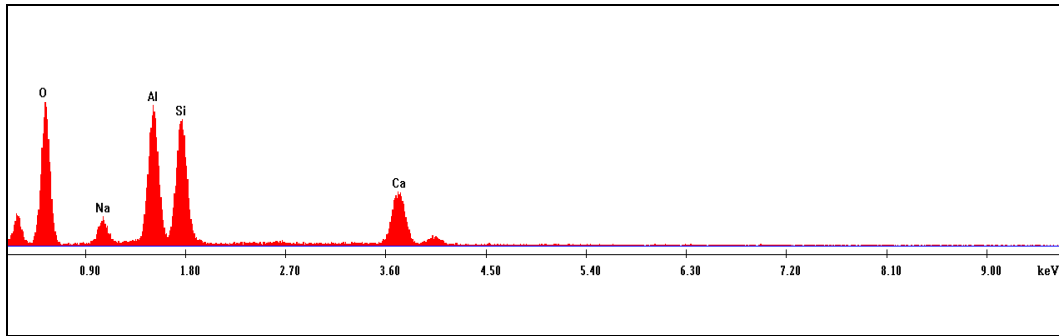


Figura 5.34 – Analisi chimica elementare della zeolite 5A industriale

5.5.3 Analisi diffrattometrica

I picchi individuati nell'analisi diffrattometrica di figura 5.35 sono tipici della zeolite 5A, non lasciando dubbi circa la cristallinità e la purezza del materiale.

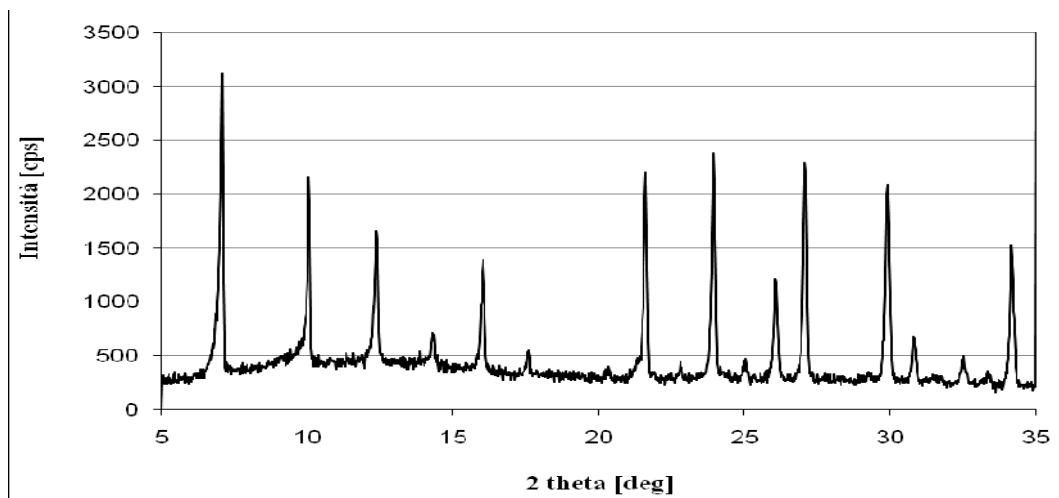


Figura 5.35 – Analisi diffrattometrica della zeolite 5A industriale

5.5.4 Analisi termica

Dall'analisi termica riportata in figura 5.36 si evince che l'acqua contenuta nella zeolite è di circa il 20% in peso della zeolite.

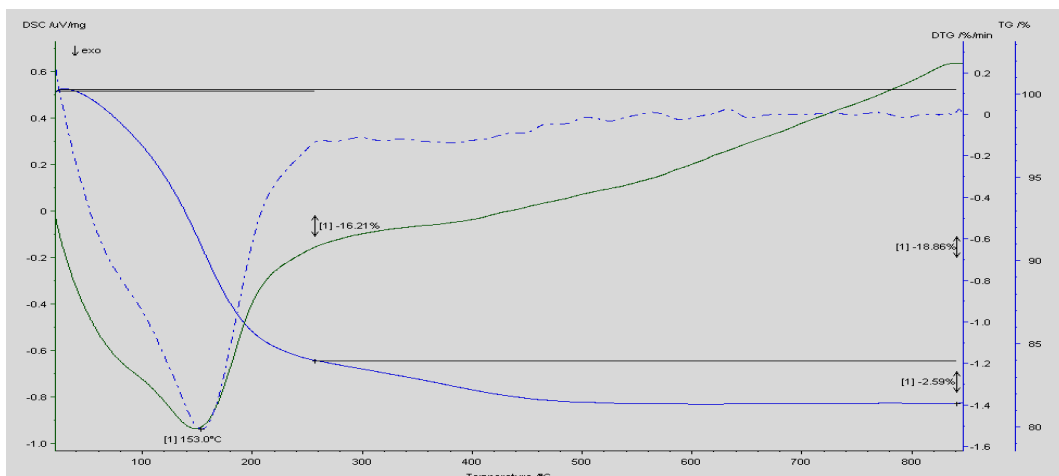


Figura 5.36 – Analisi termica della zeolite 5°

5.6 Fumo di Silice

Il fumo di silice chiamato anche silice fume o micro-silice è un sottoprodotto dell'industria di produzione al forno del silicio o delle ferroleghie. In questo

processo una piccola quantità di SiO_2 viene ridotta in forma di SiO che passa in fase gassosa da dove, una volta riossidata, si separa sotto forma di una polvere finissima a struttura vetrosa. Le caratteristiche fisiche che lo contraddistinguono sono le dimensioni; infatti, i fumi di silice hanno un diametro medio 100 volte inferiore a quello delle particelle del cemento portland, ma soprattutto la loro area superficiale specifica è enorme: i valori sia aggirano attorno a $13000\text{-}30000\text{ m}^2/\text{kg}$ contro i $300\text{-}400\text{ m}^2/\text{kg}$ della polvere di cemento. Sono queste caratteristiche dimensionali e, soprattutto, di sviluppo superficiale che conferiscono al fumo di silice le note capacità di riempimento e le proprietà pozzolaniche. Inoltre, da numerosi studi e sperimentazioni condotti sull'utilizzo del fumo di silice negli impasti contenenti cemento (malte, calcestruzzi, paste di cemento) è risultato che l'utilizzo di questo materiale finissimo comporta miglioramenti in merito alla diminuzione della porosità conferendo una maggiore durabilità del manufatto e l'aumento della resistenza meccanica a compressione in quanto evidenzia una consistente attività pozzolanica.

5.6.1 Micrografia

Nelle immagini di figura 5.37 sono riportate alcune micrografie eseguite con microscopio a scansione elettronica del fumo di silice utilizzato nella sperimentazione di malte e calcestruzzi innovativi. La dimensione delle particelle è dell'ordine di qualche micron.

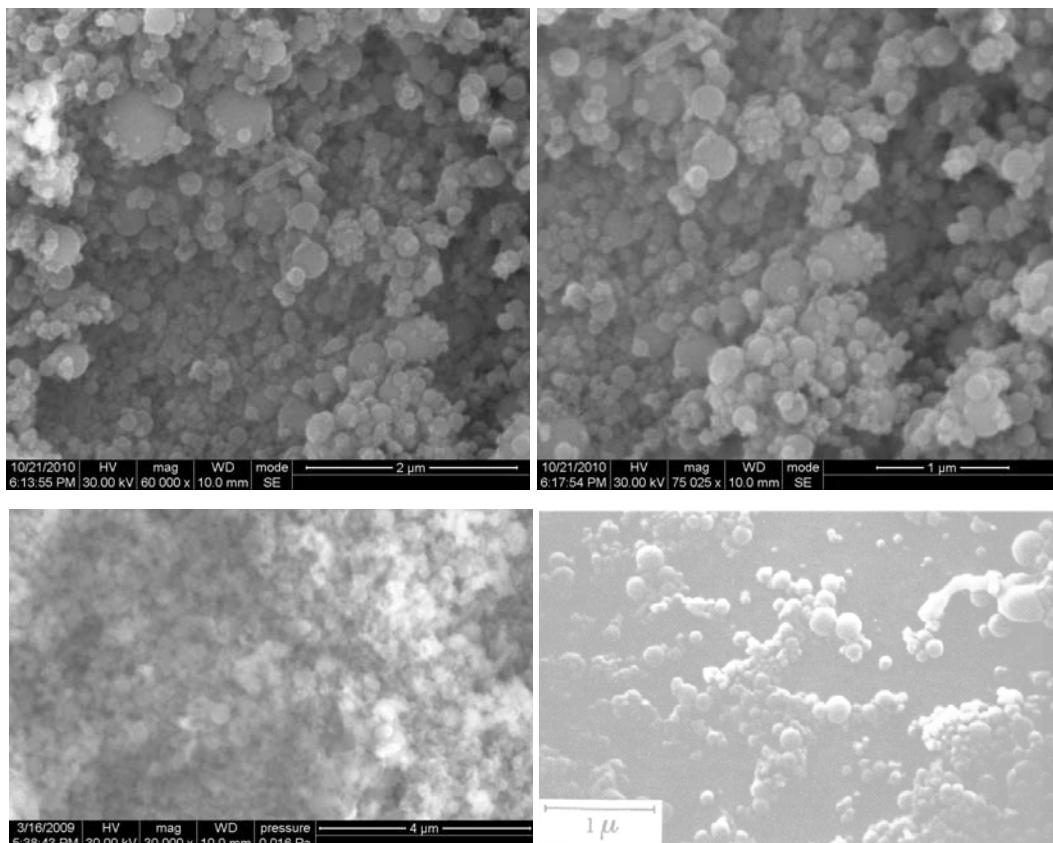


Figura 5.37 – Micrografie del fumo di silice

5.6.2 Analisi chimica

In figura 5.38 è riportata l'analisi chimica del fumo di silice.

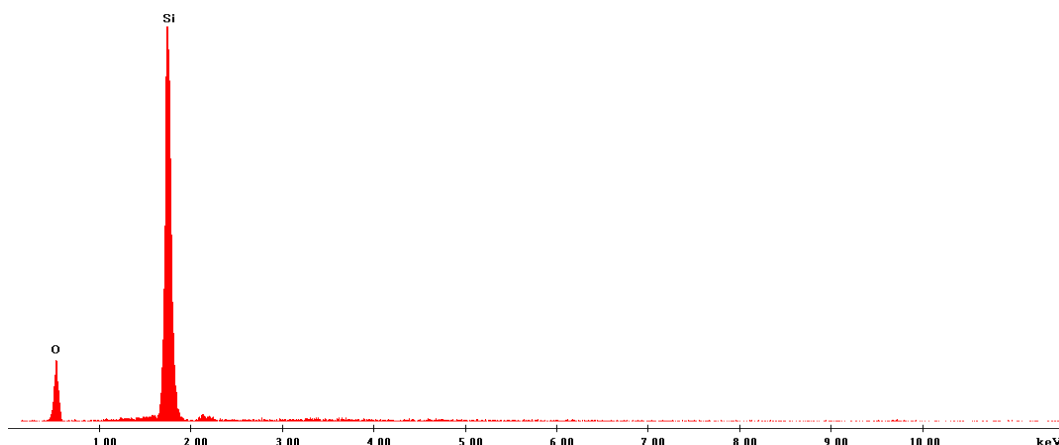


Figura 5.38 – Analisi chimica dei fumi derivanti dalla produzione di silicio o di leghe ferro-silicio

5.6.3 Analisi diffrattometrica

In figura 5.39 è riportata una diffrattometria tipica del fumo di silice.

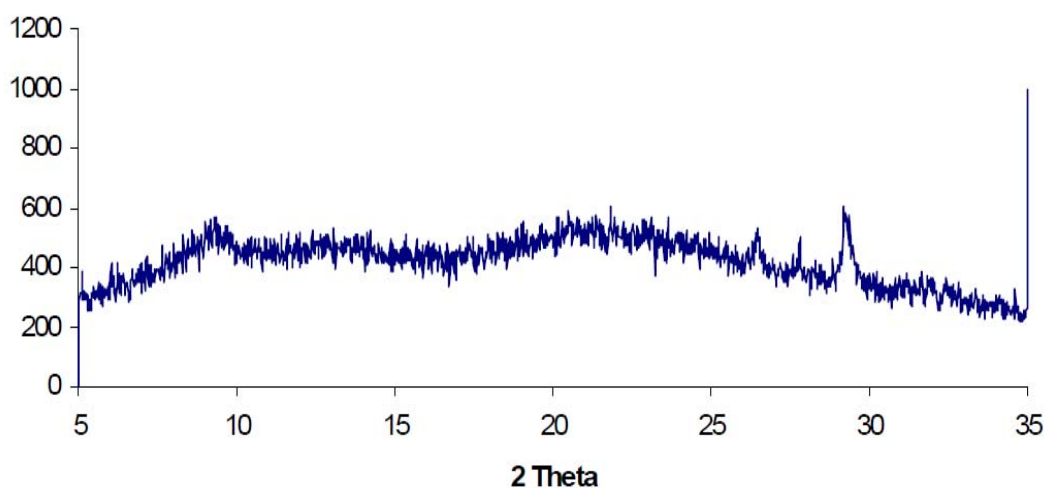


Figura 5.39 – Diffrattometria del fumo di silice

5.7 Filler Calcareo

Il calcare è una roccia sedimentaria chimica cristallina il cui componente principale è rappresentato dal minerale calcite. I giacimenti di calcare e, quindi, il minerale stesso sono più o meno compenetrati da impurità argillose o quarzitiche. Il calcare è un materiale spesso accoppiato alla dolomite. Fra i numerosi utilizzi il calcare, in pezzatura e miscela diverse, può essere usato come pietrame, pietrisco e sabbia, per le costruzioni stradali e di calcestruzzo, nell'industria dell'acciaio, della chimica e del cemento. La sua composizione varia in funzione delle condizioni di formazione, in base alle quali le rocce sedimentarie si suddividono in tre grandi gruppi: sedimenti chimici, sedimenti organogeni, sedimenti clastici. La parte prevalente delle rocce calcaree va inclusa nei sedimenti organogeni, una parte minore si è formata per precipitazione da soluzioni acquose soprassature come sedimenti chimici. Infine, possono anche formarsi sedimenti calcarei clastici, qualora le rocce formatesi originariamente per via chimica o organogena vengano distrutte fisicamente e poi ricomposte in altro luogo. Per quanto riguarda il filler calcareo utilizzato, le indagini fatte, rilevano si tratti di un calcare purissimo molto fine.

5.7.1 Microscopia

La figura 5.40 evidenzia la morfologia del filler calcareo usato nella sperimentazione: finemente macinato (dimensione massima delle particelle dell'ordine di qualche decina di micron) e purissimo (colore bianco).

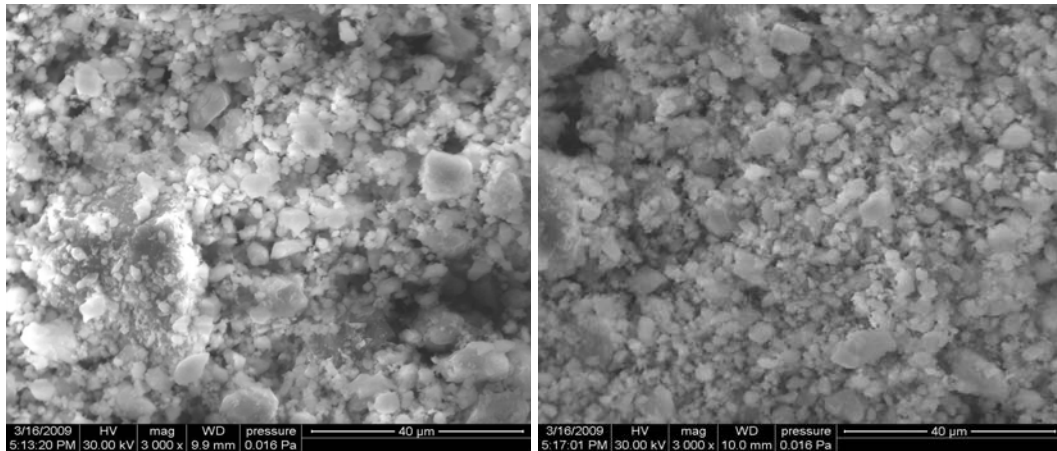


Figura 5.40 – Micrografia del filler calcareo

5.7.2 Analisi diffrattometrica

L'analisi diffrattometrica riportata in figura 5.41 mette in evidenza il picco tipico del calcare a circa 29 gradi 2θ . L'assenza di altri picchi consente di apprezzare l'elevato grado di purezza del filler calcareo usato nel confezionamento di miscele di calcestruzzo.

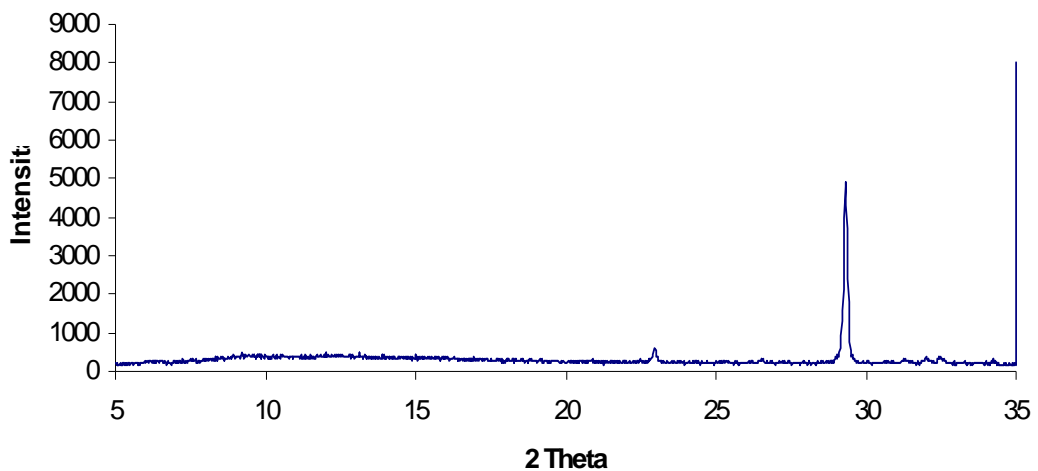


Figura 5.41 – Analisi diffrattometrica del filler calcareo

5.8 Acqua

A livello qualitativo l'acqua d'impasto non ha presentato sostanze in grado di alterare i tempi di presa e di indurimento delle malte e dei calcestruzzi realizzati in conformità alla norma UNI EN 1008. L'acqua utilizzata per gli impasti è quella potabile reperibile a livello locale dalla rete idrica comunale, incolore, inodore e povera di cloro.

5.9 Additivi

Gli additivi usati nella sperimentazione sono risultati conformi alle norme UNI EN 934 e UNI EN 480.

5.9.1 Additivi Superfluidificanti

Gli additivi superfluidificanti hanno la capacità di aumentare la lavorabilità del calcestruzzo, mantenendo inalterata la quantità di acqua, anzi è possibile ridurla senza alterare la lavorabilità dell'impasto. Per il confezionamento delle miscele di calcestruzzo si è ritenuto necessario l'utilizzo di tale additivo, in quanto la presenza di aggiunte fini hanno evidenziato una riduzione di lavorabilità e un comportamento reologico non conforme alle caratteristiche di un calcestruzzo autocompattante. Nel caso della sperimentazione oggetto del presente lavoro è stato utilizzato il superfluidificante GLENIUM SKY 524 prodotto dalla Basf. GLENIUM SKY 524 è un additivo superfluidificante a base di policarbossilati eteri di seconda generazione derivato dal concetto del Total Performance Control. Il concetto di Total Performance Control assicura per la prima volta ai produttori di calcestruzzo preconfezionato di poter fornire alle imprese, e, quindi, ai progettisti, un materiale di elevata qualità come da progettazione e capitolati originali, a partire dall'impianto di betonaggio fino alla consegna e posa in opera. Total Performance Control, infatti, vuol dire avere il completo e totale controllo delle prestazioni del calcestruzzo, sia allo stato fresco che allo stato indurito. La chimica di GLENIUM SKY 524 si basa sul Total Performance Control ed è il risultato di molti anni di studio sulle nanotecnologie e sulle interazioni tra polimeri disperdenti ed il cemento, condotti presso i laboratori di ricerca della BASF Construction Chemicals Italia Spa. Grazie alle sue caratteristiche chimiche, secondo il produttore, GLENIUM SKY possiede contemporaneamente un'eccellente capacità di riduzione d'acqua e un ottimo mantenimento di lavorabilità anche a temperature elevate del calcestruzzo, senza alcun effetto secondario di ritardo nello sviluppo delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature. I polimeri che costituiscono la base di GLENIUM SKY sono stati progettati in modo da avere una corretta regolazione della velocità di adsorbimento delle molecole, in funzione della velocità di formazione dei prodotti di idratazione del cemento ed in particolare dell'ettringite. L'efficacia come potere disperdente delle molecole di GLENIUM SKY viene così ottimizzata e garantita per il tempo necessario al trasporto e posa in opera del calcestruzzo, anche in condizioni di elevata temperatura esterna. Glenium SKY 524 è stato appositamente studiato per la confezione di calcestruzzo preconfezionato sia Reoplastico (fluido e non segregabile) che Reodinamico a basso rapporto acqua-cemento, elevato mantenimento di lavorabilità, ottime resistenze meccaniche sia alle brevi che alle lunghe stagionature e durevole secondo la EN 206-1 e la UNI 11104. Il concetto di Total Performance Control e l'utilizzo di GLENIUM SKY 524 offre al produttore di calcestruzzo preconfezionato, secondo il produttore dell'additivo, una serie di vantaggi sia di tipo tecnico che di tipo logistico. Permette di:

- ridurre il contenuto d'acqua rispetto ai più efficaci superfluidificanti a base di policarbossilato;
- confezionare calcestruzzo Reoplastico e/o Reodinamico a bassissimo rapporto acqua-cemento;
- mantenere a lungo la lavorabilità, evitando il problema delle aggiunte d'acqua a pie d'opera;
- migliorare la reologia dell'impasto anche con miscele povere di fini;
- ottimizzare la produzione di calcestruzzi per manufatti durabili in opera, conformi alle norme EN 206-1 e UNI 11104;

- migliorare, rispetto ad un superfluidificante tradizionale, la resistenza a compressione e flessione sia a breve che a lunga stagionatura, l'aderenza alle barre di armatura di pre-sollecitazione ed ordinaria, il modulo elastico, il ritiro idrometrico, la deformazione viscosa (creep) e la permeabilità all'acqua.

GLENIUM SKY 524 viene generalmente utilizzato a dosaggio ottimale da 0,8 a 1,2 litri per 100 kg di legante, nei calcestruzzi Reoplastici. Per la confezione di calcestruzzi Reodinamici GLENIUM SKY 521 viene utilizzato al dosaggio ottimale di 0,7-1,0 litri per 100 kg di fini, intesi come il totale dei passanti a 0,125 mm.

Proprietà fisico-chimiche dichiarate dal produttore	
Forma fisica	liquido viscoso
Colore	marrone
Peso specifico	1,024 – 1,064 g/ml a 20°C
pH	5 - 7 tal quale a 20 ° C
Variazione dello stato fisico	
Punto di ebollizione/intervallo	>100°C
Punto di infiammabilità	n.a.
Temperatura di autoaccensione	n.a.
Pressione di vapore	n.a.
Solubilità nell'acqua	miscibile
Viscosità	100 - 200 cps

Tabella 5.1 - Scheda tecnica dell'additivo superfluidificante Glenium SKY 524

5.9.2 Additivo Aerante

L'aerante è un additivo tensioattivo per l'inglobamento di microbolle d'aria in malte e calcestruzzi esposti a cicli di gelo e disgelo. L'additivo utilizzato nella sperimentazione è stato l'additivo aerante Mapeplast P1 prodotto dalla Mapei. Il produttore dichiara che l'additivo Mapeplast PT1 può essere vantaggiosamente utilizzato nei seguenti campi applicativi:

- calcestruzzi durabili esposti alle alternanze termiche intorno a 0°C;
- calcestruzzi magri (dosaggio di cemento inferiore a 250 Kg/m³) e carenti di sabbie fini che debbono essere pompate;
- calcestruzzi con aggregati leggeri per migliorare l'omogeneità dell'impasto, la lavorabilità e la messa in opera;
- malte da intonaco per murature per migliorare la tixotropia, la plasticità e l'adesione, oltre alla resistenza ai cicli di gelo e disgelo se applicate in ambienti esterni esposti ai climi freddi.

Le malte e i calcestruzzi, ancorché confezionati con basso rapporto acqua/cemento, e, quindi, durabili in ambienti chimicamente aggressivi (cloruri, solfati, carbonatazione, ecc.) non sono in grado di resistere alle sollecitazioni cicliche derivanti dai fenomeni alternati di gelo e disgelo. Infatti, la formazione di ghiaccio, che avviene con aumento di volume (circa 9%) provoca delle tensioni dirompenti nelle malte e nei calcestruzzi saturi di acqua come vengono a trovarsi questi materiali nelle opere idrauliche o più in generale nelle costruzioni esposte all'azione delle acque piovane. In questi casi, la prevenzione più efficace per contrastare la rottura a fatica derivante dai cicli gelo-disgelo consiste nell'inglobare un minimo di volume d'aria sotto forme di micro bolle stabili di diametro di 100-300 µm e tra loro uniformemente spaziate di 100-300 µm. In queste condizioni, quando si formano i primi germi cristallini di ghiaccio,

l'aumento di volume che ne consegue spinge l'acqua liquida non ancora congelata nelle micro bolle adiacenti provocando un benefico allentamento delle tensioni interne. Nella fase successiva di disgelo, per effetto della soluzione capillare, l'acqua risale dalle microbolle verso i pori della circostante pasta cementizia lasciando le micro bolle vuote e pronte ad ospitare nuovamente l'acqua nella fase di gelo del successivo ciclo termico naturale. Accanto alla benefica azione contro gli effetti dirompenti derivanti dalla formazione di ghiaccio, l'inglobamento delle microbolle d'aria provoca una riduzione del 20% della resistenza meccanica, qualora, questo abbassamento non sia compatibile con la Rck di progetto occorrerà ridurre il rapporto acqua/cemento. Per questo motivo, secondo il produttore, l'impiego di Mapeplast PT1, destinato ai calcestruzzi resistenti a gelo e disgelo, deve essere sempre accompagnato da un additivo fluidificante o meglio superfluidificante a seconda del livello prestazionale richiesto. L'aggiunta di Mapeplast PT1, oltre a migliorare la durabilità del calcestruzzo in tutte le opere esposte a cicli di gelo e disgelo, non modifica la permeabilità all'acqua, poiché le microbolle formano un sistema a porosità discontinua. La capacità invece di essere pompato anche in calcestruzzi carenti di sabbie fini è garantita dalla sfericità e deformabilità delle microbolle. Inoltre, l'inglobamento d'aria nei calcestruzzi riduce la tendenza di galleggiamento degli aggregati (segregazione) in virtù di una minore differenza tra la massa volumica di questi ultimi e quella della pasta cementizia che risulta anch'essa alleggerita, ne consegue una maggiore omogeneità del conglomerato e quindi una maggiore uniformità delle caratteristiche termo-isolanti. Per la produzione di calcestruzzi resistenti a cicli di gelo e disgelo, il dosaggio di Mapeplast PT1, per ottenere il volume di aria richiesto, deve essere stabilito con prove preliminari presso l'impianto di betonaggio utilizzando gli stessi materiali che verranno impiegati nella costruzione dell'opera. Generalmente il dosaggio di Mapeplast PT1 varia da 30 a 150 ml per 100 Kg di legante, l'esatto dosaggio per ottenere il volume d'aria prefissato nel calcestruzzo da gettare dipende da diversi fattori, quali, forma aggregato, granulometria sabbia, lavorabilità, tempo di trasporto, tempo di mescolamento, modalità di costipazione. È consigliabile introdurre l'additivo insieme all'acqua d'impasto e mescolare efficacemente per qualche minuto al fine di favorire lo sviluppo dell'aria prefissato. L'effetto aerante è tanto più efficace quanto più il calcestruzzo è fluido. Nel caso si impieghino additivi superfluidificanti o aggiunte pozzolane occorre prevedere un dosaggio di Mapeplast PT1 leggermente superiore per ottenere lo stesso volume di aria di un calcestruzzo ordinario.

Proprietà fisico-chimiche dichiarate dal produttore	
Forma fisica	liquido
bruno	marrone
Densità	1,02 ± 0,02 g/cm ³ a 20°C
pH	13 ± 1
Solubilità nell'acqua	miscibile
Azione principale	Aerante
Azione collaterale	Fluidificante, coadiuvante di pompaggio ed anti-segregante per cls leggeri
Cloruri solubili in acqua (%)	< 0,1
Contenuto di alcali (Na ₂ O equivalente (%))	< 2,0
Conservazione	12 mesi in imballi originali non aperti. Teme il gelo

Tabella 5.2 - Scheda tecnica dell'additivo aerante Mapeplast PT1

Capitolo 6

Malte sperimentali realizzate con gomma PFU e fini non convenzionali

6.1 Premessa

In questo capitolo saranno affrontate le tematiche relative alle valutazioni di alcune proprietà fisiche e meccaniche di miscele di malta cementizia realizzate con materiale polimerico derivante dalla triturazione di pneumatici fuori uso o a fine vita (PFU). In particolare, in una prima fase saranno affrontate le problematiche relative alla progettazione, al confezionamento, alle proprietà fisiche e meccaniche di numerose serie di miscele di malta confezionate con due tipi di cemento, due tipologie di aggiunta minerale, tre diverse frazioni granulometriche e sei diverse percentuali di dosaggio di gomma PFU. Questa prima serie di miscele servirà a far capire l'influenza ed il comportamento del materiale PFU in malte cementizie ordinariamente utilizzati per alcuni manufatti in campo civile. Sui provini che saranno realizzati con queste miscele saranno eseguiti dei test per valutare alcune caratteristiche fisiche del conglomerato cementizio (lavorabilità, peso) ed alcune caratteristiche meccaniche (resistenza a compressione e a trazione). Le valutazioni che saranno effettuate in questa prima fase di studio consentiranno di individuare delle miscele ottimali che saranno poi realizzate in una seconda fase sperimentale. Su tali miscele ottimizzate saranno rieseguiti i già citati test e si cercherà di ottenere delle miscele sempre più valide in termini di prestazioni.

6.2 Malte di prima serie

Dopo aver eseguito degli impasti di malta di prova per valutare in linea di massima il comportamento del materiale polimerico PFU, si è proceduto con la realizzazione di una serie di miscele di malta sperimentali. Per ogni tipologia di miscela sono stati realizzati numerosi provini al fine di ottenere un'analisi statistica attendibile. Per limitare gli errori dovuti a difformità di confezionamento tra le diverse miscele si è cercato di adoperare una metodologia pressoché standard di miscelazione, di confezionamento e di stagionatura. In particolare, sono state confezionate miscele al variare del tipo di cemento, tipologia e percentuale di aggiunta minerale, tipologia e percentuale di gomma PFU. Come cementi sono stati adoperati un cemento CEM III/A 32,5N e un cemento CEM II/A-S 42,5R. Le aggiunte minerali sono state: zeolite 5A di tipo industriale e fumo di silice comunemente utilizzato per il confezionamento di calcestruzzi ad alte prestazioni. Entrambe le tipologie di aggiunta sviluppano una certa attività pozzolanica. Tali materiali sono stati somministrati all'impasto in aggiunta in peso rispetto al cemento, nelle percentuali di 0%, 5%, 10% e 15%. Il materiale PFU è stato, invece, somministrato in percentuale in sostituzione in volume rispetto alla sabbia, nei dosaggi di 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 50%. Sono, inoltre, state utilizzate tre diverse frazioni granulometriche di materiale polimerico: polverino, grana fine e grana mista. Quest'ultima ottenuta per combinazione delle precedenti nelle rispettive percentuali del 40% e del 60%. Sono state, quindi, realizzate circa 300 diverse miscele di malta cementizia.

6.2.1 Confezionamento dei provini di malta di prima serie

La procedura impiegata per il confezionamento delle miscele di malta è stata molto simile alla procedura standard indicata dalla norma UNI EN 196-1,

utilizzata per la caratterizzazione meccanica dei cementi (figura 6.1). In particolare, rispetto alla procedura standard, sono state confermate le condizioni ambientali di prova e i requisiti delle attrezzature, mentre sono state variate in parte la procedura di preparazione della malta e di preparazione dei provini in quanto sono stati utilizzati materiali diversi rispetto a quelli previsti dallo standard normativo (aggiunta di zeolite o di fumo di silice, utilizzo di gomma PFU). In tal modo, si è cercato di controllare quanto più possibile le varianti che avrebbero potuto inficiare i risultati finali. La procedura di confezionamento sperimentale delle malte è stata così articolata:

- si è versata l'acqua nella bacinella e si è aggiunto il cemento, la zeolite o la silice fume ed il materiale PFU (aggiunta minerale e gomma sono state precedentemente miscelate creando un composto omogeneo);
- si è avviato immediatamente a bassa velocità la mescolatrice e dopo 30s si è aggiunta la sabbia con flusso costante nei successivi 30s. Quindi, si è regolato la mescolatrice sulla velocità superiore e si è continuato a miscelare per altri 30s;
- allo scadere di tale tempo si è arrestata la mescolatrice per 1min e 30s. Nei primi 15s si è tolta, mediante un raschietto di gomma, tutta la malta che ha aderito alle pareti e al fondo della bacinella ed è stata collocata al centro della bacinella stessa;
- si è, poi, continuato a mescolare alla velocità superiore per altri 60s.

I tempi dei vari stadi di miscelazione sono stati rispettati entro i limiti di $\pm 1s$. I provini sono stati formati subito dopo la preparazione della malta, distribuendo il contenuto negli stampi, in due strati successivi. Ogni strato è stato costipato con 30 battute e successivamente si è lisciato la superficie superiore. Ogni stampo è stato contraddistinto con un'apposita etichetta e, nella parte superiore dello stesso, è stata collocata una lastra di plastica delle dimensioni 210mm x185mm, spessore 6mm opportunamente inumidita sulla superficie. Ad ogni impasto, tutti gli elementi della mescolatrice e gli utensili utilizzati nel confezionamento della miscela, sono stati puliti accuratamente affinché i residui non incidessero sul confezionamento del nuovo impasto. Dopo 24 ore di stagionatura, i provini sono stati sformati e posti in acqua, a temperatura controllata. Alle scadenze di 2, 7 e 28 giorni di stagionatura si è proceduto con l'effettuazione di idonee prove di laboratorio per attestarne le proprietà meccaniche. E' stato, inoltre, preventivamente rilevato il peso dei manufatti realizzati.

6.2.2 Misure del peso dei provini di prima serie

Alle scadenze di 2, 7 e 28 giorni di stagionatura, per ogni provino di ogni miscela, si è proceduto, prima dell'esecuzione delle prove meccaniche di resistenza, alla pesatura dei provini stessi tramite una bilancia avente una precisione di $\pm 0.5g$. In particolare, per tali prove sono stati utilizzati più provini appartenenti a diverse serie della stessa miscela. Questo al fine di poter effettuare una buona stima del valore medio rappresentativo e, quindi, limitare il più possibile la presenza di errori sperimentali. Come valore di riferimento è stato considerato il valor medio delle misurazioni effettuate. La misura del peso è stata registrata dopo 1 ora dalla rimozione dei provini dall'ambiente di stagionatura. Nelle tabelle 6.1-6.4 sono riportati i valori di peso medio registrati per ogni tipologia di miscela eseguita. Naturalmente, è stato registrato un aumento del peso medio dei provini all'aumentare dei giorni di stagionatura, dovuto molto probabilmente al fatto che i provini con il tempo tendono a saturarsi d'acqua. Tale incremento di peso non è

stato eccessivo, in quanto mediamente è dell'ordine dello 0,6% a 7 giorni di stagionatura e dell'1,3% a 28 giorni di stagionatura, entrambi rapportati alla situazione a 2 giorni di stagionatura. All'aumentare della percentuale di gomma è stata, tuttavia, rilevata una tendenza più marcata dell'incremento di peso con il passare dei giorni di stagionatura. Riportando tutti i valori di peso medio registrati al variare della tipologia di miscela è stata osservata un'evidente dipendenza del peso rispetto appunto alla percentuale di gomma (figura 6.2). In base ai risultati sperimentali ottenuti, è possibile affermare che, ovviamente, il peso medio dei manufatti in malta cementizia è inversamente proporzionale alla percentuale di gomma PFU utilizzata: all'aumentare della percentuale di gomma usata, si è registrato, infatti, una diminuzione del peso dei provini. Tale proporzionalità, nel campo di utilizzo di percentuale di gomma sperimentata che è variata dallo 0% al 50%, è di tipo lineare. Non è stata verificata una sostanziale differenza dei valori di peso medio al variare della tipologia di aggiunta (zeolite e silice fume) e del relativo quantitativo usato (0%, 5%, 10% e 15%). Nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti dei pesi medi in funzione del dosaggio di materiale PFU per i provini realizzati con zeolite (figura 6.3) e con silice fume (figura 6.4). L'uso di zeolite o di silice fume alle diverse percentuali utilizzate (0-15%) non ha influito in maniera netta sul peso dei provini. Le ridotte oscillazioni di peso registrate al variare della percentuale e della tipologia di aggiunta minerale, a parità di dosaggio di materiale PFU, sono dovute probabilmente a fisiologici errori sperimentali. A sostegno di quanto affermato, nelle figure 6.5-6.12 si riportano gli andamenti dei pesi medi suddivisi per tipologia di cemento e per percentuale di aggiunta minerale somministrata all'impasto. Dall'analisi puntuale dei dati, è emersa una tendenza dei provini realizzati con la silice fume ad avere tendenzialmente un peso maggiore. Tra le diverse granulometrie di gomma utilizzata, in linea di massima, i manufatti confezionati con polverino di gomma hanno manifestato un peso minore. Ai fini statistici i valori di peso medio dei provini realizzati con zeolite 5A si sono presentati meno dispersi rispetto ai valori di peso medio dei provini realizzati con silice fume. Nelle tabelle 6.5-6.6 sono riportati i valori medi di peso e gli scarti quadratici medi (S.Q.M.) dei provini delle miscele realizzate con zeolite e con silice fume a parità di dosaggio di gomma PFU.



A



B



C



D



E



F

Figura 6.1 – A) mescolatrice utilizzata per gli impasti di malta; B) Bilancia di precisione; C) Cassaforma per la formatura dei provini; D) Provini di malta prima della sfornatura; E) Stagionatura di alcuni provini prismatici; F) Prova di flessione

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	% aggiunta	Tipo gomma	% gomma	Peso (g) a 2gg	Peso (g) a 7gg	Peso (g) a 28gg
Z0PV_32.5	Z0PV0_32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	0%	584,0	587,5	582,5
	Z0PV5_32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	5%	585,5	570,0	573,0
	Z0PV10_32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	10%	556,0	551,0	555,5
	Z0PV15_32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	15%	547,0	540,0	543,0
	Z0PV20_32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	20%	528,5	530,0	528,0
	Z0PV50_32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	50%	451,0	461,0	452,0
Z5PV_32.5	Z5PV0_32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	0%	591,5	578,0	589,5
	Z5PV5_32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	5%	562,0	567,5	569,5
	Z5PV10_32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	10%	553,5	555,0	553,0
	Z5PV15_32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	15%	562,0	542,0	542,5
	Z5PV20_32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	20%	531,0	541,0	534,0
	Z5PV50_32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	50%	458,0	465,0	438,0
Z10PV_32.5	Z10PV0_32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	0%	577,5	580,5	579,5
	Z10PV5_32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	5%	574,5	571,0	569,5
	Z10PV10_32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	10%	556,0	559,0	564,0
	Z10PV15_32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	15%	549,5	555,0	552,0
	Z10PV20_32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	20%	540,0	540,0	542,5
	Z10PV50_32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	50%	449,5	458,0	452,5
Z15PV_32.5	Z15PV0_32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	0%	587,5	597,5	590,5
	Z15PV5_32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	5%	564,0	577,5	567,0
	Z15PV10_32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	10%	559,5	560,5	567,0
	Z15PV15_32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	15%	550,0	563,0	550,0
	Z15PV20_32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	20%	538,0	536,0	535,0
	Z15PV50_32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	50%	436,0	454,5	446,5
Z0GF_32.5	Z0GF0_32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	0%	575,0	555,5	572,5
	Z0GF5_32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	5%	583,0	570,5	569,0
	Z0GF10_32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	10%	564,0	567,5	565,5
	Z0GF15_32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	15%	553,5	564,0	550,5
	Z0GF20_32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	20%	536,5	528,0	534,5
	Z0GF50_32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	50%	461,0	467,5	463,0
Z5GF_32.5	Z5GF0_32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	0%	587,0	584,5	582,5
	Z5GF5_32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	5%	571,0	577,0	577,5
	Z5GF10_32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	10%	566,0	568,0	567,0
	Z5GF15_32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	15%	555,0	561,0	564,0
	Z5GF20_32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	20%	550,0	547,0	550,0
	Z5GF50_32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	50%	458,5	468,0	454,0
Z10GF_32.5	Z10GF0_32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	0%	578,5	586,0	585,0
	Z10GF5_32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	5%	566,5	577,0	576,5
	Z10GF10_32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	10%	569,5	566,0	576,0
	Z10GF15_32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	15%	551,5	559,0	556,0
	Z10GF20_32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	20%	549,0	540,0	549,5
	Z10GF50_32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	50%	481,5	483,0	488,0
Z15GF_32.5	Z15GF0_32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	0%	587,0	580,0	583,0
	Z15GF5_32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	5%	578,0	578,0	578,0
	Z15GF10_32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	10%	574,5	584,5	572,0
	Z15GF15_32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	15%	560,0	564,5	563,0
	Z15GF20_32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	20%	545,5	545,0	555,5
	Z15GF50_32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	50%	483,0	486,0	485,0
Z0PG_32.5	Z0PG0_32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	0%	598,0	602,0	600,0
	Z0PG5_32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	5%	567,5	565,5	569,0
	Z0PG10_32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	10%	563,0	556,0	561,0
	Z0PG15_32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	15%	543,0	548,0	547,5
	Z0PG20_32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	20%	536,0	530,0	533,0
	Z0PG50_32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	50%	458,0	457,0	465,5
Z5PG_32.5	Z5PG0_32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	0%	581,0	582,0	587,0
	Z5PG5_32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	5%	569,0	571,0	571,5
	Z5PG10_32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	10%	575,5	569,0	564,5
	Z5PG15_32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	15%	541,0	534,5	538,0
	Z5PG20_32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	20%	531,0	535,5	536,5
	Z5PG50_32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	50%	465,5	465,0	460,0
Z10PG_32.5	Z10PG0_32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	0%	576,0	584,5	585,0
	Z10PG5_32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	5%	570,0	578,0	579,5
	Z10PG10_32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	10%	553,0	559,0	558,5
	Z10PG15_32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	15%	545,0	545,5	549,0
	Z10PG20_32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	20%	540,0	528,5	532,5
	Z10PG50_32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	50%	465,0	470,0	468,5
Z15PG_32.5	Z15PG0_32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	0%	588,0	579,5	587,5
	Z15PG5_32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	5%	572,0	573,5	567,5
	Z15PG10_32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	10%	548,0	544,5	547,0
	Z15PG15_32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	15%	537,0	533,5	538,5
	Z15PG20_32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	20%	531,0	531,5	537,0
	Z15PG50_32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	50%	453,0	464,0	467,5

Tabella 6.1 – Peso medio dei provini realizzati con zeolite 5A e cemento CEM III/A 32,5N alle diverse stagionature

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	% aggiunta	Tipo gomma	% gomma	Peso (g) a 2gg	Peso (g) a 7gg	Peso (g) a 28gg
Z0PV_42.5	Z0PV0_42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	0%	599,0	607,5	600,0
	Z0PV5_42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	5%	586,0	582,5	588,5
	Z0PV10_42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	10%	565,0	562,5	565,5
	Z0PV15_42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	15%	548,0	554,5	550,5
	Z0PV20_42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	20%	539,0	533,0	539,5
	Z0PV50_42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	50%	461,0	455,0	463,0
Z5PV_42.5	Z5PV0_42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	0%	586,0	585,0	595,5
	Z5PV5_42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	5%	570,0	577,5	581,0
	Z5PV10_42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	10%	561,0	570,5	571,0
	Z5PV15_42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	15%	542,0	548,0	556,0
	Z5PV20_42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	20%	532,0	534,0	540,0
	Z5PV50_42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	50%	448,5	459,0	464,0
Z10PV_42.5	Z10PV0_42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	0%	590,0	600,0	597,0
	Z10PV5_42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	5%	582,5	581,0	587,0
	Z10PV10_42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	10%	559,5	568,5	568,5
	Z10PV15_42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	15%	556,0	551,0	556,0
	Z10PV20_42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	20%	538,0	538,0	545,5
	Z10PV50_42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	50%	467,5	469,5	475,5
Z15PV_42.5	Z15PV0_42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	0%	590,5	600,0	602,5
	Z15PV5_42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	5%	578,0	580,5	580,5
	Z15PV10_42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	10%	567,5	569,0	572,0
	Z15PV15_42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	15%	564,5	560,0	565,5
	Z15PV20_42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	20%	540,5	543,5	546,0
	Z15PV50_42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	50%	435,0	442,0	447,5
Z0GF_42.5	Z0GF0_42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	0%	600,0	599,5	603,5
	Z0GF5_42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	5%	584,0	582,0	582,5
	Z0GF10_42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	10%	565,0	573,0	572,5
	Z0GF15_42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	15%	548,0	554,5	557,0
	Z0GF20_42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	20%	542,0	545,0	546,0
	Z0GF50_42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	50%	471,0	460,0	474,0
Z5GF_42.5	Z5GF0_42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	0%	602,5	603,5	604,0
	Z5GF5_42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	5%	582,5	592,0	587,5
	Z5GF10_42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	10%	578,5	579,0	580,0
	Z5GF15_42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	15%	556,0	561,0	562,0
	Z5GF20_42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	20%	550,0	558,0	552,5
	Z5GF50_42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	50%	473,5	482,0	480,0
Z10GF_42.5	Z10GF0_42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	0%	600,0	606,0	601,5
	Z10GF5_42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	5%	583,0	579,5	581,5
	Z10GF10_42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	10%	568,5	559,5	569,0
	Z10GF15_42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	15%	556,0	563,0	565,5
	Z10GF20_42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	20%	546,0	546,5	553,5
	Z10GF50_42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	50%	479,5	576,5	482,5
Z15GF_42.5	Z15GF0_42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	0%	594,5	595,5	592,5
	Z15GF5_42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	5%	589,0	578,0	589,0
	Z15GF10_42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	10%	578,5	568,5	571,5
	Z15GF15_42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	15%	561,0	554,0	556,5
	Z15GF20_42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	20%	554,5	563,5	550,0
	Z15GF50_42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	50%	484,5	487,5	491,0
Z0PG_42.5	Z0PG0_42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	0%	595,5	590,0	603,0
	Z0PG5_42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	5%	578,0	569,5	587,0
	Z0PG10_42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	10%	553,0	556,0	555,0
	Z0PG15_42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	15%	550,0	549,5	549,5
	Z0PG20_42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	20%	533,0	530,0	531,0
	Z0PG50_42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	50%	462,0	463,5	463,0
Z5PG_42.5	Z5PG0_42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	0%	592,0	602,5	593,0
	Z5PG5_42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	5%	589,0	591,0	581,5
	Z5PG10_42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	10%	567,0	571,0	567,0
	Z5PG15_42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	15%	550,5	555,5	557,0
	Z5PG20_42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	20%	536,0	547,0	543,0
	Z5PG50_42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	50%	470,0	479,5	478,0
Z10PG_42.5	Z10PG0_42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	0%	588,0	590,0	591,0
	Z10PG5_42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	5%	580,0	581,0	579,0
	Z10PG10_42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	10%	567,0	562,0	568,0
	Z10PG15_42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	15%	553,0	559,0	567,0
	Z10PG20_42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	20%	542,0	548,0	549,0
	Z10PG50_42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	50%	475,0	480,5	484,0
Z15PG_42.5	Z15PG0_42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	0%	589,5	584,0	584,0
	Z15PG5_42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	5%	566,0	568,0	569,0
	Z15PG10_42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	10%	550,0	546,0	554,0
	Z15PG15_42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	15%	552,0	561,0	559,0
	Z15PG20_42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	20%	538,5	543,0	543,0
	Z15PG50_42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	50%	475,0	467,0	484,0

Tabella 6.2 – Peso medio dei provini realizzati con zeolite 5A e cemento CEM II/A-S 42,5R alle diverse stagionature

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	% aggiunta	Tipo gomma	% gomma	Peso (g) a 2gg	Peso (g) a 7gg	Peso (g) a 28gg
S0PV_32.5	S0PV0_32.5	Silica Fume	0%	Polverino	0%	593,0	590,0	600,0
	S0PV5_32.5	Silica Fume	0%	Polverino	5%	568,5	562,0	570,0
	S0PV10_32.5	Silica Fume	0%	Polverino	10%	571,0	590,0	574,5
	S0PV15_32.5	Silica Fume	0%	Polverino	15%	553,5	550,0	554,0
	S0PV20_32.5	Silica Fume	0%	Polverino	20%	543,5	540,0	547,5
	S0PV50_32.5	Silica Fume	0%	Polverino	50%	545,5	450,0	456,5
S5PV_32.5	S5PV0_32.5	Silica Fume	5%	Polverino	0%	584,5	579,0	595,0
	S5PV5_32.5	Silica Fume	5%	Polverino	5%	577,5	577,0	577,0
	S5PV10_32.5	Silica Fume	5%	Polverino	10%	562,5	572,5	571,0
	S5PV15_32.5	Silica Fume	5%	Polverino	15%	562,0	557,0	563,0
	S5PV20_32.5	Silica Fume	5%	Polverino	20%	550,0	545,0	551,5
	S5PV50_32.5	Silica Fume	5%	Polverino	50%	455,5	451,0	472,0
S10PV_32.5	S10PV0_32.5	Silica Fume	10%	Polverino	0%	595,0	591,0	595,5
	S10PV5_32.5	Silica Fume	10%	Polverino	5%	556,5	557,0	568,0
	S10PV10_32.5	Silica Fume	10%	Polverino	10%	548,5	553,5	555,0
	S10PV15_32.5	Silica Fume	10%	Polverino	15%	546,5	537,5	547,5
	S10PV20_32.5	Silica Fume	10%	Polverino	20%	533,5	531,5	528,5
	S10PV50_32.5	Silica Fume	10%	Polverino	50%	443,0	452,5	451,5
S15PV_32.5	S15PV0_32.5	Silica Fume	15%	Polverino	0%	562,5	576,0	570,0
	S15PV5_32.5	Silica Fume	15%	Polverino	5%	565,5	565,0	566,0
	S15PV10_32.5	Silica Fume	15%	Polverino	10%	555,5	542,0	552,0
	S15PV15_32.5	Silica Fume	15%	Polverino	15%	509,0	529,5	540,0
	S15PV20_32.5	Silica Fume	15%	Polverino	20%	523,5	520,5	537,0
	S15PV50_32.5	Silica Fume	15%	Polverino	50%	388,5	403,0	436,0
S0GF_32.5	S0GF0_32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	0%	593,0	590,0	600,0
	S0GF5_32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	5%	582,5	595,0	584,5
	S0GF10_32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	10%	568,5	580,0	575,0
	S0GF15_32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	15%	561,0	562,0	557,0
	S0GF20_32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	20%	543,0	550,0	551,5
	S0GF50_32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	50%	473,5	475,0	474,5
S5GF_32.5	S5GF0_32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	0%	584,5	579,0	595,0
	S5GF5_32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	5%	600,5	589,5	588,5
	S5GF10_32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	10%	566,5	578,0	574,5
	S5GF15_32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	15%	561,0	556,0	577,0
	S5GF20_32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	20%	550,5	555,0	562,5
	S5GF50_32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	50%	476,5	481,0	479,0
S10GF_32.5	S10GF0_32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	0%	595,0	591,0	595,5
	S10GF5_32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	5%	589,0	588,5	590,0
	S10GF10_32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	10%	572,0	575,5	573,5
	S10GF15_32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	15%	563,0	564,0	567,5
	S10GF20_32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	20%	555,0	554,0	557,5
	S10GF50_32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	50%	493,0	486,5	494,5
S15GF_32.5	S15GF0_32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	0%	562,5	576,0	569,0
	S15GF5_32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	5%	563,0	568,0	572,0
	S15GF10_32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	10%	554,5	565,0	549,5
	S15GF15_32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	15%	557,0	551,0	559,5
	S15GF20_32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	20%	534,0	528,5	538,0
	S15GF50_32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	50%	478,0	482,5	484,5
S0PG_32.5	S0PG0_32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	0%	593,0	590,0	600,0
	S0PG5_32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	5%	585,0	580,0	586,0
	S0PG10_32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	10%	573,5	576,5	578,0
	S0PG15_32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	15%	558,0	561,0	565,0
	S0PG20_32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	20%	547,5	547,0	550,0
	S0PG50_32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	50%	479,5	486,0	480,0
S5PG_32.5	S5PG0_32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	0%	584,5	579,0	595,0
	S5PG5_32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	5%	575,0	576,0	578,5
	S5PG10_32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	10%	570,5	569,5	567,0
	S5PG15_32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	15%	525,0	525,5	542,0
	S5PG20_32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	20%	528,0	551,0	554,5
	S5PG50_32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	50%	471,0	484,0	474,0
S10PG_32.5	S10PG0_32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	0%	595,0	591,0	595,5
	S10PG5_32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	5%	537,0	539,5	560,0
	S10PG10_32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	10%	545,5	561,5	549,0
	S10PG15_32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	15%	555,0	532,5	556,5
	S10PG20_32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	20%	492,5	492,0	537,5
	S10PG50_32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	50%	465,5	473,0	475,5
S15PG_32.5	S15PG0_32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	0%	562,5	576,0	569,0
	S15PG5_32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	5%	547,5	560,0	562,5
	S15PG10_32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	10%	529,5	538,0	555,5
	S15PG15_32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	15%	532,5	527,0	541,5
	S15PG20_32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	20%	516,0	525,5	526,5
	S15PG50_32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	50%	441,0	458,0	454,5

Tabella 6.3 – Peso medio dei provini realizzati con silice fume e cemento CEM III/A 32,5N alle diverse stagionature

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	% aggiunta	Tipo gomma	% gomma	Peso (g) a 2gg	Peso (g) a 7gg	Peso (g) a 28gg
S0PV_42.5	S0PV0_42.5	Silica Fume	0%	Polverino	0%	590,0	593,5	602,0
	S0PV5_42.5	Silica Fume	0%	Polverino	5%	567,0	575,0	578,5
	S0PV10_42.5	Silica Fume	0%	Polverino	10%	552,0	555,5	562,5
	S0PV15_42.5	Silica Fume	0%	Polverino	15%	538,0	542,0	551,0
	S0PV20_42.5	Silica Fume	0%	Polverino	20%	527,0	531,0	535,5
	S0PV50_42.5	Silica Fume	0%	Polverino	50%	452,0	454,5	458,5
S5PV_42.5	S5PV0_42.5	Silica Fume	5%	Polverino	0%	588,0	595,5	603,0
	S5PV5_42.5	Silica Fume	5%	Polverino	5%	582,0	583,5	587,0
	S5PV10_42.5	Silica Fume	5%	Polverino	10%	558,5	571,0	573,0
	S5PV15_42.5	Silica Fume	5%	Polverino	15%	556,0	560,5	561,5
	S5PV20_42.5	Silica Fume	5%	Polverino	20%	543,5	550,0	552,0
	S5PV50_42.5	Silica Fume	5%	Polverino	50%	464,0	462,0	472,0
S10PV_42.5	S10PV0_42.5	Silica Fume	10%	Polverino	0%	595,0	602,5	605,5
	S10PV5_42.5	Silica Fume	10%	Polverino	5%	587,5	591,0	592,0
	S10PV10_42.5	Silica Fume	10%	Polverino	10%	564,0	573,5	576,0
	S10PV15_42.5	Silica Fume	10%	Polverino	15%	558,0	564,5	567,0
	S10PV20_42.5	Silica Fume	10%	Polverino	20%	540,0	552,5	552,5
	S10PV50_42.5	Silica Fume	10%	Polverino	50%	470,5	468,0	478,0
S15PV_42.5	S15PV0_42.5	Silica Fume	15%	Polverino	0%	598,0	606,0	606,5
	S15PV5_42.5	Silica Fume	15%	Polverino	5%	590,5	589,0	593,5
	S15PV10_42.5	Silica Fume	15%	Polverino	10%	574,5	578,0	584,5
	S15PV15_42.5	Silica Fume	15%	Polverino	15%	565,0	562,0	569,5
	S15PV20_42.5	Silica Fume	15%	Polverino	20%	542,0	551,5	553,0
	S15PV50_42.5	Silica Fume	15%	Polverino	50%	458,5	466,0	473,0
S0GF_42.5	S0GF0_42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	0%	593,5	596,0	603,0
	S0GF5_42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	5%	572,0	580,0	588,0
	S0GF10_42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	10%	566,0	570,0	575,0
	S0GF15_42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	15%	550,0	555,0	560,0
	S0GF20_42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	20%	537,0	541,0	548,0
	S0GF50_42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	50%	450,0	459,0	465,5
S5GF_42.5	S5GF0_42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	0%	598,0	598,5	600,0
	S5GF5_42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	5%	593,5	588,5	589,5
	S5GF10_42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	10%	573,0	572,0	578,0
	S5GF15_42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	15%	560,5	571,0	563,0
	S5GF20_42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	20%	544,0	556,0	562,5
	S5GF50_42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	50%	474,0	478,5	482,0
S10GF_42.5	S10GF0_42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	0%	602,5	603,0	605,5
	S10GF5_42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	5%	594,5	589,5	598,0
	S10GF10_42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	10%	576,5	575,0	585,5
	S10GF15_42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	15%	563,0	572,0	569,0
	S10GF20_42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	20%	550,0	555,0	557,0
	S10GF50_42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	50%	481,0	491,5	488,5
S15GF_42.5	S15GF0_42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	0%	607,0	608,5	609,0
	S15GF5_42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	5%	590,0	592,5	599,0
	S15GF10_42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	10%	581,5	578,5	586,5
	S15GF15_42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	15%	566,0	574,5	573,0
	S15GF20_42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	20%	553,5	564,0	567,0
	S15GF50_42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	50%	485,0	493,0	491,5
S0PG_42.5	S0PG0_42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	0%	592,5	594,0	607,0
	S0PG5_42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	5%	580,0	588,5	592,0
	S0PG10_42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	10%	568,5	574,5	582,0
	S0PG15_42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	15%	559,0	566,0	561,5
	S0PG20_42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	20%	543,0	545,5	547,5
	S0PG50_42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	50%	474,5	475,5	476,5
S5PG_42.5	S5PG0_42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	0%	602,5	604,5	606,0
	S5PG5_42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	5%	583,0	579,0	596,0
	S5PG10_42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	10%	582,0	583,0	591,0
	S5PG15_42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	15%	570,5	574,5	574,5
	S5PG20_42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	20%	554,5	555,0	557,5
	S5PG50_42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	50%	475,5	481,5	484,5
S10PG_42.5	S10PG0_42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	0%	605,5	606,0	610,0
	S10PG5_42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	5%	597,0	596,0	597,5
	S10PG10_42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	10%	588,0	585,0	592,0
	S10PG15_42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	15%	576,0	573,5	584,0
	S10PG20_42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	20%	560,5	560,0	558,5
	S10PG50_42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	50%	490,0	488,5	495,5
S15PG_42.5	S15PG0_42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	0%	608,0	609,0	611,0
	S15PG5_42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	5%	601,0	600,0	604,0
	S15PG10_42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	10%	592,5	589,0	595,0
	S15PG15_42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	15%	578,5	584,5	585,0
	S15PG20_42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	20%	569,0	567,0	570,5
	S15PG50_42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	50%	493,5	497,0	497,5

Tabella 6.4 – Peso medio dei provini realizzati con silica fume e cemento CEM II/A-S 42.5R alle diverse stagionature

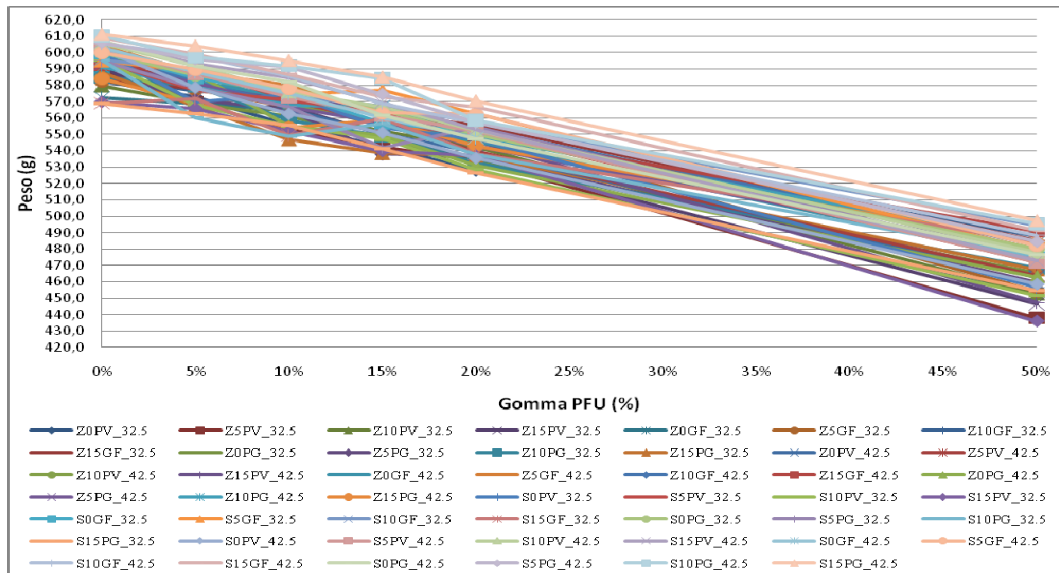


Figura 6.2 - Andamento del peso medio al variare della percentuale di gomma per ogni miscela eseguita

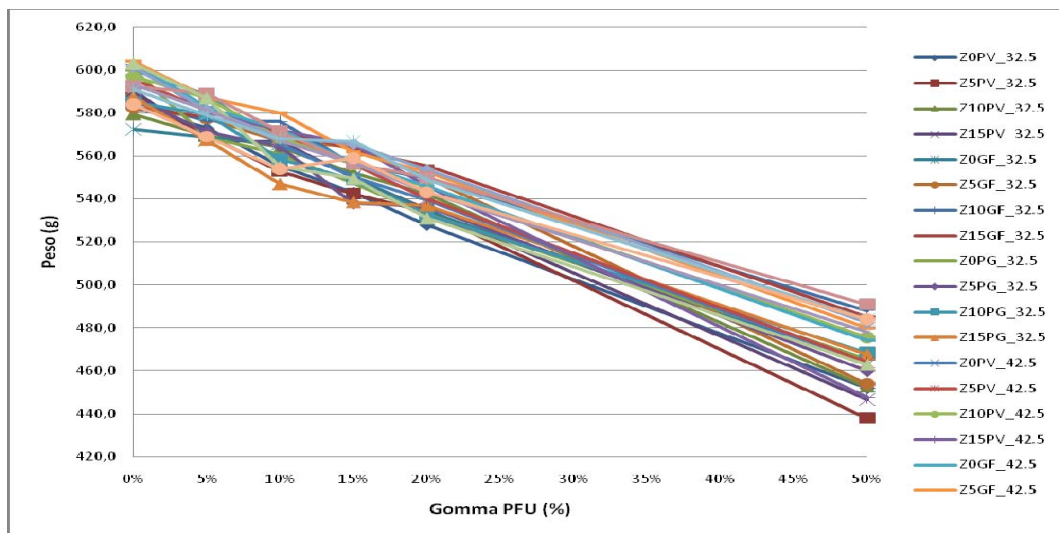


Figura 6.3 - Andamento del peso per i provini di malta realizzati con zeolite in funzione della percentuale di gomma

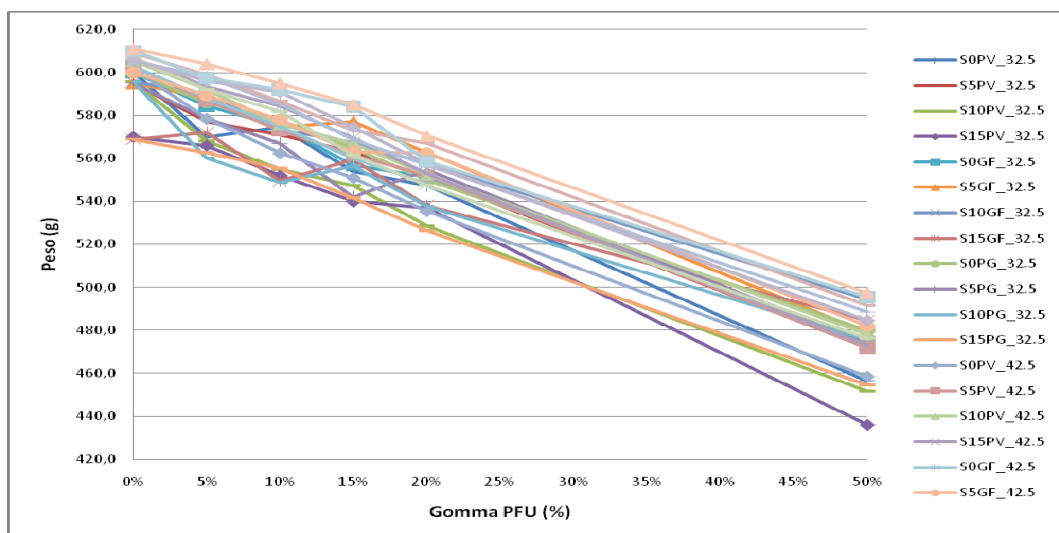


Figura 6.4 - Andamento del peso per i provini di malta realizzati con silica fume in funzione della percentuale di gomma

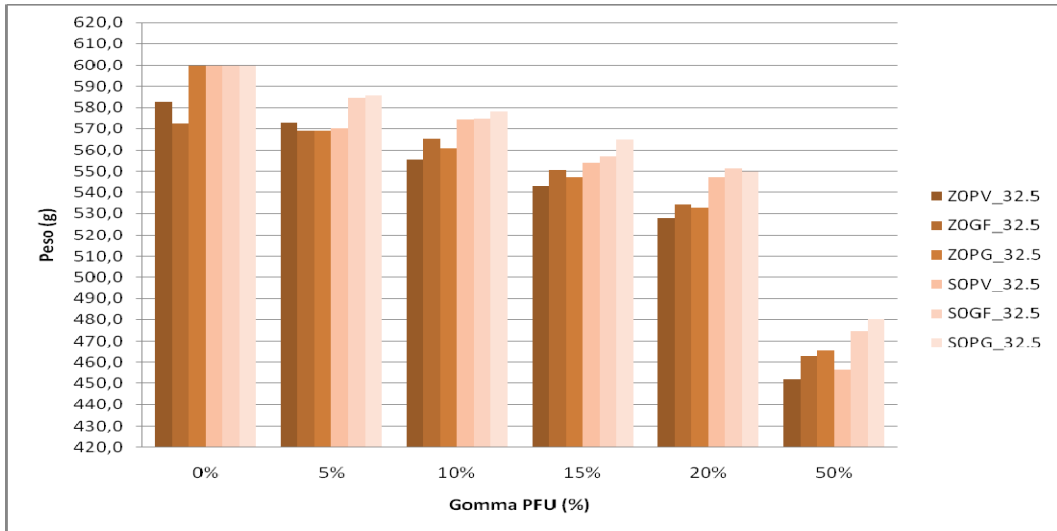


Figura 6.5- Peso medio dei provini a 28 giorni realizzati con cemento CEM III/A 32,5N e senza aggiunte minerali

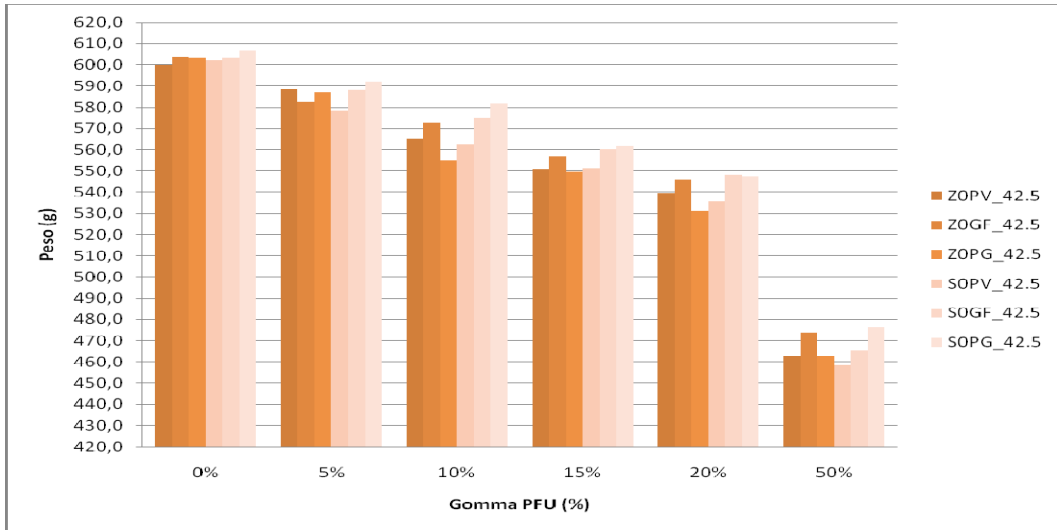


Figura 6.6 - Peso medio dei provini a 28 giorni realizzati con cemento CEM II/A-S 42,5R e senza aggiunte minerali

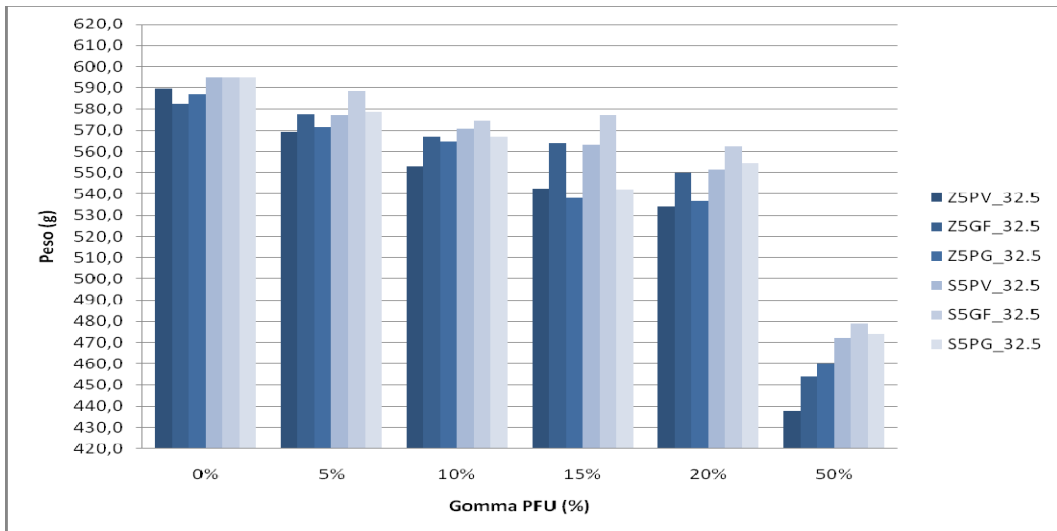


Figura 6.7 - Pesi medi dei provini a 28 giorni realizzati con cemento CEM III/A 32,5N e con il 5% di aggiunte minerali

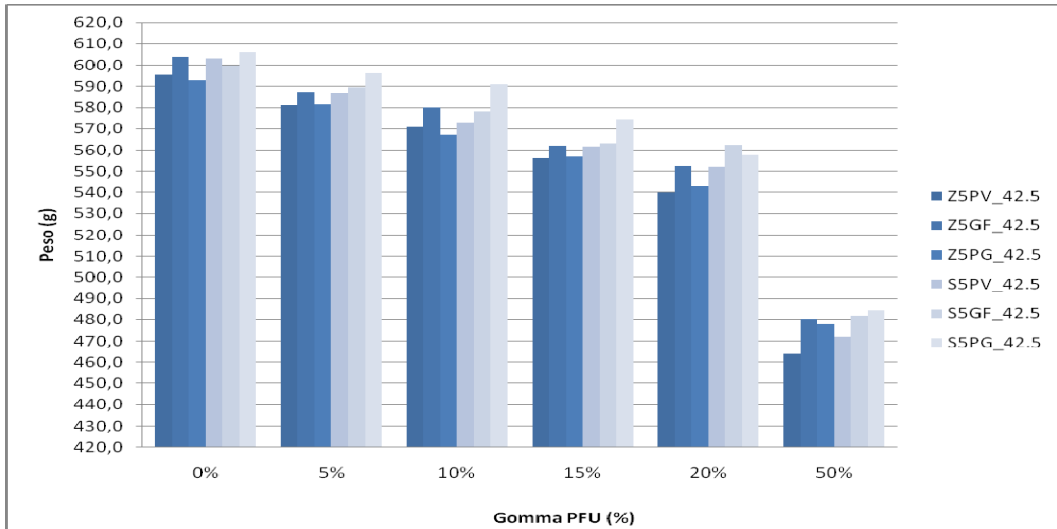


Figura 6.8 - Pesi medi dei provini a 28 giorni realizzati con cemento CEM II/A-S 42,5R e con il 5% di aggiunte minerali

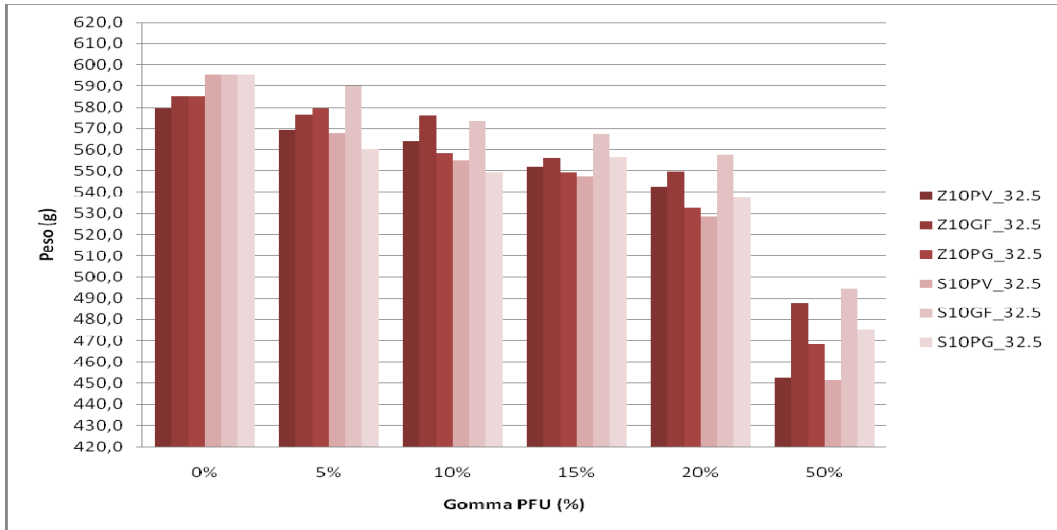


Figura 6.9- Pesi medi dei provini a 28 giorni di stagionatura realizzati con cemento CEM III/A 32,5N e con il 10% di aggiunte minerali

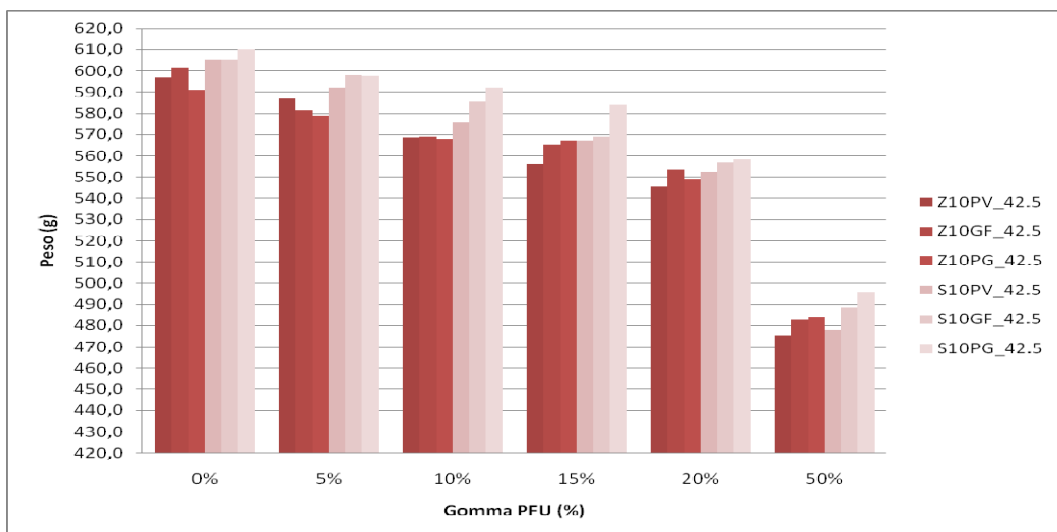


Figura 6.10 - Pesi medi dei provini a 28 giorni realizzati con cemento CEM II/A-S 42,5R e con il 10% di aggiunte minerali

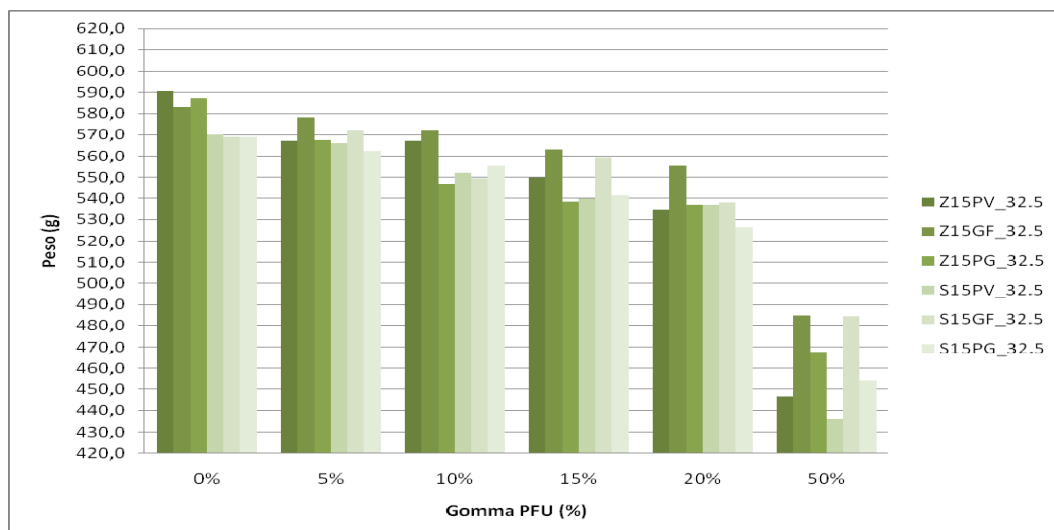


Figura 6.11 - Pesi medi dei provini a 28 giorni realizzati con cemento CEM III/A 32,5N e con il 15% di aggiunte minerali

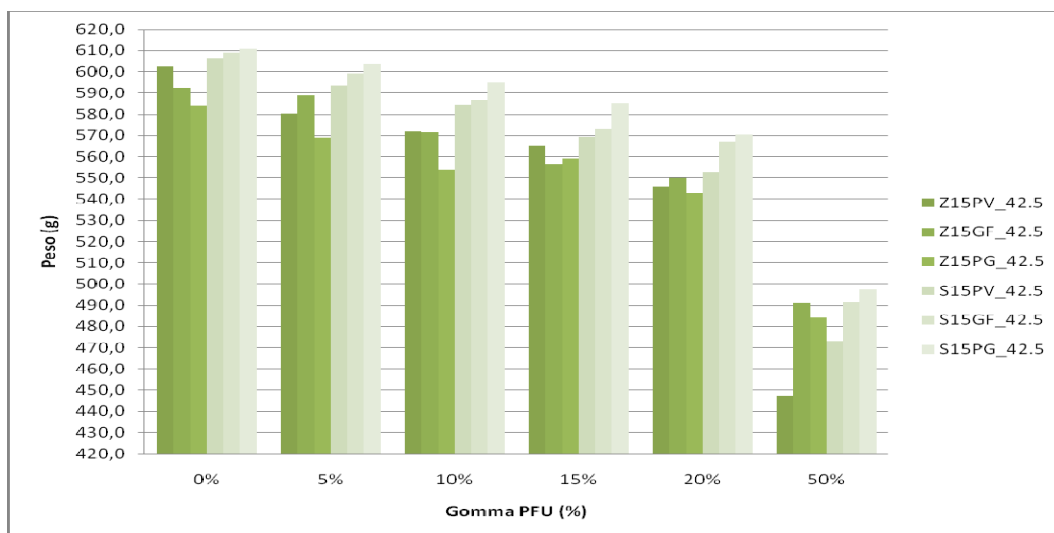


Figura 6.12 - Pesi medi dei provini a 28 giorni realizzati con cemento CEM II/A-S 42,5R e con il 15% di aggiunte minerali

Aggiunta	% gomma	Peso Medio	S.Q.M.
Zeolite	0%	591,3	8,8
Zeolite	5%	577,6	7,3
Zeolite	10%	565,2	8,0
Zeolite	15%	554,0	8,4
Zeolite	20%	542,0	7,9
Zeolite	50%	467,8	14,6

Tabella 6.5 - Valori medi e scarti quadratici medi dei pesi dei provini realizzati con zeolite a 28 giorni di stagionatura al variare del dosaggio di gomma PFU

Aggiunta	% gomma	Media	SQM
Silica Fume	0%	597,8	12,1
Silica Fume	5%	584,1	12,4
Silica Fume	10%	573,1	13,4
Silica Fume	15%	562,1	12,3
Silica Fume	20%	550,2	11,4
Silica Fume	50%	480,4	29,6

Tabella 6.6 - Valori medi e scarti quadratici medi dei pesi dei provini realizzati con silica fume a 28 giorni di stagionatura al variare del dosaggio di gomma PFU

In base ai valori di scarto quadratico medio calcolati è emerso che, per una data percentuale di materiale PFU, i valori di peso dei provini realizzati con zeolite sono stati meno dispersi rispetto a quelli realizzati con silica fume, per cui, tra le

due aggiunte minerali, pur non incidendo significativamente, la diversa percentuale di silica fume usata ha influenzato in maniera più marcata sulla massa dei provini rispetto alla zeolite. Al variare della percentuale di gomma usata si ha, in genere, una tendenza all'aumento dei valori di deviazione standard. Come accennato in precedenza, è stato osservato sperimentalmente che la gomma PFU, ovviamente, consente di diminuire il peso dei manufatti finiti. Dal punto di vista normativo, è possibile parlare di conglomerati cementizi leggeri quando il manufatto finito non abbia una massa superiore a 2000kg/mc. E' opportuno evidenziare che per raggiungere tale requisito di "leggerezza" è necessario somministrare agli impasti una certa percentuale di materiale PFU. In particolare per le miscele realizzate con cemento con classe di resistenza 32,5 tale percentuale è più bassa rispetto a quella che serve per le miscele realizzate con cemento con classe di resistenza 42,5. Per i conglomerati di malte realizzati con cemento CEM III/A 32,5N la percentuale di gomma che consente di abbassare il peso al di sotto di 2000kg/mc è dell'ordine dell'1-2% aggiungendo all'impasto zeolite, mentre è dell'ordine di circa il 4-5% in caso di aggiunta di silice fume. Per i conglomerati confezionati con cemento CEM II/A-S 42,5R, la percentuale di gomma da utilizzare per ottenere manufatti leggeri è di circa il 8-10% per gli impasti con zeolite e di circa il 10-14% per gli impasti con silice fume. Nella figura seguente, come esempio, è riportato l'andamento del peso medio a 28 giorni di stagionatura, espresso in kg/mc, degli impasti realizzati con cemento CEM II/A-S 42,5R e silice fume, al variare della percentuale di gomma PFU utilizzata.

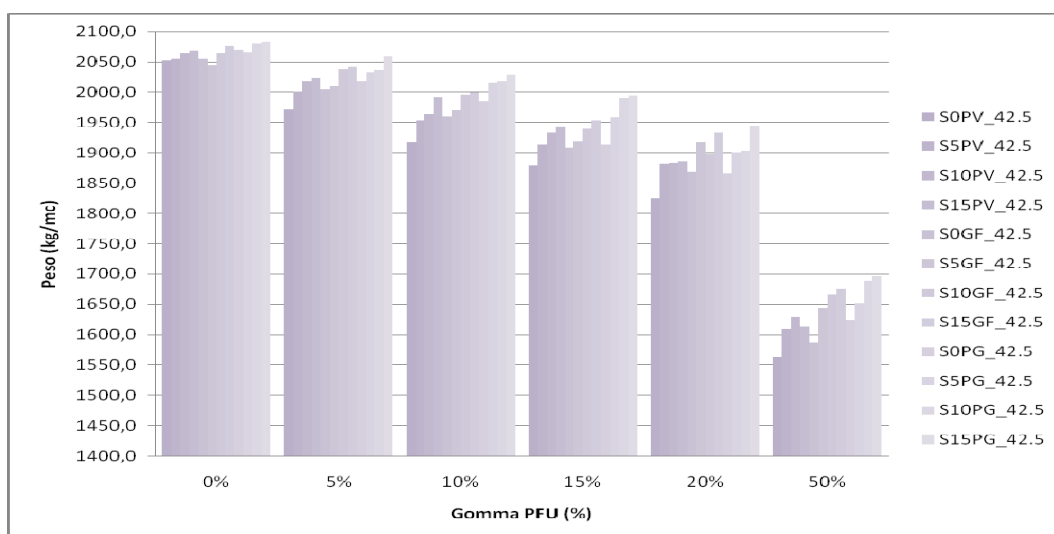


Figura 6.13 - Peso medio dei provini realizzati con cemento CEM II/A-S 42,5R e silice fume

Considerato che sperimentalmente è stata osservata una dipendenza pressoché lineare tra il peso medio dei manufatti in funzione della percentuale di gomma utilizzata si è ritenuto opportuno stimare una retta di correlazione tra le due grandezze. La legge utilizzata per la correlazione è stata la seguente:

$$P = a + b \cdot G$$

dove

- P è il peso medio delle miscele allo stato indurito espresso in kg/mc;
- G è la percentuale di gomma somministrata nell'impasto in sostituzione in volume rispetto alla sabbia;
- a e b sono i parametri della retta (rispettivamente intercetta e coefficiente angolare) da stimare con criterio dei minimi quadrati.

Ovviamente la validità della legge ricade nel range di valori della variabile indipendente G testato sperimentalmente (tra 0% e 50%). I valori più attendibili di G ed P sono stati ottenuti applicando il principio della massima verosimiglianza. La probabilità di avere valori prossimi a quelli reali diventa massima quando è minima la somma dei quadrati degli scarti (principio dei minimi quadrati). Il problema consiste, dunque, nel rendere minima la grandezza:

$$\sum (P_i - (a + b \cdot G_i))^2 = \min$$

La risoluzione del sistema permette di ottenere i valori di a e di b .

Le due equazioni che compongono il sistema sono note come equazioni normali della retta dei minimi quadrati. Per misurare l'attendibilità si introduce il cosiddetto coefficiente di determinazione dei valori stimati:

$$r^2 = \left[1 - \frac{\sum (P_{ci} - P_{vi})^2}{\left(\sum P_{ci}^2 \right) - \frac{\left(\sum P_{ci} \right)^2}{n}} \right] \quad (0 < r^2 < 1)$$

L'attendibilità delle curve di correlazione è stata verificata sia attraverso il coefficiente di correlazione r^2 che attraverso l'errore standard E_{stand} , la cui espressione relativa al nostro caso è riportata di seguito.

$$E_{\text{stand}} = \sqrt{\frac{\sum (P_{\text{mis}} - P_{\text{stim}})^2}{n}}$$

Le rette di correlazione sono state stimate in base alla tipologia di aggiunta (silica fume e zeolite) ed in base al cemento utilizzato (CEM II/A-S 42,5R e CEM III/A 32,5N). I valori di a e di b per le diverse serie di dati sono stati riportati nella seguente tabella 6.7.

Cemento	Aggiunta	a	b
CEM III/A 32,5N	Zeolite	1998,6	-842,39
CEM III/A 32,5N	Silica fume	2010,4	-811,89
CEM II/A-S 42,5R	Zeolite	2027,8	-830,82
CEM II/A-S 42,5R	Silica fume	2065,5	-856,8

Tabella 6.7- Valori di a e di b stimati al variare della tipologia di cemento e di aggiunta minerale

I valori di r^2 e di E_{stand} , per ogni serie di dati, sono riportati nella tabella 6.8.

Cemento	Aggiunta	r^2	E_{stand}
CEM III/A 32,5N	Zeolite	0,9548	30,21
CEM III/A 32,5N	Silica fume	0,9112	41,77
CEM II/A-S 42,5R	Zeolite	0,9660	25,68
CEM II/A-S 42,5R	Silica fume	0,9584	29,40

Tabella 6.8- Valori di r^2 e di E calcolati al variare della tipologia di cemento e di aggiunta minerale

Dal confronto dei diversi valori di a , di b , di r^2 e di E , non avendo verificato eccessive difformità tra le diverse serie di dati prese in esame, si è ritenuto opportuno unificare le correlazioni in un'unica curva generale. Dalla semplificazione eseguita sono stati stimati i seguenti parametri (tabella 6.9).

a	b	r^2	E_{stand}
2025,6	-835,46	0,9207	39,96

Tabella 6.9- Stima dei coefficienti di correlazione e dei parametri di attendibilità della curva di correlazione complessiva

Nella figura seguente (figura 6.14) è riportata la curva di interpolazione complessiva stimata

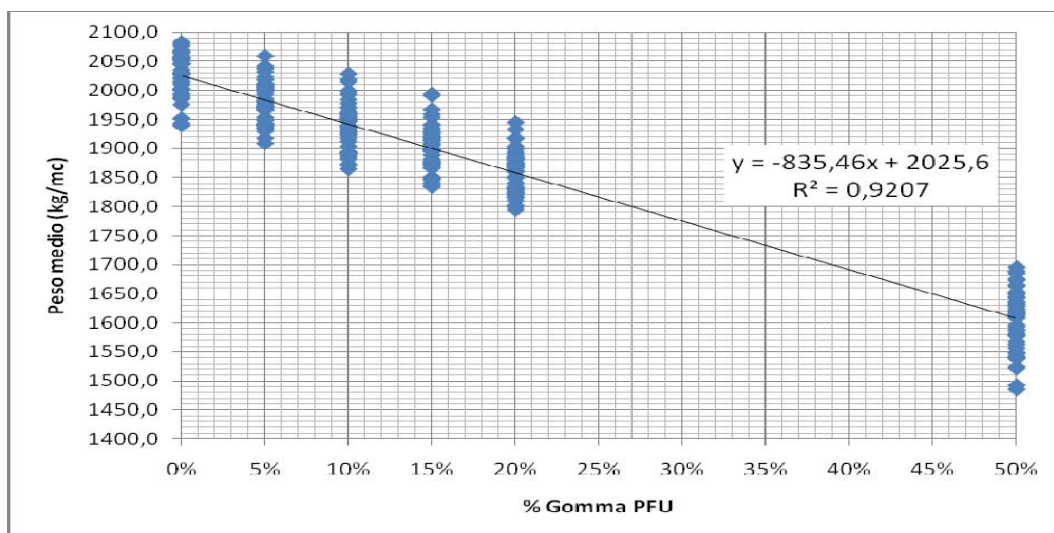


Figura 6.14 - Retta di correlazione complessiva

Per ogni misura si è provveduto a calcolare l'errore relativo percentuale. I più significativi valori ottenuti sono stati: errore relativo percentuale massimo pari all'8,17%, errore relativo percentuale medio pari all'1,75% e errore relativo minimo pari allo 0,06%. I valori ottenuti sono stati molto positivi in quanto dimostrano l'affidabilità della stima eseguita. Nonostante siano stati aggregati valori di peso di manufatti diversi tra loro a causa della diversa composizione della miscela, è stato possibile ottenere una legge di correlazione che ben si adatta alla schematizzazione della realtà. Tale considerazione è stata confermata dal fatto che, ad esempio, al di sotto del 4% di errore relativo percentuale si sono concentrati il 93,4% delle verifiche eseguite. Entro un errore relativo percentuale del 5% si sono concentrate addirittura il 99% delle verifiche. Nel caso in cui si volesse abbassare ulteriormente l'errore tra la misura stimata e quella reale, sarebbe opportuno introdurre un'ulteriore variabile indipendente ed utilizzare un modello combinato in 2 variabili.

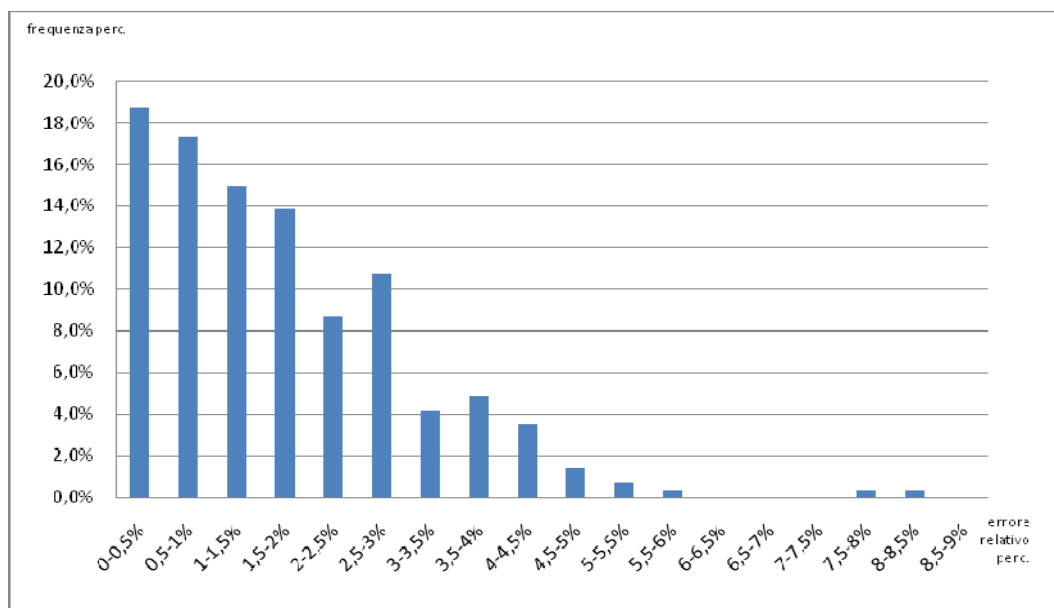


Figura 6.15 - Distribuzione dell'errore relativo percentuale

6.2.3 Prove di resistenza meccanica a flessione sui provini di prima serie

Sui numerosi provini prismatici di malta realizzati di dimensioni 40mmx40mmx160mm, alle scadenze di 2, 7 e 28 giorni di stagionatura, sono state eseguite prove meccaniche di resistenza a flessione. Dall'esecuzione della prova per ogni singolo provino è possibile ricavare all'incirca due metà da sottoporre successivamente a prova di compressione. In particolare, per ogni miscela realizzata e per ogni scadenza presa in esame, sono stati sottoposti a prova diversi provini. I valori di riferimento presi in considerazione, naturalmente, sono i valori medi, per cui nelle tabelle e nei grafici seguenti saranno riportati solamente tali valori numerici. Nelle seguenti tabelle (tabelle 6.10-6.13) sono riportati i valori ottenuti sperimentalmente.

All'aumentare dei giorni di stagionatura, è stato registrato, ovviamente, un aumento della resistenza a flessione. In qualche rara circostanza tra il valore di resistenza a 2 e 7 giorni di stagionatura è stato constatato una diminuzione del valore di resistenza dovuta molto probabilmente ad errori sperimentali. Altro dato evidente è la diminuzione della resistenza flessionale all'aumentare della percentuale di gomma utilizzata nell'impasto. Nella figura seguente (figura 6.16) è riportata, al variare della tipologia di miscela, la resistenza flessionale rispetto appunto alla percentuale di gomma usata.

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	% aggiunta	Tipo gomma	% gomma	R.fl. (kPa) a 2gg	R.fl. (kPa) a 7gg	R.fl. (kPa) a 28gg
Z0PV_32.5	Z0PV0 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	0%	2,25	2,44	8,88
	Z0PV5 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	5%	2,98	3,77	8,04
	Z0PV10 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	10%	2,44	4,52	6,98
	Z0PV15 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	15%	2,51	4,48	6,23
	Z0PV20 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	20%	2,60	2,32	5,98
	Z0PV50 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	50%	0,59	2,23	2,93
Z5PV_32.5	Z5PV0 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	0%	4,73	5,06	9,54
	Z5PV5 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	5%	3,09	6,40	8,20
	Z5PV10 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	10%	2,16	5,77	6,98
	Z5PV15 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	15%	3,47	4,31	6,61
	Z5PV20 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	20%	1,48	4,97	6,07
	Z5PV50 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	50%	0,96	2,51	2,93
Z10PV_32.5	Z10PV0 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	0%	4,78	6,02	7,34
	Z10PV5 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	5%	4,78	7,15	7,83
	Z10PV10 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	10%	3,56	6,40	7,13
	Z10PV15 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	15%	4,48	6,14	6,77
	Z10PV20 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	20%	3,56	3,66	5,86
	Z10PV50 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	50%	1,85	2,46	2,77
Z15PV_32.5	Z15PV0 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	0%	4,97	6,19	8,09
	Z15PV5 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	5%	5,27	4,57	7,41
	Z15PV10 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	10%	4,97	4,10	7,36
	Z15PV15 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	15%	4,22	6,19	6,35
	Z15PV20 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	20%	3,89	4,69	5,74
	Z15PV50 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	50%	1,64	2,37	2,55
Z0GF_32.5	Z0GF0 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	0%	2,34	5,60	7,41
	Z0GF5 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	5%	2,34	5,18	7,52
	Z0GF10 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	10%	2,34	5,18	6,91
	Z0GF15 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	15%	1,88	4,43	6,26
	Z0GF20 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	20%	1,88	3,68	4,92
	Z0GF50 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	50%	1,64	2,44	2,98
Z5GF_32.5	Z5GF0 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	0%	3,52	7,13	8,88
	Z5GF5 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	5%	3,52	4,27	7,57
	Z5GF10 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	10%	3,52	7,01	7,15
	Z5GF15 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	15%	2,81	3,14	5,27
	Z5GF20 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	20%	3,28	4,31	5,09
	Z5GF50 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	50%	1,64	2,63	3,07
Z10GF_32.5	Z10GF0 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	0%	4,92	7,31	7,55
	Z10GF5 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	5%	4,22	5,98	7,24
	Z10GF10 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	10%	4,22	6,12	6,94
	Z10GF15 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	15%	3,52	5,23	6,26
	Z10GF20 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	20%	4,05	4,20	5,86
	Z10GF50 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	50%	2,72	2,84	3,21
Z15GF_32.5	Z15GF0 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	0%	5,06	6,80	7,03
	Z15GF5 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	5%	4,34	5,74	6,66
	Z15GF10 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	10%	4,01	5,86	6,82
	Z15GF15 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	15%	3,80	4,69	6,14
	Z15GF20 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	20%	3,73	4,64	5,27
	Z15GF50 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	50%	2,25	3,14	3,35
Z0PG_32.5	Z0PG0 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	0%	3,75	8,09	9,84
	Z0PG5 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	5%	3,09	5,93	7,66
	Z0PG10 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	10%	2,95	5,27	7,73
	Z0PG15 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	15%	2,46	4,85	6,75
	Z0PG20 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	20%	2,30	3,84	5,86
	Z0PG50 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	50%	1,45	2,46	3,52
Z5PG_32.5	Z5PG0 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	0%	5,39	7,78	8,41
	Z5PG5 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	5%	4,95	7,08	8,25
	Z5PG10 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	10%	4,27	6,28	7,92
	Z5PG15 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	15%	3,56	5,93	6,33
	Z5PG20 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	20%	3,49	5,70	5,81
	Z5PG50 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	50%	2,09	2,81	3,23
Z10PG_32.5	Z10PG0 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	0%	5,86	6,73	8,09
	Z10PG5 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	5%	5,44	6,45	7,78
	Z10PG10 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	10%	4,22	6,35	6,56
	Z10PG15 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	15%	3,94	5,39	5,98
	Z10PG20 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	20%	3,73	4,95	5,81
	Z10PG50 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	50%	2,44	2,98	3,19
Z15PG_32.5	Z15PG0 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	0%	6,07	6,23	7,41
	Z15PG5 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	5%	4,20	6,02	6,87
	Z15PG10 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	10%	2,70	5,48	6,02
	Z15PG15 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	15%	3,77	4,73	5,18
	Z15PG20 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	20%	3,98	5,23	5,46
	Z15PG50 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	50%	2,06	2,95	3,07

Tabella 6.10- Resistenza a flessione dei provini realizzati con zeolite 5A e CEMIII/A 32,5N

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	%aggiunta	Tipo gomma	%gomma	R.fl. (kPa) a 2gg	R.fl. (kPa) a 7gg	R.fl. (kPa) a 28gg
Z0PV_42.5	Z0PV0 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	0%	7,15	7,57	9,28
	Z0PV5 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	5%	6,28	7,50	7,64
	Z0PV10 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	10%	5,37	6,82	6,87
	Z0PV15 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	15%	5,18	6,33	6,35
	Z0PV20 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	20%	4,36	5,39	5,74
	Z0PV50 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	50%	2,84	3,05	3,14
Z5PV_42.5	Z5PV0 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	0%	6,28	6,70	8,11
	Z5PV5 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	5%	6,56	8,37	8,65
	Z5PV10 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	10%	5,16	7,24	7,29
	Z5PV15 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	15%	4,59	5,77	5,95
	Z5PV20 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	20%	4,57	5,60	6,09
	Z5PV50 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	50%	2,18	2,39	2,98
Z10PV_42.5	Z10PV0 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	0%	6,33	9,21	9,33
	Z10PV5 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	5%	6,70	7,38	7,62
	Z10PV10 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	10%	5,74	6,16	6,94
	Z10PV15 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	15%	5,81	6,05	6,40
	Z10PV20 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	20%	5,06	5,13	5,60
	Z10PV50 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	50%	2,55	2,81	2,88
Z15PV_42.5	Z15PV0 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	0%	7,20	10,29	10,41
	Z15PV5 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	5%	7,08	8,30	8,30
	Z15PV10 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	10%	6,16	6,87	6,94
	Z15PV15 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	15%	6,12	6,94	7,05
	Z15PV20 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	20%	5,18	6,02	6,19
	Z15PV50 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	50%	1,80	2,25	2,46
Z0GF_42.5	Z0GF0 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	0%	6,33	7,50	9,68
	Z0GF5 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	5%	6,14	6,56	7,78
	Z0GF10 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	10%	5,91	6,80	7,03
	Z0GF15 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	15%	4,24	5,39	6,02
	Z0GF20 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	20%	3,89	4,45	5,16
	Z0GF50 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	50%	2,23	2,81	2,84
Z5GF_42.5	Z5GF0 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	0%	6,16	6,56	8,58
	Z5GF5 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	5%	6,49	7,03	7,73
	Z5GF10 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	10%	6,02	6,09	6,56
	Z5GF15 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	15%	5,18	5,39	5,86
	Z5GF20 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	20%	4,57	4,22	4,64
	Z5GF50 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	50%	2,06	1,88	2,60
Z10GF_42.5	Z10GF0 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	0%	6,94	7,03	9,63
	Z10GF5 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	5%	7,50	7,57	7,90
	Z10GF10 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	10%	5,27	5,41	6,61
	Z10GF15 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	15%	5,18	5,27	6,23
	Z10GF20 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	20%	4,95	5,06	5,18
	Z10GF50 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	50%	1,43	2,25	2,77
Z15GF_42.5	Z15GF0 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	0%	6,91	7,05	7,95
	Z15GF5 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	5%	5,95	5,74	7,52
	Z15GF10 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	10%	6,12	5,86	6,30
	Z15GF15 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	15%	5,60	5,98	6,23
	Z15GF20 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	20%	4,57	5,70	6,23
	Z15GF50 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	50%	3,40	3,61	3,87
Z0PG_42.5	Z0PG0 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	0%	5,81	8,48	9,16
	Z0PG5 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	5%	5,79	6,77	7,13
	Z0PG10 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	10%	5,11	5,95	7,34
	Z0PG15 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	15%	4,80	5,81	5,95
	Z0PG20 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	20%	4,17	4,80	5,48
	Z0PG50 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	50%	2,39	2,77	3,23
Z5PG_42.5	Z5PG0 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	0%	6,82	8,09	9,70
	Z5PG5 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	5%	6,02	6,91	7,45
	Z5PG10 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	10%	5,27	6,70	6,96
	Z5PG15 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	15%	5,18	5,95	6,35
	Z5PG20 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	20%	4,97	5,39	5,51
	Z5PG50 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	50%	2,84	3,28	3,40
Z10PG_42.5	Z10PG0 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	0%	6,73	9,12	9,21
	Z10PG5 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	5%	7,34	7,88	8,30
	Z10PG10 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	10%	6,91	7,31	7,55
	Z10PG15 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	15%	6,49	6,75	7,50
	Z10PG20 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	20%	5,74	6,23	6,26
	Z10PG50 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	50%	3,84	3,98	4,22
Z15PG_42.5	Z15PG0 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	0%	8,20	9,80	10,13
	Z15PG5 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	5%	6,02	7,99	8,13
	Z15PG10 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	10%	5,81	6,56	6,82
	Z15PG15 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	15%	6,28	7,29	7,52
	Z15PG20 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	20%	5,77	5,55	5,63
	Z15PG50 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	50%	3,42	3,68	3,98

Tabella 6.11 - Resistenza a flessione dei provini realizzati con zeolite 5A e CEMII/A-S 45,5R

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	%aggiunta	Tipo gomma	%gomma	R.fl. (kPa) a 2gg	R.fl. (kPa) a 7gg	R.fl. (kPa) a 28gg
S0PV_32.5	S0PV0 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	0%	3,23	5,06	10,08
	S0PV5 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	5%	3,02	5,53	8,77
	S0PV10 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	10%	2,60	7,29	8,46
	S0PV15 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	15%	2,63	5,02	7,76
	S0PV20 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	20%	0,96	4,73	6,45
	S0PV50 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	50%	1,08	1,64	2,88
S5PV_32.5	S5PV0 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	0%	1,90	5,53	9,66
	S5PV5 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	5%	1,08	4,99	8,37
	S5PV10 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	10%	2,09	3,07	7,05
	S5PV15 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	15%	0,23	1,83	6,56
	S5PV20 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	20%	1,10	3,98	4,24
	S5PV50 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	50%	0,54	0,80	2,63
S10PV_32.5	S10PV0 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	0%	3,52	6,61	9,16
	S10PV5 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	5%	2,84	5,70	6,59
	S10PV10 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	10%	2,63	5,18	5,91
	S10PV15 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	15%	2,25	4,36	5,23
	S10PV20 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	20%	1,59	4,20	4,76
	S10PV50 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	50%	1,27	4,20	4,76
S15PV_32.5	S15PV0 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	0%	1,90	3,94	6,87
	S15PV5 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	5%	1,66	4,22	6,96
	S15PV10 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	10%	1,45	3,30	5,58
	S15PV15 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	15%	0,96	2,02	4,57
	S15PV20 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	20%	1,13	1,99	3,68
	S15PV50 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	50%	0,33	0,68	0,87
S0GF_32.5	S0GF0 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	0%	3,23	5,06	10,08
	S0GF5 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	5%	2,72	5,16	7,38
	S0GF10 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	10%	1,92	5,02	6,52
	S0GF15 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	15%	1,88	4,97	6,23
	S0GF20 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	20%	1,85	4,24	6,61
	S0GF50 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	50%	1,43	2,84	3,09
	S5GF0 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	0%	1,90	5,53	9,66
	S5GF5 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	5%	2,09	6,07	6,38
S5GF_32.5	S5GF10 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	10%	2,32	5,02	6,05
	S5GF15 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	15%	2,09	4,59	6,61
	S5GF20 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	20%	0,59	3,98	4,17
	S5GF50 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	50%	1,50	2,88	3,45
	S10GF0 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	0%	3,52	6,61	9,16
	S10GF5 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	5%	2,65	6,14	8,41
S10GF_32.5	S10GF10 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	10%	3,02	6,07	6,84
	S10GF15 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	15%	2,18	4,95	6,23
	S10GF20 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	20%	2,13	4,36	5,23
	S10GF50 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	50%	1,31	2,98	3,54
	S15GF0 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	0%	1,90	3,94	6,87
	S15GF5 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	5%	3,12	6,61	7,08
S15GF_32.5	S15GF10 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	10%	2,39	4,36	5,32
	S15GF15 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	15%	2,84	5,55	5,67
	S15GF20 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	20%	2,30	4,27	4,62
	S15GF50 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	50%	1,80	2,77	2,84
	S0PG0 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	0%	3,23	5,06	10,08
	S0PG5 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	5%	1,78	5,18	8,79
S0PG_32.5	S0PG10 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	10%	1,73	3,07	7,62
	S0PG15 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	15%	1,59	3,68	7,03
	S0PG20 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	20%	1,29	3,73	7,15
	S0PG50 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	50%	1,13	2,34	3,52
	S5PG0 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	0%	1,90	5,53	9,66
	S5PG5 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	5%	2,02	4,43	6,98
S5PG_32.5	S5PG10 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	10%	1,83	3,80	5,81
	S5PG15 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	15%	1,01	2,02	6,21
	S5PG20 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	20%	2,39	1,90	5,86
	S5PG50 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	50%	0,73	2,63	2,91
	S10PG0 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	0%	3,52	6,61	9,16
	S10PG5 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	5%	1,99	3,45	7,08
S10PG_32.5	S10PG10 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	10%	1,59	2,88	5,95
	S10PG15 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	15%	1,59	2,41	5,98
	S10PG20 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	20%	1,31	2,91	5,86
	S10PG50 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	50%	1,17	2,30	4,01
	S15PG0 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	0%	1,90	3,94	6,87
	S15PG5 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	5%	0,96	4,36	6,02
S15PG_32.5	S15PG10 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	10%	2,25	3,42	4,80
	S15PG15 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	15%	1,92	2,98	4,55
	S15PG20 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	20%	1,20	4,10	4,24
	S15PG50 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	50%	0,89	1,08	2,02

Tabella 6.12 - Resistenza a flessione dei provini realizzati con silica fume e CEMIII/A 32,5N

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	%aggiunta	Tipo gomma	%gomma	R.fl. (kPa) a 2gg	R.fl. (kPa) a 7gg	R.fl. (kPa) a 28gg
S0PV_42.5	S0PV0 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	0%	5,37	6,95	8,59
	S0PV5 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	5%	5,48	6,87	7,50
	S0PV10 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	10%	4,48	5,70	6,45
	S0PV15 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	15%	4,08	5,23	6,12
	S0PV20 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	20%	3,80	4,80	5,70
	S0PV50 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	50%	2,06	2,60	2,84
S5PV_42.5	S5PV0 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	0%	5,63	7,50	8,20
	S5PV5 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	5%	4,69	5,06	7,29
	S5PV10 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	10%	4,27	5,74	6,45
	S5PV15 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	15%	4,95	5,53	6,56
	S5PV20 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	20%	3,98	4,15	6,45
	S5PV50 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	50%	2,04	2,53	3,00
S10PV_42.5	S10PV0 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	0%	5,44	8,46	9,96
	S10PV5 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	5%	4,69	6,54	7,69
	S10PV10 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	10%	4,22	6,23	7,03
	S10PV15 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	15%	4,64	5,27	7,38
	S10PV20 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	20%	4,10	5,44	6,38
	S10PV50 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	50%	2,77	2,84	3,54
S15PV_42.5	S15PV0 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	0%	6,75	8,32	8,84
	S15PV5 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	5%	6,16	7,48	8,39
	S15PV10 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	10%	5,48	6,38	7,97
	S15PV15 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	15%	4,80	5,06	7,15
	S15PV20 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	20%	4,17	5,27	7,27
	S15PV50 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	50%	1,99	2,18	2,93
S0GF_42.5	S0GF0 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	0%	5,37	6,95	8,59
	S0GF5 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	5%	4,48	6,21	8,58
	S0GF10 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	10%	4,24	4,90	6,33
	S0GF15 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	15%	4,22	4,57	5,48
	S0GF20 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	20%	3,52	4,27	5,77
	S0GF50 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	50%	1,83	2,63	2,77
S5GF_42.5	S5GF0 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	0%	6,33	7,34	7,76
	S5GF5 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	5%	5,48	5,81	6,28
	S5GF10 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	10%	4,05	5,32	6,23
	S5GF15 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	15%	3,98	5,53	6,21
	S5GF20 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	20%	3,98	5,39	5,51
	S5GF50 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	50%	2,63	2,44	3,16
S10GF_42.5	S10GF0 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	0%	6,91	7,52	8,86
	S10GF5 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	5%	6,28	6,28	6,98
	S10GF10 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	10%	5,27	5,60	6,56
	S10GF15 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	15%	4,34	6,40	6,54
	S10GF20 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	20%	4,15	5,04	5,63
	S10GF50 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	50%	2,67	2,51	3,52
S15GF_42.5	S15GF0 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	0%	6,45	6,87	9,26
	S15GF5 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	5%	5,67	5,72	8,20
	S15GF10 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	10%	4,48	5,74	7,05
	S15GF15 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	15%	4,41	6,40	6,68
	S15GF20 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	20%	4,90	5,74	6,21
	S15GF50 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	50%	3,05	3,68	4,03
S0PG_42.5	S0PG0 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	0%	5,37	6,95	8,59
	S0PG5 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	5%	5,16	6,23	7,88
	S0PG10 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	10%	4,34	4,88	5,27
	S0PG15 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	15%	4,03	5,02	5,91
	S0PG20 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	20%	3,87	3,45	5,58
	S0PG50 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	50%	1,88	2,23	3,68
S5PG_42.5	S5PG0 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	0%	6,07	8,32	8,44
	S5PG5 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	5%	4,88	5,77	8,09
	S5PG10 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	10%	4,69	5,91	6,00
	S5PG15 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	15%	4,48	4,92	5,74
	S5PG20 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	20%	3,98	5,27	5,63
	S5PG50 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	50%	2,25	2,81	2,84
S10PG_42.5	S10PG0 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	0%	6,45	7,50	8,67
	S10PG5 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	5%	5,81	6,40	8,53
	S10PG10 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	10%	5,23	5,58	7,34
	S10PG15 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	15%	5,18	5,51	6,19
	S10PG20 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	20%	4,80	4,97	5,55
	S10PG50 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	50%	2,44	2,77	3,00
S15PG_42.5	S15PG0 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	0%	6,70	6,87	8,91
	S15PG5 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	5%	5,93	7,34	8,44
	S15PG10 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	10%	5,09	5,81	7,66
	S15PG15 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	15%	4,88	6,12	7,45
	S15PG20 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	20%	4,92	6,23	6,35
	S15PG50 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	50%	2,74	3,21	3,21

Tabella 6.13 - Resistenza a flessione dei provini realizzati con silice fume e CEMII/A-S 42,5R

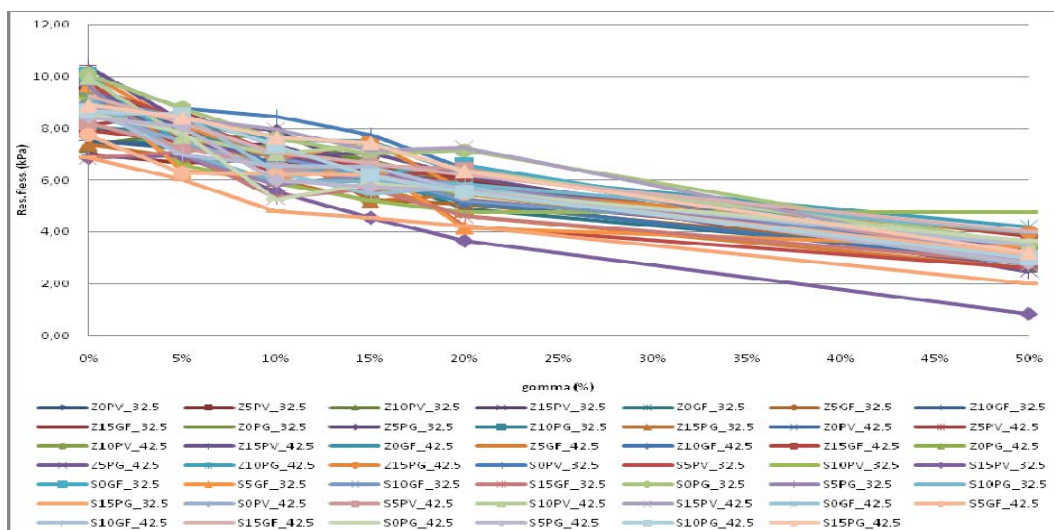


Figura 6.16 - Resistenza a flessione dei provini al variare della percentuale di gomma utilizzata

I risultati sperimentali ottenuti dimostrano che la resistenza flessionale media dei manufatti in malta cementizia è inversamente proporzionale alla percentuale di gomma PFU utilizzata: all'aumentare della percentuale di gomma usata, si è registrato, infatti, una diminuzione della resistenza meccanica a flessione dei provini. Tale andamento risulta più definito per le miscele realizzate con zeolite 5A rispetto a quelle realizzate con silica fume in quanto per le prime i valori medi ottenuti, in funzione della percentuale di gomma utilizzata, presentano una varianza inferiore ai secondi. Nelle figure seguenti (figure 6.17-6.18) sono riportati gli andamenti della resistenza flessionale media relativamente al dosaggio di gomma PFU, per le due differenti tipologie di aggiunta minerale: zeolite 5A e silica fume. Quanto affermato è confermato dal calcolo della varianza per le diverse miscele realizzate in funzione della tipologia di aggiunta e della percentuale di gomma PFU usata nell'impasto (figura 6.19).

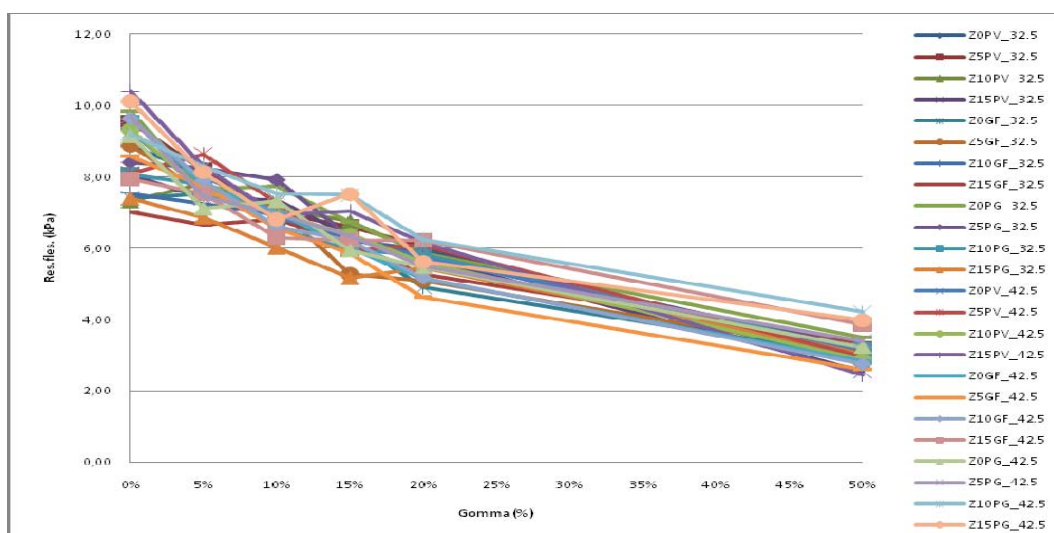


Figura 6.17 - Resistenza a flessione dei provini confezionati con zeolite 5A al variare della percentuale di gomma utilizzata

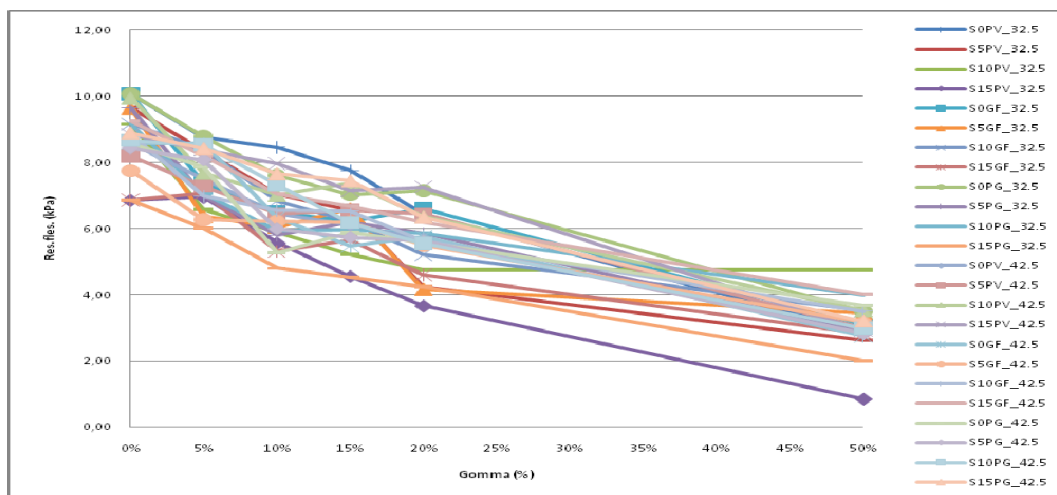


Figura 6.18 - Resistenza a flessione dei provini confezionati con silice fume al variare della percentuale di gomma utilizzata

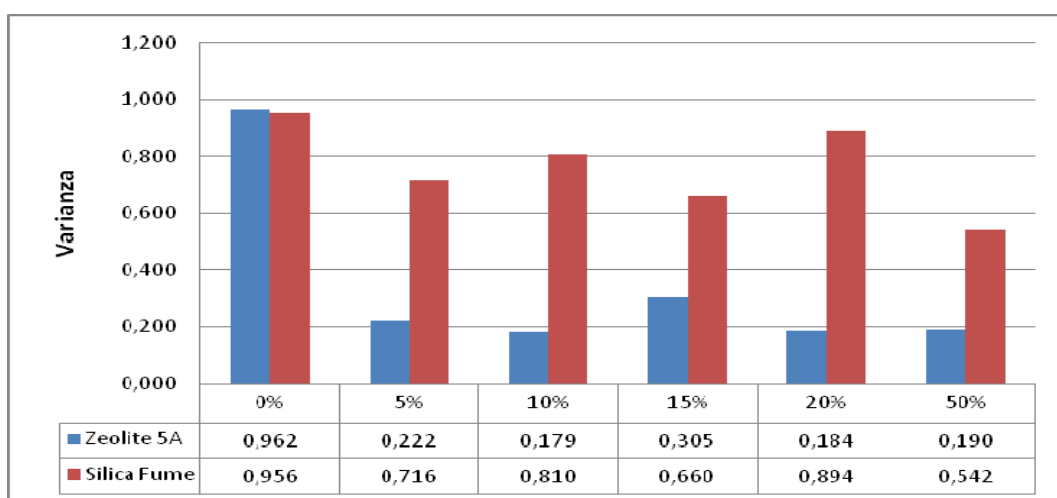


Figura 6.19 Varianza in funzione della tipologia di aggiunta e della percentuale di gomma PFU

Osservando il grafico precedente è stato possibile notare che le miscele realizzate con zeolite 5A presentano valori di varianza di resistenza flessionale a 28 giorni di stagionatura, più bassi rispetto alle miscele realizzate con silice fume, a parità di percentuale di gomma PFU, a dimostrazione del fatto che i provini realizzati con il silico-alluminato idrato zeolitico sono meno influenzati dalla tipologia di cemento, di gomma e di errori sperimentali rispetto ai rispettivi manufatti realizzati con silice fume, per cui l'andamento della resistenza meccanica a flessione media al variare della percentuale di gomma risulta più netto e marcato, meno disperso. Per quanto riguarda le due differenti tipologie di cemento usati negli impasti (CEM III/A 32,5N, CEM II/A-S 42,5R), è stato osservato che non c'è un importante miglioramento delle resistenze flessionali dovuto ad un cemento di classe di resistenza superiore. Quanto affermato è emerso dal confronto dei grafici riportati nelle figure 6.20 e 6.21. Per capire, invece, l'influenza della tipologia di gomma PFU (polverino, grana fine e misto granulometrico tra polverino e grana fine), avendo valutato una non significativa influenza sulla resistenza flessionale della tipologia di cemento, si è proceduto con il calcolo dei valori medi di resistenza a flessione dei provini realizzati in funzione solamente della percentuale di gomma utilizzata e, appunto, della sua tipologia. Dall'analisi dei valori medi così calcolati, è possibile notare che la tipologia di gomma non influisce in maniera significativa sulla resistenza meccanica a flessione, tuttavia la

tipologia polverino mediamente consente l'ottenimento di valori flessionali più elevati rispetto alle altre due tipologie di gomma. La grana fine è la tipologia di gomma PFU che in genere fornisce valori medi più bassi, mentre la tipologia combinata (polverino e grana fina) si posiziona a livello intermedio tra le due. In figura 6.22 è riportato l'andamento medio della resistenza flessionale al variare della tipologia di gomma. E' possibile, dunque, affermare che, seppur non significativamente, la resistenza flessionale è influenzata dalla granulometria del materiale polimerico PFU utilizzato. Frazioni più piccole di gomma PFU consentono l'ottenimento di valori di resistenza meccanica a flessione più elevati. Per valutare l'influenza dell'aggiunta minerale sul comportamento flessionale delle malte realizzate si è proceduto al calcolo di valori medi di resistenza meccanica a flessione accorpando i dati per le varie miscele realizzate in funzione del tipo di cemento, del tipo e del quantitativo di materiale PFU somministrato all'impasto. I valori medi ottenuti sono stati, quindi, stimati in funzione della tipologia e della percentuale di aggiunta minerale somministrata e dei tempi di stagionatura. I valori ottenuti sono diagrammati nel grafico di figura 6.23. Da un'attenta analisi del grafico sopra riportato, è emerso che alle brevi stagionature la zeolite consente di ottenere resistenze flessionali più elevate rispetto ai manufatti realizzati con silica fume. Addirittura l'aggiunta all'impasto del 15% di zeolite consente, a soli 2 giorni di stagionatura, di superare la resistenza meccanica a flessione dei provini realizzati con silica fume a 7 giorni di stagionatura. Quindi, la zeolite si comporta come un additivo accelerante di indurimento. Alle medio - lunghe stagionature (28giorni) le due differenti aggiunte minerali influiscono pressoché in maniera analoga sulla resistenza flessionale anche se tendenzialmente i provini realizzati con materiale zeolitico mostrano prestazioni meccaniche a flessione più elevate. La percentuale ottimale di aggiunta, sia per la zeolite che per la silica fume, è del 10% in aggiunta in peso rispetto al dosaggio di cemento. Per aggiunte superiori (15%) c'è una tendenza a diminuire dei valori di resistenza misurati. Probabilmente tale effetto è originato da una perdita di lavorabilità delle miscele allo stato fresco e, quindi, ad una difficoltà maggiore di messa in opera.

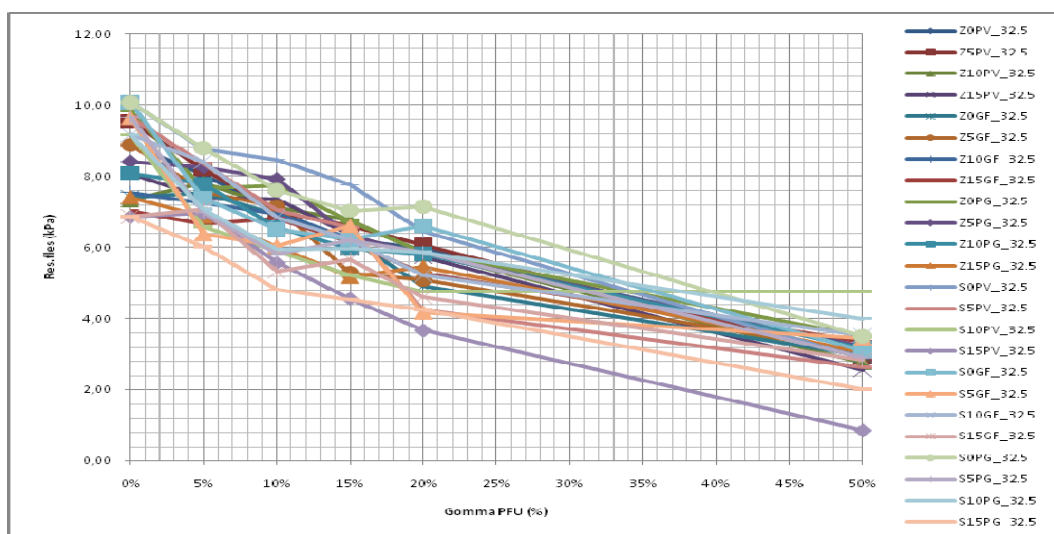


Figura 6.20 - Resistenza flessionale media a 28 giorni dei provini realizzati con cemento CEM III/A 32,5N

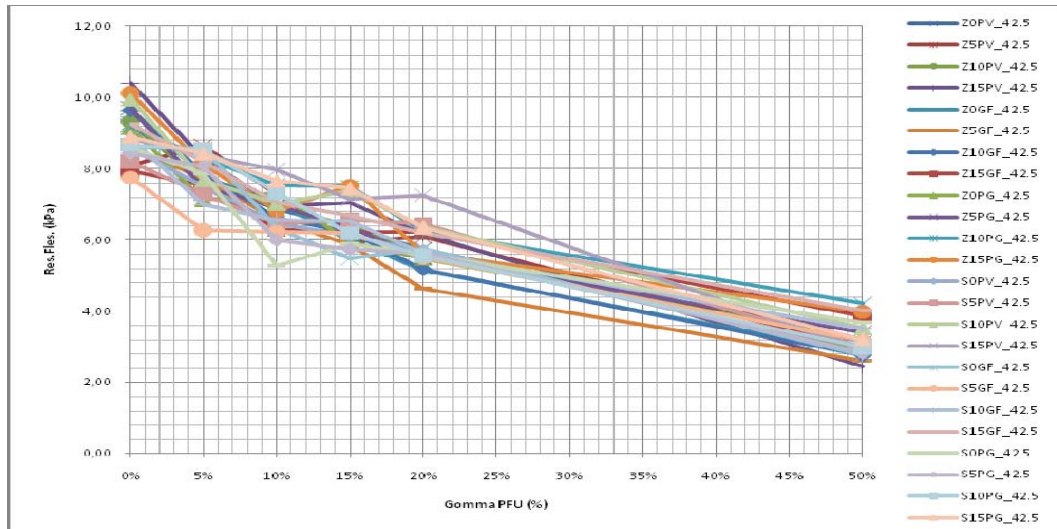


Figura 6.21 - Resistenza flessionale media a 28 giorni dei provini realizzati con cemento CEM II/A-S 42,5R

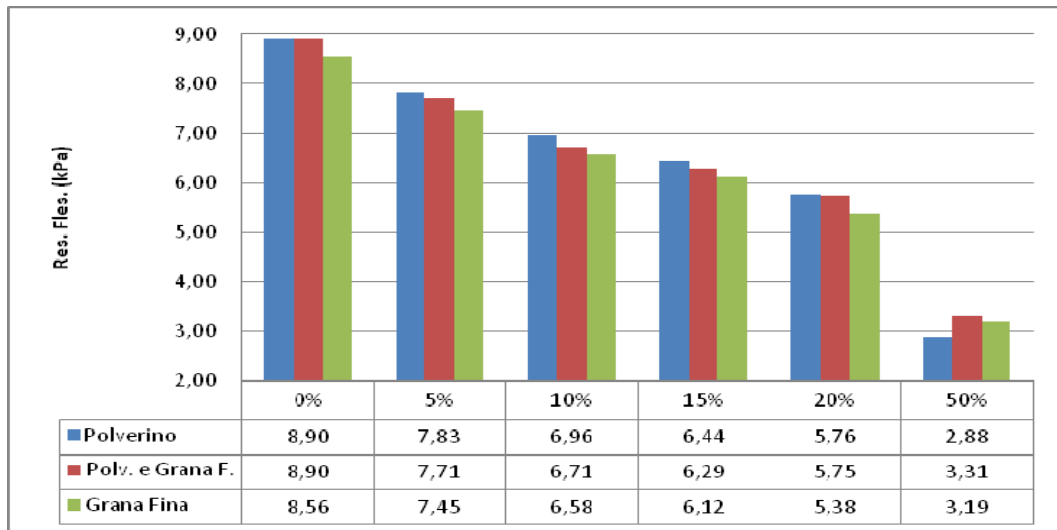


Figura 6.22 - Resistenza flessionale media per tipologia di gomma PFU

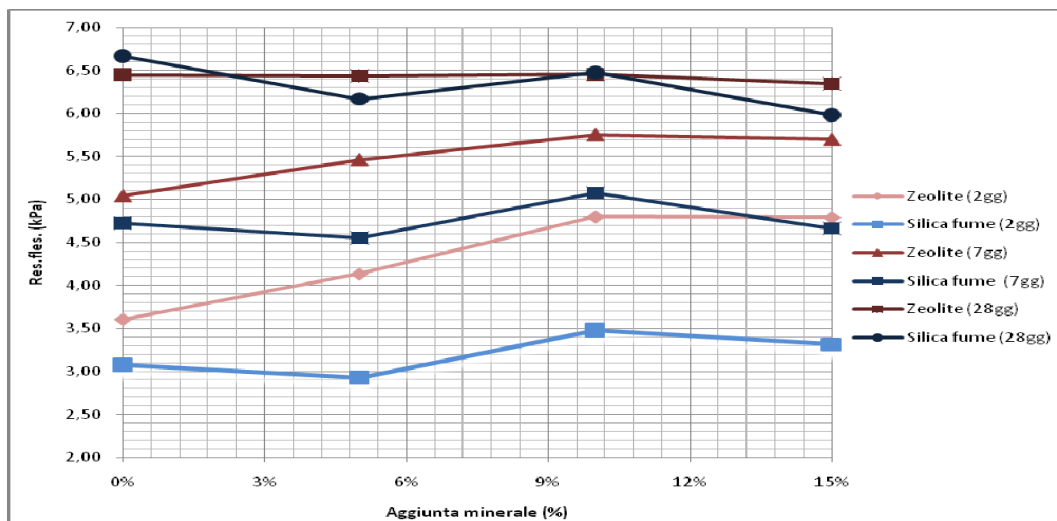


Figura 6.23 - Resistenza flessionale media in funzione della tipologia e della percentuale di aggiunta minerale somministrata all'impasto e dei tempi di stagionatura

Analogamente a quanto stimato per il peso dei manufatti, anche per la resistenza meccanica flessione è stata rilevata sperimentalmente una dipendenza pressoché

lineare tra la resistenza flessionale appunto e la percentuale di gomma utilizzata si è ritenuto opportuno stimare una retta di correlazione tra le due grandezze. La legge utilizzata per la correlazione è stata la seguente:

$$R_f = a + b \cdot G$$

dove

- R_f è la resistenza flessionale media delle miscele allo stato indurito a 28 giorni di stagionatura espressa in kPa;
- G è la percentuale di gomma somministrata nell'impasto in sostituzione in volume rispetto alla sabbia;
- a e b sono i parametri della retta (rispettivamente intercetta e coefficiente angolare) da stimare con criterio dei minimi quadrati.

Ovviamente, la validità della legge ricade nel range di valori della variabile indipendente G testato sperimentalmente (tra 0% e 50%). L'attendibilità delle curve di correlazione è stata valutata attraverso il coefficiente di correlazione r^2 . Nella figura seguente 6.24 è riportata la curva di correlazione stimata, la relativa legge ed il valore del coefficiente di correlazione R^2 . Il calcolo del coefficiente di correlazione effettuato ci consente di affermare che è possibile stimare una retta di correlazione lineare tra la resistenza meccanica a flessione e la percentuale di gomma utilizzata nell'impasto. La stima potrebbe essere ulteriormente migliorata effettuando una correlazione di tipo esponenziale o di tipo polinomiale di secondo ordine, oppure effettuando una regressione multipla introducendo nella stima ulteriori variabili quali ad esempio la tipologia e la percentuale di aggiunta minerale usata.

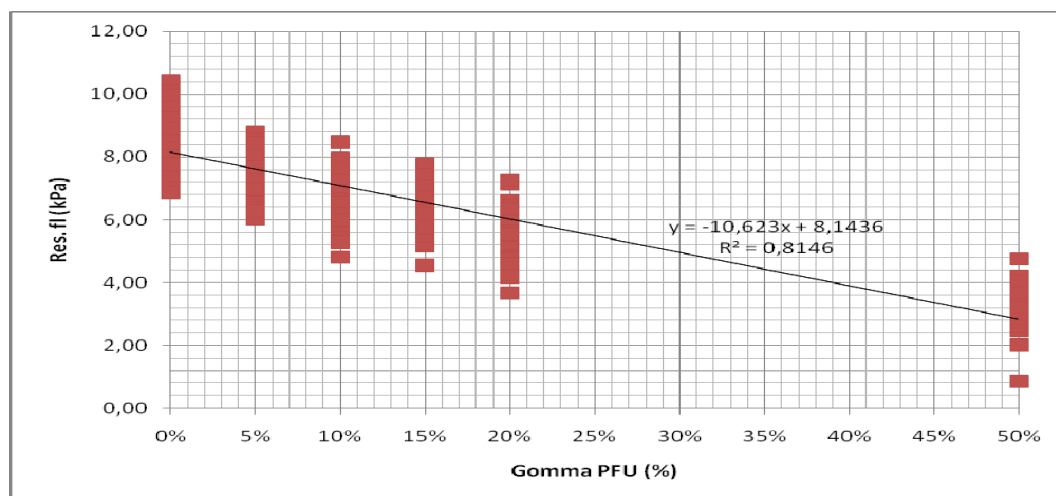


Figura 6.24 - Correlazione tra la resistenza a flessione e la percentuale di gomma utilizzata, legge di correlazione e coefficiente di correlazione r^2

6.2.4 Prove di resistenza meccanica a compressione sui provini di prima serie¹

Dopo aver proceduto al confezionamento dei provini, alle scadenze di 2, 7 e 28 giorni di stagionatura, si è provveduto, dopo aver rilevato il peso e in seguito alla prova di flessione su ogni singolo provino, ad eseguire prove meccaniche di resistenza a compressione sulle due metà ottenute in ogni circostanza dalla prova a flessione. Per ogni miscela, alle diverse stagionature, sono stati confezionati

¹ Iacobini I.; Crea F.; Frontera P.; Marchese S. (2008). Caratterizzazione Meccanica di Malte Cementizie Confezionate con Materiali Derivanti dai Pneumatici a Fine Vita e Zeolite Sintetica, *Atti del 9° Convegno Nazionale AIMAT*, Piano di Sorrento 29 Giugno – 2 Luglio 2008.

diversi provini, per cui il valore di riferimento preso in considerazione per le analisi è risultato ancora una volta il valor medio delle misurazioni effettuate. Nelle seguenti tabelle (tabelle 6.14-6.17) sono riportati i valori ottenuti. Ovviamente, è stato registrato un aumento della resistenza meccanica a compressione dei provini all'aumentare dei giorni di stagionatura. Evidente è la diminuzione della resistenza a compressione al crescere della percentuale di gomma utilizzata nell'impasto. L'andamento delle resistenze a compressione è rappresentato nella figura seguente (figura 6.26), rispetto appunto alla percentuale di gomma usata. Come per la resistenza a flessione, anche per la resistenza meccanica a compressione media, i risultati sperimentali ottenuti dimostrano che le proprietà meccaniche dei manufatti in malta cementizia sono inversamente proporzionali alla percentuale di gomma PFU utilizzata, cioè all'aumentare della percentuale di gomma usata, si è registrato una diminuzione della resistenza meccanica a compressione dei provini. Altro dato prevedibile è stato la valutazione di due differenti intensità di resistenza tra i provini realizzati con il cemento CEM III/A 32,5N e quelli confezionati con il cemento CEM II/A-S 42,5R. Questa differenza di resistenza è evidente nei casi di ridotta somministrazione all'impasto di materiale PFU (0, 5, 10 e 15%). Aumentando la percentuale di gomma nelle miscele la differenza di resistenza a compressione tende a livellarsi (dosaggio di gomma PFU pari al 20%). Utilizzando il 50% di materiale polimerico non è possibile apprezzare significative variazioni di resistenza meccanica a compressione tra i provini confezionati con i due diversi cementi. Nelle seguenti figure (figure 6.27-6.28) sono riportati gli andamenti delle resistenze meccaniche a compressione al variare del dosaggio di gomma PFU in funzione delle diverse tipologie di cemento usate. Gli andamenti di resistenza a compressione risultano più definiti per le miscele realizzate con zeolite 5A al variare della tipologia di cemento. Infatti, per gli impasti realizzati con tale silico-alluminato-idrato è possibile individuare facilmente quali sono quelli realizzati con cemento con classe di resistenza 42,5 rispetto a quelli realizzati con l'altro tipo di cemento (classe di resistenza 32,5). Per le miscele realizzate con silice fume non è possibile definire chiaramente gli andamenti della resistenza meccanica in funzione della percentuale di gomma somministrata all'impasto ed al variare del tipo di cemento. Tali caratteristiche sono valide per dosaggi di gomma PFU inferiori al 50%. Per un dosaggio di materiale polimerico del 50% in sostituzione in volume della sabbia non è possibile distinguere variazioni significative di resistenza meccanica a compressione per tutte le diverse tipologie di miscele realizzate. Per meglio interpretare quanto esposto sono stati riportati nelle figure 6.29-6.30 gli andamenti delle resistenze meccaniche a compressione al variare della percentuale di gomma PFU usata e della tipologia di cemento. Tale considerazione è confermata anche da alcuni parametri statistici medi calcolati in funzione della percentuale di materiale PFU somministrato all'impasto. Ad esempio, in figura 6.31 è riportato l'andamento medio della varianza in funzione della percentuale di gomma e della tipologia di aggiunta. Anche la tipologia granulometrica di gomma PFU somministrata all'impasto non influenza in maniera significativa le resistenze meccaniche a compressione. Riportando ad esempio le resistenze meccaniche medie a compressione in un diagramma (figura 6.32) in funzione della percentuale di gomma usata e della sua tipologia, è possibile apprezzare rilevanti variazioni di resistenza. Analizzando il grafico di figura 6.32 è possibile notare come non ci sia grande differenza di resistenza tra le diverse tipologie di gomma usata. Per valutare l'influenza

dell'aggiunta minerale sul comportamento a compressione delle malte realizzate si è proceduto al calcolo di valori medi di resistenza meccanica a compressione accorpando i dati per le varie miscele realizzate in funzione del tipo di cemento, del tipo e del quantitativo di materiale PFU somministrato all'impasto. I valori medi ottenuti sono stati, quindi, stimati in funzione della tipologia e della percentuale di aggiunta minerale somministrata e dei tempi di stagionatura. I valori numerici ottenuti sono diagrammati nel grafico di figura 6.33.



Figura 6.25 – Serie di provini con differenti percentuali di gomma PFU

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	%aggiunta	Tipo gomma	%gomma	R.C. (MPa) a 2gg	R.C. (MPa) a 7gg	R.C. (MPa) a 28gg
Z0PV_32.5	Z0PV0 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	0%	12,94	25,47	38,21
	Z0PV5 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	5%	11,06	17,56	29,44
	Z0PV10 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	10%	7,53	15,81	26,58
	Z0PV15 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	15%	7,84	12,13	20,81
	Z0PV20 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	20%	6,18	11,90	16,48
	Z0PV50 32.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	50%	1,92	3,65	5,24
Z5PV_32.5	Z5PV0 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	0%	17,00	25,04	34,87
	Z5PV5 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	5%	15,35	24,64	34,45
	Z5PV10 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	10%	13,79	20,30	28,28
	Z5PV15 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	15%	11,54	16,52	23,94
	Z5PV20 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	20%	9,17	15,00	21,09
	Z5PV50 32.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	50%	2,62	4,47	6,44
Z10PV_32.5	Z10PV0 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	0%	17,63	24,76	32,42
	Z10PV5 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	5%	18,68	23,35	30,41
	Z10PV10 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	10%	15,84	21,03	27,63
	Z10PV15 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	15%	13,13	17,98	23,43
	Z10PV20 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	20%	10,63	14,35	19,86
	Z10PV50 32.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	50%	2,87	3,55	6,04
Z15PV_32.5	Z15PV0 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	0%	19,90	25,22	30,96
	Z15PV5 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	5%	16,73	22,49	25,74
	Z15PV10 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	10%	16,87	21,24	25,53
	Z15PV15 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	15%	12,29	16,94	18,40
	Z15PV20 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	20%	11,36	14,36	17,00
	Z15PV50 32.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	50%	2,73	4,40	5,62
Z0GF_32.5	Z0GF0 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	0%	9,94	21,06	34,84
	Z0GF5 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	5%	8,99	19,11	32,20
	Z0GF10 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	10%	7,95	17,55	27,29
	Z0GF15 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	15%	6,87	14,97	23,93
	Z0GF20 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	20%	5,72	13,67	19,37
	Z0GF50 32.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	50%	2,62	5,88	7,78
Z5GF_32.5	Z5GF0 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	0%	16,44	28,61	36,59
	Z5GF5 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	5%	14,53	22,36	32,56
	Z5GF10 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	10%	12,94	23,89	28,82
	Z5GF15 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	15%	10,91	19,03	25,65
	Z5GF20 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	20%	9,34	16,96	22,71
	Z5GF50 32.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	50%	4,84	7,98	9,00
Z10GF_32.5	Z10GF0 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	0%	18,68	26,05	33,22
	Z10GF5 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	5%	15,53	26,22	28,97
	Z10GF10 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	10%	14,73	20,31	26,81
	Z10GF15 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	15%	14,15	18,87	23,23
	Z10GF20 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	20%	11,95	16,77	21,50
	Z10GF50 32.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	50%	4,96	6,85	8,50
Z15GF_32.5	Z15GF0 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	0%	19,33	25,35	28,15
	Z15GF5 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	5%	14,29	18,76	25,87
	Z15GF10 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	10%	16,04	21,12	22,28
	Z15GF15 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	15%	13,48	18,24	20,47
	Z15GF20 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	20%	11,88	15,30	17,96
	Z15GF50 32.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	50%	5,59	7,34	7,53
Z0PG_32.5	Z0PG0 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	0%	15,05	27,90	38,97
	Z0PG5 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	5%	9,66	21,01	31,05
	Z0PG10 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	10%	9,18	18,42	29,83
	Z0PG15 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	15%	7,78	15,82	24,23
	Z0PG20 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	20%	7,26	13,68	18,88
	Z0PG50 32.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	50%	3,20	6,03	7,88
Z5PG_32.5	Z5PG0 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	0%	20,12	28,92	38,28
	Z5PG5 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	5%	16,94	24,79	31,18
	Z5PG10 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	10%	14,40	22,90	29,17
	Z5PG15 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	15%	12,08	17,34	21,88
	Z5PG20 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	20%	10,22	16,35	21,12
	Z5PG50 32.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	50%	3,91	6,72	8,69
Z10PG_32.5	Z10PG0 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	0%	20,94	27,12	36,02
	Z10PG5 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	5%	22,56	23,04	31,02
	Z10PG10 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	10%	14,95	18,91	27,30
	Z10PG15 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	15%	13,38	16,33	20,50
	Z10PG20 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	20%	12,56	14,14	21,56
	Z10PG50 32.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	50%	4,88	6,33	8,30
Z15PG_32.5	Z15PG0 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	0%	19,50	24,19	27,50
	Z15PG5 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	5%	14,79	25,57	29,67
	Z15PG10 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	10%	12,46	15,14	19,62
	Z15PG15 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	15%	9,58	11,75	17,23
	Z15PG20 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	20%	10,65	14,36	16,76
	Z15PG50 32.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	50%	4,18	5,03	6,02

Tabella 6.14 - Resistenza a compressione dei provini realizzati con zeolite 5A e CEMIII/A 32,5N

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	%aggiunta	Tipo gomma	%gomma	R.C. (kPa) a 7gg	R.C. (kPa) a 28gg	R.C. (kPa) a 28gg
Z0PV_42.5	Z0PV0 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	0%	34.07	48,53	58.18
	Z0PV5 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	5%	27.32	36,68	46.09
	Z0PV10 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	10%	22.66	29,74	39.06
	Z0PV15 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	15%	19.69	27,22	32.22
	Z0PV20 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	20%	11.81	18,76	25.04
	Z0PV50 42.5	Zeolite 5A	0%	Polverino	50%	6.20	8,23	9.19
Z5PV_42.5	Z5PV0 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	0%	34.54	48,75	58.91
	Z5PV5 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	5%	30.23	39,67	47.87
	Z5PV10 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	10%	26.21	37,44	41.04
	Z5PV15 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	15%	19.60	29,96	34.31
	Z5PV20 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	20%	18.98	26,15	29.74
	Z5PV50 42.5	Zeolite 5A	5%	Polverino	50%	4.73	5,72	7.87
Z10PV_42.5	Z10PV0 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	0%	32.11	49,78	58.45
	Z10PV5 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	5%	33.56	44,53	52.16
	Z10PV10 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	10%	24.55	32,53	45.32
	Z10PV15 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	15%	23.44	31,25	39.42
	Z10PV20 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	20%	18.99	25,15	32.45
	Z10PV50 42.5	Zeolite 5A	10%	Polverino	50%	6.52	7,86	11.32
Z15PV_42.5	Z15PV0 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	0%	43.56	58,64	69.13
	Z15PV5 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	5%	38.04	45,88	58.19
	Z15PV10 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	10%	31.88	43,97	47.35
	Z15PV15 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	15%	28.52	40,55	43.10
	Z15PV20 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	20%	20.78	29,72	31.15
	Z15PV50 42.5	Zeolite 5A	15%	Polverino	50%	2.92	4,01	4.62
Z0GF_42.5	Z0GF0 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	0%	33.96	45,67	56.51
	Z0GF5 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	5%	27.11	37,56	47.98
	Z0GF10 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	10%	23.74	33,85	42.55
	Z0GF15 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	15%	20.10	27,53	33.02
	Z0GF20 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	20%	18.47	24,66	29.43
	Z0GF50 42.5	Zeolite 5A	0%	Grana Fine	50%	6.52	6,87	7.88
Z5GF_42.5	Z5GF0 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	0%	36.49	50,81	61.97
	Z5GF5 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	5%	32.30	42,91	49.72
	Z5GF10 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	10%	27.78	35,87	41.91
	Z5GF15 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	15%	19.32	31,12	34.79
	Z5GF20 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	20%	18.58	26,69	28.25
	Z5GF50 42.5	Zeolite 5A	5%	Grana Fine	50%	7.35	7,56	7.68
Z10GF_42.5	Z10GF0 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	0%	39.35	60,06	61.74
	Z10GF5 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	5%	34.44	43,44	50.87
	Z10GF10 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	10%	29.46	42,99	45.93
	Z10GF15 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	15%	25.58	35,21	39.56
	Z10GF20 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	20%	22.35	31,16	33.78
	Z10GF50 42.5	Zeolite 5A	10%	Grana Fine	50%	9.03	9,44	11.08
Z15GF_42.5	Z15GF0 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	0%	42.40	62,30	64.74
	Z15GF5 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	5%	38.35	49,60	53.36
	Z15GF10 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	10%	31.63	44,55	45.01
	Z15GF15 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	15%	30.36	34,10	35.89
	Z15GF20 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	20%	24.67	32,79	33.87
	Z15GF50 42.5	Zeolite 5A	15%	Grana Fine	50%	9.66	10,99	11.15
Z0PG_42.5	Z0PG0 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	0%	36.76	47,17	56.26
	Z0PG5 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	5%	26.64	35,60	46.56
	Z0PG10 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	10%	22.37	30,82	36.91
	Z0PG15 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	15%	20.47	27,97	33.62
	Z0PG20 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	20%	17.60	24,56	27.44
	Z0PG50 42.5	Zeolite 5A	0%	Polv+Grana	50%	7.07	8,27	9.61
Z5PG_42.5	Z5PG0 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	0%	36.24	50,46	57.38
	Z5PG5 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	5%	31.75	43,90	48.28
	Z5PG10 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	10%	27.62	37,60	42.55
	Z5PG15 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	15%	23.54	31,59	36.67
	Z5PG20 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	20%	20.73	26,21	30.76
	Z5PG50 42.5	Zeolite 5A	5%	Polv+Grana	50%	7.87	9,25	12.68
Z10PG_42.5	Z10PG0 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	0%	39.62	52,04	59.25
	Z10PG5 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	5%	36.83	44,84	49.68
	Z10PG10 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	10%	32.30	38,23	43.49
	Z10PG15 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	15%	27.05	33,82	39.24
	Z10PG20 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	20%	22.96	26,51	34.00
	Z10PG50 42.5	Zeolite 5A	10%	Polv+Grana	50%	9.61	10,62	14.72
Z15PG_42.5	Z15PG0 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	0%	40.66	50,36	52.50
	Z15PG5 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	5%	30.47	37,32	42.54
	Z15PG10 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	10%	23.49	27,39	36.56
	Z15PG15 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	15%	26.95	35,05	35.67
	Z15PG20 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	20%	21.13	26,05	31.75
	Z15PG50 42.5	Zeolite 5A	15%	Polv+Grana	50%	8.16	8,96	9.63

Tabella 6.15 - Resistenza a flessione dei provini realizzati con zeolite 5A e CEMII/A-S 42,5N

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	%aggiunta	Tipo gomma	%gomma	R.C. (kPa) a 2gg	R.C. (kPa) a 7gg	R.C. (kPa) a 28gg
S0PV_32.5	S0PV0 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	0%	11,22	28,23	41,09
	S0PV5 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	5%	9,62	22,83	35,02
	S0PV10 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	10%	7,43	21,38	30,33
	S0PV15 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	15%	6,45	16,36	27,20
	S0PV20 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	20%	5,60	8,36	22,20
	S0PV50 32.5	Silica Fume	0%	Polverino	50%	2,07	4,93	6,23
S5PV_32.5	S5PV0 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	0%	10,65	26,58	41,34
	S5PV5 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	5%	9,93	24,47	35,40
	S5PV10 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	10%	7,54	22,04	33,43
	S5PV15 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	15%	7,48	18,21	28,77
	S5PV20 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	20%	1,28	17,54	25,34
	S5PV50 32.5	Silica Fume	5%	Polverino	50%	1,44	3,15	7,95
S10PV_32.5	S10PV0 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	0%	8,31	32,20	47,77
	S10PV5 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	5%	10,35	18,03	31,17
	S10PV10 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	10%	8,90	20,07	27,64
	S10PV15 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	15%	7,00	16,48	23,44
	S10PV20 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	20%	6,93	15,03	19,94
	S10PV50 32.5	Silica Fume	10%	Polverino	50%	2,43	4,92	8,75
S15PV_32.5	S15PV0 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	0%	8,30	19,29	27,73
	S15PV5 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	5%	8,51	21,27	32,53
	S15PV10 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	10%	6,37	14,84	20,63
	S15PV15 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	15%	2,77	10,19	16,18
	S15PV20 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	20%	4,10	9,29	14,62
	S15PV50 32.5	Silica Fume	15%	Polverino	50%	0,42	5,29	7,31
S0GF_32.5	S0GF0 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	0%	11,22	28,23	41,09
	S0GF5 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	5%	8,47	23,54	26,40
	S0GF10 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	10%	5,33	22,23	29,66
	S0GF15 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	15%	6,52	17,80	26,99
	S0GF20 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	20%	5,83	16,57	24,57
	S0GF50 32.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	50%	1,57	6,98	10,86
S5GF_32.5	S5GF0 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	0%	10,65	26,58	31,34
	S5GF5 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	5%	9,94	23,36	38,10
	S5GF10 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	10%	7,55	22,91	31,11
	S5GF15 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	15%	5,38	20,82	28,45
	S5GF20 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	20%	4,31	17,98	26,16
	S5GF50 32.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	50%	2,36	7,62	11,44
S10GF_32.5	S10GF0 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	0%	8,31	32,20	47,77
	S10GF5 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	5%	7,48	30,81	34,58
	S10GF10 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	10%	6,69	20,69	34,58
	S10GF15 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	15%	5,32	18,86	31,41
	S10GF20 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	20%	5,15	16,63	29,16
	S10GF50 32.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	50%	2,57	7,79	13,22
S15GF_32.5	S15GF0 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	0%	8,30	19,29	27,73
	S15GF5 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	5%	12,49	23,71	37,44
	S15GF10 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	10%	10,44	23,70	28,74
	S15GF15 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	15%	10,08	23,10	29,15
	S15GF20 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	20%	8,08	17,54	23,95
	S15GF50 32.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	50%	5,38	10,04	11,88
S0PG_32.5	S0PG0 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	0%	11,22	28,23	41,09
	S0PG5 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	5%	5,51	17,53	35,51
	S0PG10 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	10%	5,03	16,60	32,47
	S0PG15 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	15%	4,23	12,79	27,66
	S0PG20 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	20%	4,41	13,64	24,55
	S0PG50 32.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	50%	1,71	5,98	10,30
S5PG_32.5	S5PG0 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	0%	10,65	26,58	33,34
	S5PG5 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	5%	10,60	22,25	30,60
	S5PG10 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	10%	10,51	23,90	28,34
	S5PG15 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	15%	7,48	13,02	18,17
	S5PG20 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	20%	11,53	13,72	15,68
	S5PG50 32.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	50%	3,37	7,80	10,06
S10PG_32.5	S10PG0 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	0%	8,31	32,20	47,77
	S10PG5 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	5%	8,71	18,39	28,08
	S10PG10 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	10%	3,89	8,32	24,89
	S10PG15 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	15%	9,42	12,49	28,41
	S10PG20 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	20%	7,87	15,28	24,58
	S10PG50 32.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	50%	3,19	5,89	10,37
S15PG_32.5	S15PG0 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	0%	8,30	19,29	27,73
	S15PG5 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	5%	9,76	19,10	27,21
	S15PG10 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	10%	5,23	15,44	17,44
	S15PG15 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	15%	7,38	14,61	20,11
	S15PG20 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	20%	6,90	15,17	15,63
	S15PG50 32.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	50%	3,30	6,83	8,11

Tabella 6.16- Resistenza a flessione dei provini realizzati con silica fume e CEMIII/A 32,5N

Nome serie	Nome miscela	Aggiunta	%aggiunta	Tipo gomma	%gomma	R.C. (MPa) a 2gg	R.C. (MPa) a 7gg	R.C. (MPa) a 28gg
S0PV_42.5	S0PV0 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	0%	28,26	41,45	53,47
	S0PV5 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	5%	21,59	33,48	41,93
	S0PV10 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	10%	19,13	27,95	35,10
	S0PV15 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	15%	15,85	21,10	28,47
	S0PV20 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	20%	13,66	18,94	25,36
	S0PV50 42.5	Silica Fume	0%	Polverino	50%	5,35	8,17	9,01
S5PV_42.5	S5PV0 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	0%	35,19	43,10	60,37
	S5PV5 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	5%	28,15	35,93	50,22
	S5PV10 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	10%	24,82	31,03	40,05
	S5PV15 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	15%	20,81	28,00	34,87
	S5PV20 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	20%	17,94	22,37	30,38
	S5PV50 42.5	Silica Fume	5%	Polverino	50%	6,16	8,31	10,89
S10PV_42.5	S10PV0 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	0%	37,74	46,26	64,97
	S10PV5 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	5%	31,69	40,07	53,84
	S10PV10 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	10%	28,08	34,71	47,47
	S10PV15 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	15%	22,75	29,08	38,86
	S10PV20 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	20%	19,82	25,09	32,69
	S10PV50 42.5	Silica Fume	10%	Polverino	50%	7,23	8,55	11,28
S15PV_42.5	S15PV0 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	0%	39,27	49,76	69,18
	S15PV5 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	5%	34,07	42,57	57,11
	S15PV10 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	10%	30,77	38,06	49,75
	S15PV15 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	15%	24,14	30,02	41,54
	S15PV20 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	20%	20,88	26,17	34,76
	S15PV50 42.5	Silica Fume	15%	Polverino	50%	6,04	8,38	10,48
S0GF_42.5	S0GF0 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	0%	28,26	41,45	53,47
	S0GF5 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	5%	21,59	33,48	46,43
	S0GF10 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	10%	20,56	30,38	39,27
	S0GF15 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	15%	16,20	25,24	33,05
	S0GF20 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	20%	13,23	22,48	27,41
	S0GF50 42.5	Silica Fume	0%	Grana Fine	50%	5,57	8,11	10,10
S5GF_42.5	S5GF0 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	0%	33,08	44,52	62,34
	S5GF5 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	5%	27,84	38,32	51,50
	S5GF10 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	10%	23,34	31,46	42,75
	S5GF15 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	15%	22,22	28,51	38,25
	S5GF20 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	20%	18,43	24,19	33,54
	S5GF50 42.5	Silica Fume	5%	Grana Fine	50%	8,13	9,53	11,98
S10GF_42.5	S10GF0 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	0%	35,44	48,37	66,20
	S10GF5 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	5%	29,65	42,73	57,51
	S10GF10 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	10%	26,85	36,97	51,46
	S10GF15 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	15%	23,77	31,82	42,38
	S10GF20 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	20%	20,61	26,59	36,19
	S10GF50 42.5	Silica Fume	10%	Grana Fine	50%	8,94	10,89	13,73
S15GF_42.5	S15GF0 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	0%	37,28	51,62	72,28
	S15GF5 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	5%	32,27	44,37	61,17
	S15GF10 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	10%	28,22	38,82	54,19
	S15GF15 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	15%	25,68	33,15	44,68
	S15GF20 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	20%	22,07	28,91	39,74
	S15GF50 42.5	Silica Fume	15%	Grana Fine	50%	9,05	12,00	15,24
S0PG_42.5	S0PG0 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	0%	28,26	41,45	53,47
	S0PG5 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	5%	24,18	35,27	47,02
	S0PG10 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	10%	20,44	30,00	38,22
	S0PG15 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	15%	19,33	27,03	34,73
	S0PG20 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	20%	15,37	22,06	28,19
	S0PG50 42.5	Silica Fume	0%	Polv+Grana	50%	6,23	8,86	10,63
S5PG_42.5	S5PG0 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	0%	33,55	46,34	62,03
	S5PG5 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	5%	27,28	39,63	52,96
	S5PG10 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	10%	23,17	33,33	44,43
	S5PG15 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	15%	21,53	29,52	38,23
	S5PG20 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	20%	18,16	24,58	30,64
	S5PG50 42.5	Silica Fume	5%	Polv+Grana	50%	6,29	8,75	10,88
S10PG_42.5	S10PG0 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	0%	35,68	49,62	65,07
	S10PG5 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	5%	28,45	42,39	56,12
	S10PG10 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	10%	25,09	35,97	48,78
	S10PG15 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	15%	22,70	31,23	40,91
	S10PG20 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	20%	19,15	27,77	34,57
	S10PG50 42.5	Silica Fume	10%	Polv+Grana	50%	7,80	10,27	12,41
S15PG_42.5	S15PG0 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	0%	36,90	52,25	69,70
	S15PG5 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	5%	29,98	44,08	57,89
	S15PG10 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	10%	27,96	39,55	51,35
	S15PG15 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	15%	23,72	34,38	42,55
	S15PG20 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	20%	21,57	29,16	36,18
	S15PG50 42.5	Silica Fume	15%	Polv+Grana	50%	8,69	10,90	13,49

Tabella 6.17 - Resistenza a compressione dei provini realizzati con silice fume e CEMII/A-S 42,5R

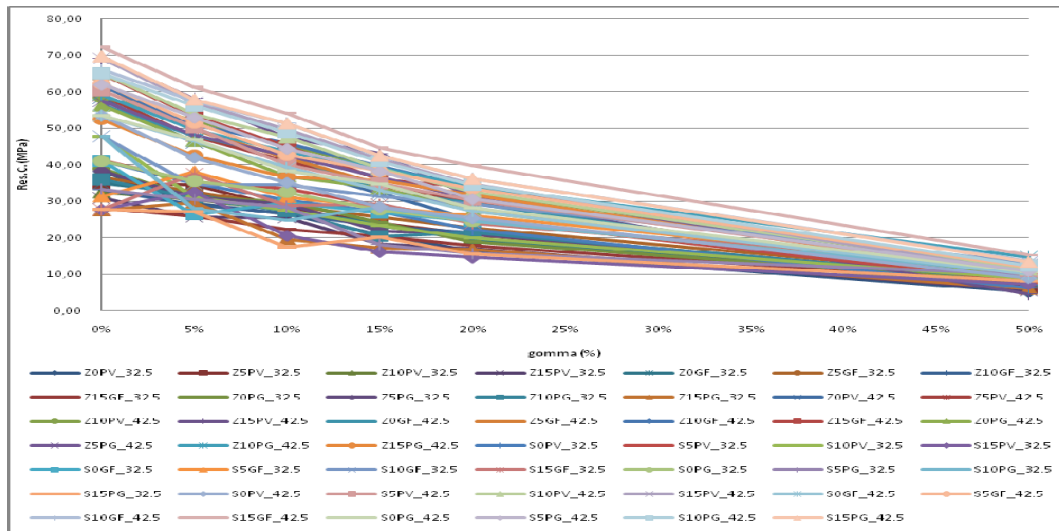


Figura 6.26 - Resistenza a compressione dei provini al variare della percentuale di gomma utilizzata

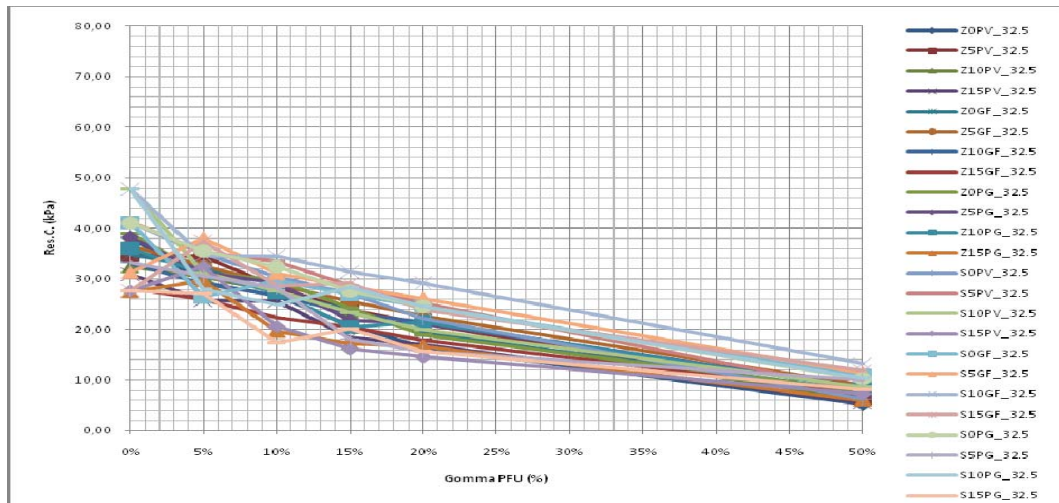


Figura 6.27- Andamento della resistenza a compressione dei provini realizzati con CEMIII/A 32,5N

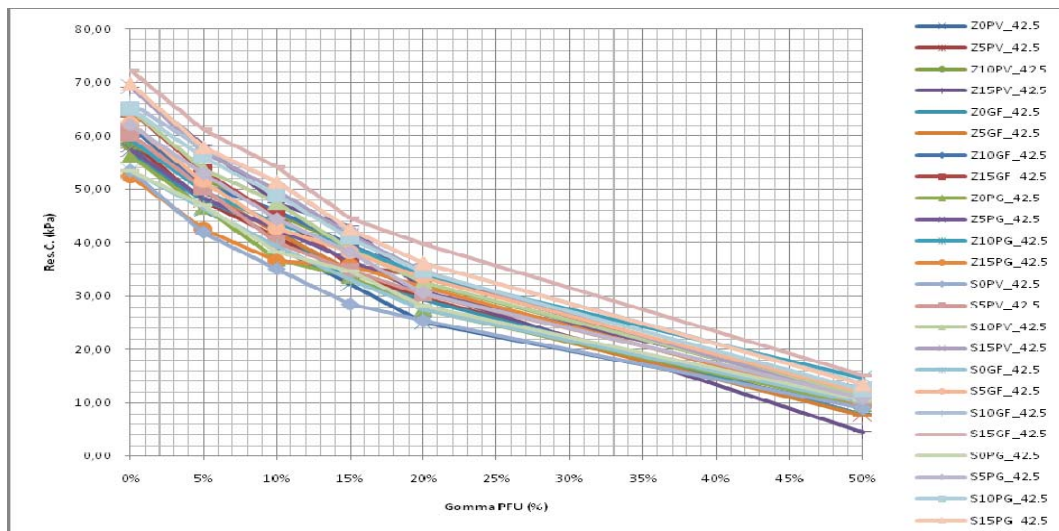


Figura 6.28- Andamento della resistenza a compressione dei provini realizzati con CEMII/A-S 42,5R

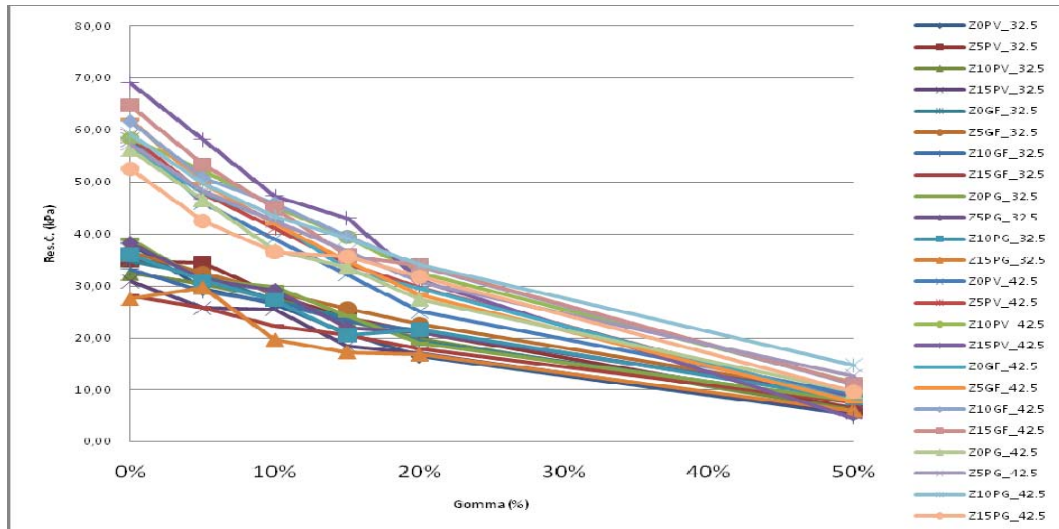


Figura 6.29 - Andamento della resistenza a compressione dei provini realizzati con zeolite 5A

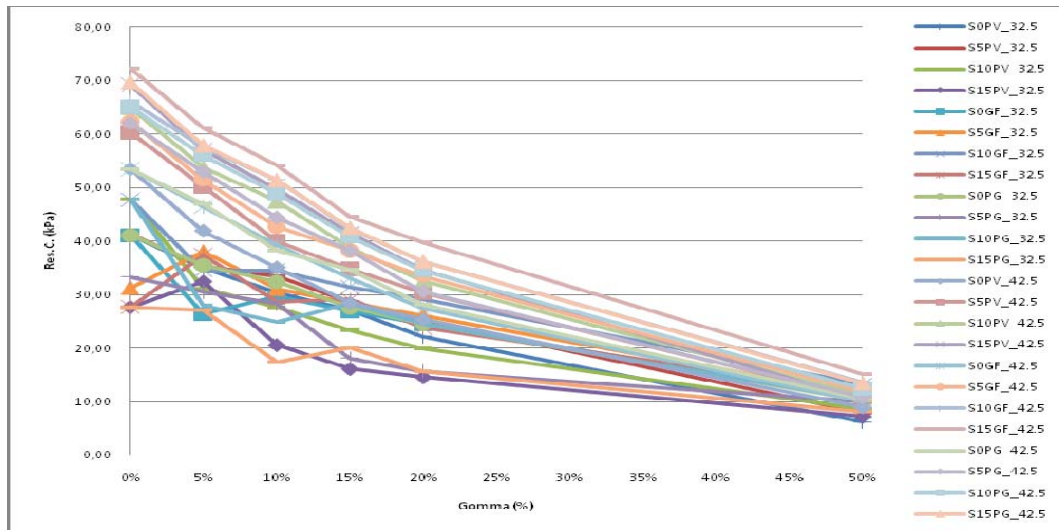


Figura 6.30 - Andamento della resistenza a compressione dei provini realizzati con silica fume

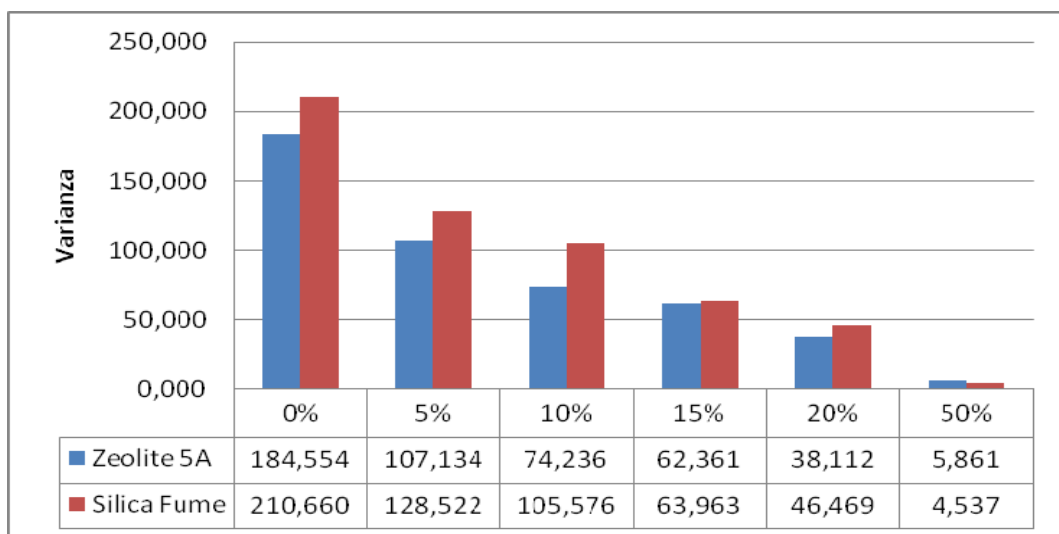


Figura 6.31 - Varianza della resistenza a compressione media

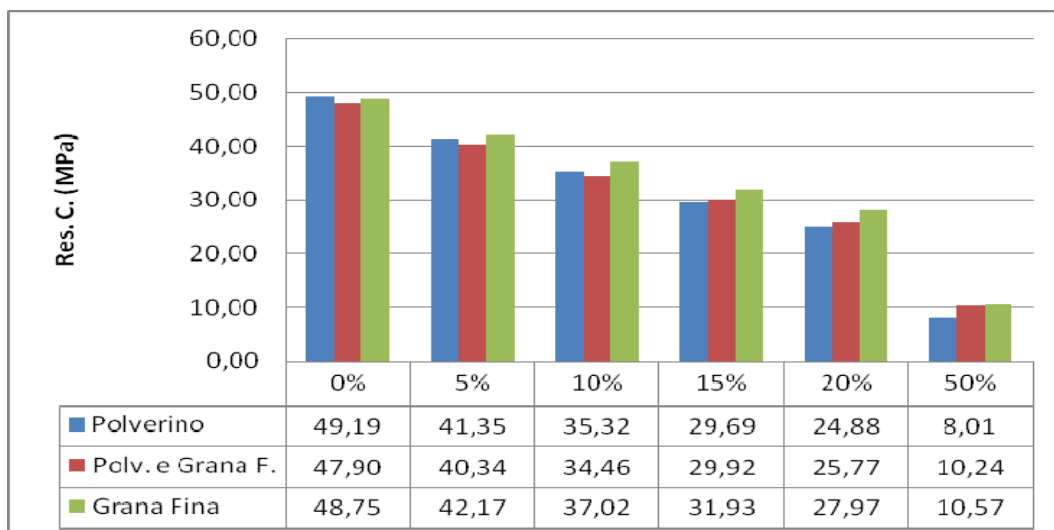


Figura 6.32 - Resistenza meccanica media in funzione della tipologia e della percentuale di gomma PFU somministrata all'impasto

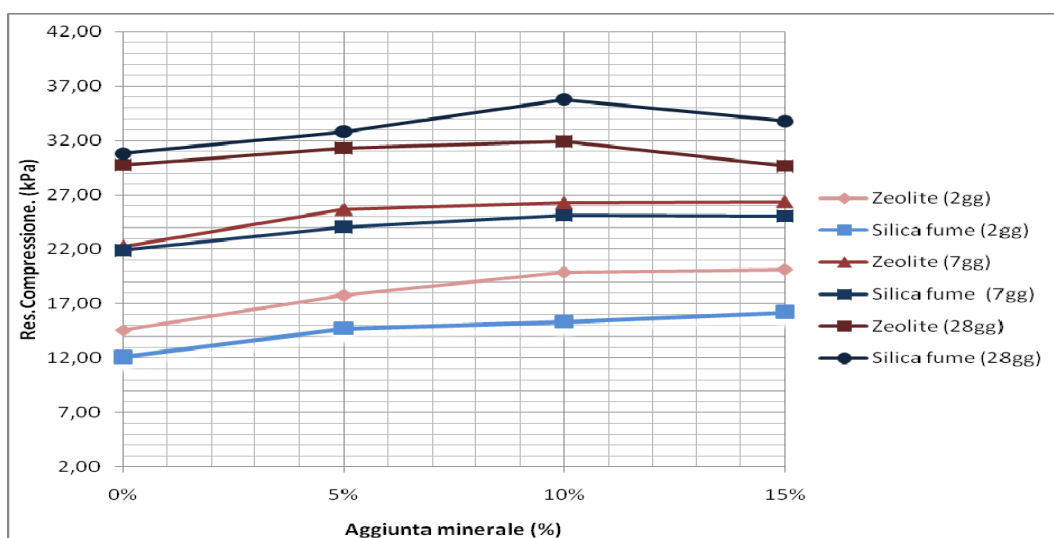


Figura 6.33 - Resistenza a compressione media in funzione della tipologia e della percentuale di aggiunta minerale somministrata all'impasto ai diversi tempi di stagionatura

Da un'attenta analisi del grafico sopra riportato, è emerso che alle brevi stagionature la zeolite consente di ottenere resistenza maggiori rispetto ai manufatti realizzati con silica fume. A 2 e a 7 giorni di stagionatura, cioè alle brevi stagionature, la zeolite si comporta come un additivo accelerante di indurimento. L'incremento di resistenza promosso dal silico alluminato idrato è più evidente a 2 giorni rispetto a 7 giorni di stagionatura. Alle medio - lunghe stagionature (28giorni) le due differenti aggiunte minerali influiscono pressoché in maniera analoga sulla resistenza flessionale anche se i provini realizzati con silica fume mostrano prestazioni meccaniche a compressione più elevate. La percentuale ottimale di aggiunta, sia per la zeolite che per la silica fume, è del 10% in aggiunta in peso rispetto al dosaggio di cemento. Per aggiunte superiori (15%) c'è una tendenza a diminuire dei valori di resistenza misurati, probabilmente a causa di una perdita di lavorabilità delle miscele allo stato fresco e, quindi, ad una difficoltà maggiore di messa in opera. A differenza di quanto valutato per le prove di resistenza meccanica a flessione, per la compressione non è possibile stimare, con sufficienti livelli di approssimazione, una sola curva di correlazione tra la resistenza meccanica a compressione e la percentuale di

gomma PFU somministrata nella miscela. Come è possibile verificare nel grafico seguente (figura 6.34), la stima di un'unica curva interpolatrice lineare non consente di ottenere, ad esempio, un alto valore del coefficiente di correlazione ed è chiaramente visibile che tale correlazione non approssima bene i punti del diagramma. E' opportuno stimare almeno due curve interpolatrici di tipo esponenziale in funzione della diversa classe di resistenza del cemento usata e. Nella figura 6.35 sono riportate le due curve interpolatrici stimate, con l'indicazione per ognuna del coefficiente di correlazione R^2 . La stima di due differenti curve interpolatrici ha consentito di ottenere buoni livelli di approssimazione, confermati da alti valori dell'indice di correlazione: 0.94 e 0.88 rispettivamente per miscele realizzate con cemento di classe di resistenza 42,5 e 32,5.

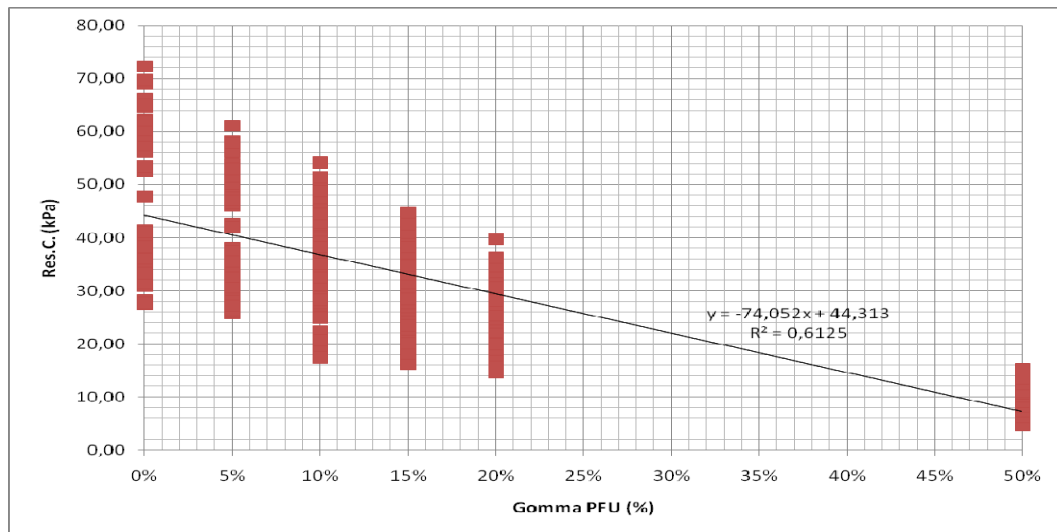


Figura 6.34 - Correlazione lineare tra la resistenza meccanica a compressione e la percentuale di gomma PFU somministrata all'impasto

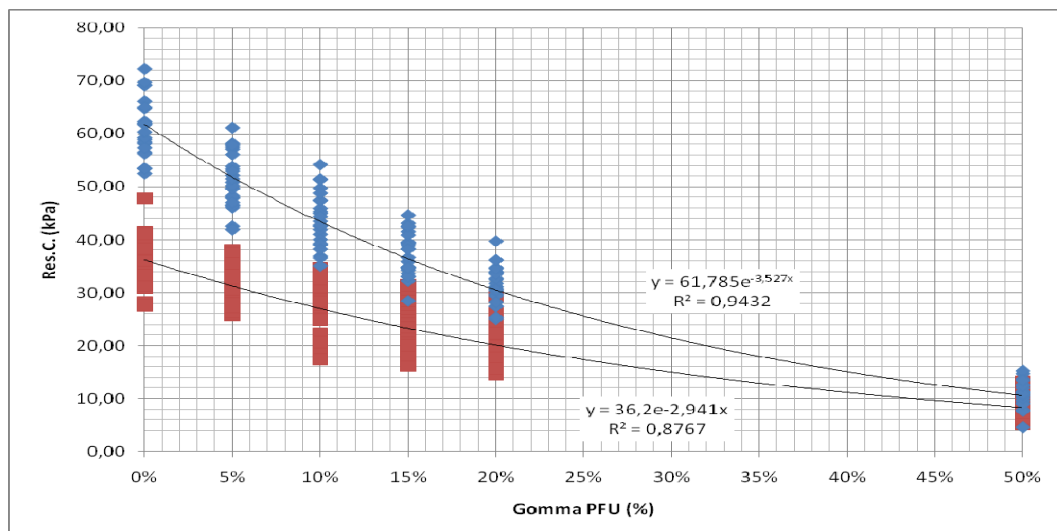


Figura 6.35 - Correlazioni tra la resistenza meccanica a compressione e la percentuale di gomma PFU somministrata all'impasto per tipologia di cemento

6.3 Miscele di malta di seconda serie

Al fine di ottimizzare i risultati ottenuti sulle miscele di prima serie soprattutto in termini di prestazioni meccaniche, si è pensato di confezionare delle malte cementizie identiche alle precedenti in termini di composizione (dosaggio e

tipologie di cemento, rapporto a/c, dosaggio e tipologia di sabbia, dosaggio di materiale PFU), ma diverse in termini di composizione granulometrica del materiale PFU somministrato. Quindi, invece di utilizzare una singola tipologia di gomma, polverino, grana fina oppure l'unione di polverino e grana, si è utilizzata una distribuzione granulometrica della gomma PFU simile alla curva granulometrica della sabbia usata negli impasti. Cioè si è ricostruita la curva granulometrica della sabbia con il materiale polimerico, per cui i vari impasti realizzati sono stati "uniformati" anche dal punto di vista granulometrico. Con gli impasti di prima serie si è verificato empiricamente che le diverse miscele di malta a parità di composizione, ma a diverse tipologie di gomma hanno manifestato livelli di lavorabilità diversa, forse dovuta alla diversa superficie di particelle da incollare: è noto che a parità di composizione in termini di dosaggio dei materiali ed al variare della dimensione dei grani dell'aggregato, le superfici da incollare da parte del legante variano notevolmente, così come cambiano le prestazioni meccaniche e la porosità del materiale. Ottimizzando la granulometria della gomma PFU si è cercato di ottimizzare ed uniformare queste caratteristiche delle malte con l'obiettivo di ottenere manufatti superiori dal punto di vista prestazionale. Ovviamente, ricostruire perfettamente la granulometria della sabbia sarebbe stata un'operazione troppo onerosa e non applicabile ingegneristicamente. Perciò l'attività è stata svolta utilizzando solamente 4 diverse frazioni granulometriche per il materiale PFU: trattenuto al diametro 4mm, trattenuto al diametro 2.8mm, trattenuto al diametro 1mm e passante al diametro 1mm. La composizione granulometrica della gomma utilizzata è riportata in tabella 6.18.

Frazione granulometrica	% in peso
PFU T4	2,3
PFU T2,8	4,4
PFU T1	34,8
PFU P1	58,5

Tabella 6.18 - Composizione granulometrica della gomma usata negli impasti di seconda serie

Per quanto riguarda i dosaggi del materiale PFU, oltre alla miscela senza gomma, sono stati utilizzati i dosaggi 5, 10 e 15% in sostituzione sul volume della sabbia, come per le miscele di prima serie. I dosaggi del 20% e 50%, considerati i risultati ottenuti negli impasti di prima serie, non sono stati ripetuti, in quanto tali dosaggi non hanno consentito l'ottenimento di manufatti utilizzabili in campo strutturale. In particolare, i manufatti realizzabili con tali dosaggi elevati di gomma PFU potrebbero essere utilizzati per scopi diversi, ad esempio malte leggere per riempitivi, materiale di alleggerimento strutturale, pannelli fono e termo isolanti non strutturali. I cementi utilizzati sono stati, come per le miscele di prima serie, CEM III/A 32,5N e CEM II/A-S 42,5R. Il confezionamento delle miscele è stato identico a quello utilizzato per le miscele di prima serie.

6.3.1 "Peso" delle miscele di seconda serie

Come per le malte di prima serie, anche per le malte di seconda serie è stata condotta un'analisi dei pesi dei provini. Nella seguente tabella 6.19 sono riportate le composizioni e l'indicazione dei pesi medi valutati per ogni miscela realizzata a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura. Nella figura 6.36 è evidenziato l'andamento dei pesi medi dei provini delle varie miscele realizzate in funzione dei diversi tempi di stagionatura.

Miscela	Tipo Cemento	% gomma PFU	Peso 2 gg (g)	Peso 7 gg (g)	Peso 28 gg (g)
M0_32.5	CEM III/A 32.5N	0%	593,0	596,7	602,3
M5_32.5	CEM III/A 32.5N	5%	577,8	582,4	588,8
M10_32.5	CEM III/A 32.5N	10%	568,1	568,5	578,4
M15_32.5	CEM III/A 32.5N	15%	554,0	561,8	561,9
M0_42.5	CEM II/A-S 42.5R	0%	599,4	602,4	604,7
M5_42.5	CEM II/A-S 42.5R	5%	590,1	594,8	595,9
M10_42.5	CEM II/A-S 42.5R	10%	561,3	567,5	583,3
M15_42.5	CEM II/A-S 42.5R	15%	557,6	559,0	562,7

Tabella 6.19 - Nomenclatura delle miscele di seconda serie eseguite e peso medio dei provini registrato alle diverse stagionature

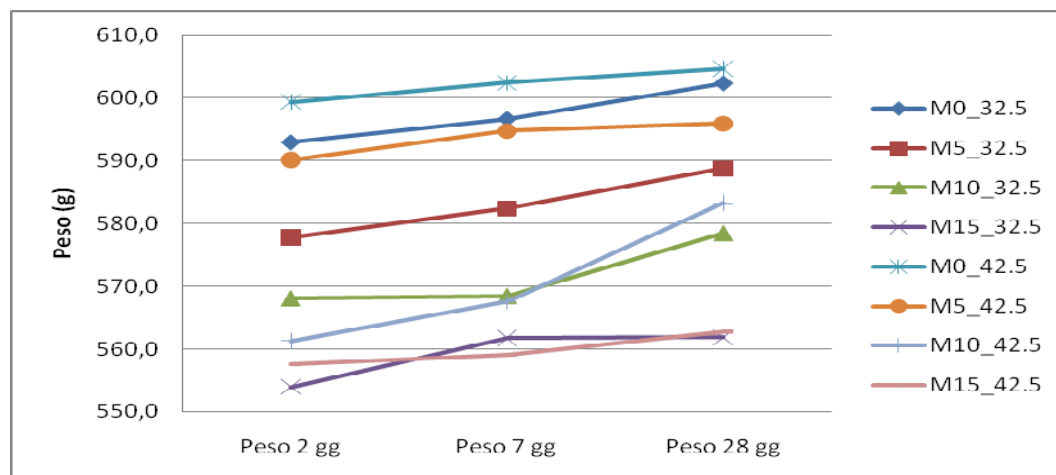


Figura 6.36 - Peso medio dei provini di seconda serie

Come evidenziato per le miscele di prima serie, all'aumentare dei giorni di stagionatura, il peso medio dei provini di ogni miscela tende ad aumentare, tale fenomeno è probabilmente dovuto ad un effetto di saturazione d'acqua dei provini stessi. E' evidente, inoltre, che ovviamente all'aumentare della percentuale di gomma usata nella miscela, si ha un'apprezzabile diminuzione del peso dei provini, mentre, come già notato nei provini di prima serie, non c'è una netta differenza di peso al variare della tipologia di cemento. Noti i valori di peso medio dei provini di seconda serie, si è proceduto con il confronto con i provini di prima serie per tipologia di cemento utilizzato. Nelle seguenti figure (figura 6.37 e 6.38) sono riportati gli andamenti dei pesi medi di prima e di seconda serie per tipologia di cemento. Naturalmente le miscele di prima serie prese in esame sono quelle confezionate senza aggiunta di minerale (zeolite e silice fume). Dall'analisi dei grafici sopra riportati è possibile evidenziare che entrambe le miscele di seconda serie (indicate con M_32.5 e M_42.5), realizzate con una curva granulometrica della gomma simile per costruzione a quella della sabbia presentano valori di peso medio sempre superiori ai rispettivi pesi medi valutati sugli impasti di prima serie. E' concepibile ipotizzare allora che grazie ad una giusta combinazione delle diverse frazioni granulometriche della gomma PFU è possibile realizzare, a parità di volume, manufatti più pesanti, per cui più compatti e probabilmente più durevoli. L'incremento di peso, tuttavia, non è eccessivo e non influisce sul raggiungimento dei requisiti di leggerezza dei provini. Per quanto riguarda la stima di una retta di correlazione tra peso e percentuale di gomma PFU occorre di dire che l'incremento di peso dei provini registrati sui provini di seconda serie non produce effetti significativi sulla retta stimata per le miscele di prima serie, per ciò è possibile estendere la retta di correlazione precedentemente valutata anche alle miscele di seconda serie.

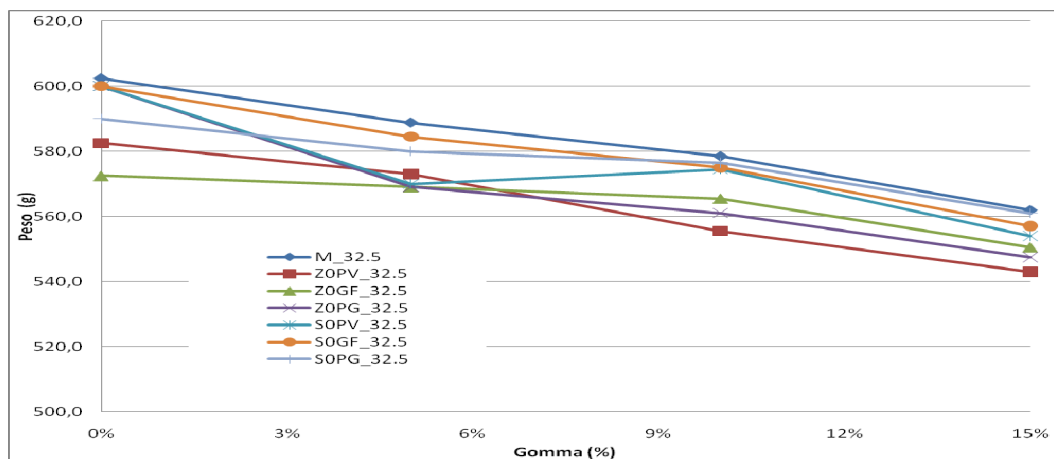


Figura 6.37- Confronto tra i pesi medi dei provini di prima e di seconda serie realizzati senza aggiunte minerali e con cemento CEM III/A 32,5N

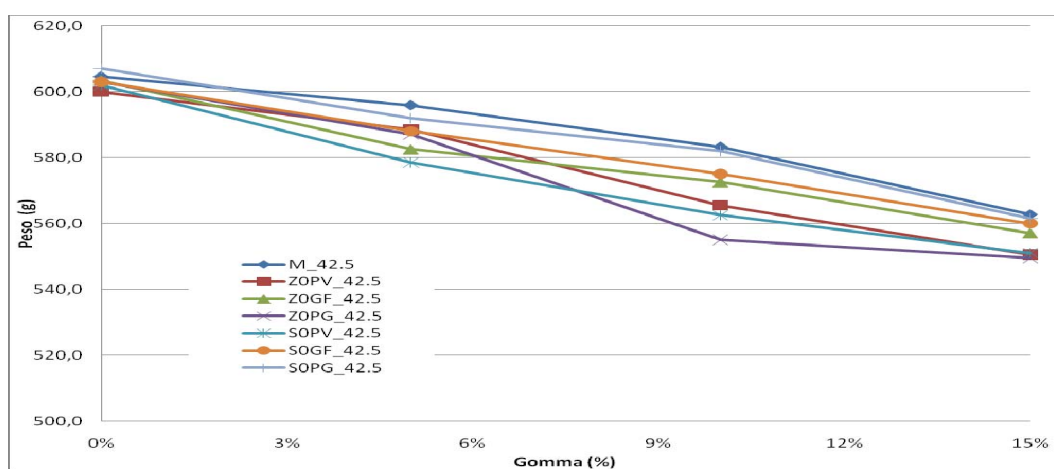


Figura 6.38 - Confronto tra i pesi medi dei provini di prima e di seconda serie realizzati senza aggiunte minerali e con cemento CEM II/A-S 42,5R

6.3.2 Resistenza a flessione delle miscele di seconda serie

Anche per le malte di seconda serie è stata condotta un'analisi sperimentale per valutare le prestazioni meccaniche in termini di resistenza a flessione. Nella seguente tabella 6.20 sono riportate le composizioni e l'indicazione delle resistenze a flessione medie valutate per ogni miscela realizzata a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura. Nella figura 6.39 è evidenziato l'andamento delle resistenze flessionali medie dei provini delle varie miscele realizzate in funzione dei diversi tempi di stagionatura. Ovviamente, man mano all'avanzare dei giorni di stagionatura si ha una crescita dei valori di resistenza meccanica a flessione, mentre tale caratteristica meccanica dei manufatti diminuisce all'aumentare del dosaggio di materiale PFU. Tendenzialmente la resistenza a flessione tende ad aumentare utilizzando una cemento con una classe di resistenza più elevata, anche se, come evidenziato per le miscele di prima serie, tale andamento non è ben delineato, soprattutto all'aumentare del dosaggio di materiale polimerico. Valutati i valori di resistenza flessionale dei provini di seconda serie, si è proceduto con il confronto con i provini di prima serie per tipologia di cemento utilizzato. Nelle seguenti figure (figura 6.40 e 6.41) sono riportati gli andamenti delle resistenze medie di prima e di seconda serie per tipologia di cemento. Naturalmente le miscele di prima serie prese in esame sono quelle confezionate senza aggiunta di minerale (cioè senza zeolite e silice fume).

Miscela	Tipo Cemento	% gomma PFU	R. Fl. 2 gg (kPa)	R. Fl. 7 gg (kPa)	R. Fl. 28 gg (kPa)
M0_32.5	CEM III/A 32.5N	0%	4,00	5,46	7,60
M5_32.5	CEM III/A 32.5N	5%	2,81	4,79	7,44
M10_32.5	CEM III/A 32.5N	10%	2,60	4,45	7,25
M15_32.5	CEM III/A 32.5N	15%	1,96	4,35	6,05
M0_42.5	CEM II/A-S 42.5R	0%	6,34	7,98	8,86
M5_42.5	CEM II/A-S 42.5R	5%	5,61	6,89	8,63
M10_42.5	CEM II/A-S 42.5R	10%	4,42	5,39	6,89
M15_42.5	CEM II/A-S 42.5R	15%	4,33	5,00	6,59

Tabella 6.20 - Resistenze a flessione medie dei provini registrate alle diverse stagionature

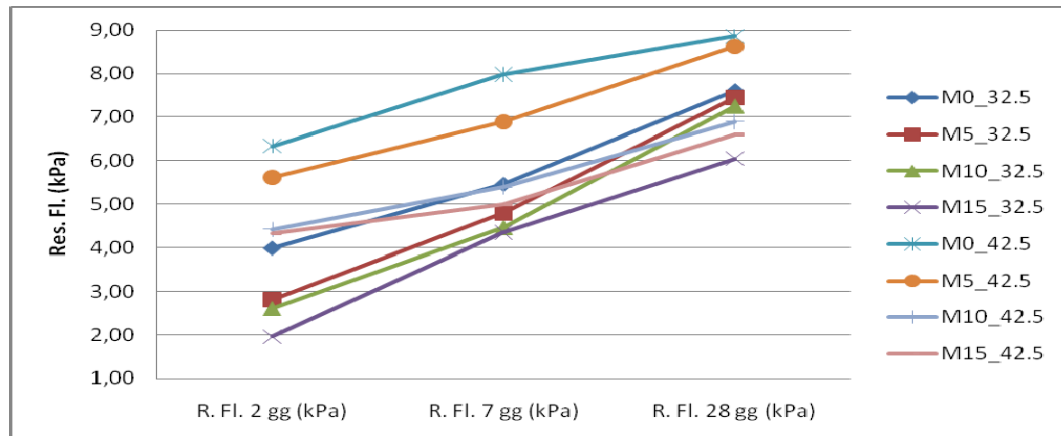


Figura 6.39 – Andamento delle resistenze a flessione medie dei provini di seconda serie

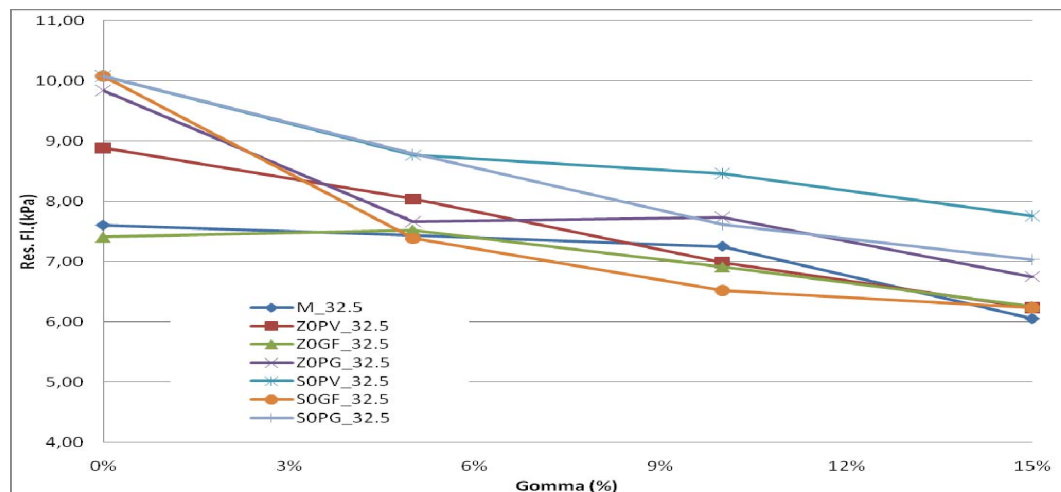


Figura 6.40 - Confronto tra le resistenze flessionali medie dei provini di prima e di seconda serie realizzati senza aggiunte minerali e con cemento CEM III/A 32.5N

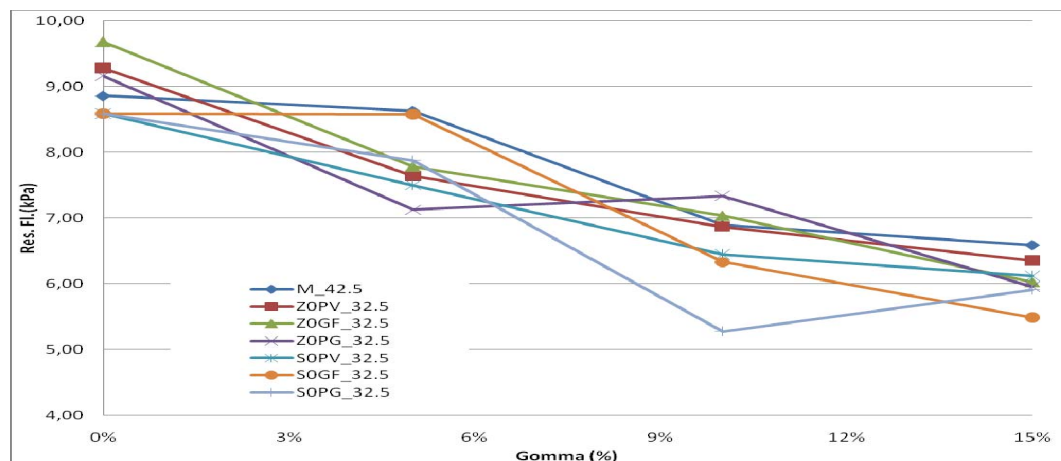


Figura 6.41 - Confronto tra le resistenze flessionali medie dei provini di prima e di seconda serie realizzati senza aggiunte minerali e con cemento CEM II/A-S 42,5R

Analizzando i grafici di cui sopra è stato possibile evidenziare che le miscele di seconda serie si comportano all'incirca come le miscele di prima serie. Cioè l'introduzione di materiale PFU distribuito granulometricamente come la sabbia, non sembra apportare significativi incrementi di resistenza flessionale nei manufatti. Un miglioramento della resistenza flessionale promosso dall'uso del materiale granulometrico PFU è stato apprezzato per le miscele realizzate con cemento CEM II/A-S 42,5R e con l'uso del 5% e del 15% di gomma. Per quanto riguarda la stima di una retta di correlazione tra resistenza flessionale e percentuale di gomma PFU occorre di dire i valori di resistenza flessionale dei provini di seconda serie non producono effetti significativi sulla retta stimata per le miscele di prima serie, per ciò è possibile estendere la retta di correlazione precedentemente valutata anche alle miscele di seconda serie, così come verificato con la grandezza "Peso".

6.3.3 Resistenza a compressione delle miscele di seconda serie

Dopo aver valutato il peso e la resistenza meccanica dei provini di seconda serie si è proceduto in maniera analoga a valutare la resistenza meccanica a compressione. Nella seguente tabella 6.21 sono riportate le composizioni e l'indicazione delle resistenze a compressione medie valutate per ogni miscela realizzata a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura. Nella figura 6.42 è evidenziato l'andamento delle resistenze a compressione medie dei provini delle varie miscele realizzate in funzione dei diversi tempi di stagionatura. Come per la resistenza a flessione, all'avanzare dei giorni di stagionatura si ha una crescita dei valori di resistenza meccanica a compressione, mentre tale caratteristica meccanica dei manufatti diminuisce all'aumentare del dosaggio di materiale PFU. La resistenza a compressione, inoltre, ha mostrato evidenti incrementi all'aumentare della classe di resistenza del cemento. A questo punto è stata fatta una comparazione tra i valori di resistenza a compressione dei provini di seconda serie con i provini di prima serie per tipologia di cemento utilizzato. Nelle seguenti figure (figura 6.43 e 6.44) sono riportati gli andamenti delle resistenze medie di prima e di seconda serie per tipologia di cemento. Le miscele di prima serie prese in esame, come per i confronti eseguiti sui pesi e le resistenze flessionali dei manufatti, sono quelle confezionate senza aggiunta di minerale (zeolite e silice fume). Dall'analisi dei diagrammi precedentemente riportati è emerso che le miscele di seconda serie si comportano all'incirca come le miscele di prima serie, anche se i valori di resistenza di queste miscele sono tra i più elevati. Nel dettaglio la miscela di seconda serie che ha evidenziato valori di resistenza meccanica a compressione più elevati rispetto alle rispettive di prima serie è stata quella realizzata con cemento CEM III/A 32,5N ed il 5% di gomma PFU. Infatti, nessuna delle miscele realizzate con lo stesso cemento e lo stesso quantitativo di gomma riesce a raggiungere lo stesso livello di resistenza. Negli altri casi le miscele realizzate con gomma PFU assortita granulometricamente all'incirca come quella della sabbia sono riuscite a raggiungere livelli di resistenza meccanica molto elevati al pari o poco inferiori rispetto alle migliori relative miscele degli impasti di prima serie. Tuttavia, l'incremento di resistenza valutato sulle miscele di seconda serie, non ha inciso significativamente e in maniera netta sui livelli di resistenza meccanica dei manufatti. Cioè gli andamenti di resistenza meccanica a compressione non sono "più elevati" rispetto alle migliori miscele di prima serie, dunque, per quanto riguarda la stima di una retta di correlazione tra resistenza a compressione e percentuale di gomma PFU occorre di dire che è possibile estendere la retta di

correlazione precedentemente valutata sulle miscele di prima serie anche alle miscele di seconda serie, così come verificato con le grandezze “Peso” e “Resistenza meccanica a flessione”.

Miscela	Tipo Cemento	% gomma PFU	R. Compr. 2 gg (MPa)	R. Compr. 7 gg (MPa)	R. Compr. 28 gg (MPa)
M0_32.5	CEM III/A 32.5N	0%	15,48	21,10	38,09
M5_32.5	CEM III/A 32.5N	5%	10,10	19,36	35,60
M10_32.5	CEM III/A 32.5N	10%	7,35	15,73	27,30
M15_32.5	CEM III/A 32.5N	15%	6,54	14,09	23,42
M0_42.5	CEM II/A-S 42.5R	0%	28,63	40,45	49,66
M5_42.5	CEM II/A-S 42.5R	5%	23,08	33,73	39,90
M10_42.5	CEM II/A-S 42.5R	10%	16,95	27,28	34,78
M15_42.5	CEM II/A-S 42.5R	15%	17,73	24,53	29,19

Tabella 6.21 - Resistenze a compressione medie dei provini registrate alle diverse stagionature

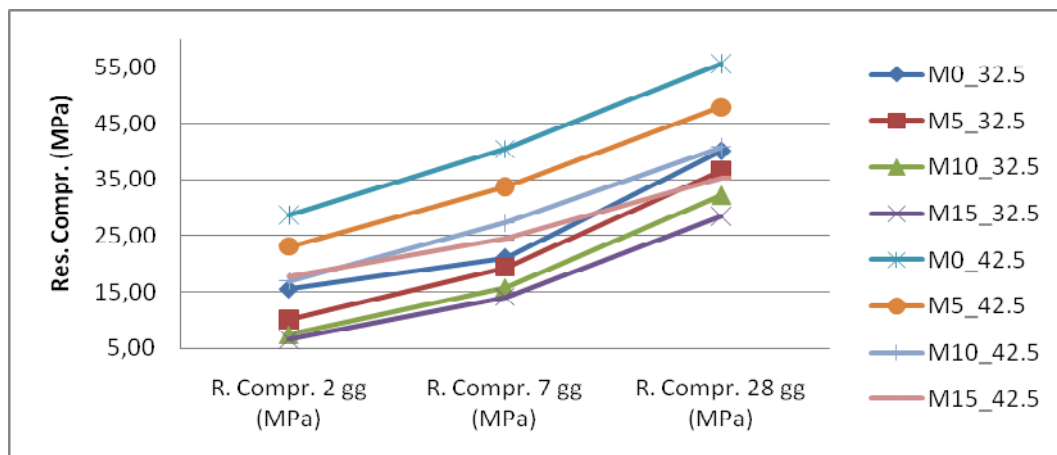


Figura 6.42 - Andamento delle resistenze a compressione medie dei provini di seconda serie

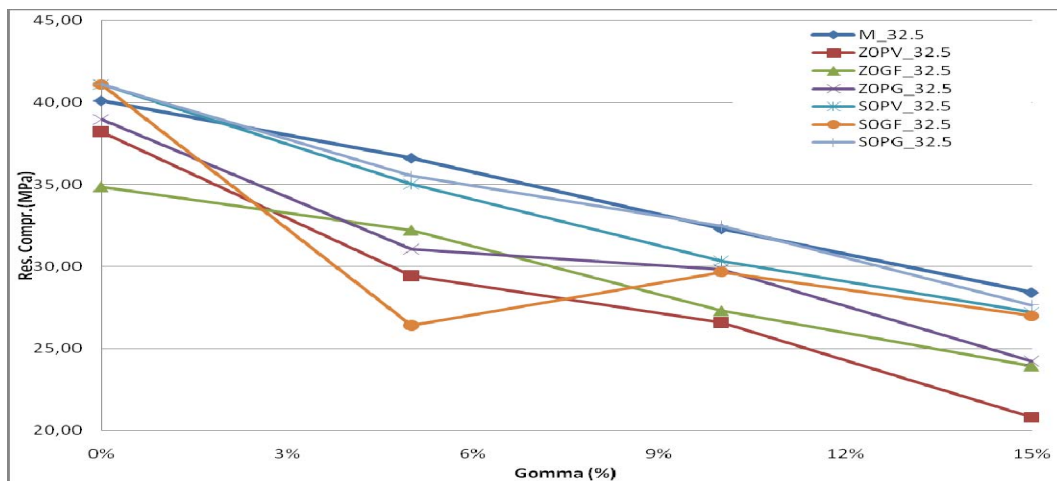


Figura 6.43 - Confronto tra le resistenze a compressione medie dei provini di prima e di seconda serie realizzati senza aggiunte minerali e con cemento CEM III/A 32.5N

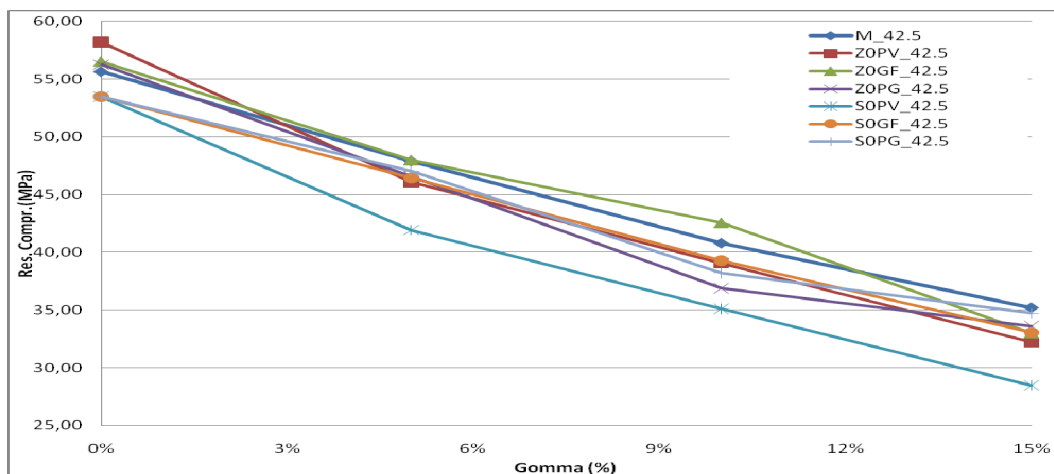


Figura 6.44 - Confronto tra le resistenze a compressione medie dei provini di prima e di seconda serie realizzati senza aggiunte minerali e con cemento CEM II/A-S 42,5R

6.4 Miscele di malta di terza serie

Per ottimizzare ulteriormente i risultati meccanici ottenuti si è proceduto con il confezionamento di nuove miscele di malta cementizia: “Malte di terza serie”. La particolarità di queste malte è stata che si è effettuato sul materiale polimerico un trattamento termico in stufa a 120°C per 12 ore al fine di provocare nello stesso un effetto di “ingottimento” per cercare di incrementare ulteriormente le prestazioni meccaniche. A differenza delle miscele di seconda serie, nelle miscele di terza serie si è provveduto a confezionare anche delle miscele con l’aggiunta mineraria della zeolite 5A e si è cercato di ottimizzare ulteriormente il mix design delle miscele cambiando opportunamente la distribuzione granulometrica della sabbia e, di conseguenza, della gomma utilizzata negli impasti. Si è rinunciato all’utilizzo del cemento di classe di resistenza 42,5 in quanto, come constatato per le miscele di prima e seconda serie, l’incremento di prestazioni meccaniche registrate nei manufatti realizzati non giustifica il suo utilizzo soprattutto a livello economico, per cui in questa terza fase di indagine si è optato per l’uso di due cementi di classe 32,5, il primo a normale indurimento, l’altro a rapido indurimento. In particolare, per il confezionamento delle miscele di terza serie sono stati utilizzati i seguenti materiali:

- Cementi CEM III/A 32,5N e CEM II/A-LL 32,5R;
- Acqua potabile a temperatura ambiente, priva di sostanze dannose ed in quantità tali da fornire un rapporto a/c pari a 0,5;
- Sabbia, e stata utilizzata una sabbia di facile reperibilità sul territorio cosentino, avente diametro massimo 4 mm;
- Gomma PFU utilizzata in sostituzione percentuale al volume di sabbia, distribuita secondo la curva granulometrica della sabbia. Le percentuali di gomma PFU utilizzata in sostituzione al volume di sabbia sono state: 0%, 5%, 10%, 15 %;
- Zeolite tipo 5A, aggiunta in peso al cemento in percentuali pari a 0%, 5%, 10 %, 15 %.

Dall’analisi della curva granulometrica della sabbia è emerso che una buona approssimazione è possibile ottenerla utilizzando tre frazioni di gomma PFU così distribuite:

- 3,22 % di T4 (trattenuto al setaccio 4 mm);
- 8,52 % di T2,8 (trattenuto al setaccio 2,8 mm);
- 38,26 % di T1 (trattenuto al setaccio 1 mm);

- 50,22 % di P1 (passante al setaccio 1 mm).

Nelle tabelle che seguono (tabelle 6.22-6.29) sono riportate le miscele realizzate al variare della percentuale di zeolite e della gomma PFU, in termini di dosaggio per componente, sufficiente a realizzare tre provini di malta di dimensioni 40mm x 40mm x 160mm.

Zeol. 0%	Cem.[gr]	Sab[gr]	Acqua[gr]	G.nat[gr]	T4[gr]	T2,8[gr]	T1[gr]	P1[gr]
G.naturale 0%	450	1350	225	0	0	0	0	0
G.naturale 5%	450	1282,5	225	25,47	0,85	2,26	10,22	13,42
G.naturale 10%	450	1215	225	53,49	1,69	4,53	20,43	26,83
G.naturale 15%	450	1147,5	225	80,24	2,54	6,79	30,66	40,25

Tabella 6.22 - Miscele realizzate senza zeolite al variare della percentuale di gomma naturale

Zeol. 5%=[22,5gr]	Cem.[gr]	Sab[gr]	Acqua[gr]	G.nat[gr]	T4[gr]	T2,8[gr]	T1[gr]	P1[gr]
G.naturale 0%	450	1350	225	0	0	0	0	0
G.naturale 5%	450	1282,5	225	25,47	0,85	2,26	10,22	13,42
G.naturale 10%	450	1215	225	53,49	1,69	4,53	20,43	26,83
G.naturale 15%	450	1147,5	225	80,24	2,54	6,79	30,66	40,25

Tabella 6.23 - Miscele realizzate con il 5% di zeolite al variare della percentuale di gomma naturale

Zeol. 10%=[45gr]	Cem.[gr]	Sab[gr]	Acqua[gr]	G.nat[gr]	T4[gr]	T2,8[gr]	T1[gr]	P1[gr]
G.naturale 0%	450	1350	225	0	0	0	0	0
G.naturale 5%	450	1282,5	225	25,47	0,85	2,26	10,22	13,42
G.naturale 10%	450	1215	225	53,49	1,69	4,53	20,43	26,83
G.naturale 15%	450	1147,5	225	80,24	2,54	6,79	30,66	40,25

Tabella 6.24 - Miscele realizzate con il 10% di zeolite al variare della percentuale di gomma naturale

Zeol. 15%=[67,5gr]	Cem.[gr]	Sab[gr]	Acqua[gr]	G.nat[gr]	T4[gr]	T2,8[gr]	T1[gr]	P1[gr]
G.naturale 0%	450	1350	225	0	0	0	0	0
G.naturale 5%	450	1282,5	225	25,47	0,85	2,26	10,22	13,42
G.naturale 10%	450	1215	225	53,49	1,69	4,53	20,43	26,83
G.naturale 15%	450	1147,5	225	80,24	2,54	6,79	30,66	40,25

Tabella 6.25 - Miscele realizzate con il 15% di zeolite al variare della percentuale di gomma naturale

Zeol. 0%	Cem.[gr]	Sab.[gr]	Acqua[gr]	G.trat[gr]	T4[gr]	T2,8[gr]	T1[gr]	P1[gr]
G.trattata 0%	450	1350	225	0	0	0	0	0
G.trattata 5%	450	1282,5	225	29,04	0,92	2,46	11,09	14,57
G.trattata 10%	450	1215	225	58,07	1,84	4,92	22,19	29,13
G.trattata 15%	450	1147,5	225	87,12	2,76	7,37	33,28	43,7

Tabella 6.26 - Miscele realizzate senza zeolite al variare della percentuale di gomma trattata

Zeol. 5%=[22,5gr]	Cem.[gr]	Sab.[gr]	Acqua[gr]	G.trat[gr]	T4[gr]	T2,8[gr]	T1[gr]	P1[gr]
G.trattata 0%	450	1350	225	0	0	0	0	0
G.trattata 5%	450	1282,5	225	29,04	0,92	2,46	11,09	14,57
G.trattata 10%	450	1215	225	58,07	1,84	4,92	22,19	29,13
G.trattata 15%	450	1147,5	225	87,12	2,76	7,37	33,28	43,7

Tabella 6.27 - Miscele realizzate con il 5% di zeolite al variare della percentuale di gomma trattata

Zeo.10%=[45gr]	Cem.[gr]	Sab.[gr]	Acqua[gr]	G.trat[gr]	T4[gr]	T2,8[gr]	T1[gr]	PI[gr]
G.trattata 0%	450	1350	225	0	0	0	0	0
G.trattata 5%	450	1282,5	225	29,04	0,92	2,46	11,09	14,57
G.trattata 10%	450	1215	225	58,07	1,84	4,92	22,19	29,13
G.trattata 15%	450	1147,5	225	87,12	2,76	7,37	33,28	43,7

Tabella 6.28 - Miscele realizzate con il 10% di zeolite al variare della percentuale di gomma trattata

Zeo.15%=[67,5gr]	Cem.[gr]	Sab.[gr]	Acqua[gr]	G.trat[gr]	T4[gr]	T2,8[gr]	T1[gr]	PI[gr]
G.trattata 0%	450	1350	225	0	0	0	0	0
G.trattata 5%	450	1282,5	225	29,04	0,92	2,46	11,09	14,57
G.trattata 10%	450	1215	225	58,07	1,84	4,92	22,19	29,13
G.trattata 15%	450	1147,5	225	87,12	2,76	7,37	33,28	43,7

Tabella 6.29 - Miscele realizzate con il 15% di zeolite al variare della percentuale di gomma trattata

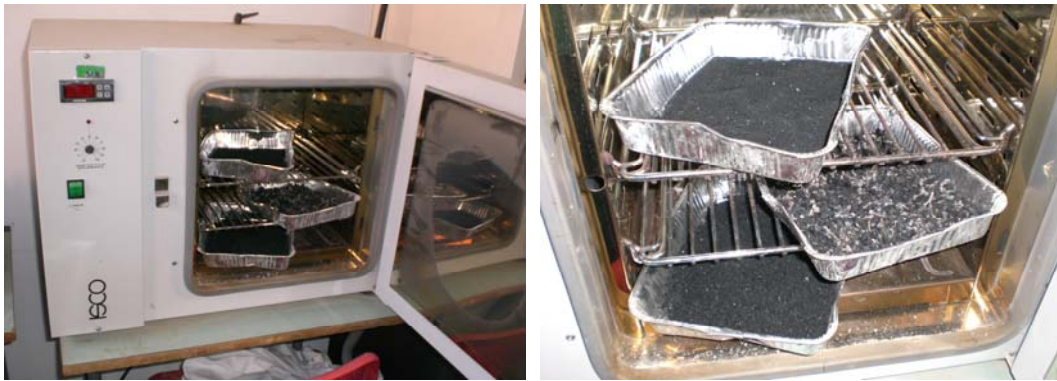


Figura 6.45 – Gomma PFU trattata termicamente



Figura 6.46 - Stagionatura di alcuni provini di terza serie



Figura 6.47 – Alcuni provini di terza serie



Figura 6.48 – Particolari di alcune sezioni dei provini di terza serie

6.4.1 Preparazione dei provini delle miscele di terza serie

I provini, di forma prismatica, hanno dimensioni 40 mm×40mm×160 mm e sono stati formati subito dopo la preparazione della malta. Lo stampo è costituito da tre scomparti orizzontali in modo da consentire la preparazione contemporanea di 3 provini. Preparata la miscela, essa è stata introdotta negli appositi scomparti mediante una paletta, fino ad ottenere uno strato pari all'incirca a metà del provino; successivamente si è proceduto alla prima compattazione effettuata, rispettivamente, con 15 colpi di pestello e 30 battute a terra. Infine, si sono riempiti gli stampi con la restante parte di miscela rimasta nella bacinella e, analogamente al primo strato, si è effettuata una seconda compattazione, invertendo l'ordine delle operazioni, tramite 30 battute a terra e 15 colpi col pestello. A compattazione avvenuta si è effettuata la lisciatura della malta in eccesso mediante una spatola, fino ad ottenere un'altezza dei provini pari a quella degli scomparti. Le operazioni conclusive sono quelle relative alle etichettature per identificare i provini ed alla collocazione di pellicole di materiale impermeabile. Un'osservazione che è opportuno sottolineare è quella inerente alla compattazione: dato che la normativa vigente per la caratterizzazione meccanica dei cementi stabilisce che la procedura standard sia di 60 scosse per strato, nel nostro caso tale procedura risultava essere inadeguata, in quanto la gomma avrebbe avuto una tendenza al galleggiamento sulla matrice cementizia. Una volta preparati, ciascuno stampo si è coperto da una pellicola impermeabile, si è posto su una base orizzontale e si è accertato che la temperatura rimanesse costante a circa 20°C e l'umidità non inferiore al 90%. I provini sono stati sformati dopo 24 h e subito marcati opportunamente per la stagionatura in acqua al fine di consentirne l'identificazione successiva. A questo punto, sono stati immersi,

rapidamente in acqua a 20°C, e disposti orizzontalmente. Infine, sono stati tolti dall'acqua e fatti asciugare per circa 90 minuti prima dell'esecuzione delle prove meccaniche.

6.4.2 Analisi del peso dei provini di terza serie

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori medi di peso dei provini realizzati nella terza campagna di indagine. Nella figura 6.48 è rappresentato l'andamento del peso medio dei provini per ogni miscela realizzata alle diverse stagionature esaminate in funzione della percentuale di zeolite somministrata ai vari impasti.

Dal grafico in figura 6.48 è stato constatato che il dosaggio di zeolite provoca ad ogni tempo di stagionatura considerato una variazione del peso medio dei manufatti prismatici. In particolare, tale incremento si può riscontrare fino ad una percentuale di aggiunta di materiale microporoso zeolitico del 10%. Per un dosaggio superiore al 10% inizia ad esserci una diminuzione di peso, probabilmente dovuta ad una perdita di lavorabilità dell'impasto, quindi maggiore difficoltà a mettere in opera il conglomerato cementizio. Avendo eseguito delle miscele pressochè analoghe dal punto di vista dell'energia di costipazione, le miscele confezionate con un elevato dosaggio di zeolite (15%), richiedendo un livello di energia meccanica più elevato per la corretta messa in opera delle stesse, hanno esibito dei pesi medi più bassi presumibilmente proprio a causa di questo fenomeno. Le miscele che hanno esibito una maggiore densità (quindi maggiore compattezza sinonimo molto spesso di maggiore durabilità) sono state quelle confezionate con il 10% di zeolite. Come per le miscele di prima e di seconda serie anche con le miscele di terza serie è stato osservato un incremento del peso medio dei manufatti all'aumentare dei giorni di stagionatura, quasi certamente dovuto al crescere del livello di saturazione dei provini al crescere dei giorni di stagionatura. Inoltre, è stata compiuta una ulteriore analisi del peso medio dei provini: si è valutata l'influenza della gomma PFU su tale grandezza fisica. Nella figura 6.49 seguente sono riportati gli andamenti del peso medio delle singole miscele in funzione del quantitativo di gomma usata. Come è stato possibile osservare, appare evidente che anche per le miscele di terza serie, all'aumentare della percentuale di gomma usata si ha una proporzionale perdita di peso dei manufatti e come per le precedenti miscele tale andamento appare piuttosto netto tale da essere ben approssimato da una retta di interpolazione lineare, analoga a quella stimata per le miscele di prima serie. E' stato poi verificata l'influenza della tipologia di gomma (naturale e trattata termicamente). In base ai dati sperimentali registrati, il peso medio a 28 giorni di stagionatura non sembra essere influenzato significativamente dalle caratteristiche della gomma, anche se i manufatti realizzati con gomma trattata termicamente hanno manifestato valori di peso più elevati all'aumentare del dosaggio di gomma somministrata all'impasto. Nel grafico seguente (figura 6.50) sono stati riportati gli andamenti del peso medio dei provini realizzati con gomma PFU naturale e trattata termicamente. Le curve di correlazione peso-percentuale di gomma PFU stimate per le miscele di prima serie possono essere utilizzate anche per la terza serie di miscele realizzate.

Zeolite		0%			
Gomma Trattata		0%	5%	10%	15%
Peso	2[giorni]	576,00	572,00	564,50	552,75
	7[giorni]	583,00	564,75	556,00	551,50
	28[giorni]	587,17	576,00	560,50	553,75
Zeolite		5%			
Gomma Trattata		0%	5%	10%	15%
Peso	2[giorni]	579,50	571,25	560,50	545,50
	7[giorni]	584,25	575,75	568,00	557,75
	28[giorni]	587,00	582,00	576,50	560,00
Zeolite		10%			
Gomma Trattata		0%	5%	10%	15%
Peso	2[giorni]	582,00	576,00	568,75	559,25
	7[giorni]	591,75	576,50	568,75	566,75
	28[giorni]	595,25	581,00	573,50	568,75
Zeolite		15%			
Gomma Trattata		0%	5%	10%	15%
Peso	2[giorni]	581,75	569,00	559,50	547,25
	7[giorni]	580,75	575,25	565,00	553,00
	28[giorni]	586,25	575,50	567,25	555,25

Zeolite		0%			
Gomma Naturale		0%	5%	10%	15%
Peso	2[giorni]	576,00	570,25	557,00	537,00
	7[giorni]	583,00	582,75	565,50	550,25
	28[giorni]	587,17	586,75	573,50	549,75
Zeolite		5%			
Gomma Naturale		0%	5%	10%	15%
Peso	2[giorni]	579,50	569,50	559,75	537,00
	7[giorni]	584,25	577,75	568,25	556,50
	28[giorni]	587,00	576,00	567,50	558,50
Zeolite		10%			
Gomma Naturale		0%	5%	10%	15%
Peso	2[giorni]	582,00	569,75	551,50	541,75
	7[giorni]	591,75	579,50	562,75	556,50
	28[giorni]	595,25	583,50	565,00	560,75
Zeolite		15%			
Gomma Naturale		0%	5%	10%	15%
Peso	2[giorni]	581,75	572,75	559,00	549,75
	7[giorni]	580,75	578,00	562,75	550,50
	28[giorni]	586,25	577,75	563,75	554,25

Tabella 6.30 - Peso medio dei provini di terza serie confezionati con cemento CEM III/A 32,5N

Zeolite		0%				
Gomma Trattata		0%	5%	10%	15%	
Peso	2	giorni	578,50	562,00	551,50	540,25
	7	giorni	591,25	571,25	563,00	560,75
	28	giorni	597,50	578,00	570,75	565,25
Zeolite		5%				
Gomma Trattata		0%	5%	10%	15%	
Peso	2	giorni	591,00	563,62	560,00	540,75
	7	giorni	590,00	580,00	565,75	554,75
	28	giorni	592,75	585,25	576,75	561,00
Zeolite		10%				
Gomma Trattata		0%	5%	10%	15%	
Peso	2	giorni	583,00	578,00	557,00	549,25
	7	giorni	589,75	579,50	565,25	560,25
	28	giorni	602,25	588,00	571,00	562,25
Zeolite		15%				
Gomma Trattata		0%	5%	10%	15%	
Peso	2	giorni	582,25	581,75	568,25	554,00
	7	giorni	590,00	578,25	568,25	555,25
	28	giorni	599,50	581,75	571,75	558,50

Zeolite		0%				
Gomma Naturale		0%	5%	10%	15%	
Peso	2	giorni	578,50	570,00	553,25	544,75
	7	giorni	591,25	573,50	560,75	552,50
	28	giorni	597,50	583,25	565,75	555,50
Zeolite		5%				
Gomma Naturale		0%	5%	10%	15%	
Peso	2	giorni	591,00	564,00	555,50	534,50
	7	giorni	590,00	577,00	566,75	552,25
	28	giorni	592,75	581,75	570,75	552,00
Zeolite		10%				
Gomma Naturale		0%	5%	10%	15%	
Peso	2	giorni	583,00	570,25	557,25	551,00
	7	giorni	589,75	582,50	570,25	561,75
	28	giorni	602,25	578,25	567,55	566,25
Zeolite		15%				
Gomma Naturale		0%	5%	10%	15%	
Peso	2	giorni	582,25	575,75	563,00	552,00
	7	giorni	590,00	580,75	566,25	553,25
	28	giorni	599,50	583,25	566,50	557,00

Tabella 6.31 - Peso medio dei provini di terza serie confezionati con cemento CEM II/A-LI 32,5R

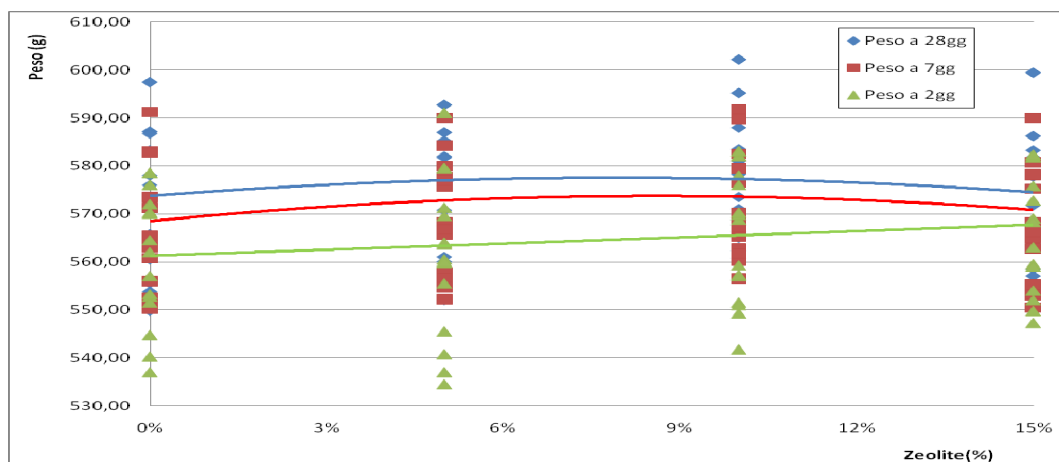


Figura 6.48 - Peso medio dei provini in funzione del dosaggio di zeolite alle diverse stagionature con relative curve di interpolazione polinomiale del secondo ordine che ne stima l'andamento

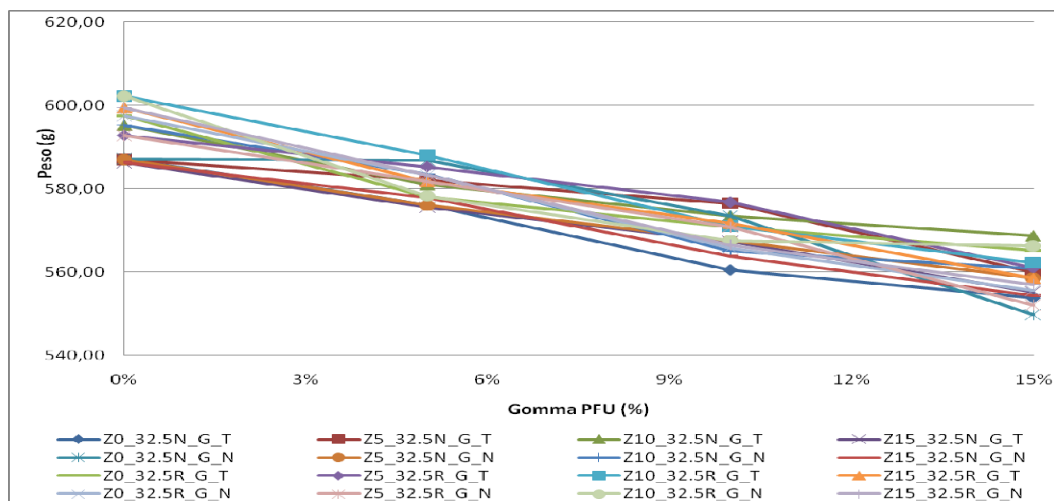


Figura 6.49 - Peso medio dei provini in funzione del quantitativo di gomma PFU utilizzata

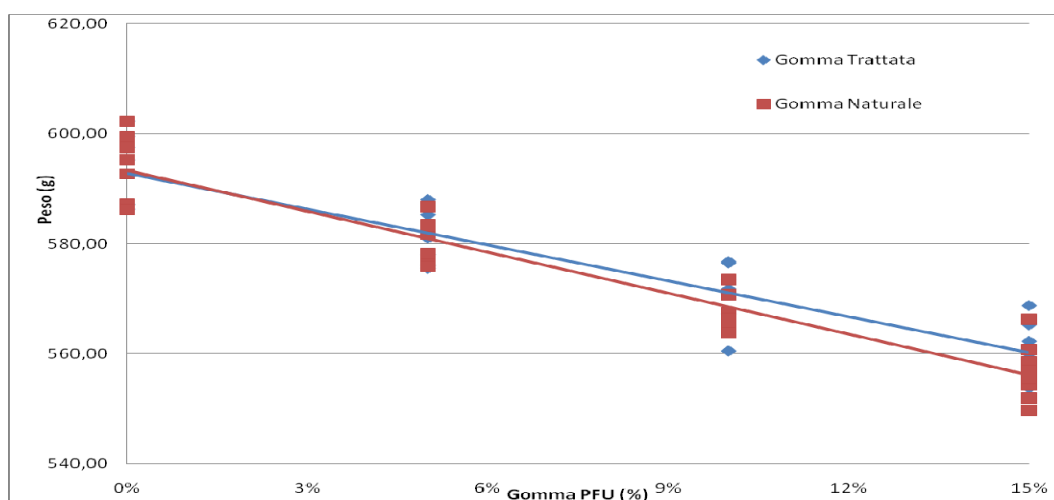


Figura 6.50 - Andamento del peso medio dei provini in funzione del dosaggio e della tipologia di gomma PFU

6.4.3 Resistenza a flessione malte di terza serie

La resistenza meccanica a flessione è stata valutata per tutte le miscele realizzate nella terza serie a diversi tempi di stagionatura (2, 7 e 28 giorni). Per ognuna di queste miscele sono state effettuate diverse prove e i risultati persi in considerazione sono ovviamente i valori medi. Nella seguente tabella 6.32 sono riportati i risultati medi ottenuti a seguito di prove meccaniche di flessione. Anche con la resistenza a flessione si è provveduto a valutare l'influenza dell'aggiunta di zeolite negli impasti. Come confermato dal grafico in figura 6.51, la zeolite ha permesso l'ottenimento di valori di resistenza flessionali più elevati all'aumentare del suo utilizzo nella miscela, indifferentemente del dosaggio e dalla tipologia di gomma. Dal punto di vista prestazionale è conveniente, comunque, non superare la percentuale del 10% in aggiunta al peso del cemento, in quanto gli incrementi di resistenza meccanica, in questo caso, a flessione non ne giustificerebbero l'utilizzo. Infatti, al di sopra del 7-8% gli incrementi differenziali di resistenza sono sempre decrescenti e l'utilizzo di dosaggio di zeolite non comporta particolari aumenti di resistenza.

Nome serie	Nome miscela	Cemento	Aggiunta	%agg.	Tipo gomma	% PFU	R.Fl (kPa) a 2gg	R.Fl (kPa) a 7gg	R.Fl (kPa) a 28gg
Z0_32.5N_G_T	Z0_32.5N_G0_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Trattata	0%	1,86	4,58	6,52
	Z0_32.5N_G5_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Trattata	5%	1,61	4,17	6,29
	Z0_32.5N_G10_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Trattata	10%	1,49	3,63	4,79
	Z0_32.5N_G15_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Trattata	15%	1,57	4,49	4,72
Z5_32.5N_G_T	Z5_32.5N_G0_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Trattata	0%	3,21	5,16	6,96
	Z5_32.5N_G5_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Trattata	5%	3,54	4,52	6,38
	Z5_32.5N_G10_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Trattata	10%	3,20	4,42	6,08
	Z5_32.5N_G15_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Trattata	15%	3,15	3,70	5,05
Z10_32.5N_G_T	Z10_32.5N_G0_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Trattata	0%	3,84	4,55	6,98
	Z10_32.5N_G5_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Trattata	5%	4,28	4,93	6,40
	Z10_32.5N_G10_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Trattata	10%	3,53	4,90	6,14
	Z10_32.5N_G15_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Trattata	15%	3,53	3,62	5,20
Z15_32.5N_G_T	Z15_32.5N_G0_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Trattata	0%	4,38	5,65	7,10
	Z15_32.5N_G5_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Trattata	5%	3,98	4,93	6,43
	Z15_32.5N_G10_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Trattata	10%	4,25	4,90	5,77
	Z15_32.5N_G15_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Trattata	15%	3,20	3,42	5,19
Z0_32.5N_G_N	Z0_32.5N_G0_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Naturale	0%	1,86	4,58	6,52
	Z0_32.5N_G5_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Naturale	5%	2,13	4,36	5,73
	Z0_32.5N_G10_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Naturale	10%	1,64	3,75	4,85
	Z0_32.5N_G15_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Naturale	15%	1,63	3,50	4,78
Z5_32.5N_G_N	Z5_32.5N_G0_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Naturale	0%	3,21	5,14	6,95
	Z5_32.5N_G5_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Naturale	5%	2,60	4,44	5,71
	Z5_32.5N_G10_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Naturale	10%	2,47	4,44	5,40
	Z5_32.5N_G15_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Naturale	15%	1,88	4,46	5,14
Z10_32.5N_G_N	Z10_32.5N_G0_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Naturale	0%	3,84	4,54	6,97
	Z10_32.5N_G5_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Naturale	5%	2,78	4,44	5,65
	Z10_32.5N_G10_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Naturale	10%	2,85	4,11	5,70
	Z10_32.5N_G15_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Naturale	15%	2,44	3,93	5,57
Z15_32.5N_G_N	Z15_32.5N_G0_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Naturale	0%	4,38	5,64	7,10
	Z15_32.5N_G5_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Naturale	5%	3,80	4,84	5,72
	Z15_32.5N_G10_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Naturale	10%	3,68	4,44	5,70
	Z15_32.5N_G15_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Naturale	15%	3,34	4,14	5,70
Z0_32.5R_G_T	Z0_32.5R_G0_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	0%	Trattata	0%	3,42	5,41	5,95
	Z0_32.5R_G5_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	0%	Trattata	5%	3,35	4,66	5,58
	Z0_32.5R_G10_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	0%	Trattata	10%	3,05	4,78	5,18
	Z0_32.5R_G15_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	0%	Trattata	15%	2,63	4,76	4,95
Z5_32.5R_G_T	Z5_32.5R_G0_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	5%	Trattata	0%	4,66	4,99	5,55
	Z5_32.5R_G5_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	5%	Trattata	5%	3,75	4,85	5,67
	Z5_32.5R_G10_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	5%	Trattata	10%	4,31	4,15	5,53
	Z5_32.5R_G15_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	5%	Trattata	15%	3,09	3,77	4,55
Z10_32.5R_G_T	Z10_32.5R_G0_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	10%	Trattata	0%	3,91	4,13	6,59
	Z10_32.5R_G5_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	10%	Trattata	5%	3,87	4,34	5,98
	Z10_32.5R_G10_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	10%	Trattata	10%	3,19	4,92	4,97
	Z10_32.5R_G15_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	10%	Trattata	15%	2,84	4,57	4,69
Z15_32.5R_G_T	Z15_32.5R_G0_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	15%	Trattata	0%	4,15	5,39	6,68
	Z15_32.5R_G5_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	15%	Trattata	5%	4,17	5,53	5,79
	Z15_32.5R_G10_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	15%	Trattata	10%	3,94	4,71	4,73
	Z15_32.5R_G15_T	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	15%	Trattata	15%	3,75	4,52	4,15
Z0_32.5R_G_N	Z0_32.5R_G0_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	0%	Naturale	0%	3,42	5,41	5,95
	Z0_32.5R_G5_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	0%	Naturale	5%	4,03	4,05	5,88
	Z0_32.5R_G10_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	0%	Naturale	10%	3,16	3,42	4,99
	Z0_32.5R_G15_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	0%	Naturale	15%	2,95	4,15	4,78
Z5_32.5R_G_N	Z5_32.5R_G0_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	5%	Naturale	0%	4,66	4,99	5,55
	Z5_32.5R_G5_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	5%	Naturale	5%	3,52	4,66	5,37
	Z5_32.5R_G10_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	5%	Naturale	10%	3,00	4,99	4,99
	Z5_32.5R_G15_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	5%	Naturale	15%	2,51	4,62	4,15
Z10_32.5R_G_N	Z10_32.5R_G0_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	10%	Naturale	0%	3,91	4,13	6,59
	Z10_32.5R_G5_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	10%	Naturale	5%	3,66	4,73	5,25
	Z10_32.5R_G10_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	10%	Naturale	10%	3,35	4,48	4,55
	Z10_32.5R_G15_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	10%	Naturale	15%	3,05	4,38	5,13
Z15_32.5R_G_N	Z15_32.5R_G0_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	15%	Naturale	0%	4,15	5,39	6,68
	Z15_32.5R_G5_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	15%	Naturale	5%	4,03	5,11	5,51
	Z15_32.5R_G10_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	15%	Naturale	10%	3,89	4,90	5,37
	Z15_32.5R_G15_N	CEM II/A-L 32.5R	Zeolite 5A	15%	Naturale	15%	3,77	4,78	4,59

Tabella 6.32 - Resistenza flessionale media dei provini di terza serie

Si è passati, quindi, all'esame della resistenza flessionale in funzione del dosaggio di gomma PFU. Nella figura 6.52 è riportato l'andamento della resistenza a flessione di ogni miscela di terza serie in funzione della percentuale di gomma PFU usata. Nelle figure 6.53 e 6.54 sono riportati, nel dettaglio, i valori medi delle resistenze flessionali a 28 giorni di stagionatura per le due differenti classi di resistenza di cemento (32,5R e 32,5N) e le due tipologie di gomma (trattata e

naturale) usate. Nel primo dei due grafici è possibile notare che gli andamenti delle resistenze flessionali sono piuttosto regolari ed è osservabile il fatto che all'aumentare della percentuale di gomma si ha, come già affermato, una perdita di resistenza flessionale. Tuttavia, la perdita di resistenza non è molto marcata: mediamente al 15% di utilizzo di materiale polimerico si ha una perdita di resistenza del 30% rispetto alla malta senza gomma. Nel secondo e nel terzo grafico è possibile notare che le miscele cementizie realizzate con gomma trattata termicamente tendono ad avere una resistenza a flessione più elevata rispetto alle rispettive miscele realizzate con gomma naturale. Da un semplice calcolo numerico è stato ricavato che mediamente (media delle medie dei valori) si ha un incremento di resistenza a flessione del 3,09% per quanto riguarda i provini realizzati con cemento di classe di resistenza 32,5N e dell'1,35% per le miscele realizzate con il cemento con classe 32,5R. Appare opportuno far notare che tale aumento di resistenza a flessione scaturisce soltanto in base al trattamento termico eseguito sul materiale PFU somministrato agli impasti senza influire sulla composizione, modalità di preparazione e stagionatura dei provini stessi. L'incremento di resistenza flessionale si ipotizza essere dovuto al miglioramento dell'aderenza tra l'elemento polimerico e la matrice cementizia.

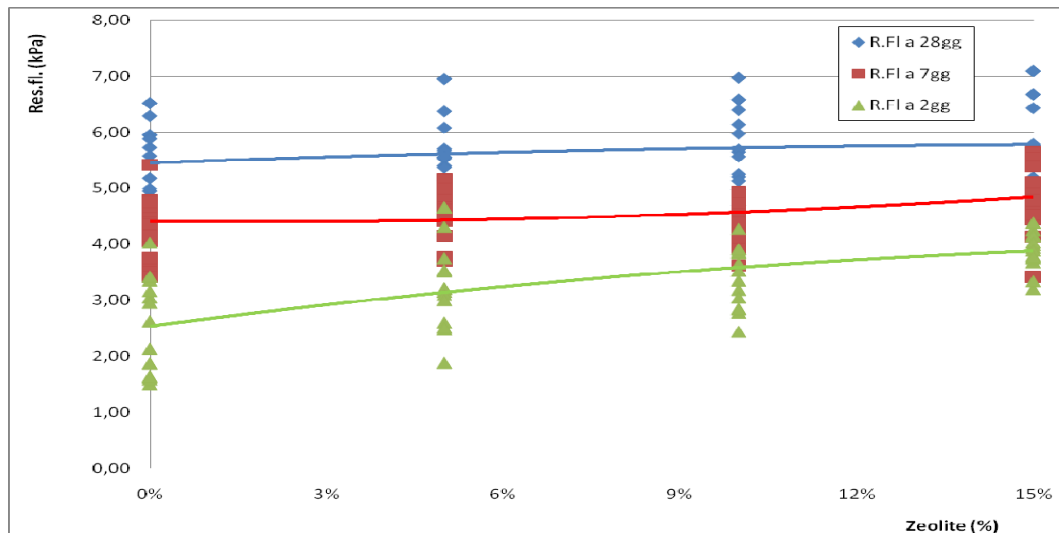


Figura 6.51 - Andamento della resistenza a flessione media dei provini in funzione del dosaggio di zeolite alle diverse stagionature con relative curve di interpolazione polinomiale del secondo ordine

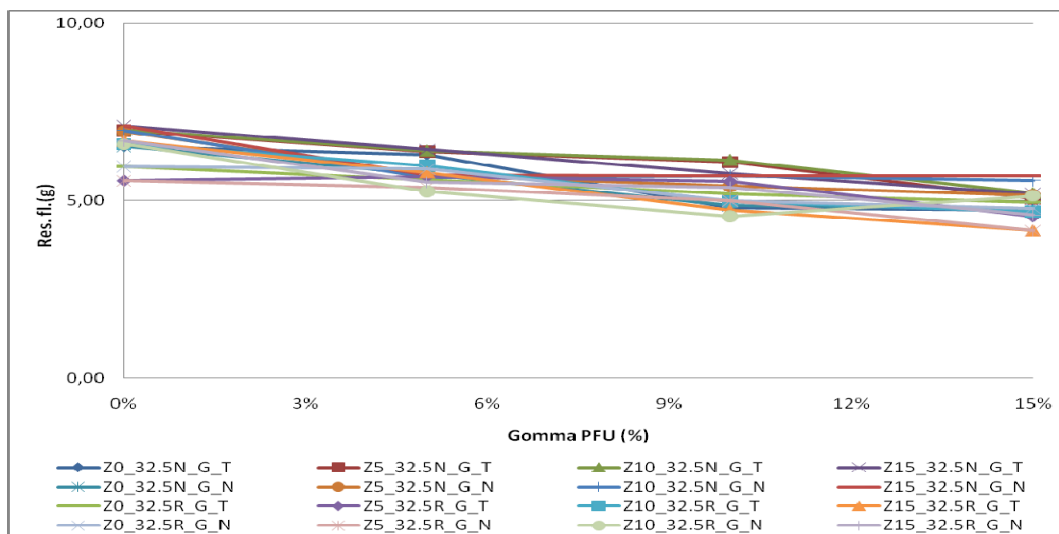


Figura 6.52 - Resistenza a flessione medie a 28 giorni di stagionatura, miscele di malta cementizia di terza serie

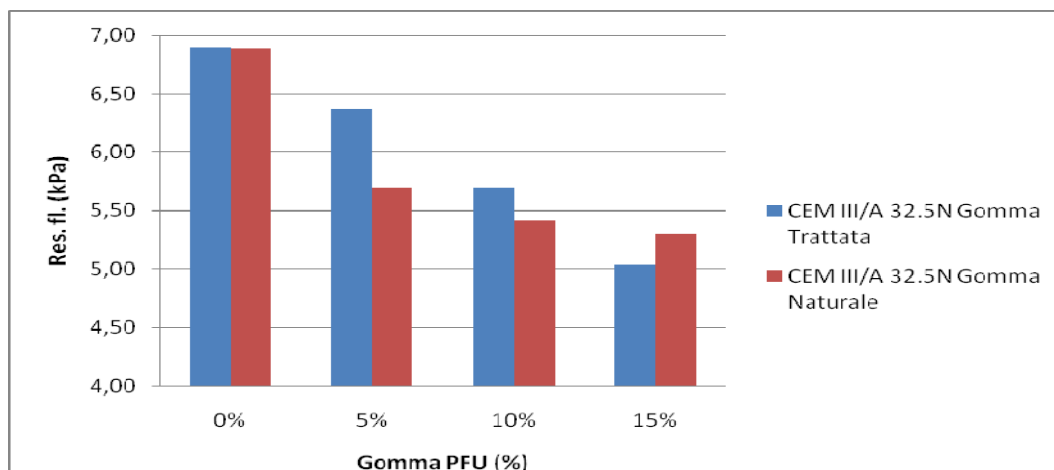


Figura 6.53 - Confronto tra le resistenze flessionali medie delle miscele realizzate con cemento CEM III/A 32,5N

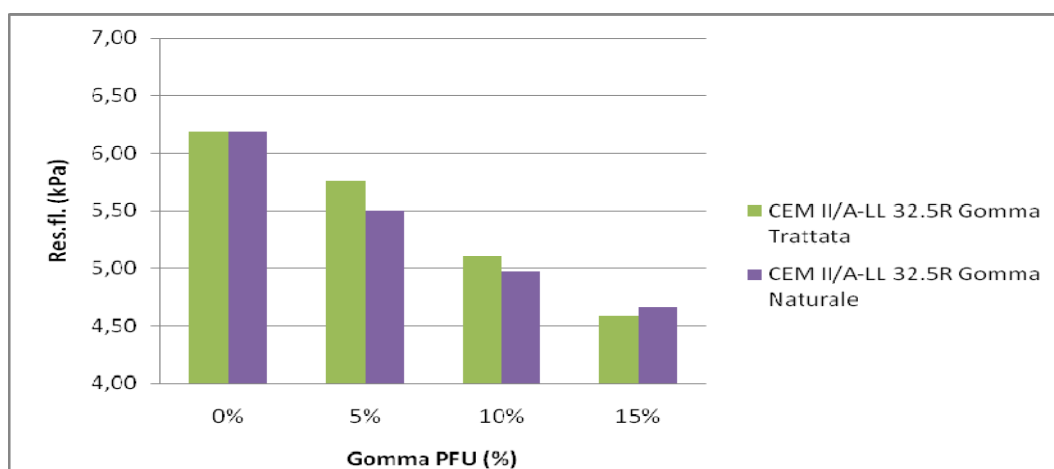


Figura 6.54 - Confronto tra le resistenze flessionali medie delle miscele realizzate con cemento CEM II/A-LL 32,5R

Per quanto riguarda la curve di interpolazione resistenza a flessione in funzione della percentuale di gomma è stato possibile continuare ad utilizzare le rette di correlazione stimate per le miscele di prima serie.

6.4.4 Resistenza a compressione delle malte di terza serie

Anche la resistenza meccanica a compressione a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura è stata valutata per i provini di terza serie realizzati. Ogni provino di tutte le miscele eseguite è stato sottoposto a tale test meccanico e i risultati ottenuti sono stati considerati in maniera aggregata valutando i rispettivi valori medi. Nella seguente tabella sono riportati i risultati medi ottenuti a seguito di prove di compressione. Valutando l'influenza dell'aggiunta di zeolite negli impasti è emerso che aumentando la percentuale di zeolite negli impasti si è registrato un aumento della resistenza a compressione dei manufatti indifferentemente dalla percentuale e dalla tipologia di gomma PFU usata. Dal punto di vista prestazionale è conveniente, comunque, non superare la percentuale del 10% in aggiunta al peso del cemento, in quanto gli incrementi di resistenza meccanica a compressione non ne giustificerebbero l'utilizzo come nel caso della resistenza a flessione. Sopra il 7-8% gli incrementi differenziali di resistenza sono sempre minori e l'utilizzo di dosaggio di zeolite non comporta particolari aumenti di resistenza. L'effetto benefico della zeolite è stato registrato soprattutto alle brevi stagionature (2 e 7 giorni). Nel seguente grafico (figura 6.55) sono riportati i valori medi di resistenza a compressione in funzione del quantitativo di zeolite alle diverse stagionature

considerate. Inoltre, sono indicate delle curve interpolatrici che ne descrivono gli andamenti in maniera complessiva. Esaminando i valori di resistenza flessionale in funzione del dosaggio di gomma PFU, come per la flessione e le altre miscele precedentemente analizzate, è stato notato che gli andamenti delle resistenze a compressione sono piuttosto regolari ed è osservabile il fatto che all'aumentare della percentuale di gomma si ha una perdita di resistenza non è elevata. Nella figura 6.56 è riportato tale andamento per ogni miscela di terza serie realizzata.

Nome serie	Nome miscela	Cemento	Aggiunta	% aggiunta	Tipo gomma	% gomma	R.compr. (MPa) a 2gg	R.compr. (MPa) a 7gg	R.compr. (MPa) a 28gg
Z0_32.5N_G_T	Z0_32.5N_G0_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Trattata	0%	9,70	22,71	39,27
	Z0_32.5N_G5_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Trattata	5%	6,40	20,99	37,16
	Z0_32.5N_G10_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Trattata	10%	6,20	18,25	33,43
	Z0_32.5N_G15_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Trattata	15%	6,47	19,11	32,28
Z5_32.5N_G_T	Z5_32.5N_G0_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Trattata	0%	15,44	27,62	39,64
	Z5_32.5N_G5_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Trattata	5%	15,18	25,64	38,12
	Z5_32.5N_G10_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Trattata	10%	12,76	24,21	34,34
	Z5_32.5N_G15_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Trattata	15%	12,75	23,33	32,81
Z10_32.5N_G_T	Z10_32.5N_G0_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Trattata	0%	16,78	27,76	39,61
	Z10_32.5N_G5_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Trattata	5%	15,87	25,73	39,29
	Z10_32.5N_G10_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Trattata	10%	13,53	24,30	35,57
	Z10_32.5N_G15_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Trattata	15%	12,03	23,50	32,97
Z15_32.5N_G_T	Z15_32.5N_G0_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Trattata	0%	19,18	29,39	39,95
	Z15_32.5N_G5_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Trattata	5%	19,30	27,65	38,51
	Z15_32.5N_G10_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Trattata	10%	18,47	25,26	35,75
	Z15_32.5N_G15_T	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Trattata	15%	16,01	24,54	33,48
Z0_32.5N_G_N	Z0_32.5N_G0_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Naturale	0%	9,70	22,71	39,27
	Z0_32.5N_G5_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Naturale	5%	8,69	18,14	36,01
	Z0_32.5N_G10_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Naturale	10%	6,99	15,36	30,28
	Z0_32.5N_G15_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	0%	Naturale	15%	5,02	13,34	25,86
Z5_32.5N_G_N	Z5_32.5N_G0_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Naturale	0%	15,44	27,62	39,64
	Z5_32.5N_G5_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Naturale	5%	11,53	23,53	35,04
	Z5_32.5N_G10_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Naturale	10%	10,91	20,85	30,56
	Z5_32.5N_G15_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	5%	Naturale	15%	8,88	18,08	25,96
Z10_32.5N_G_N	Z10_32.5N_G0_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Naturale	0%	16,78	27,76	39,61
	Z10_32.5N_G5_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Naturale	5%	13,94	24,13	35,09
	Z10_32.5N_G10_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Naturale	10%	11,43	22,90	30,65
	Z10_32.5N_G15_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	10%	Naturale	15%	9,63	19,61	26,17
Z15_32.5N_G_N	Z15_32.5N_G0_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Naturale	0%	19,18	29,39	39,95
	Z15_32.5N_G5_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Naturale	5%	16,51	26,01	35,31
	Z15_32.5N_G10_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Naturale	10%	14,03	23,34	32,55
	Z15_32.5N_G15_N	CEM III/A 32.5N	Zeolite 5A	15%	Naturale	15%	12,10	20,58	28,69
Z0_32.5R_G_T	Z0_32.5R_G0_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	0%	Trattata	0%	16,31	31,85	42,95
	Z0_32.5R_G5_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	0%	Trattata	5%	16,68	27,11	37,05
	Z0_32.5R_G10_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	0%	Trattata	10%	14,55	24,88	34,88
	Z0_32.5R_G15_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	0%	Trattata	15%	12,95	22,41	32,01
Z5_32.5R_G_T	Z5_32.5R_G0_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	5%	Trattata	0%	18,82	35,80	43,99
	Z5_32.5R_G5_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	5%	Trattata	5%	17,51	29,39	38,86
	Z5_32.5R_G10_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	5%	Trattata	10%	15,37	29,38	35,36
	Z5_32.5R_G15_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	5%	Trattata	15%	13,75	23,25	33,35
Z10_32.5R_G_T	Z10_32.5R_G0_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	10%	Trattata	0%	19,38	36,86	45,00
	Z10_32.5R_G5_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	10%	Trattata	5%	18,73	30,16	39,34
	Z10_32.5R_G10_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	10%	Trattata	10%	17,82	29,92	37,07
	Z10_32.5R_G15_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	10%	Trattata	15%	15,11	24,49	35,36
Z15_32.5R_G_T	Z15_32.5R_G0_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	15%	Trattata	0%	24,99	37,55	45,74
	Z15_32.5R_G5_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	15%	Trattata	5%	21,53	32,88	37,60
	Z15_32.5R_G10_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	15%	Trattata	10%	20,93	30,81	33,99
	Z15_32.5R_G15_T	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	15%	Trattata	15%	18,15	26,48	29,31
Z0_32.5R_G_N	Z0_32.5R_G0_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	0%	Naturale	0%	16,31	31,85	42,95
	Z0_32.5R_G5_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	0%	Naturale	5%	16,04	26,87	33,94
	Z0_32.5R_G10_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	0%	Naturale	10%	12,52	22,75	29,77
	Z0_32.5R_G15_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	0%	Naturale	15%	10,77	20,20	26,37
Z5_32.5R_G_N	Z5_32.5R_G0_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	5%	Naturale	0%	18,82	35,80	43,99
	Z5_32.5R_G5_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	5%	Naturale	5%	16,76	27,39	35,12
	Z5_32.5R_G10_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	5%	Naturale	10%	13,01	23,80	30,26
	Z5_32.5R_G15_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	5%	Naturale	15%	11,12	20,79	26,98
Z10_32.5R_G_N	Z10_32.5R_G0_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	10%	Naturale	0%	19,38	36,86	45,00
	Z10_32.5R_G5_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	10%	Naturale	5%	16,89	27,57	34,45
	Z10_32.5R_G10_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	10%	Naturale	10%	14,00	23,83	29,97
	Z10_32.5R_G15_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	10%	Naturale	15%	12,40	21,10	26,65
Z15_32.5R_G_N	Z15_32.5R_G0_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	15%	Naturale	0%	24,99	37,55	45,74
	Z15_32.5R_G5_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	15%	Naturale	5%	18,49	29,46	34,90
	Z15_32.5R_G10_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	15%	Naturale	10%	18,17	27,18	29,99
	Z15_32.5R_G15_N	CEM II/A-LL 32.5R	Zeolite 5A	15%	Naturale	15%	16,94	23,20	26,46

Tabella 6.33 - Resistenza meccanica a compressione media dei provini di terza serie (MPa)

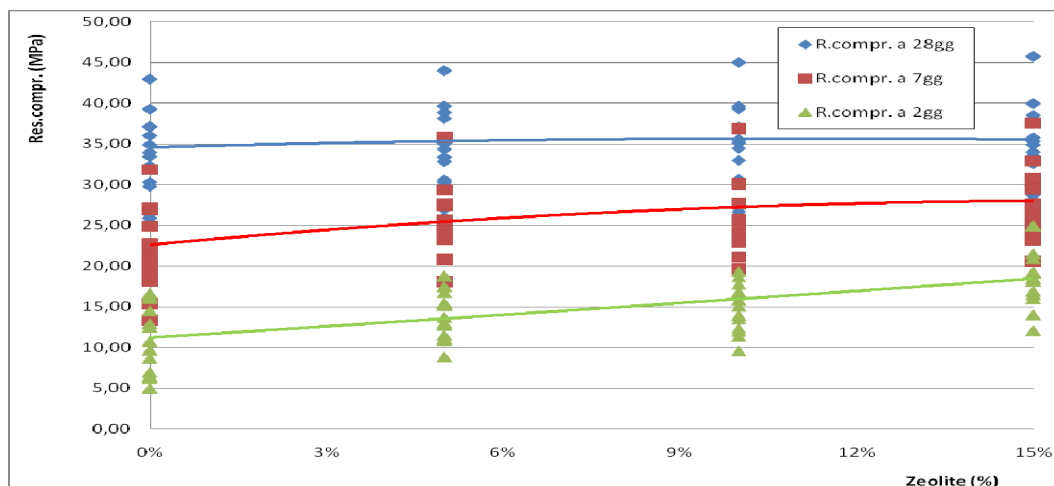


Figura 6.55 - Andamenti della resistenza a compressione media dei provini di terza serie in funzione del dosaggio di zeolite alle diverse stagionature con relative curve di interpolazione polinomiale del secondo ordine

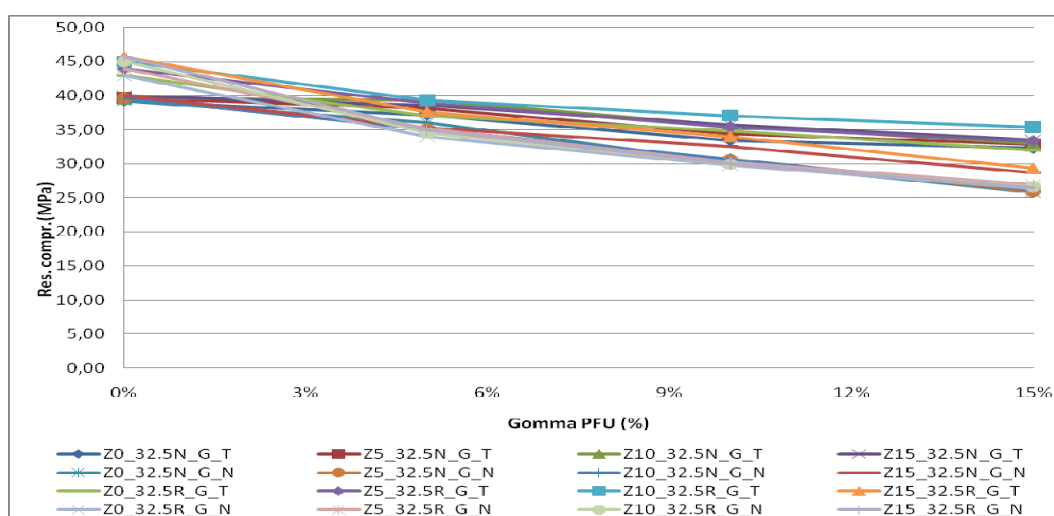


Figura 6.56 - Resistenza media a compressione a 28 giorni di stagionatura, miscele di malta cementizia di terza serie

Dalle valutazioni delle resistenze medie a compressione per ogni percentuale di gomma somministrata all'impasto e dal confronto dei valori analoghi tra le diverse miscele che si differenziano per la sola tipologia di materiale PFU usato (trattata e naturale) è emerso che le miscele confezionate con gomma trattata termicamente hanno raggiunto livelli di resistenza più elevati. L'incremento di resistenza è stato mediamente del 10,91% per le miscele realizzate con cemento CEM III/A 32N e del 12,58% per le miscele confezionate con il cemento CEM II/A-LL 32,5R. Per cui un incremento sensibile di resistenza meccanica che ha consentito in parte il recupero della resistenza persa a causa dell'utilizzo di gomma PFU. Il recupero di resistenza probabilmente è dovuto al miglioramento dell'adesione tra le particelle di gomma e la matrice cementizia in quanto il trattamento termico sulla gomma porta all'ottenimento di una gomma più dura, più simile rispetto alla gomma non trattata alla sabbia. Inoltre, tramite il processo termico, si incide sul processo di vulcanizzazione del materiale polimerico in maniera tale da provocarne una maggiore resistenza a compressione. Appare opportuno ricordare che un'altra parte della resistenza persa si recupera utilizzando negli impasti la zeolite. Quindi, somministrando zeolite e trattando termicamente il materiale polimerico, è possibile recuperare buona parte della resistenza meccanica persa a causa dell'utilizzo dell'aggregato polimerico. Nelle figure 6.57 e 6.58 sono riportati i confronti tra e resistenze meccaniche a

compressione registrate al variare della tipologia e percentuale di gomma PFU ed in funzione della tipologia di cemento. Si è ritenuto opportuno effettuare un confronto tra le diverse serie di miscele eseguite valutando gli andamenti della resistenza a compressione a 28 giorni di stagionatura registrate sui provini di malta confezionati con il cemento CEM III/A 32,5N al variare della percentuale di zeolite somministrata all'impasto. Nei grafici seguenti (figure 6.59-6.52) sono riportati tali andamenti.

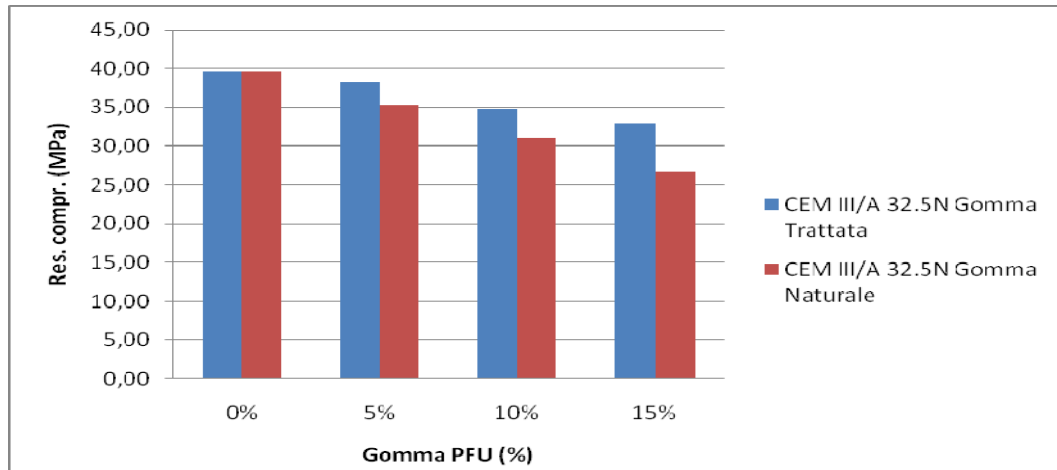


Figura 6.57 - Confronto tra le resistenze a compressione medie delle miscele realizzate con cemento CEM III/A 32,5N in funzione della tipologia di gomma PFU

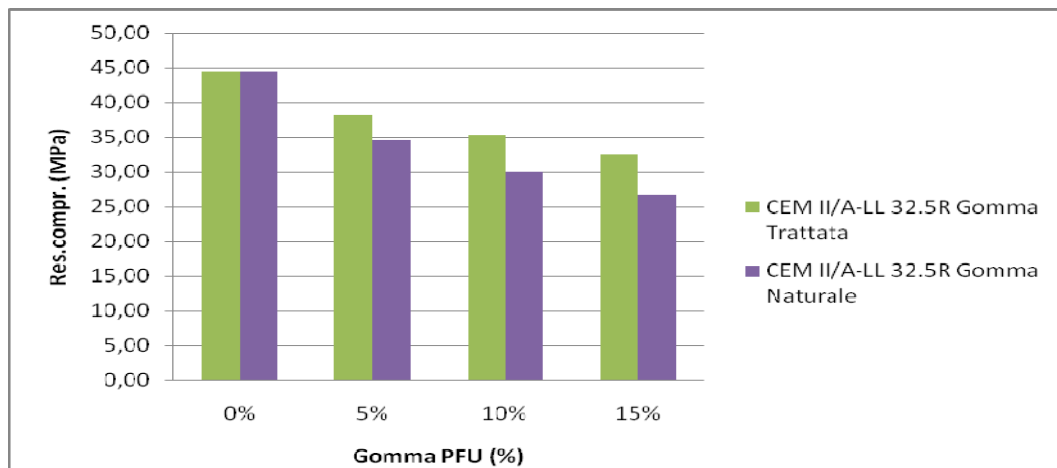


Figura 6.58 - Confronto tra le resistenze compressione medie delle miscele realizzate con cemento CEM II/A-LL 32,5R in funzione della tipologia di gomma PFU

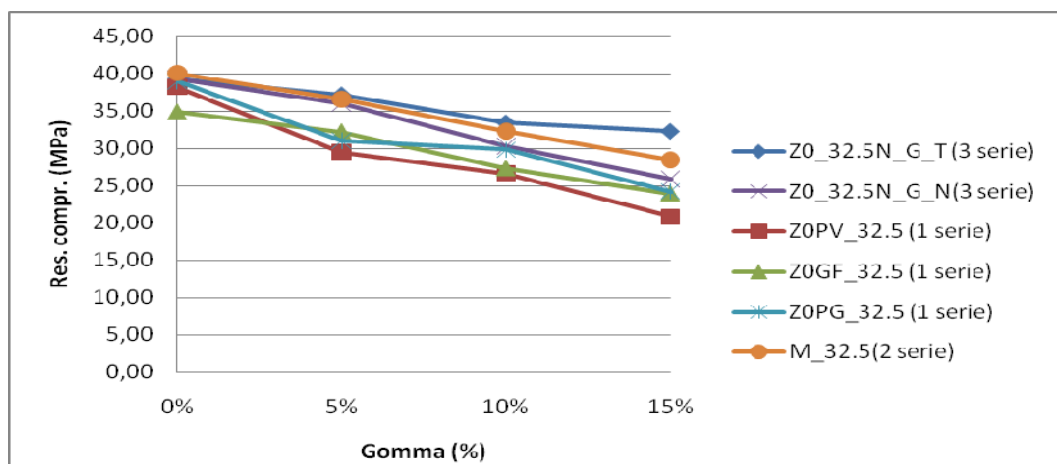


Figura 6.59 - Confronto tra le miscele di prima, seconda e terza serie confezionate senza zeolite

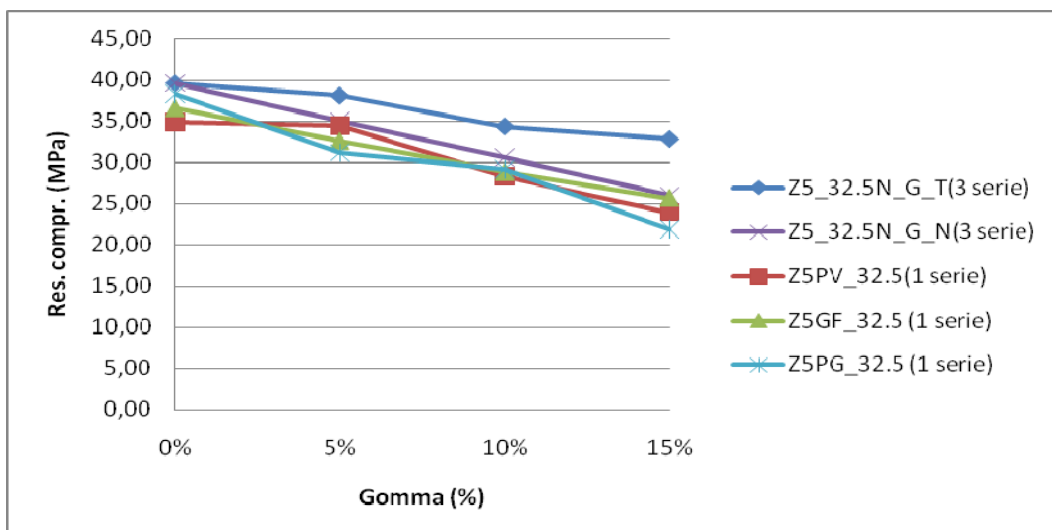


Figura 6.60 - Confronto tra le miscele di prima, seconda e terza serie confezionate con il 5% di zeolite

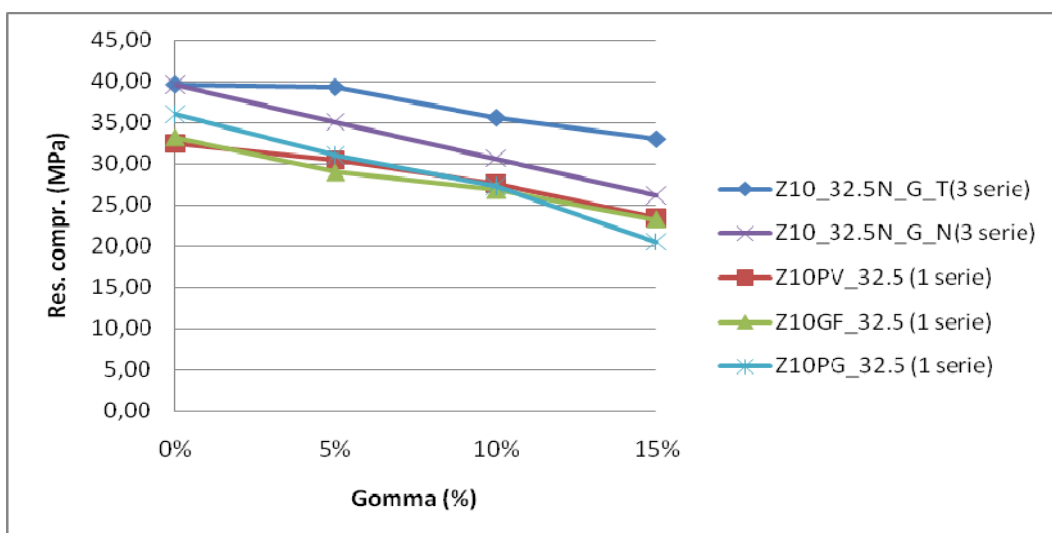


Figura 6.61 - Confronto tra le miscele di prima, seconda e terza serie confezionate con il 10% di zeolite

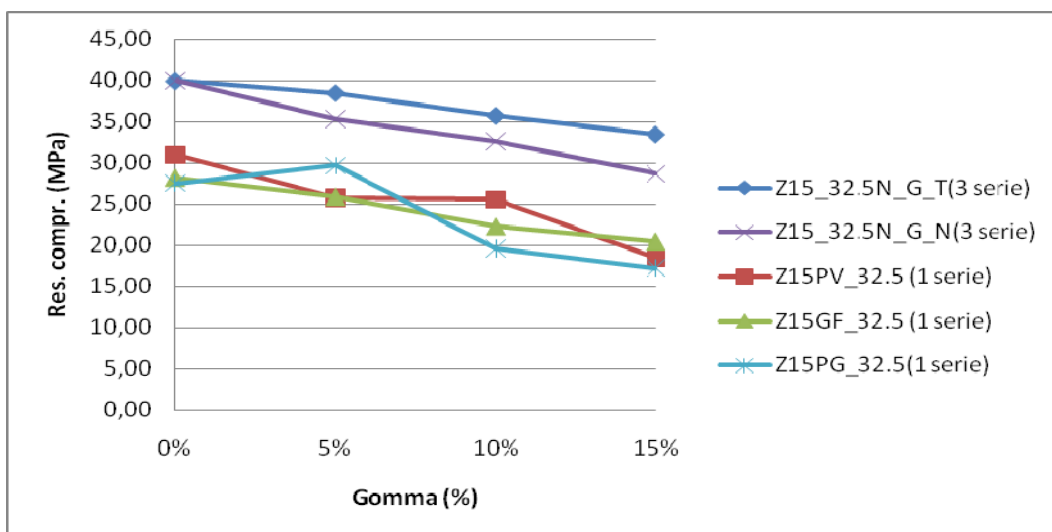


Figura 6.62 - Confronto tra le miscele di prima, seconda e terza serie confezionate con il 15% di zeolite

Dal confronto tra le diverse miscele di prima, seconda e terza serie è emerso chiaramente che le miscele ottimizzate (terza serie) soprattutto in termini di curva granulometrica e di trattamento termico del materiale PFU hanno consentito

l'ottenimento di valori di resistenza molto elevati. Ad esempio, somministrando il 10% di zeolite ed il 15% di gomma PFU trattata termicamente distribuita secondo la curva granulometrica della sabbia è possibile raggiungere lo stesso livello di resistenza ottenuto nelle miscele di prima serie senza gomma. Addirittura usando il 15% di zeolite ed il 15% di gomma PFU trattata termicamente si riescono a superare nettamente le resistenze a compressione registrate con le miscele di malta di prima serie confezionate senza materiale polimerico. Anche non utilizzando la zeolite è possibile avere, con le miscele confezionate con il 15% di gomma trattata, all'incirca la stessa resistenza valutata nelle miscele di prima e di seconda serie senza gomma. Tutto questo è, dunque, possibile effettuando un modesto trattamento termico sulla gomma PFU prima di somministrarlo all'impasto. I risultati ottenuti hanno dimostrato che si possono smaltire considerevoli quantitativi di materiale di scarto dell'industria automobilistica all'interno dei manufatti cementizi senza causare perdite di resistenza meccanica a compressione, principale problema riscontrato in letteratura circa l'utilizzo del materiale PFU nei conglomerati cementizi. Inoltre, è opportuno ricordare che i manufatti ottenuti utilizzando gomma sono dei manufatti sicuramente più leggeri degli analoghi senza gomma, vantaggio da non trascurare in quanto tale requisito permetterebbe di realizzare strutture più snelle oppure, a parità di carico e di geometria strutturale, strutture con livelli tensionali più bassi, per cui strutture in grado di assorbire in opera eventuali sovraccarichi che potrebbero insorgere durante la vita utile delle strutture stesse (sisma, sovraccarichi, ecc.).

6.5 Cicli termici e prove ultrasonore sulle miscele ottimizzate

Sulle miscele di seconda serie, per conoscere il comportamento dei provini in particolari condizioni di temperatura, sono stati compiuti dei cicli termici sui manufatti cementizi confezionati con diverse percentuali di gomma. In particolare, dopo aver confezionato le miscele e disarmato i provini, gli stessi sono stati lasciati in acqua per un determinato periodo di tempo cioè, fino a quando si è proceduto con le prove meccaniche descritte nei precedenti paragrafi. I dati ricavati dalle prove fatte a 90 giorni di stagionatura sono stati utilizzati come riferimento per valutare il decadimento delle resistenze rispetto ai provini sottoposti a trattamenti termici, iniziati dopo i 90 giorni di stagionatura. Il lavoro sperimentale è stato svolto eseguendo la misurazione della velocità di transito delle onde ultrasonore, prima e dopo, ogni esposizione dei provini alle varie temperature e pesando prima e dopo averli sottoposti a trattamenti termici. I trattamenti termici sono stati compiuti suddividendo i campioni in due gruppi in base cioè ai due tipi di cemento usati, CEM II/A-S 42,5R e il CEM III/A 32,5N. Nel dettaglio, per ogni provino la procedura eseguita ad ogni ciclo termico è stata:

- pesatura mediante bilancia elettronica;
- rilevazione della velocità di transito delle onde ultrasonore;
- allocazione in forno per 48 ore a temperatura costante (i provini sono stati disposti in modo da non venire a contatto tra di loro e in posizione orizzontale);
- prelievo dal forno (per evitare una brusca escursione termica, allo scadere delle 48 ore, il forno è stato lasciato aperto per 2 ore circa e solo successivamente i provini sono stati tolti);
- pesatura a secco, subito dopo aver tolto i provini dal forno;
- esposizione a temperatura ambiente per 48 ore.

Questa procedura è stata ripetuta più volte incrementando, tra un ciclo e l'altro, la temperatura del forno di 50°C partendo da 100°C fino ad arrivare a 300°C. Bisogna precisare che prima di iniziare il primo ciclo del trattamento i provini sono stati pesati e per alcuni di essi si è resa necessaria la levigatura delle due facce opposte trasversali rispetto alla lunghezza maggiore dei provini, quelle cioè su cui poi sono stati posati i sensori. Questo è stato fatto per garantire la buona aderenza tra sensore e superficie di appoggio del provino, in modo che la regolarità delle superfici dei provini non influenzassero la velocità di transito delle onde ultrasonore. Al termine dell'ultimo ciclo termico, cioè dopo avere raggiunto i 300°C e dopo aver rilevato le velocità ultrasoniche ed i pesi, i provini sono stati sottoposti alle prove meccaniche per misurarne la resistenza a compressione e a flessione oltre che per poter valutare la variazione che queste hanno subito per effetto dell'esposizione alle alte temperature. I dati ottenuti con le prove meccaniche, i cicli termici e i rilevamenti delle velocità ultrasonore, sono stati raggruppati, elaborati e confrontati. Questo ha fornito un quadro pressoché completo delle interazioni di alcune caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche delle miscele in relazione alle diverse percentuali di PFU adottate e ai due tipi di cemento. Per ognuna delle diverse miscele, i dati raccolti dopo i trattamenti termici sono stati analizzati per valutare l'andamento delle variazioni del peso e della velocità ultrasonora e per stimare una curva di correlazione tra velocità ultrasonora e resistenza a compressione, relativa ad ogni esposizione termica. In particolare, si è cercato di verificare la possibilità di individuazione di una legge che consenta di apprezzare la variazione della resistenza meccanica dopo i suddetti trattamenti, senza dover per questo distruggere i provini. I dati ottenuti attraverso i cicli termici e il rilevamento agli ultrasuoni sono stati elaborati al fine di ottenere:

- la variazione di peso ad ogni incremento di temperatura cioè dopo ogni ciclo termico;
- la variazione della velocità ultrasonora tra un ciclo termico e l'altro;
- la stima di curve interpolatrici per l'individuazione di una legge correlativa per velocità ultrasonica e resistenza a compressione.



Figura 6.63 – Rilevazione della velocità ultrasonora



Figura 6.64 – Dispositivi usati per l'esecuzione della prova a flessione e della prova a compressione



Figura 6.65 – Provini sottoposti a cicli termici

6.5.1 Miscela di seconda serie: prove meccaniche a 90 giorni di stagionatura

Di seguito (tabella 6.34) sono riportati i valori rilevati del peso dei provini e le prove meccaniche effettuate a 90 giorni di stagionatura. Le miscele di seconda serie sono state identificate durante l'effettuazione dei cicli termici con la seguente nomenclatura (tabella 6.35).

Miscela	Tipo Cemento	% gomma PFU	Peso (g) a 90gg	R. Fl. a 90 gg (kPa)	R. Compr. A 90 gg (MPa)
M0_32.5	CEM III/A 32.5N	0%	602,45	8,00	49,97
M5_32.5	CEM III/A 32.5N	5%	592,37	7,68	41,75
M10_32.5	CEM III/A 32.5N	10%	579,00	6,84	35,51
M15_32.5	CEM III/A 32.5N	15%	560,32	6,06	27,98
M0_42.5	CEM II/A-S 42.5R	0%	608,94	8,46	56,57
M5_42.5	CEM II/A-S 42.5R	5%	597,04	7,81	45,47
M10_42.5	CEM II/A-S 42.5R	10%	577,25	6,40	40,60
M15_42.5	CEM II/A-S 42.5R	15%	572,99	4,80	36,92

Tabella 6.34 – Peso, resistenza a flessione e a compressione dei provini della seconda serie a 90 giorni di stagionatura

Miscela	Nomenclatura
M0_32.5	32.5/TQ
M5_32.5	32.5 - 5%
M10_32.5	32.5-10%
M15_32.5	32.5-15%
M0_42.5	42.5 - TQ
M5_42.5	42.5 - 5%
M10_42.5	42.5-10%
M15_42.5	42.5-15%

Tabella 6.35 – Nomenclatura utilizzata per le miscele di seconda serie durante i cicli termici

6.5.2 Variazione del peso medio dei provini per effetto dei cicli termici

Si riportano di seguito i pesi medi per ogni miscela, durante ogni ciclo del trattamento termico relativo. I valori riportati nelle precedenti tabelle sono stati inseriti in grafici Peso medio - Temperatura (figure 6.66-6.67).

Temperatura (°C)			0	100	150	200	250	300
Peso Medio Provini (gr.)	Miscele	32.5 - TQ	599,03	554,40	548,79	545,36	544,73	541,96
		32.5 - 5%	590,48	549,97	539,00	535,12	532,60	529,31
		32.5-10%	572,80	539,17	524,40	519,71	517,09	511,56
		32.5-15%	557,00	522,29	508,24	503,48	493,40	491,27

Tabella 6.35 – Peso medio dei provini di ogni miscela con CEM III/A 32.5N, dopo ogni ciclo termico

Temperatura (°C)			0	100	150	200	250	300
Peso Medio Provini (gr.)	Miscele	42.5 - TQ	600,27	553,60	548,66	546,03	542,17	539,82
		42.5 - 5%	590,80	546,10	541,35	537,33	533,65	530,46
		42.5-10%	572,57	528,86	524,72	520,27	516,57	512,26
		42.5-15%	563,20	515,78	512,59	505,76	503,49	499,71

Tabella 6.36 – Peso medio dei provini di ogni miscela con CEM II/A-S 42,5R, dopo ogni ciclo termico

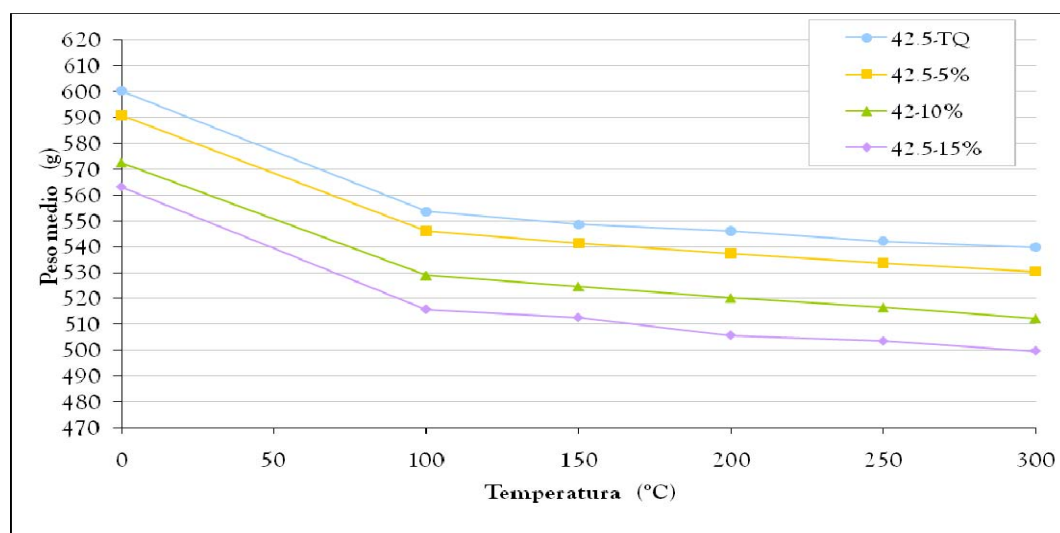


Figura 6.66 - Andamento dei pesi medi per le miscele realizzate con CEM II/A-S 42,5R

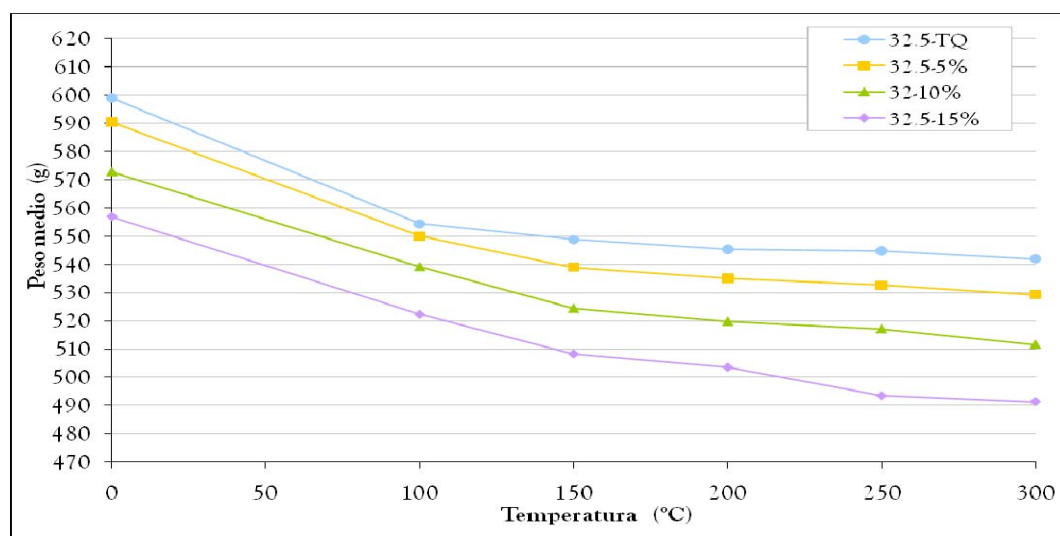


Figura 6.67 - Andamento dei pesi medi per le miscele realizzate con CEM III/A 32,5N

Per interpretare il comportamento delle varie miscele a seguito dei trattamenti termici sono state calcolate le variazioni dei pesi medi per ogni tipo di malta di seconda serie eseguita. La variazione del peso medio è stata ottenuta rapportando la media dei pesi, misurati dopo ogni trattamento, con la media dei pesi di partenza, secondo la relazione:

$$\Delta P_m = \frac{\left(P_m^{T_{ciclo}} - P_m^{T_0} \right)}{P_m^{T_0}} \cdot 100;$$

dove:

- $P_m^{T_0}$ è il peso medio iniziale, misurato prima di sottoporre i provini ai Cicli Termici;
- $P_m^{T_{ciclo}}$ è il peso medio misurato dopo ogni ciclo.

I valori di ΔP_m così ottenuti, sono riportati nelle tabelle 6.37 e 6.38.

T (°C)	100	100	150	200	250	300
Miscela	ΔP (%)					
42,5 - TQ	0,00	7,92	8,93	9,30	9,95	10,14
42,5 - 5%	0,00	7,84	8,67	9,54	9,94	10,34
42,5 - 10%	0,00	7,94	8,64	9,48	10,03	10,65
42,5 - 15%	0,00	8,60	9,29	10,60	11,00	11,47

Tabella 6.37 - Perdita di peso percentuale per i provini confezionati con CEM II/A-S 42,5R durante i trattamenti termici

T (°C)	100	100	150	200	250	300
Miscela	ΔP (%)					
32,5 - TQ	0,00	7,60	8,74	9,14	9,25	9,70
32,5 - 5%	0,00	7,07	8,82	9,49	10,03	10,53
32,5 - 10%	0,00	5,98	8,57	9,38	10,09	10,81
32,5 - 15%	0,00	5,54	8,94	9,82	11,83	12,05

Tabella 6.38 – Perdita di peso percentuale per i provini confezionati con CEM III/A 32,5N durante i trattamenti termici

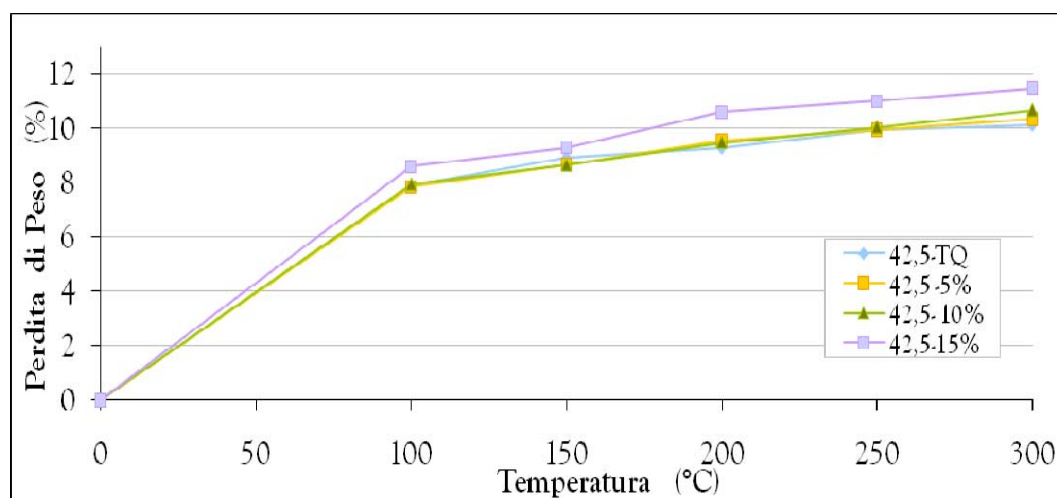


Figura 6.68 – Variazione dei pesi medi durante i cicli termici per le miscele con CEM II/A-S 42,5R

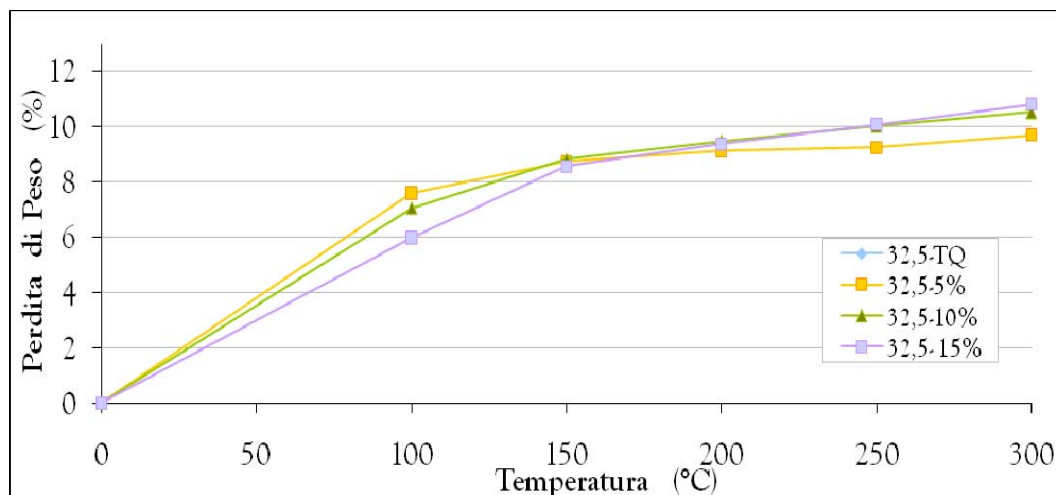


Figura 6.69 – Variazione dei pesi medi durante i cicli termici per le miscele con CEM III/A 32,5N

Analizzando i risultati ottenuti risulta evidente che i trattamenti termici producono una riduzione di peso dei provini. Le perdite più consistenti si sono verificate dopo il primo ciclo a 100°C, molto probabilmente dovute all'evaporazione dell'acqua presente all'interno dei manufatti cementizi. Non è stata riscontrata una sostanziale differenza di perdita di peso tra i diversi provini realizzati con i due differenti cementi. Una maggiore percentuale di PFU comporta una variazione di peso più elevata, anche se tale perdita non è assolutamente eccessiva. Tali considerazioni trovano fondamento scientifico in alcune pubblicazioni scientifiche recenti. Ad esempio, in riferimento a studi recenti² compiuti sui conglomerati cementizi è possibile verificare che, anche in questo, la perdita di peso maggiore è constatata a 100°C. Tale fenomeno è imputabile al fatto che, durante i primi cicli, si ha una maggiore perdita di peso dovuta all'evaporazione dell'acqua di legame oltre a quella libera della matrice. Inoltre, nei cicli successivi, non si sono presentate trasformazioni importanti in quanto è possibile misurare perdite di peso dovute a decomposizioni delle fasi idrate della matrice cementizia solo a partire dai 400°C. Tutto quanto esposto risulterà molto più evidente dall'analisi dell'andamento della velocità di propagazione delle onde ultrasonore durante i cicli termici riportato nei paragrafi successivi.

6.5.3 Indagine ultrasonica sui provini di seconda serie

L'indagine ultrasonora è stata eseguita sui provini di malta di seconda serie prima e dopo ogni ciclo di trattamento termico. Nelle tabelle (tabelle 6.39-6.40) e figure (figure 6.70-6.71) successive, sono state raccolte le velocità medie registrate per ogni miscela, in funzione della temperatura caratteristica di ogni ciclo termico.

T (°C)	0	100	150	200	250	300
Miscela	V_m (%)					
42,5 - TQ	4219	3730	3468	3260	2895	2623
42,5 - 5%	4044	3562	3374	3117	2854	2666
42,5 - 10%	3956	3406	3192	2857	2654	2454
42,5 - 15%	3772	3125	2882	2488	2347	2083

Tabella 6.39 – Velocità media di propagazione delle onde ultrasonore nei provini realizzati con CEM II/A - S 42,5R

² G. Epasto, G. Campanella: "Valutazione della durabilità di calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio", Crolli e affidabilità delle strutture civili, Dario Flaccovio editore, 2007

T (°C)	0	100	150	200	250	300
Miscela	V _m (%)					
32,5 - TQ	4296	3810	3423	3024	2864	2318
32,5 - 5%	4077	3582	3348	2974	2624	2301
32,5 - 10%	3958	3509	3361	2966	2633	2298
32,5 - 15%	3751	3281	3158	2774	2136	1924

Tabella 6.40 – Velocità media di propagazione delle onde ultrasonore nei provini realizzati con CEM III/A 32,5N

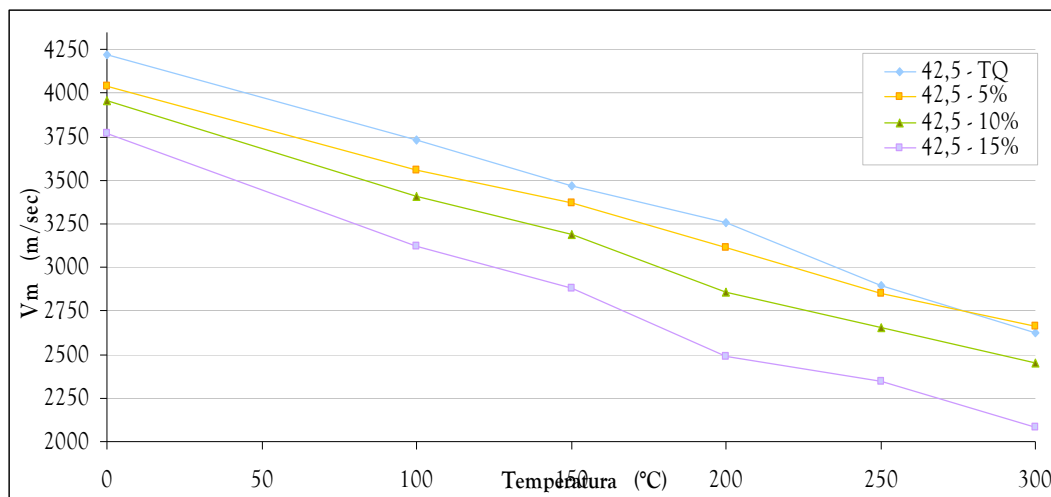


Figura 6.70 – Andamento della Velocità Media Ultrasonora alle diverse Temperature dei Trattamenti Termici per le miscele con CEM II/A-S 42,5R

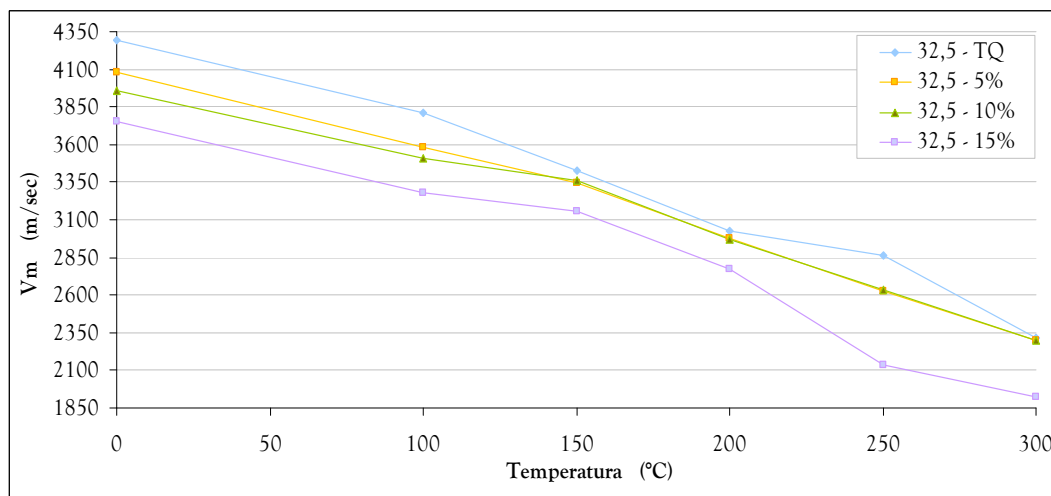


Figura 6.71 – Andamento della Velocità Media Ultrasonora alle diverse Temperature dei Trattamenti Termico per le miscele con CEM III/A 32,5N

L'andamento della velocità di propagazione delle onde ultrasonore nei provini di malta fornisce un primo segnale di ciò che accade alla malta dopo ogni ciclo termico.

Facendo riferimento alla classificazione della qualità dei conglomerati cementizi indicati dalla letteratura scientifica si può affermare che:

- a partire dai 150 °C, si abbassa il grado di qualità delle miscele (classifica ACI 214);
- le miscele con il 5% e il 10% di PFU mantengono una qualità migliore, anche dopo l'ultimo ciclo a 300°C, rispetto a quelle con il 15%;

- dopo 300°C, la velocità scende sotto i 2500m/sec, quindi, solo dopo questo ultimo ciclo del trattamento, possiamo ritenere che le malte siano diventate di qualità molto bassa.

I dati ottenuti con l'indagine ultrasonora sono stati elaborati in modo da determinare la variazione di velocità ultrasonora durante i trattamenti ai cicli termici mediante la seguente relazione:

$$\Delta V_m = \frac{(V_m^{T_0} - V_m^{T_{ciclo}})}{V_m^{T_0}} \cdot 100;$$

dove:

- $V_m^{T_0}$ è la velocità ultrasonora media iniziale (misurata prima di sottoporre i provini ai Cicli Termici);
- $V_m^{T_{ciclo}}$ è la velocità ultrasonora media misurata dopo ogni ciclo.

Le tabelle e i grafici successivi, riportano i valori percentuali delle variazioni di velocità media calcolati per ogni miscela secondo le due differenti tipologie di cemento usate.

T (°C)	0°	100°	150°	200°	250°	300°
Miscele	ΔV_m (%)					
42,5 - TQ	0,00	11,60	17,82	22,73	31,40	37,83
42,5 - 5%	0,00	11,93	16,57	22,93	29,44	34,09
42,5 - 10%	0,00	13,89	19,30	27,77	32,91	37,97
42,5 - 15%	0,00	17,16	23,60	34,05	37,78	44,79

Tabella 6.41 – Perdita di velocità ultrasonica percentuale delle miscele realizzate con CEM II/A-S 42,5R

T (°C)	0°	100°	150°	200°	250°	300°
Miscele	ΔV_m (%)					
32,5 - TQ	0,00	11,31	20,31	29,61	33,34	46,05
32,5 - 5%	0,00	12,13	17,87	27,06	35,63	43,56
32,5 - 10%	0,00	11,34	15,08	25,06	33,48	41,95
32,5 - 15%	0,00	12,52	15,81	26,04	43,04	48,70

Tabella 6.42 – Perdita di velocità ultrasonica percentuale delle miscele realizzate con CEM III/A 32,5N

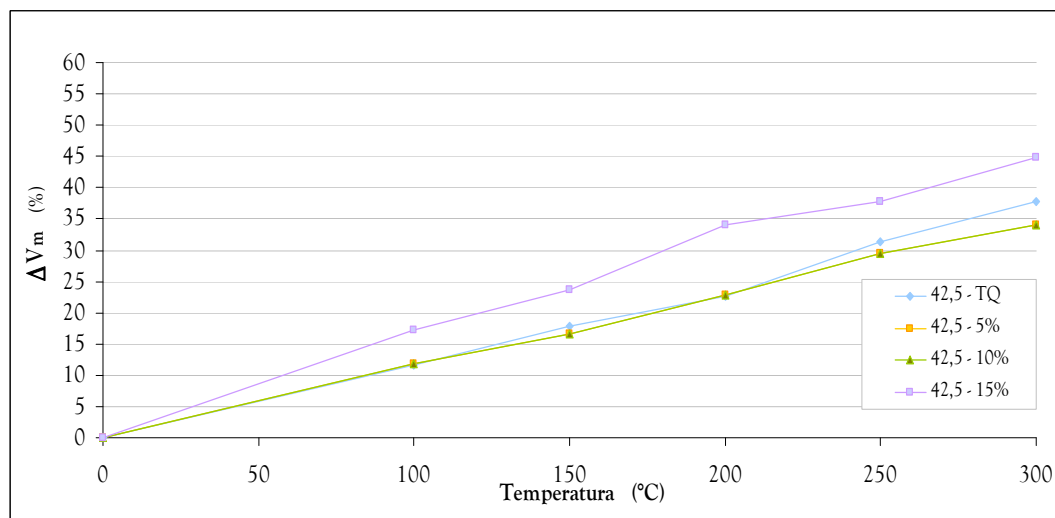


Figura 6.72 – Andamento della variazione di velocità media per le miscele realizzate con CEM II/A-S 42,5R

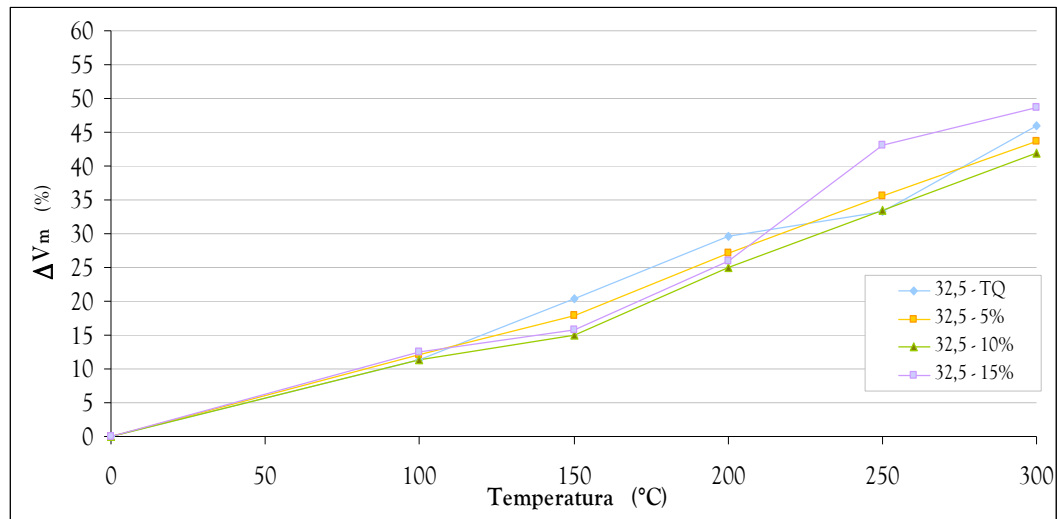


Figura 6.73 – Andamento della variazione di velocità media per le miscele realizzate con CEM II/A 32,5N

E' stato osservato che per le malte confezionate con CEM II/A-S 42,5R e con il 15% di gomma PFU, la velocità risulta inferiore a 2900m/sec già dopo il ciclo a 150°C e, inoltre, per tale miscela si registra un andamento della variazione di velocità più alto rispetto alle altre miscele. Le malte, con il 5%, 10%, presentano una variazione della velocità molto simile a quelle cosiddette "tal quali". I valori di velocità ultrasonore valutate ai cicli relativi alle temperature comprese tra 150°C e 300°C, producono dei cambiamenti delle miscele tali da far registrare valori della velocità media in graduale diminuzione. Questo è indicativo dell'evaporazione dell'acqua di legame e dell'acqua libera nella matrice oltre che del fatto che, a causa della diversa dilatazione e contrazione tra pasta cementizia e gomma PFU, sulle interfacce di quest'ultime si formeranno delle discontinuità che rallentano il passaggio delle onde ultrasonore. Sono state confrontate, inoltre, la variazione della velocità media con la variazione di peso medio. Attraverso questo è stato valutato il legame che sussiste tra peso e velocità e soprattutto come questa dipendenza è influenzata dalle esposizioni alle diverse temperature. Precisando che nei grafici successivi (figure 6.74 e 6.75), ad ogni punto delle spezzate corrisponde un ciclo termico, si osserva che, per ognuna delle miscele, sia la variazione del peso (perdita di peso) che la variazione della velocità ultrasonora (perdita di velocità) hanno presentato andamenti crescenti all'aumentare della temperatura dei cicli (in entrambe le grandezze, all'aumentare della temperatura si è registrata una perdita). Questo dimostra che se durante i cicli la variazione di velocità cresce, il materiale si degrada sempre di più rispetto allo stato iniziale. Di seguito, sono stati riportati i grafici a superficie in funzione della tipologia di cemento usato nell'impasto (figure 6.76-6.77). Tali grafici permettono di capire efficacemente il legame esistente tra peso, velocità ultrasonora e contenuto di gomma PFU al variare della temperatura in un range compreso tra 100°C e 300°C. Escludendo i fisiologici errori sperimentali appare evidente che le grandezze messe in relazione descrivono in un grafico 3D un piano, per cui, tra coppie di esse, è possibile ipotizzare correlazioni di tipo lineare (proporzionalità diretta nel range di temperatura trattato). Completati i trattamenti termici, i provini, sono stati sottoposti alle prove meccaniche di rottura a flessione e compressione. In particolare, le prove sono state eseguite 48h dopo l'ultimo ciclo compiuto a 300°C. Bisogna precisare che è stato possibile misurare le resistenze per di tutti i provini trattati poiché questi, alla fine del trattamento termico, sono risultati

lievemente alterati in superficie e sugli spigoli ma, complessivamente, in buono stato, come si evince dalle immagini riportate in figura 6.78.

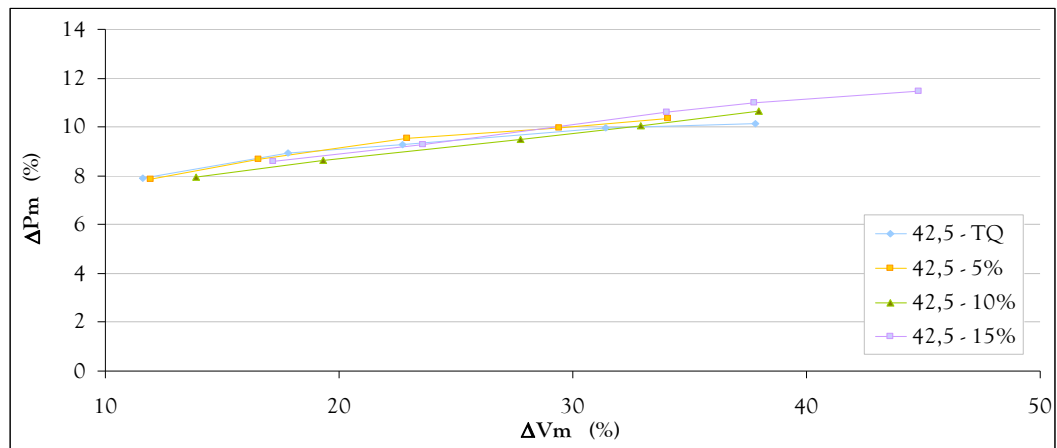


Figura 6.74 – Perdita di velocità ultrasonora e di peso durante il termico delle miscele realizzate con CEM II/A 42,5R

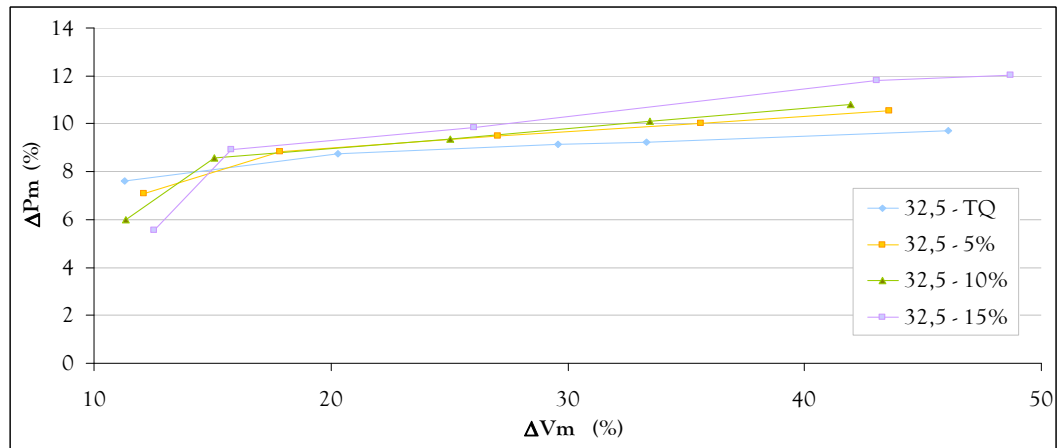


Figura 6.75 – Perdita di velocità ultrasonora e di peso durante il trattamento termico delle miscele realizzate con CEM III/A-S 32,5N

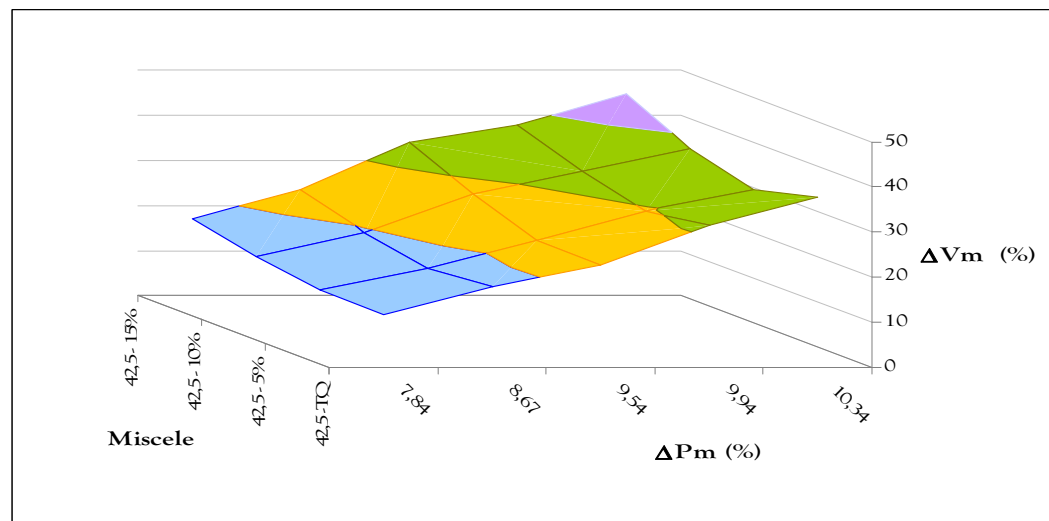


Figure 6.76 - Variazione del peso e della velocità per tipologia di miscela confezionata con CEM II/A-S 42,5R

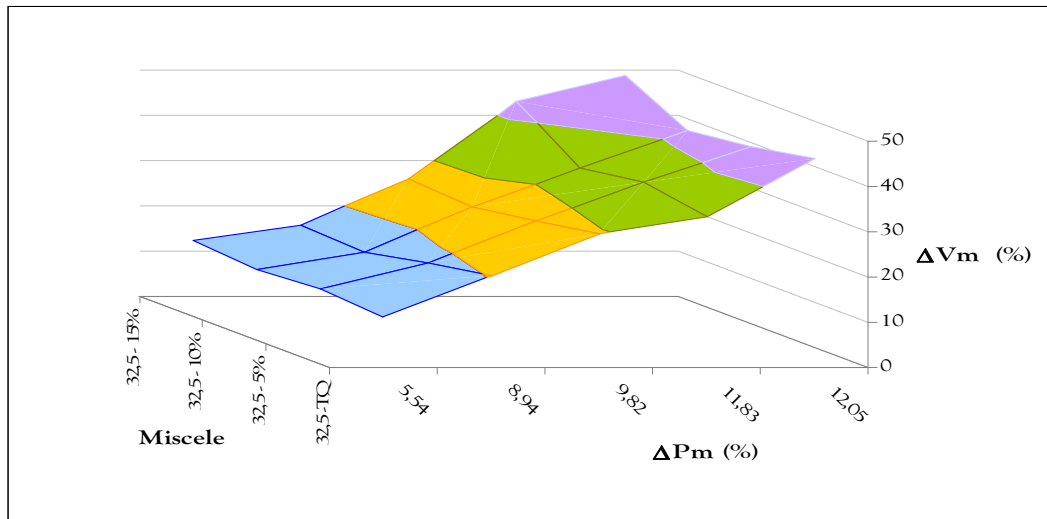


Figure 6.77- Variazione del peso e della velocità per tipologia di miscela confezionata con CEM II/A-S 32,5N



Figura 6.78 – Particolari di alcuni provini sottoposti ai trattamenti termici

6.5.4 Prove di resistenza meccanica a flessione sui provini di seconda serie sottoposti a cicli termici

Per evidenziare gli effetti dei trattamenti termici sul comportamento delle malte, di seguito, sono state riportate le resistenze a flessione registrate prima e dopo i trattamenti termici. Si precisa che le miscele non trattate sono state sottoposte alle prove meccaniche al raggiungimento dei 90 giorni di stagionatura. In figura 6.79 sono riportate le perdite percentuali di resistenza a flessione in funzione del dosaggio di gomma PFU per le miscele realizzate con i due differenti cementi.

Resistenza a flessione (kPa)	42,5-T.Q	42,5- 5%	42,5-10%	42,5-15%
Provini sottoposti a cicli termici	5,20	4,90	4,38	3,10
Provini non sottoposti a cicli termici	8,46	7,81	6,40	4,80

Tabella 6.43 – Resistenze a flessione delle miscele sottoposte a cicli termici e non, confezionate con CEM II/A-S 42,5R

Resistenza a flessione (kPa)	32,5-T.Q	32,5- 5%	32,5-10%	32,5-15%
Provini sottoposti a cicli termici	4,04	3,78	3,58	2,62
Provini non sottoposti a cicli termici	8,00	7,68	6,84	6,06

Tabella 6.44 – Resistenze a flessione delle miscele sottoposte a cicli termici e non, confezionate con CEM III/A 32,5N

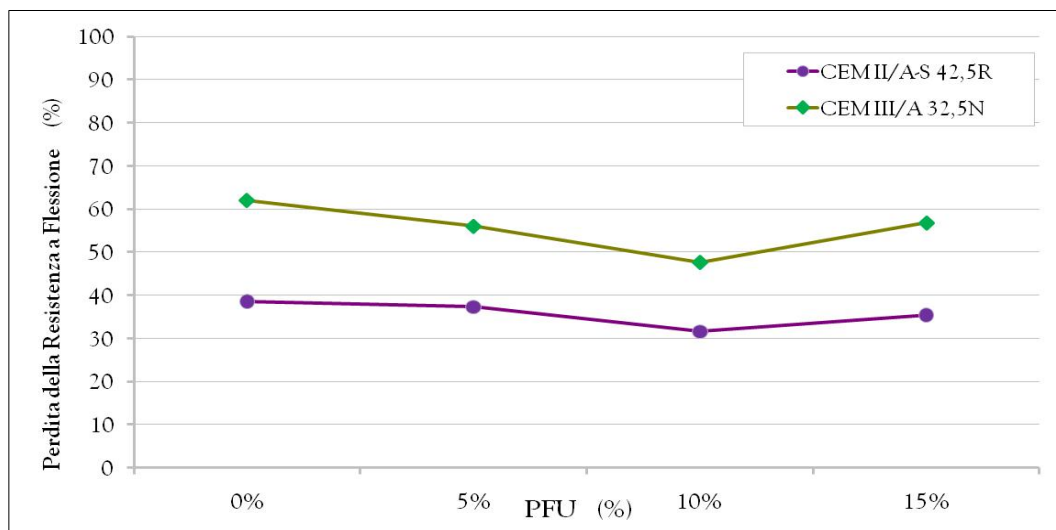


Figura 6.79 – Perdita percentuale di resistenza a flessione

Dai dati registrati con le prove di rottura a flessione, si possono osservare gli effetti in termini di resistenza che i trattamenti termici producono su ogni miscela. Risulta evidente una diminuzione dei valori di resistenza a flessione nelle malte trattate. Confrontando le miscele è possibile affermare che:

- le malte confezionate con CEM II/A 42,5R, a flessione, perdono meno resistenza di quelle confezionate con CEM II/A 32,5N;
- le malte confezionate con PFU dopo i trattamenti termici perdono meno resistenza a flessione rispetto a quelle “Tal Quali”, in particolare quelle con il 10% di gomma meno delle altre;
- la percentuale ottimale di gomma PFU da somministrare all’impasto, anche in virtù del fatto che provoca una riduzione di perdita di resistenza a flessione dopo i cicli termici, è del 10% in sostituzione in volume sulla sabbia.

6.5.5 Prove di resistenza meccanica a compressione sui provini di seconda serie sottoposti a cicli termici

Le prove meccaniche per misurare la resistenza a compressione hanno fornito i dati riportati nelle successive tabelle. Anche in questo caso, sono stati messi a confronto i dati delle prove delle malte non trattate con quelle trattate termicamente. In figura 6.80 sono riportate le perdite percentuali di resistenza a flessione in funzione del dosaggio di gomma PFU per le miscele realizzate con i due differenti cementi.

Resistenza a compressione (MPa)	42,5-T.Q	42,5- 5%	42,5-10%	42,5-15%
Provini sottoposti a cicli termici	44,75	38,8	30,51	25,71
Provini non sottoposti a cicli termici	56,57	45,47	40,6	36,92

Tabella 6.45 – Resistenze a compressione delle miscele sottoposte a cicli termici e non, confezionate con CEM II/A-S 42,5R

Resistenza a compressione (MPa)	32,5-T.Q	32,5- 5%	32,5-10%	32,5-15%
Provini sottoposti a cicli termici	38,19	35,42	32,81	26,01
Provini non sottoposti a cicli termici	49,97	41,75	35,51	27,98

Tabella 6.46 – Resistenze a compressione delle miscele sottoposte a cicli termici e non, confezionate con CEM III/A 32,5N

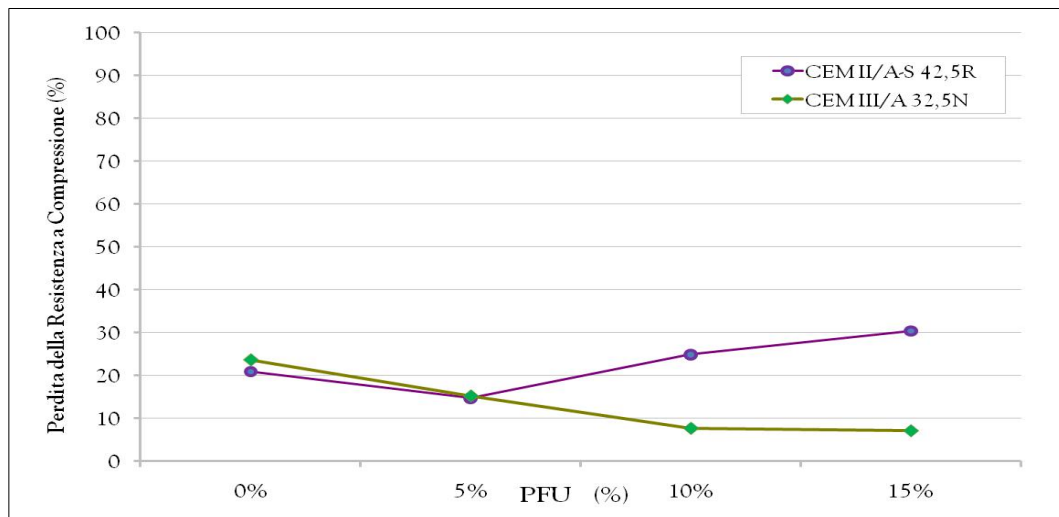


Figura 6.80 – Perdita percentuale di resistenza a compressione

Confrontando i precedenti dati relativi alle resistenze a compressione è possibile affermare che:

- dopo i cicli termici, le resistenze a compressione anche se accettabili, ossia al di sopra dei minimi normativi (UNI EN 998-2);
- la perdita maggiore di resistenza si registra nelle malte confezionate con CEM II/A 42,5R. Per queste malte, infatti, al crescere della percentuale di PFU, si perde fino al 30% della resistenza iniziale;
- le malte confezionate con CEM III/A 32,5N si alterano meno di quelle confezionate con l'altro cemento;
- in caso di basso utilizzo di materiale PFU (fino al 5%) è conveniente utilizzare il cemento CEM II/A 42,5R in quanto, a parità di perdita di resistenza a compressione (circa il 15%), le malte realizzate con questa tipologia di cemento perdono molta meno resistenza a flessione;
- in caso di un maggiore utilizzo di gomma PFU (10-15%) è più conveniente utilizzare un cemento CEM III/A 32,5N, perché dal punto della durabilità per resistenza ai cicli termici i manufatti realizzati con questo cemento si degradano di meno ed, inoltre, perché i livelli di resistenza raggiunti dopo tali cicli sono assolutamente dello stesso ordine di grandezza. Usando il cemento CEM III/A 32,5N rispetto al CEM II/A 42,5R si ha in generale un minor costo economico (a parità di resistenza meccanica).

6.5.6 Curve interpolatrici tra la resistenza a compressione e la velocità ultrasonica

I provini di malta di seconda serie, dopo aver raggiunto i 90 giorni di stagionatura, sono stati suddivisi in due gruppi di cui uno è stato sottoposto ai trattamenti termici e l'altro è stato utilizzato per caratterizzare le miscele, appunto a 90 giorni di stagionatura. In particolare, per quest'ultimo gruppo di provini, sono stati misurati peso, velocità ultrasonora, resistenza a flessione e a compressione, mentre per quelli trattati termicamente, il peso e la velocità sono stati misurati dopo ogni ciclo termico, mentre le resistenze meccaniche solo dopo l'ultimo trattamento. Sulla base del presupposto che per i conglomerati cementizi sono presenti diversi studi che mettono in relazione la velocità ultrasonora con la resistenza a compressione mediante l'individuazione di una legge empirica correlativa, è stato pensato di individuare con lo stesso criterio, una relazione tra

velocità e resistenza. Bisogna precisare, però, che tali leggi sono legate a esperienze particolari, per cui i coefficienti che ne determinano gli andamenti sono diversi e da stimare di volta in volta, per ogni miscela. In definitiva, ciò che si è cercato di fare, è stato quello di determinare delle leggi empiriche che consentano di calcolare una grandezza caratteristica incognita in funzione di una nota. Le costruzioni di appropriate curve di correlazione, fino ad oggi, risultano essere delle buone chiavi di lettura e di interpretazione per i risultati che si ottengono mediante indagini non distruttive. A tale scopo, i valori delle velocità ottenuti con l'indagine ultrasonora, sono serviti per determinare per ogni tipo di miscela delle curve, con le quali stimare poi, le relative resistenze a compressione. Nel dettaglio, per effettuare la stima della resistenza a compressione, è stato necessario individuare una correlazione analitica tra il parametro non distruttivo (velocità ultrasonica) e quello distruttivo (resistenza a compressione) che caratterizza ognuna delle miscele di malta. Questa correlazione, risulta individuata grazie all'elaborazione statistica dei dati relativi alle diverse miscele non trattate termicamente. L'elaborazione statistica dei dati è stata compiuta mediante l'applicazione del metodo dei minimi quadrati, tramite cui è stato possibile individuare la migliore curva interpolatrice dei dati stessi. L'equazione della curva adottata è stata:

$$R = a \times V^b$$

dove a e b sono i parametri da tarare di volta in volta perché influenzati dal tipo di miscela, R la resistenza meccanica a compressione e V la velocità ultrasonica. Per calcolare i coefficienti a e b è necessario "linearizzare" la precedente equazione mediante il passaggio ai logaritmi:

$$\text{Log}(R) = \text{Log}(a) + b \cdot \text{Log}(V)$$

ponendo:

$$\text{Log}(R) = Y$$

$$\text{Log}(a) = A$$

$$\text{Log}(V) = X$$

per cui si ottiene:

$$Y = A + bX$$

che rappresenta l'equazione di una retta con pendenza b e intercetta A . Tra le infinite curve, rappresentative della famiglia di dati a nostra disposizione, la migliore interpolante può essere individuata applicando il metodo dei minimi quadrati. Il metodo consiste nel rendere minima, la somma delle distanze tra i valori di resistenza reali e i rispettivi valori calcolati con la relazione precedente, cioè consiste nel verificare che la curva scelta soddisfi l'equazione:

$$\sum (\text{Log}(R_i) - \text{Log}(a) + b \times \text{Log}(V_i))^2 = \min ;$$

Per verificare quando appena detto, si utilizza un noto teorema di analisi matematica che afferma che il punto di minimo di una funzione, si trova annullando la derivata prima della funzione stessa (precedente equazione) rispetto alle sue variabili, che nel caso in esame sono i parametri a e b da calcolare. Quindi, tramite il sistema a due equazioni nelle due incognite a e b (equazioni normali della retta dei minimi quadrati) così ottenute, le cui espressioni sono

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum (\text{Log}(R_i) - \text{Log}(a) + b \times \text{Log}(V_i))^2 = 0 ;$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum (\text{Log}(R_i) - \text{Log}(a) + b \times \text{Log}(V_i))^2 = 0 ;$$

si ricavano, appunto, i parametri a e b incogniti che saranno proprio quei parametri che consentono di individuare la curva più idonea per ogni miscela. Di seguito, in figura 6.81, è stata riportata, come esempio, la curva stimata per la miscela confezionata con CEM II/A-S 42,5R ed il 5% di materiale PFU

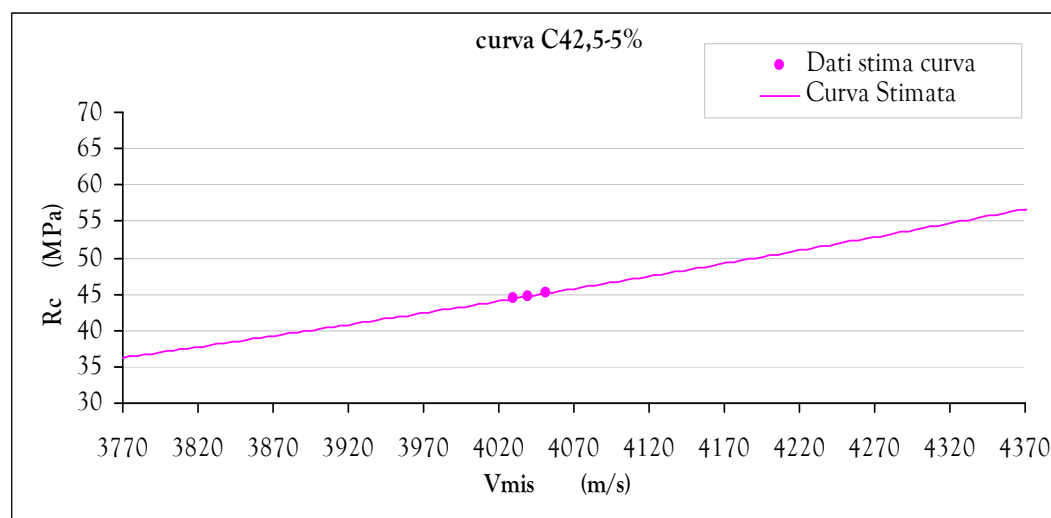


Figura 6.81 - Curva stimata per la miscela confezionata con CEM II/A-S 42,5R e il 5% di PFU.

Non tutti i dati relativi ai provini di malta non trattata termicamente sono stati utilizzati per stimare le curve interpolatrici perché circa la metà di questi, è stata utilizzata per verificare l'attendibilità della curva stimata. Per valutare la bontà delle curve interpolatrici stimate si è calcolato l'errore standard:

$$E_{standard} = \sqrt{\frac{\sum (R_{mis} - R_{stim})^2}{n}}$$

che fornisce la distanza media tra i valori di resistenza a compressione misurati (R_{mis}) con quelli stimati (R_{stim}). Il massimo errore standard è stato di 3,78 MPa. Per quando riguarda l'errore relativo questo non ha superato il 10%. Questo significa che se ad esempio avessimo una resistenza reale di 60 MPa l'errore che si commetterebbe stimandola mediante l'equazione della relativa curva, sarebbe nel peggiore dei casi il 17%. Da tutto ciò possiamo confermare che l'utilizzo di curve di interpolazione per la stima delle resistenze meccaniche a compressione è accettabile anche per malte confezionate con gomma PFU, indipendentemente dalla percentuale di gomma. Stimate e verificate le curve di interpolazione dei provini di malta non sottoposti a cicli termici, si è pensato, come accennato in precedenza, di verificare se tali curve potessero essere utilizzate anche per stimare la resistenza meccanica a compressione dei provini sottoposti a trattamenti termici. Come esempio, nella figura 6.82, sono riportati: le curve di interpolazione stimate con i dati delle miscele non trattate termicamente e i dati relativi ai provini sottoposti a cicli termici per la miscela realizzata con cemento CEM II/A-S 42,5R ed il 5% di materiale PFU. L'andamento rappresentato in tale figura è molto simile agli andamenti valutati su tutte le altre miscele. Come si può osservare dal grafico, le curve stimate per miscele non trattate, risultano non applicabili ai provini sottoposti a cicli termici. Questo è confermato dalle verifiche condotte anche nel calcolo dell'errore standard. Tale errore, infatti, è risultato sempre eccessivo raggiungendo, in alcuni casi, valori pari a 50 MPa.

Ciò ci consente di dire che le curve di correlazione stimate per miscele non trattate non possono essere utilizzate per miscele trattate termicamente. Quindi, se per un verso si può confermare che l'utilizzo di curve di interpolazione per la stima delle resistenze a compressione è una procedura perseguibile per le miscele non alterate dai trattamenti termici, dall'altro si deve registrare il fatto che le stesse curve non possono essere adottate qualora si sottopongano a trattamenti termici i manufatti ottenuti.

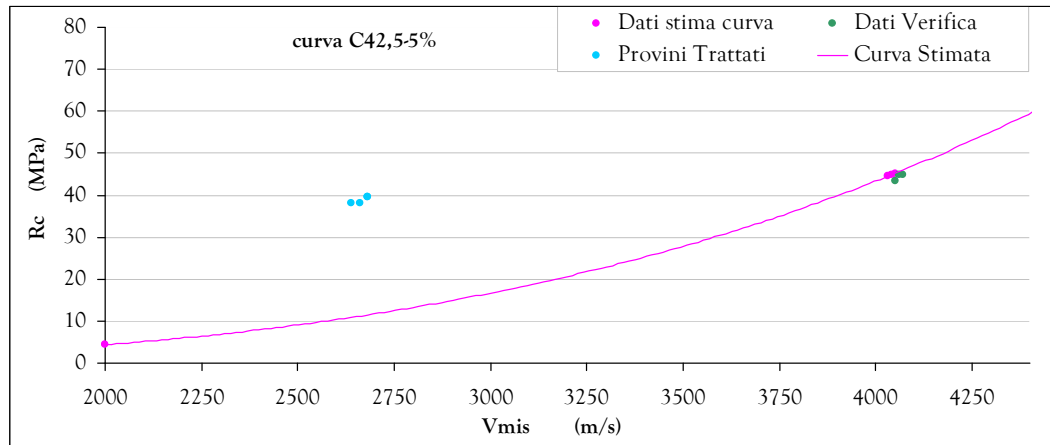


Figura 6.82 – Curva stimata e dati relativi ai provini trattati, per la miscela confezionata con il 5% di PFU e cemento CEM II/A 42,5R

Per evidenziare gli effetti dei trattamenti termici e il conseguente comportamento delle miscele, si riportano in un unico grafico le miscele complessive per tipologia di cemento in cui sono indicate:

- le velocità e le resistenze misurate in base ai provini di malta non trattati;
- le velocità misurate e le rispettive resistenze relative ai provini di malta trattati termicamente.

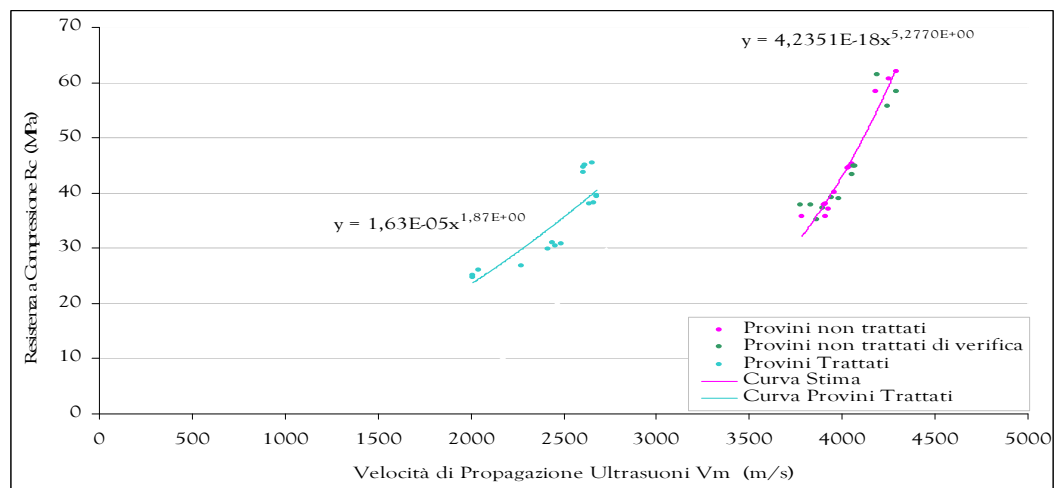


Figura 6.83 – Curve Vm-Rc complessive per miscele realizzate con CEM II/A-S 42,5R

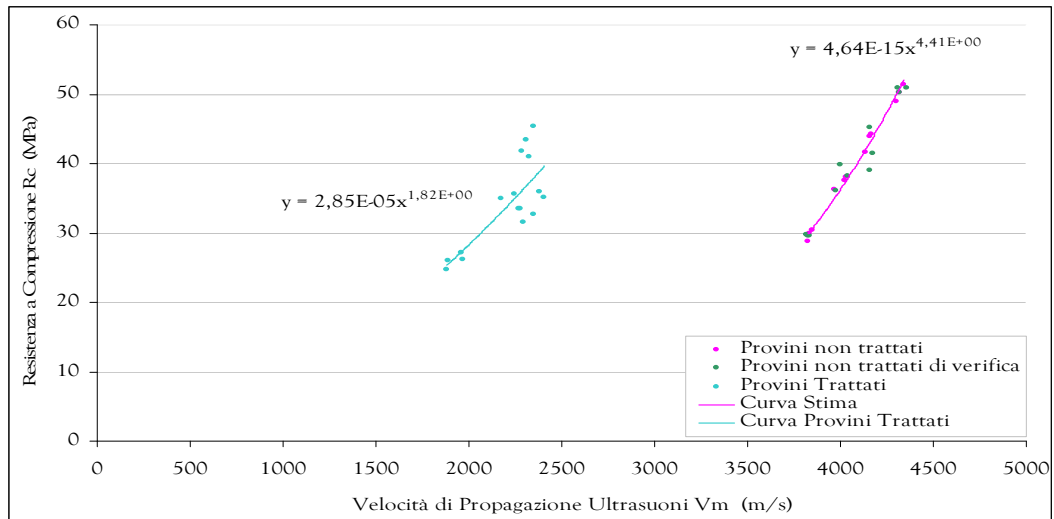


Figura 6.84 – Curve Vm-Rc complessive per miscele realizzate con CEM III/A 32,5N

Dalle stime delle resistenze per miscele trattate, fatte utilizzando le stesse equazioni delle curve interpolatrici relative alle malte non trattate è risultato che:

- le curve interpolatrici possono essere utilizzate per stimare le resistenze a compressione, note le velocità ultrasoniche, solo se i campioni non subiscono trattamenti termici;
- le curve interpolatrici stimate per malte non trattate non possono essere utilizzate per calcolare le resistenze delle malte durante i trattamenti termici e cioè dopo ogni incremento di temperatura a meno che non si trovi un coefficiente correttivo;
- le resistenze stimate sono notevolmente inferiori a quelle misurate, direttamente, attraverso le prove meccaniche;
- riportando i dati su un unico grafico è stato notato che questi due gruppi si concentrano in diverse regioni del piano $R_c - V_m$;
- per le miscele trattate bisogna stimare delle equazioni “ad hoc” poiché evidentemente le alterazioni interne che la matrice cementizia subisce fanno sì che la velocità ultrasonica e la resistenza a compressione siano legate da una legge differente da quella vista per le miscele non trattate oppure qualora si voglia utilizzare le stesse equazioni è evidente che bisogna moltiplicare le stesse per due coefficienti correttivi. Attraverso questi coefficienti si dovrebbe traslare e ruotare la curva interpolatrice dei provini non trattati in modo da farla tendere, con buona approssimazione, alla curva interpolatrice dei provini trattati.

Capitolo 7

Progettazione e caratterizzazione di calcestruzzi a basso impatto ambientale realizzati con gomma PFU e fini non convenzionali

7.1 Premessa

La caratterizzazione condotta sulle malte cementizie ha evidenziato la possibilità di confezionare miscele cementizie aventi particolari prestazioni, in termini di resistenza meccanica e di durabilità, pur somministrando elevati quantitativi di materiale PFU. Ovviamente si è ritenuto opportuno ampliare la ricerca estendendo la campagna di indagine anche al campo dei calcestruzzi sia ordinari che innovativi. In particolare, a partire da uno studio sperimentale improntato nel confezionamento e nella caratterizzazione di calcestruzzi ordinari, cioè miscele di calcestruzzo che ordinariamente sono realizzate per essere utilizzate nei vari campi dell'ingegneria civile (strutture in elevazione, fondazioni, ponti, muri di sostegno, paratie, ecc.), successivamente si è indirizzata la ricerca nel settore dei calcestruzzi innovativi ed in particolare sui calcestruzzi autocompattanti (Self-Compacting Concrete, SCC). Per quest'ultima tipologia di conglomerato è stata eseguita una caratterizzazione reologica (lavorabilità) allo stato fresco e una caratterizzazione meccanica (resistenza meccanica a compressione), fisico-meccanica (prove non distruttive), fisico-chimica (peso, ritiro, resistenza ai cicli di gelo/disgelo, resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro e solfato, resistenza ai cicli termici) allo stato indurito. Nei seguenti paragrafi sono riportate nel dettaglio le indagini condotte e i risultati ottenuti.

7.2 Calcestruzzi ordinari

Ogni anno vengono prodotti ingenti quantitativi di calcestruzzo, soprattutto di tipo tradizionale o ordinario. Riuscire a “smaltire” anche piccoli dosaggi di materiale PFU all'interno delle miscele di conglomerato cementizio significherebbe risolvere gran parte del danno ambientale generato da questo materiale di scarto dell'industria automobilistica. Se, inoltre, si riuscisse a dimostrare che in particolari condizioni l'uso della gomma PFU potesse addirittura comportare il raggiungimento di particolari prestazioni delle miscele così realizzate, allora non si potrebbe far altro che incentivare e promuovere questo tipo di tecnologia. Ecco perché è importante condurre una sperimentazione, sempre attuale, circa la possibilità di utilizzo della gomma PFU nei calcestruzzi ordinari ed indagarne le proprietà in particolari condizioni aggressive, ad esempio quando i calcestruzzi sono soggetti a cicli di gelo/disgelo.

7.2.1 Calcestruzzi ordinari: campagna di indagine

In base alla sperimentazione condotta sulle malte contenenti diverse tipologie e pezzature di gomma provenienti dalla triturazione di pneumatici fuori uso (PFU) somministrate nelle miscele in sostituzione percentuale sul volume di sabbia e contenenti zeolite 5A industriale (aggiunta in percentuale sul peso del cemento), nelle quali è stata verificata la quantità ottimale di questi materiali (risultata all'incirca del 10%, in sostituzione in volume sulla sabbia per la gomma PFU ed il 10%, in aggiunta al cemento in peso per la zeolite), si è ritenuto opportuno procedere con la realizzazione, con tali proporzioni, di impasti di calcestruzzo. Sono stati realizzati impasti tal quali (cioè senza gomma PFU), con la zeolite, con il filler calcareo e con il materiale PFU, in modo da avere la possibilità di

confronto dei valori sperimentali ottenuti. Successivamente, sulla base dei risultati ottenuti, sono stati confezionati ulteriori impasti nei quali è stata ulteriormente affinata la miscela, in relazione ai valori ottenuti in precedenza. Ad esempio, negli impasti di prima approssimazione, si è notato che la presenza della gomma PFU provoca una diminuzione della lavorabilità degli impasti di calcestruzzo allo stato fresco che è stata migliorata attraverso l'introduzione di un additivo superfluidificante nelle miscele definitive. Per le miscele sperimentali di calcestruzzo "ordinario" sono stati utilizzati i seguenti materiali:

- due tipi di cementi, il CEM III/A 32,5N e il CEM II/A-S 42,5R (analoghi a quelli sperimentati sulle malte);
- sabbia di tipo alluvionale e aggregati sia di cava che alluvionali, reperiti sul territorio calabrese;
- zeolite 5A di tipo industriale;
- gomma proveniente dalla triturazione dei pneumatici a fine vita con diversa granulometria.

7.2.2 Calcestruzzi ordinari: mix design delle miscele di prima approssimazione

Lo studio effettuato sull'analisi granulometrica degli aggregati ha portato ad utilizzare nell'impasto un quantitativo di sabbia pari al 45%. Per la restante parte, pari al 55%, è stato utilizzato aggregato grosso con diametro massimo di 16 mm. Gli impasti di prova sono stati preparati con dosaggi ridotti di 13 litri, secondo la seguente procedura di impasto:

- immissione degli aggregati nella betoniera e mescolamento per qualche minuto;
- aggiunta del cemento, dell'eventuale zeolite e/o gomma (PFU) e omogeneizzazione per cinque minuti;
- aggiunta dell'acqua e miscelazione per circa 10 minuti.

Il dosaggio di cemento invariato in tutte le miscele è stato di 440 Kg/m^3 . Per le miscele di prima approssimazione, in definitiva, si è proceduto al confezionamento di quattro tipologie di impasto per ogni tipologia di cemento usato così formulate:

- "TQ", miscela realizzata senza aggiunte di gomma PFU e di zeolite;
- "TQ + 10% Zeolite", miscela realizzata con l'aggiunta del 10% di zeolite, in aggiunta in peso al dosaggio di cemento;
- "TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino", miscela realizzata con l'aggiunta del 10% di zeolite in percentuale in peso rispetto alla quantità di cemento e del 10% di polverino di gomma PFU in sostituzione in volume alla sola sabbia;
- "TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma mista", come la miscela precedente, ma con il termine gomma mista è da intendersi la sostituzione in volume degli aggregati, sabbia e pietrisco, con una frazione di materiale polimerico PFU contenente sia il polverino che pezzature più grandi distribuita secondo il seguente assortimento:
 - 12% polverino;
 - 13% grana media;
 - 75% grana grossa.

Nella tabella 7.1 sono riportate le quantità dei componenti utilizzati per i vari impasti realizzati. Oltre al dosaggio di cemento è stato mantenuto costante in tutte le miscele eseguite in questa fase, il rapporto a/c pari a 0,5.

Denominazione	Tipo cemento	Aggregati	Zeolite (Kg)	Polverino (10%)	Gomma (10%)
Miscela 1	CEM III/A 32,5N	21,63	-	-	-
Miscela 2	CEM III/A 32,5N	21,63	0,57	-	-
Miscela 3	CEM III/A 32,5N	21,45	0,57	0,38	-
Miscela 4	CEM III/A 32,5N	19,43	0,57	-	2,20
Miscela 5	CEM II/A-S 42,5R	21,63	-	-	-
Miscela 6	CEM II/A-S 42,5R	21,63	0,57	-	-
Miscela 7	CEM II/A-S 42,5R	21,45	0,57	0,38	-
Miscela 8	CEM II/A-S 42,5R	19,43	0,57	-	2,20

Tabella 7.1 - Quantità dei componenti delle miscele di calcestruzzo di prima approssimazione

7.2.3 Provini, tolleranze e dimensioni

Realizzate le miscele con la procedura esposta sono stati confezionati i provini di calcestruzzo in accordo con la UNI EN 12390. Le attuali norme sui provini, impongono la realizzazione di cubi il cui lato sia proporzionato alle dimensioni massime dell'aggregato. I lati dei provini possono essere di 10 cm, 15 cm, 20cm e 30 cm. Le tolleranze che riguardano le dimensioni effettive del provino possono scostarsi dalle dimensioni nominali fino all'1%, e, nella norma, vengono anche indicate le tolleranze sulla planarità; infatti, la superficie del provino non deve superare un errore dello 0,05% del lato del provino e le tolleranze angolari ciascuno degli angoli dei provini deve essere di $90^\circ \pm 30'$. In tutti i casi in cui i limiti di tolleranza vengono superati si deve provvedere alla spianatura. Per la realizzazione dei provini esaminati nella presente sperimentazione si è fatto riferimento a provini cubici di lato 10cm.

7.2.4 Casseforme per calcestruzzi

Le norme trattano le caratteristiche delle casseforme quali l'assorbenza e la tenuta nonché della tipologia, delle dimensioni interne degli scomparti e delle relative tolleranze. La massa d'acqua assorbita dalla cassaforma dopo mezz'ora dal riempimento rapportata al volume d'acqua interno della cassaforma non deve superare i $5,0\text{g/dm}^3$. L'assorbenza può essere evitata impermeabilizzando le superfici interne. Le casseforme possono avere uno o più scomparti e devono consentire l'estrazione del provino senza difficoltà e senza danneggiare il provino stesso. Le dimensioni interne dei provini possono scostarsi dalle dimensioni nominali fino all'1%. Nel nostro caso, sono stati utilizzati stampi di plastica rigida costruite in un sol pezzo, resistenti agli urti e all'abrasione e ideali per usi di cantiere e di laboratorio (figura 7.1).

7.2.5 Preparazione dei provini

L'operazione di preparazione dei provini riguarda il getto del calcestruzzo nelle apposite casseforme, preventivamente cosparse di disarmante, al fine di agevolare la sformatura del provino. Con opportune attrezzature è stato effettuato un costipamento del getto, in modo da ottenere la massima densità. Una volta riempito e costipato si è effettuata una rasatura della superficie superiore del cubetto, provvedendo poi a lisciarla con cazzuola.

7.2.6 Sformatura dei provini e stagionatura

È un momento molto delicato, in quanto, il provino deve essere disarmato, senza che si danneggi, normalmente ciò è avvenuto dopo 24 ore dal getto. Dopo la sformatura i provini sono stati lasciati a stagionare in condizioni di umidità e di temperatura controllati (U.R. $\geq 95\%$; T= 20°C). Esistono in normativa deroghe sui tempi di sformatura per casi specifici. Dopo la sformatura il provino è stato

opportunamente siglato per consentirne la successiva identificazione (figura 7.1). La stagionatura è avvenuta all'interno di contenitori pieni d'acqua (figura 7.2) al fine di tenere i provini ad umidità controllata (U.R. $\geq 90\%$ T=18-22°C) fino al momento di esecuzione della prova di laboratorio.

7.2.7 Resistenza a compressione dei provini di prima approssimazione

Di seguito, in tabella 7.2, si riportano le prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7, 28, 90 e 120 giorni di stagionatura sui provini appartenenti alle diverse miscele di calcestruzzo ordinario di prima approssimazione realizzate.



Figura 7.1 - Casseforme usate per il confezionamento dei provini e provini siglati per l'identificazione



Figura 7.2 - Stagionatura dei provini prima e dopo la sformatura



Figura 7.3 – Prova di resistenza meccanica a compressione

Tipo di Cemento	2 giorni	7 giorni	28 giorni	90 giorni	120 giorni
	Rottura (Mpa)	Rottura (Mpa)	Rottura (Mpa)	Rottura (Mpa)	Rottura (Mpa)
32,5 TQ	8,86	17,89	29,54	32,53	35,17
32,5 + 10% Zeolite	14,10	19,35	30,14	33,04	34,94
32,5 + 10% Zeolite + 10% Polverino	13,53	18,61	25,18	25,91	28,15
32,5 + 10% Zeolite + 10% Gomma mista	8,25	11,93	15,01	16,52	15,84
42,5 TQ	19,16	28,51	41,45	47,45	51,03
42,5 + 10% Zeolite	27,10	34,99	47,41	51,78	55,53
42,5 + 10% Zeolite + 10% Polverino	18,34	28,38	32,41	39,29	42,99
42,5 + 10% Zeolite + 10% Gomma mista	14,73	20,21	21,49	24,37	27,41

Tabella 7.2 - Resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo di prima approssimazione

Nei grafici ad istogrammi di figura 7.4 e 7.5 sono riportati gli andamenti delle resistenze meccaniche medie ai diversi giorni di stagionatura.

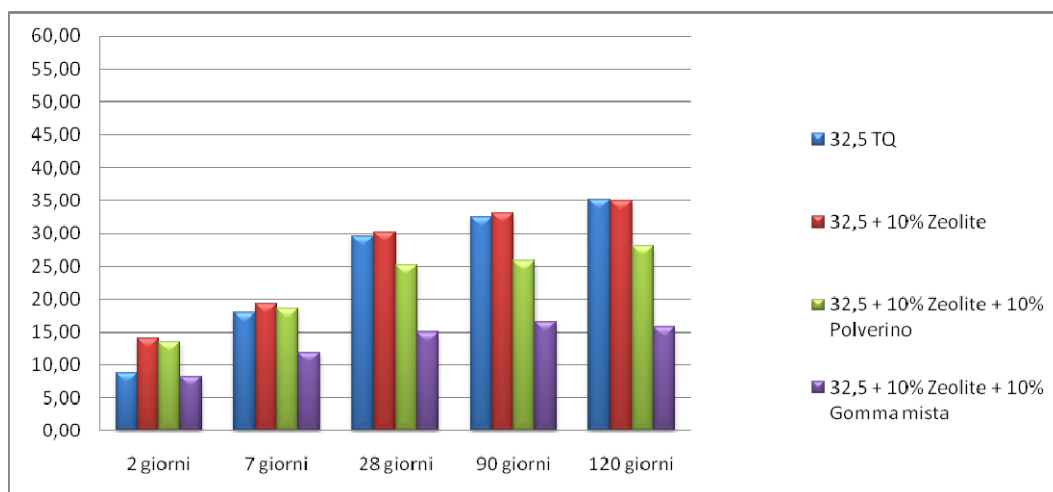


Figura 7.4 - Resistenza a compressione media (MPa) dei provini di prima appross. realizzati con CEM III/A 32,5N

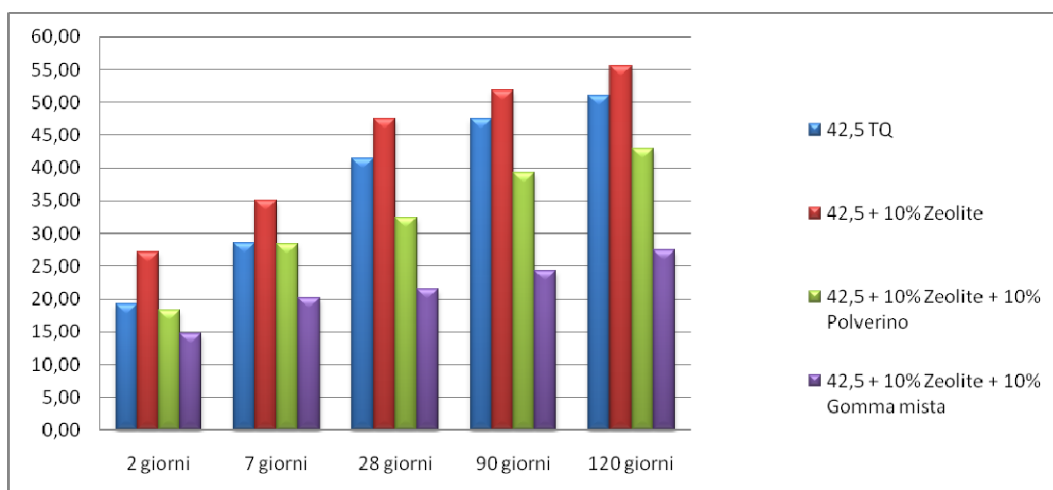


Figura 7.5 - Resistenza a compressione media (MPa) dei provini di prima appross. realizzati con CEM II/S-A 42,5R

Dai risultati delle prove di resistenza meccanica a compressione eseguite sui provini realizzati con il CEM III/A 32,5N si evince che:

- la sostituzione degli aggregati con aggregato polimerico (sia polverino, che grana grossa) provoca ovviamente una perdita di resistenza a compressione sia alle brevi che lunghe stagionature;
- l'aggiunta di zeolite permette un parziale recupero di resistenza a compressione persa a causa dell'utilizzo di aggregato polimerico;
- l'utilizzo del 10% di aggregato polimerico e del 10% di zeolite consente l'ottenimento di un calcestruzzo strutturale in quanto si ottengono a 28 giorni valori di resistenza superiori a 15MPa.

Oltre ai fenomeni già citati per le precedenti miscele, nei provini realizzati con CEM II/A-S 42,5R si evince che:

- con l'utilizzo del 10% di polverino, in sostituzione in volume alla sabbia e l'aggiunta del 10% sul peso del cemento della zeolite, non si verifica una elevata perdita di resistenza a compressione sia alle brevi che lunghe stagionature rispetto a quelle senza gomma;

- l'utilizzo del 10% di "gomma mista" e zeolite in percentuale pari al 10%, consente l'ottenimento di un calcestruzzo strutturale in quanto si ottengono a 28 giorni valori di resistenza superiori ai 20MPa;
- la miscela realizzata con la zeolite e con il 10% di polverino presenta valori di resistenza a compressione nel tempo paragonabili a quelle realizzate con la sola aggiunta di zeolite.

7.2.8 Prove di gelo-disgelo

Tra i numerosi vantaggi derivanti dall'utilizzo della gomma PFU vi sono la maggiore leggerezza dei manufatti, il raggiungimento di requisiti prestazionali particolari quali la fono e la termo-isolanza, ma è stata ipotizzata anche una maggiore resistenza ai cicli di gelo e disgelo. Attualmente la normativa UNI EN 206 prescrive che, in caso di variazioni termiche intorno a 0°C, all'interno della miscela debba essere somministrata una determinata percentuale di additivo aerante con il principale compito di creare una microporosità chiusa per assorbire sovratensioni generate dalle variazioni termiche e dalla presenza di acqua. L'uso di materiale polimerico PFU all'interno della matrice cementizia potrebbe consentire l'ottenimento di questo particolare aspetto prestazionale. Per questo motivo si è condotta un'indagine sui calcestruzzi ordinari realizzati eseguendo prove di gelo/disgelo. La prova di gelo e disgelo è stata eseguita secondo la normativa UNI 7087:2002. I provini sono stati sottoposti ad escursioni termiche secondo un ciclo costituito da due fasi, gelo e disgelo. Si è provveduto, prima dell'inizio della prova, alla pesatura dei provini: questa operazione è stata eseguita, una volta sui provini essiccati in forno allo scopo di valutarne il peso non influenzato dall'acqua potenzialmente intrappolata "peso a secco" e successivamente a inizio ciclo, dopo aver immerso i provini in acqua per tre ore e dopo aver portato gli stessi in condizione satura con superficie asciutta, in modo da avere il peso iniziale di riferimento della prova. Con cadenza periodica di 25 cicli, come previsto da normativa, i provini sono stati pesati al fine di valutare l'andamento del peso. La prova di gelo-disgelo è consistita nell'introdurre i provini nella cella ad una temperatura di -25°C per 6 ore e successivamente per altrettanto tempo in acqua alla temperatura di +5°C.

7.2.9 Analisi dei pesi dei provini sottoposti a gelo-disgelo

Nella tabella 7.3 si riportano i pesi registrati durante la prova di gelo disgelo determinati in condizione satura a superficie asciutta. Di seguito figura 7.6 e 7.7 sono riportati i grafici che mostrano l'andamento del peso durante e cicli, mentre nelle figure 7.8 e 7.9 sono stati riportate le relative variazioni percentuali. La percentuale massima di variazione del peso dei provini di calcestruzzo è inferiore al 3%, pertanto la prova può essere ritenuta attendibile. Dai risultati ottenuti si evince essenzialmente che per i provini confezionati con cemento CEM III/A 32,5N:

- l'aggiunta di polverino, conferisce al conglomerato una buona resistenza ai cicli di gelo-disgelo, si evidenziano piccole variazioni di peso, il che denota, inoltre, una buona impermeabilizzazione complessiva delle miscele;
- le miscele realizzate senza gomma PFU intorno ai 200-250 cicli di gelo-disgelo non aumentano più di peso e lo stesso tende ad abbassarsi, il che indica che i provini iniziano a risentire del fenomeno di degrado;

- i provini realizzati con gomma PFU a fine prova, cioè dopo ben 300 cicli di gelo-disgelo tendono ancora ad acquistare “peso”, a dimostrazione del fatto che ancora non hanno subito fenomeni di degrado.

Per i provini confezionati con cemento CEM II/A-S 42,5R:

- l'utilizzo di zeolite, comporta l'ottenimento di una matrice cementizia più compatta, perciò meno suscettibile dal degrado promosso dai cicli di gelo-disgelo; i provini realizzati senza zeolite, prima dei 300 cicli previsti a livello normativo, manifestano una perdita di peso che molto probabilmente denota il manifestarsi di fenomeni di degrado;
- non c'è stata una significativa variazione di peso tra i provini realizzati con sola zeolite ed i provini realizzati con zeolite e polverino, i quali dopo la prova di gelo-disgelo hanno manifestato pochissimi segni di degrado;
- l'uso di gomma di pezzatura mista in sostituzione degli aggregati tradizionali consente l'ottenimento di buoni livelli di durabilità; dopo 300 cicli di gelo-disgelo, il peso medio dei provini della serie F non evidenzia perdite di massa.

n° cicli	Rilievi del peso (gr) riferiti al Ciclo corrispondente							
	32,5 TQ	32,5 TQ + 10% Zeolite	32,5 TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	32,5 TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista	42,5 TQ	42,5 TQ + 10% Zeolite	42,5 TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	42,5 TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista
0	2430,0	2380,0	2342,0	2172,5	2411,0	2382,5	2311,5	2211,5
5	2431,5	2380,0	2344,0	2176,0	2415,5	2383,5	2312,5	2213,5
30	2431,0	2380,0	2341,0	2174,5	2416,5	2387,0	2314,5	2213,5
55	2430,5	2379,5	2342,0	2175,5	2416,5	2387,5	2316,0	2214,0
80	2432,0	2380,0	2342,0	2176,0	2417,0	2387,5	2316,5	2215,5
105	2436,0	2384,0	2342,0	2181,0	2420,0	2389,5	2318,5	2218,5
130	2437,0	2387,0	2342,5	2185,0	2419,0	2389,5	2318,5	2219,0
155	2435,0	2390,0	2343,5	2188,0	2419,0	2388,5	2318,0	2220,5
180	2435,5	2390,5	2342,0	2188,5	2419,5	2389,5	2319,5	2222,0
205	2439,5	2397,0	2342,0	2194,0	2421,0	2390,0	2317,5	2223,0
230	2444,5	2404,5	2343,0	2198,0	2419,0	2386,0	2318,5	2225,5
255	2436,5	2411,0	2344,5	2203,0	2414,0	2386,5	2318,0	2224,5
280	2424,0	2393,0	2344,0	2204,5	2406,5	2385,0	2315,5	2225,0
300	2422,0	2379,5	2344,0	2207,0	2408,5	2386,0	2317,0	2225,0

Tabella 7.3 - Pesì rilevati durante la prova di gelo – disgelo

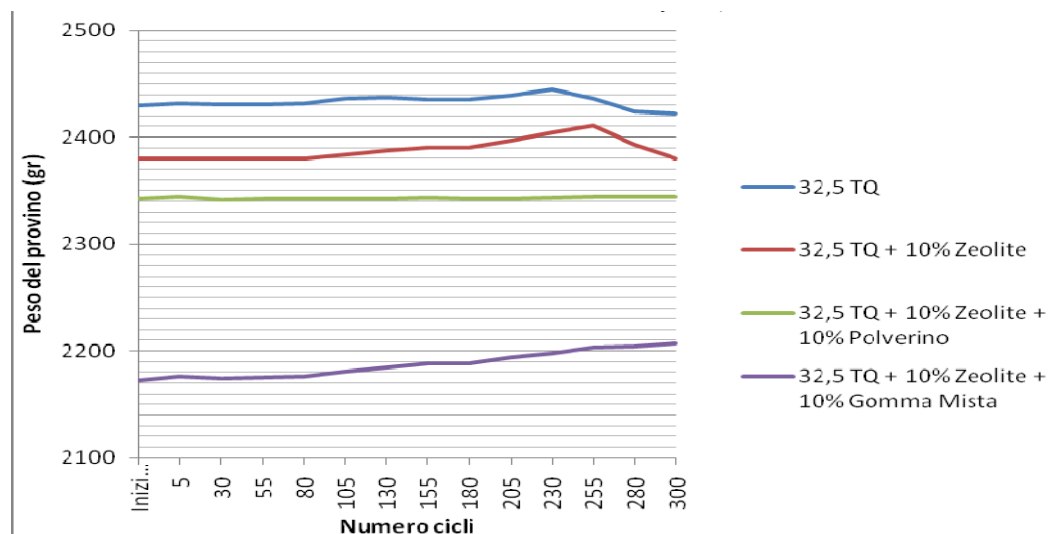


Figura 7.6 - Peso medio rilevato durante la prova di gelo-disgelo dei provini confezionati con cemento CEM III/A 32,5N

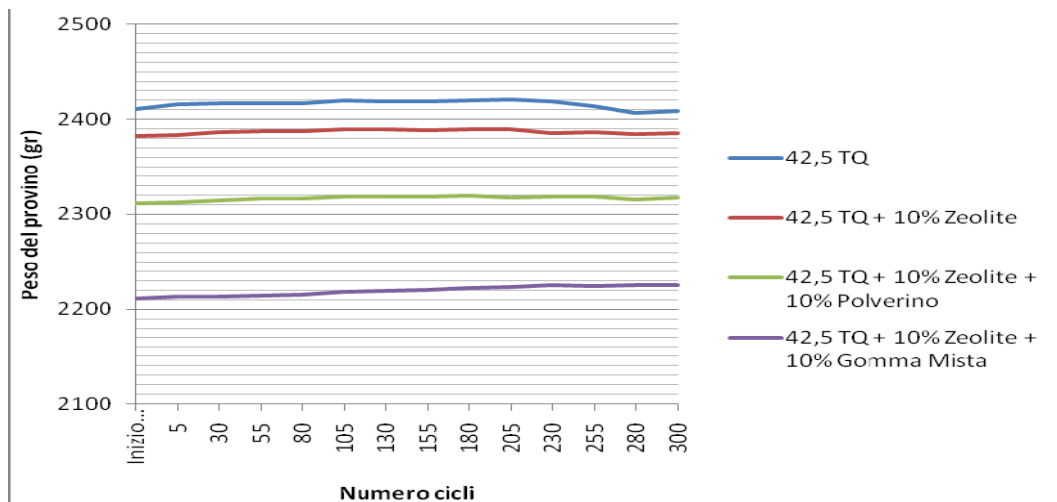


Figura 7.7 - Peso medio rilevato durante la prova di gelo-disgelo dei provini confezionati con cemento CEM II/A-S 42.5R

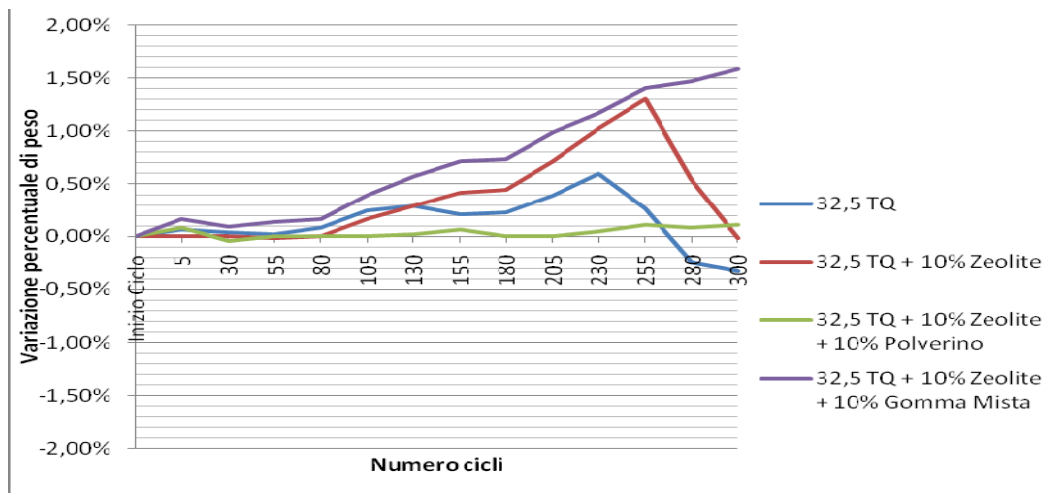


Figura 7.8 - Variazione percentuale di peso medio: provini confezionati con CEM III/A 32,5N

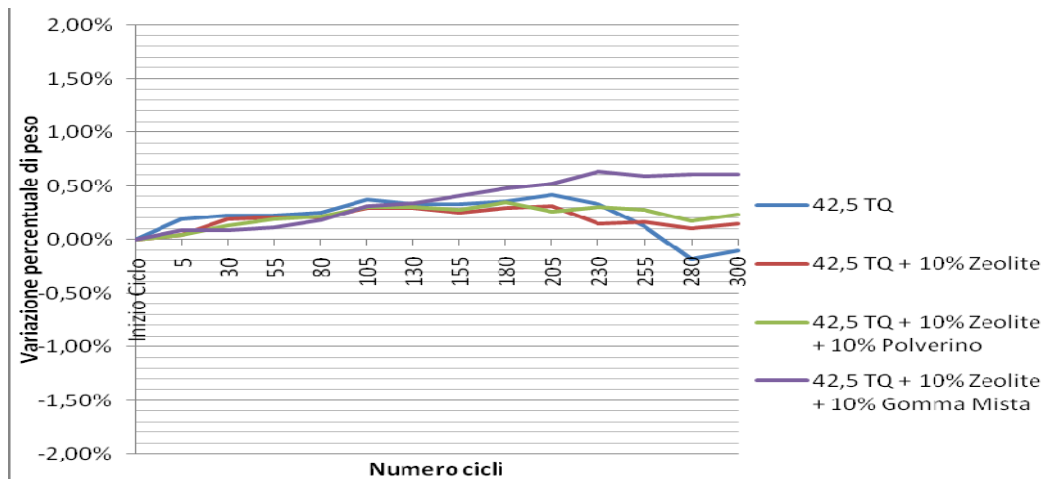


Figura 7.9 - Variazione percentuale di provini confezionati con CEM II/A-S 42,5R

Complessivamente, per i provini realizzati con l'utilizzo di materiale polimerico, fino al limite di 300 cicli, non si sono registrate significative riduzioni di peso, per cui i manufatti realizzati con gomma PFU possono essere utilizzati per realizzare strutture site in ambienti aggressivi dove si manifestano variazioni termiche

intorno allo 0°C. In tabella 7.4 viene riportata la variazione di peso dei provini a secco, prima e dopo i cicli. Per peso a secco è da intendersi il peso dei provini, essiccati in forno, allo scopo di eliminare l'acqua potenzialmente intrappolata.

Tipo di Cemento		Peso a secco	Peso a secco	Variazione percentuale di peso (%)
		Prima della prova (gr)	dopo la prova (gr)	
32,5	TQ	2366,5	2298,5	-2,87%
	TQ + 10% Zeolite	2316,75	2165	-6,55%
	TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	2284,75	2276,75	-0,35%
	TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista	2112	2069,25	-2,02%
42,5	TQ	2342,5	2312,25	-1,29%
	TQ + 10% Zeolite	2329,5	2310,5	-0,82%
	TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	2253,5	2253	-0,02%
	TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista	2142	2126	-0,75%

Tabella 7.4 - Variazione percentuale del peso medio a secco dei provini sottoposti ai cicli di gelo e disgelo

7.2.10 Analisi delle resistenze meccaniche a compressione dei provini sottoposti a cicli di gelo-disgelo

Dopo i cicli di gelo e disgelo, i provini di calcestruzzo sono stati sottoposti a prova meccanica di resistenza a compressione. I risultati ottenuti sono stati messi in relazione con la resistenza meccanica a compressione a 28 giorni dei provini appartenenti alla medesima miscela, ma non sottoposti a cicli termici. Nella tabella 7.5 sono stati riportati i valori ottenuti. I dati, tramite analisi sperimentali, permettono di evidenziare, per le miscele realizzate con cemento CEM III/A 32,5N, quanto segue: i provini realizzati con l'utilizzo del 10% di polverino di gomma in sostituzione in volume alla sabbia, mantengono pressoché inalterata la resistenza meccanica, prima e dopo i cicli di gelo-disgelo; le miscele non realizzate con polverino PFU manifestano, invece, una sensibile riduzione di resistenza a compressione. Per le miscele realizzate con cemento CEM II/A-S 42,5R: anche per i conglomerati realizzati con questo cemento l'uso del 10% di polverino di gomma in sostituzione in volume alla sabbia comporta un sostanziale mantenimento della resistenza meccanica, prima e dopo i cicli di gelo-disgelo; buoni risultati di resistenza sono stati raggiunti dalle miscele TQ, TQ + 10% Zeolite; variazioni più significative sono state evidenziate dalla miscela realizzata con gomma mista.

Tipo di Cemento		Resistenza meccanica a compressione		
		A 28 giorni (MPa)	Dopo la prova di gelo disgelo (MPa)	Variaz. di Resistenza (%)
32,5	TQ	29,54	24,90	-15,71%
	TQ + 10% Zeolite	30,14	27,01	-10,38%
	TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	25,18	24,77	-1,63%
	TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista	14,98	8,96	-40,17%
42,5	TQ	41,45	40,59	-2,08%
	TQ + 10% Zeolite	47,41	44,82	-5,46%
	TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	32,41	31,90	-1,57%
	TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista	21,49	16,20	-24,64%

Tabella 7.5 - Variazione di resistenza meccanica

7.2.11 Valutazione del danno subito dai provini a causa dei cicli di gelo-disgelo

Durante la prova, ogni 50 cicli, si è effettuata una valutazione qualitativa circa l'evoluzione dello stato di danno manifestato dai provini. In particolare, la

valutazione ha previsto il contrassegno dei provini appartenenti ad una data miscela con i seguenti livelli di resistenza al degrado:

- ottimo, relativo ad un ottimo stato di conservazione (assenza di fessure);
- buono, relativo ad un buono stato di conservazione (comparsa delle prime fessurazioni non estese sulla superficie del provino);
- discreto, relativo ad un discreto stato di conservazione (presenza di fessurazioni più o meno diffuse sulla superficie del provino);
- sufficiente, relativo ad un sufficiente stato di conservazione (presenza di fessure diffuse e profonde su tutta la superficie del provino)
- non sufficiente, relativo ad un insufficiente stato di conservazione (distacchi di materiale, fessure profonde e diffuse su tutta la superficie)

Nella tabella 7.6 sono riportate le evoluzioni dello stato di conservazione durante la prova di gelo-disgelo. Affinché la lettura della tabella 7.6 sia maggiormente comprensibile si è realizzata, attraverso delle immagini, l'individuazione del singolo stato di danno (figura 7.10). Non sono stati registrati stati di conservazione non sufficiente.

Tipologia di cemento	Stato dei provini col passare dei cicli di Gelo-Disgelo					
	55	105	155	205	255	300
32,5 TQ	Ottimo	Buono	Buono	Discreto	Sufficiente	Sufficiente
32,5 TQ + 10% Zeolite	Ottimo	Buono	Buono	Discreto	Discreto	Sufficiente
32,5 TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Buono	Buono
32,5 TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista	Ottimo	Buono	Discreto	Discreto	Discreto	Discreto
42,5 TQ	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Buono	Buono
42,5 TQ + 10% Zeolite	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo
42,5 TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo
42,5 TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Buono	Buono	Buono

Tabella 7.6 - Evoluzione dello stato di danno

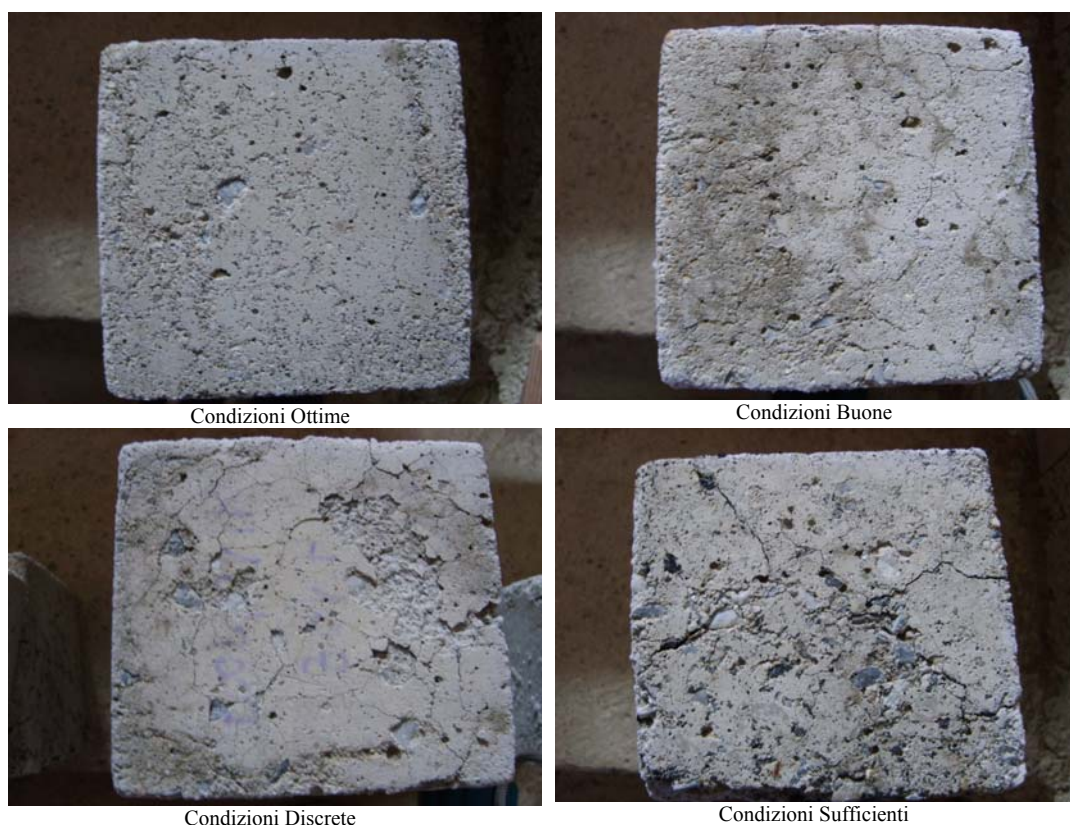


Figura 7.10 - Livelli di degrado considerati nell'indagine qualitativa

7.2.12 Mix - design degli impasti di calcestruzzo ordinario definitivi

In considerazione dei risultati ottenuti sulle miscele di prima approssimazione, si è deciso di apportare qualche modifica alle singole miscele intervenendo sulla granulometria degli aggregati, ad esempio utilizzo del 50% di sabbia e del 50% di pietrisco. Quindi, distribuendo in diversa maniera gli aggregati soprattutto al fine di aumentare la lavorabilità degli impasti. Si è, inoltre, deciso di abbassare il rapporto a/c da 0,50 a 0,45, somministrando in queste miscele, dove opportuno, un additivo superfluidificante. Gli impasti definitivi sono stati eseguiti in betoniera per volumi pari a 35 litri utilizzando soltanto il CEM III/A 32,5N in quantità di 350 Kg/m³. Rispetto alle miscele di prima approssimazione si è abbassato, dunque, il dosaggio di cemento di circa 100 kg/m³ e si è utilizzato solo un cemento di classe di resistenza bassa (32,5). Nella determinazione della quantità d'acqua da utilizzare, si è tenuto conto dell'acqua già contenuta nella zeolite (circa il 25% in peso). La procedura di impasto è stata la seguente:

- inserimento degli aggregati nella macchina e omogeneizzazione per qualche minuto;
- aggiunta del cemento, dell'eventuale zeolite, gomma e omogeneizzazione, poi aggiunta dell'acqua e miscelazione per circa dieci minuti;
- trascorso tale tempo e constatato che l'impasto sia stato omogeneo, si sono confezionati i provini.

È stata utilizzata la seguente dicitura per poter identificare le singole miscele:

- Miscela A: miscela tal quale;
- Miscela B: miscela realizzata con l'aggiunta del 10% zeolite 5A industriale, in peso sul dosaggio di cemento;
- Miscela C: realizzata con l'aggiunta del 10% di zeolite 5A industriale, in peso sul dosaggio di cemento e del 10% di polverino di gomma in sostituzione, in volume, sul dosaggio della sabbia;
- Miscela D: miscela realizzata con l'aggiunta del 10% di zeolite 5A industriale, in peso sul dosaggio di cemento e del 10% di aggregato gommoso grosso, in sostituzione, in volume agli aggregati;
- Miscela E: miscela realizzata con l'aggiunta del 10% di polverino di gomma in sostituzione in volume sul dosaggio della sabbia;
- Miscela F: miscela realizzata con l'aggiunta del 10% di aggregato gommoso grosso, in sostituzione, in volume agli aggregati.

Per gomma mista è da intendersi una combinazione degli aggregati polimerici aventi la seguente distribuzione:

- 25% polverino;
- 25% grana media;
- 50% grana grossa.

In tabella 7.7 sono riportati i dosaggi dei componenti delle miscele per impasti da 35litri.

Denomin.	Tipo cemento	Aggregati (Kg)	zeolite (Kg)	Polverino (10%) (Kg)	Gomma Mista (10%) (Kg)
Miscela A	CEM III/A 32,5N	66,65	-	-	-
Miscela B	CEM III/A 32,5N	65,65	1,75	-	-
Miscela C	CEM III/A 32,5N	62,36	1,75	1,24	-
Miscela D	CEM III/A 32,5N	59,07	1,75	-	1,24
Miscela E	CEM III/A 32,5N	63,13	-	1,24	-
Miscela F	CEM III/A 32,5N	59,80	-	-	1,24

Tabella 7.7 - Miscele definitive di calcestruzzo ordinario

Nella tabella seguente, come esempio di miscela definitiva realizzata, si riporta la composizione tipo della miscela A.

Miscela A				
	Peso specifico	Peso (Kg/m ³)	Vol (l)	Peso per 35 l
Cemento	3,1	350,00	112,90	12,25
Acqua di impasto	1	157,50	157,50	5,52
Aria	-	-	10,00	-
Zeolite (10%Cem)	2,1	0,00	0,00	0,00
Additivo (1%Cem)	1,1	3,50	3,18	0,12
T 10 (20%)	2,65	379,70	143,28	13,13
T 7.1 (15%)		284,77	107,46	9,97
T 4 (15%)		284,77	107,46	9,97
Sabbia (50%)		949,25	358,21	33,22
a/c		0,45		

Tabella 7.8 - Composizione della miscela A

7.2.13 Prove di resistenza a compressione dei provini realizzati con gli impasti della seconda serie

In tabella 7.9 sono riportate le prove di resistenza a compressione, delle diverse miscele definitive realizzate, effettuate a 2, 7, 28, 90 e 120 giorni di stagionatura.

Miscela	Resistenza meccanica a compressione (MPa)				
	2 giorni	7 giorni	28 giorni	90 giorni	120 giorni
A TQ	14,06	31,18	39,77	49,62	54,24
B TQ + 10% Zeolite	26,46	36,08	46,89	50,55	56,71
C TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	16,87	25,18	31,78	35,75	38,29
D TQ + 10 % Zeolite + 10% Gomma Mista	14,21	22,76	28,72	34,09	34,48
E TQ + 10% Polverino	13,21	22,23	28,18	33,43	34,03
F TQ + 10% Gomma Mista	12,53	18,87	28,26	31,91	33,51

Tabella 7.9 - Resistenze a compressione medie dei provini di calcestruzzo degli impasti definitivi realizzati

Nella figura 7.11 è riportato l'andamento delle resistenze a compressione medie dei provini cubici di calcestruzzo degli impasti definitivi.

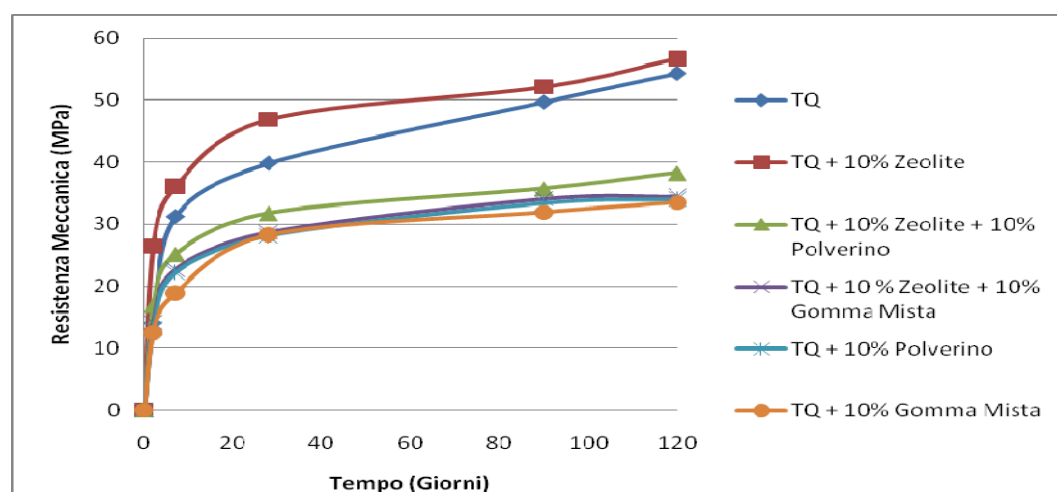


Figura 7.11 - Resistenze a compressione medie degli impasti definitivi realizzati con CEM III/A 32,5N

Dai risultati ottenuti si evince che:

- l'aggiunta di gomma provoca una perdita di resistenza a compressione sia alle brevi che lunghe stagionature, come verificato nella sperimentazione condotta sulle malte;

- si evidenzia un andamento molto simile, tra la curva del conglomerato con solo polverino e quello con la gomma mista sia “con” che “senza” zeolite (figure 7.12 e 7.13);
- l’aggiunta di zeolite all’impasto permette un parziale recupero di resistenza (figure 7.14, 7.15 e 7.16);
- tutti i calcestruzzi realizzati possono identificarsi come calcestruzzi strutturali, nonostante sia stato utilizzato un cemento di bassa classe di resistenza e un dosaggio molto più basso rispetto al dosaggio usato negli impasti di prima approssimazione.

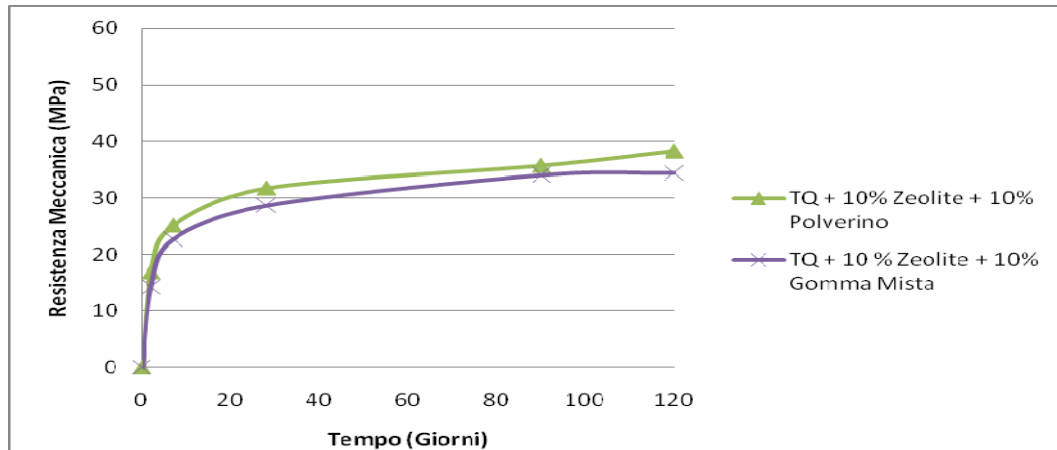


Figura 7.12 - Confronto tra le resistenze medie a compressione registrate nelle miscele contenenti granulometria di gomma differenti, nel caso di presenza di zeolite

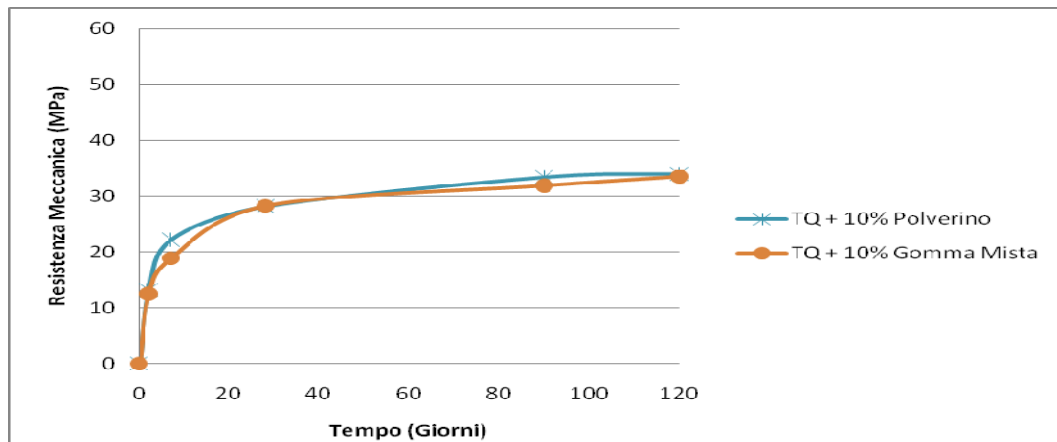


Figura 7.13 - Confronto tra le resistenze medie a compressione registrate nelle miscele contenenti granulometria di gomma differenti, nel caso di presenza di zeolite

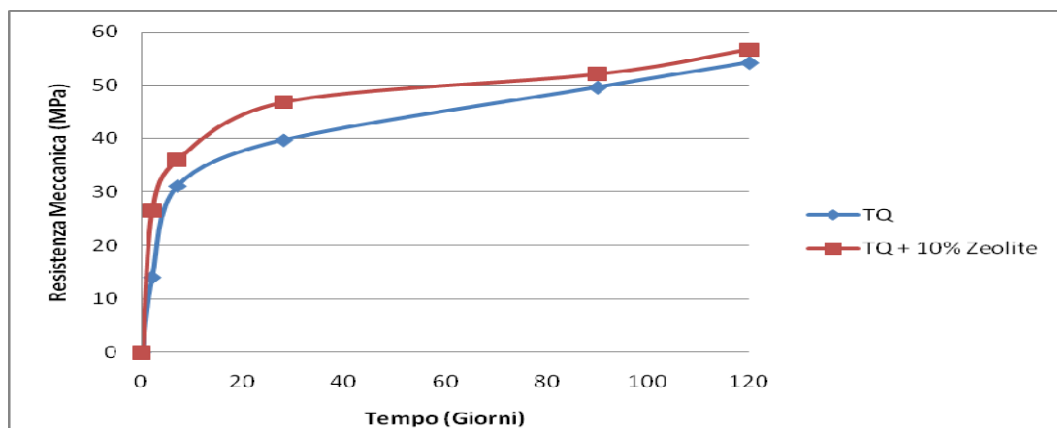


Figura 7.14 - Confronto tra le resistenze medie a compressione registrate nelle miscele tal quali, con e senza zeolite

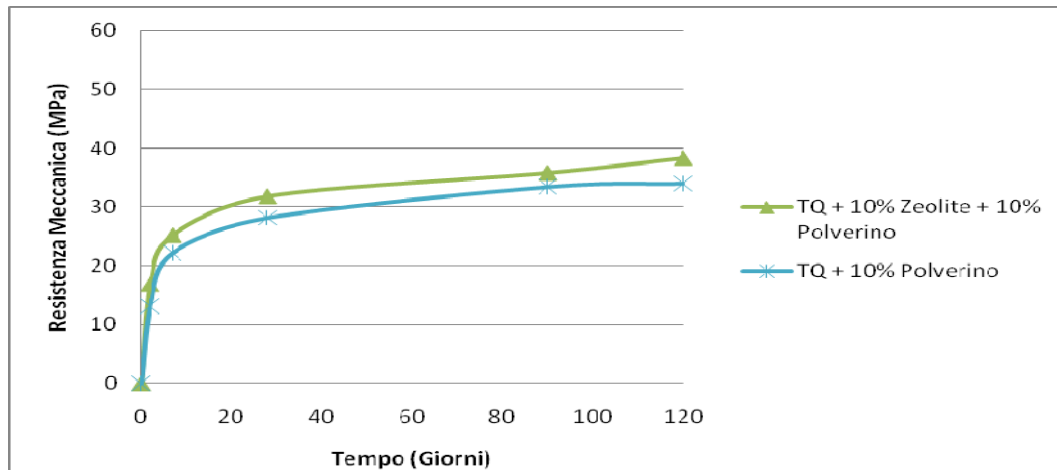


Figura 7.15 - Confronto tra le resistenze medie a compressione registrate nelle miscele confezionate con e senza zeolite

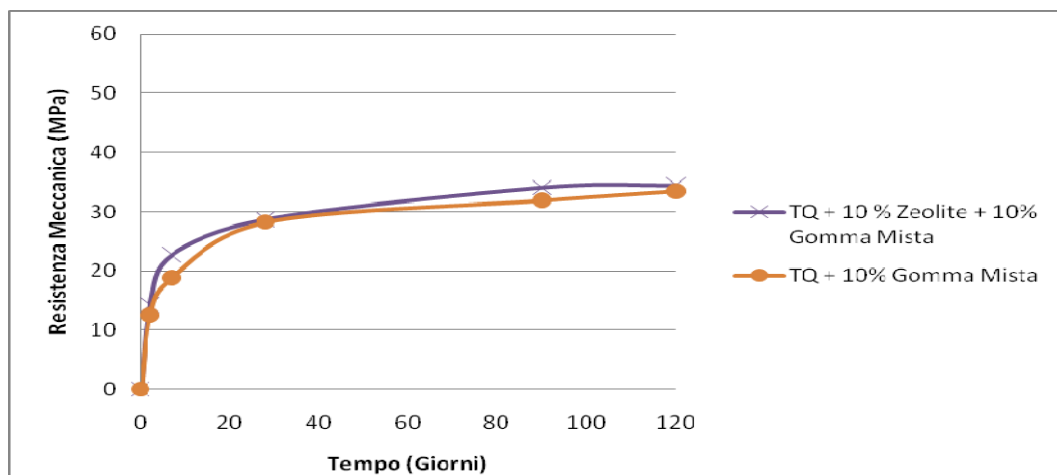


Figura 7.16 - Confronto tra le resistenze medie a compressione registrate nelle miscele confezionate con gomma mista, con e senza zeolite

L'aggiunta di zeolite, assicurando una struttura più compatta e svolgendo attività pozzolanica, permette di recuperare una parte di resistenza meccanica perduta a causa dell'utilizzo di aggregato polimerico.

7.2.14 Valutazione del modulo elastico secante

Sulle miscele definitive di calcestruzzo ordinario è stato valutato per ognuna il modulo elastico secante. E' noto in letteratura scientifica¹ che in un diagramma "...sforzo monoassiale - deformazione di un calcestruzzo assoggettato a un carico di compressione nel tempo in modo tale da mantenere costante la velocità di deformazione...", si possono distinguere "...una parte ascendente approssimativamente lineare, una parte ascendente curva e una parte curva discendente; quest'ultima inizia dopo che la deformazione ha superato il valore massimo corrispondente al carico, tipicamente pari allo 0,2-0,3%...". E' interessante osservare che il comportamento a compressione di un calcestruzzo, almeno per bassi valori di sollecitazione, è in certa misura elastico ma non proporzionale (si potrebbe dire pseudo plastico in quanto la forma ricorda materiali a deformazione eminentemente plastica, come il rame, anche se la

¹ V.A.Rossetti, Il calcestruzzo materiali e tecnologia, McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano, 1995, pagine 199-201

deformazione è quella tipica di un materiale fragile, cioè molto piccola, raggiungendo appena lo 0,2-0,3% come si è detto, mentre il rame può raggiungere il 90%). A valori del carico più elevati il comportamento del calcestruzzo è decisamente non elastico e non proporzionale. Questo andamento è dovuto alla presenza delle fessure all'interfaccia fra la pasta cementizia e l'aggregato. Per livelli di carico fino a circa il 50% del valore massimo, tali fessure risultano stabili, nel senso che a carico costante assumono una configurazione stabile e una lunghezza costante. Per livelli di carico tra il 50 e il 75% del carico massimo il sistema di fessure tende a diventare meno stabile e queste si accrescono; al di sopra di un livello di carico del 75-80%, detto carico critico, la velocità di propagazione aumenta ed il sistema di fessure diventa instabile, cosicché la velocità di deformazione diventa superiore a quella inizialmente prodotta dalla macchina, la reazione del provino si riduce ed il carico applicato decresce. Se si porta il livello della sollecitazione al di sopra del carico critico e a un valore costante, il calcestruzzo manifesta un tipo di rottura in condizioni di carico protratto; è stato osservato, ad esempio, che con un carico costante pari al 90% del carico massimo, a causa del propagarsi delle fessure, dopo circa un'ora è avvenuta la rottura del provino; per carichi maggiori il tempo durante il quale il carico è sopportato si riduce. In assenza di un vero e proprio comportamento di elasticità proporzionale, il comportamento elastico del materiale viene definito attraverso i moduli tangente iniziale, tangente a un valore definito del carico e secante, definito anche quest'ultimo in corrispondenza a un valore determinato del carico. Ai fini dell'attuale ricerca, si è ritenuto opportuno valutare il comportamento dei calcestruzzi confezionati con zeolite e materiale polimerico PFU anche per la caratteristica meccanica del modulo elastico dei conglomerati cementizi stessi. In particolare, si è provveduto alla stima del modulo elastico secante di ogni miscela definitiva eseguita. Le prove condotte sono molto interessanti dal punto di vista scientifico in quanto consentono di valutare l'influenza della gomma PFU sul comportamento meccanico, in questo caso sul modulo elastico, dei conglomerati. Facendo riferimento alle norme UNI vigenti si sono determinati i valori della resistenza a compressione di provini cilindrici di calcestruzzo della stessa miscela d'impasto e dimensioni di quelli destinati alla misura del modulo elastico secante, confezionati e stagionati nelle identiche condizioni. I risultati di tali prove meccaniche a compressione su provini cilindrici sono riportati in tabella 7.10.

Provino	Peso (gr)	Carico max (KN)	Res. Compr. (MPa)
A	12550	593,87	33,6
B	12300	698,18	39,5
C	11440	487,93	27,6
D	11810	419,6	23,7
E	12203	441,34	25
F	11670	344,75	20,29

Tabella 7.10 - Resistenze meccaniche a compressione di provini cilindrici a 28 giorni di stagionatura

Come previsto a livello normativo, la tensione massima di prova da utilizzare per la determinazione del modulo elastico secante a compressione è fissata ad 1/3 della resistenza a compressione del calcestruzzo. La tensione di base (precarico), diversa da zero, deve essere fissata pari a circa 1/10 della tensione massima di prova. Per quanto riguarda l'intervallo tra la tensione massima e la tensione di base, si sono considerate altre due letture di tensioni intermedie N1 e N2. I carichi a cui si fa riferimento nell'esecuzione della prova di stima del modulo elastico secante sono riportati in tabella 7.11.

Serie	Carico (kN)					
	A	B	C	D	E	F
Precarico	19,8	23,3	16,3	14,0	14,7	11,5
N1	66,0	77,6	54,2	46,6	49,0	38,3
N2	132,0	155,2	108,4	93,2	98,1	76,6
Carico massimo	198,0	232,7	162,6	139,9	147,1	114,9

Tabella 7.11 - Valori di carico da utilizzare per la stima dei moduli elastici delle miscele

Facendo dei cicli di carico, così previsto a livello normativo, si possono ottenere, a stabilizzazione, le letture estensimetriche. I cicli stabilizzati ai valori di tensione permettono di verificare che le letture sui tre estensimetri non differiscano singolarmente dal loro valore medio più del 10%. Alla prima serie fanno seguito le serie di cicli di stabilizzazione tra le tensioni intermedie e quella massima. A stabilizzazione avvenuta è stata effettuata la lettura delle deformazioni in corrispondenza della tensione massima e la lettura della deformazione residua. In figura 7.17 sono raffigurati alcuni grafici delle prove effettuate sulle diverse miscele. Il modulo elastico secante è ottenuto dal rapporto tra la differenza di tensione (massima e minima) e la differenza tra la deformazione in corrispondenza della tensione massima e la deformazione residua:

$$E_s = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\sigma_i - \sigma_0}{\Delta \varepsilon}$$

In tabella 7.12 sono riportati i valori medi del modulo elastico ottenuto per le diverse miscele cementizie realizzate. Si determina infine il carico di rottura dei provini usati per tale determinazione: la media di questi valori non deve differire più del 20% di quelle dei provini provati soltanto a compressione. Nel nostro caso tale condizione è sempre stata rispettata. I risultati relativi sono riportati in tabella 7.13. Dalle prove meccaniche a compressione e dalle stime dei moduli elastici per i calcestruzzi realizzati, si evince che l'utilizzo di zeolite permette un miglioramento delle proprietà meccaniche. Infatti, nelle miscele in cui è presente la zeolite (B, C ed E) si ha un incremento del valore della resistenza meccanica a compressione e del valore del modulo elastico rispetto alle stesse miscele confezionate senza zeolite (A, D e F). La presenza di gomma PFU nelle miscele comporta, in generale, abbassamenti non eccessivi del valore del modulo elastico. Dal confronto tra le miscele realizzate con polverino di gomma e gomma mista si evince che negli impasti, la presenza di una granulometria più fine di materiale polimerico conferisce al manufatto finito valori di modulo elastico più elevato rispetto a quelli con granulometria più grossolana.

Tipo	Composizione	Es (MPa)
A	TQ	28969
B	TQ + 10% Zeolite	29382
C	TQ + 10% Zeolite + 10% Polverino	20332
D	TQ + 10% Zeolite + 10% Gomma Mista	21009
E	TQ + 10% Polverino	24135
F	TQ + 10% Gomma Mista	15944

Tabella 7.12 - Moduli elastici secanti medi per le diverse miscele

Miscela	Res. Compr. provini usati per stima di Es (Mpa)	Res. Compr. 28 giorni (Mpa)	Differenza (%)
A	38,85	33,60	15,6%
B	35,88	39,50	-9,2%
C	29,11	27,60	5,5%
D	23,56	23,70	-0,6%
E	26,04	25,00	4,2%
F	19,74	20,29	-2,7%

Tabella 7.13 - Verifica dell'attendibilità delle stime dei moduli elastici

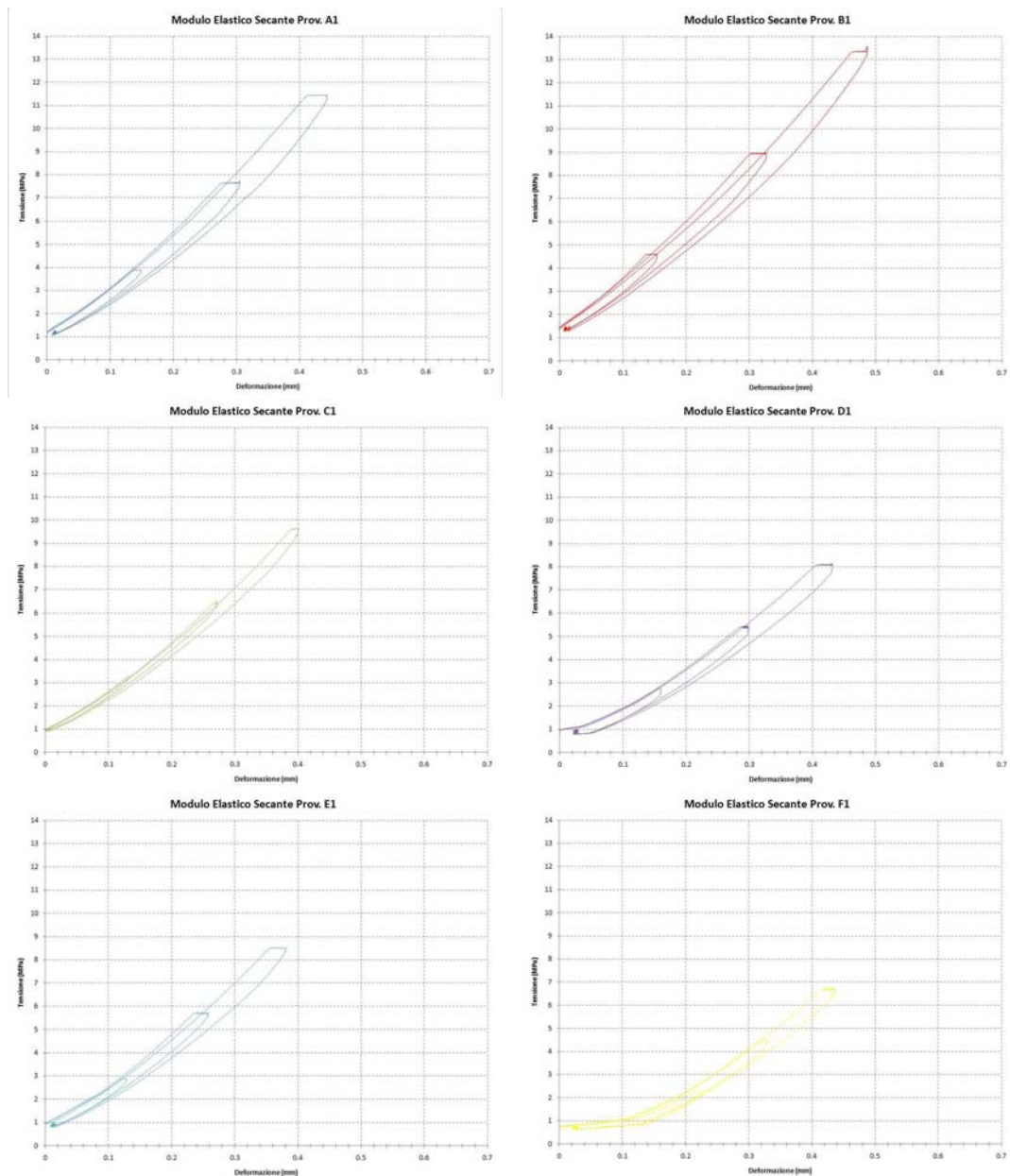


Figura 7.17 - Alcuni cicli di stabilizzazione eseguiti sui provini cilindrici

7.3 Calcestruzzi autocompattanti

L'esperienza condotta sui calcestruzzi ordinari ha permesso di stabilire la possibilità di raggiungimento, da parte dei manufatti confezionati con la gomma PFU, di elevate prestazioni soprattutto in termini di durabilità. Si è proceduto, quindi, con la sperimentazione di utilizzo di questo materiale polimerico PFU in calcestruzzi innovativi di tipo autocompattante (SCC).

7.3.1 Campagna di indagine

Preso atto dei buoni risultati registrati con gli impasti sia di prima approssimazione che con gli impasti definitivi di calcestruzzo ordinario confezionati con zeolite e gomma PFU, si è pensato di realizzare anche dei calcestruzzi autocompattanti (self-compacting concrete, SCC) al fine di valutare la possibilità di utilizzo soprattutto del materiale polimerico di scarto all'interno di questi calcestruzzi innovativi e constatarne eventuali pregi e difetti. Il lavoro è stato rivolto in una prima fase alla progettazione di calcestruzzi autocompattanti

tenendo conto dell'influenza, della diversa natura e quantitativo di materiale finissimo impiegato, successivamente si è provveduto a valutarne le proprietà allo stato fresco ed indurito. La progettazione di una miscela di SCC è, in larga misura, diversa da quella di un calcestruzzo ordinario; infatti, cambiano sia gli obiettivi della progettazione che soprattutto le proprietà fisico-reologiche allo stato fresco. In quest'ottica la prima parte del lavoro di ricerca sugli SCC effettuato è stato suddiviso in due fasi:

- la prima fase ha riguardato la produzione di impasti di prova, per valutarne qualitativamente la compatibilità tra i materiali finissimi utilizzati ed i costituenti ordinari (cemento, aggregato) e per determinarne opportunamente i dosaggi da impiegare per ottenere una determinata fluidità allo stato fresco. In questa fase sono state valutate anche le caratteristiche fisico-reologiche dell'impasto tramite l'esecuzione di una serie di test quali lo Slump Flow ed il J-Ring ed infine, sono state valutate le prestazioni meccaniche alle brevi ed alle lunghe stagionature;
- la seconda fase ha riguardato la progettazione, realizzazione e caratterizzazione degli impasti definitivi in base ai risultati ottenuti nella prima fase con il confezionamento degli impasti di prova, tramite prove reologiche allo stato fresco, meccaniche, fisico-meccaniche e chimico-fisiche allo stato indurito.

7.3.2 Calcestruzzi autocompattanti: materiali

Per la progettazione delle miscele sono stati utilizzati materiali reperibili nel comprensorio cosentino, in modo tale da ottenere un calcestruzzo proponibile sul mercato. Nello specifico, sono stati utilizzati:

- cemento CEM II/A-S 42,5 R;
- aggregati alluvionali con dimensione massima di 16 mm;
- polverino di gomma PFU utilizzato in sostituzione in volume sulla sabbia;
- materiali finissimi quali filler calcareo e zeolite 5A di produzione industriale;
- additivi superfluidificante (GLENIUM SKY 521) e aerante (MAPEPLAST PT1).

7.3.3 Calcestruzzi autocompattanti: miscele di prova

Per quanto riguarda il proporzionamento delle miscele, la scelta dei dosaggi è stata guidata dai riferimenti delle linee guida della Normativa Italiana UNI 11040.

In particolare, la norma consiglia:

- un contenuto di finissimi compreso tra 500 – 600 kg/m³;
- un rapporto acqua/finissimi compreso tra 0,28 – 0,37;
- un volume di pasta (cemento, aggiunte e finissimi da aggregati) non minore di 400 litri/m³.

In base a questi vincoli sono state utilizzate le seguenti quantità:

- 380 kg/m³ di cemento;
- 180 kg/m³ di aggiunte minerali;
- 190 litri/m³ di acqua.

Si è ottenuto, quindi, un dosaggio di finissimi di 560 kg/m³ (cemento più aggiunte minerali) ed un rapporto acqua/finissimi di circa 0,34. Il rapporto a/c è stato mantenuto per ogni impasto pari a 0,50. In questa prima fase della sperimentazione ci si è dedicati alla valutazione, in modo qualitativo,

dell'influenza dei diversi materiali finissimi sulle caratteristiche di fluidità dell'impasto fresco, al variare del contenuto di additivo superfluidificante. In particolare, i parametri che sono stati osservati durante la realizzazione degli impasti freschi sono stati:

- lavorabilità della miscela;
- presenza di bleeding;
- presenza di segregazione.

Sono state progettate e realizzate sette miscele di SCC di prova. Nella tabella 7.14 sono riportati i dosaggi delle miscele realizzate.

Miscela	1) ZC10	2) ZC20	3) ZC20	4) ZC0A	5) ZC	6) ZC	7) Z
Materiale	Peso (Kg/mc)	Peso (Kg/mc)	Peso (Kg/mc)	Peso (Kg/mc)	Peso (Kg/mc)	Peso (Kg/mc)	Peso (Kg/mc)
Cem II/A-S 42,5 R	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
Acqua	190,0	190,0	190,0	190,0	190,0	190,0	190,0
Zeolite 5A secca	106,0	106,0	106,0	106,0	106,0	106,0	180,0
Filler Calcareo	73,0	73,0	73,0	73,0	73,0	73,0	-
Aggr. Totali	1510,3	1589,8	1589,8	1510,251	1589,8	1589,8	1568,0
Sabbia	755,1	794,9	794,9	755,126	794,9	794,9	784,0
Tratt 10	196,3	206,7	206,7	196,333	206,7	206,7	203,8
Tratt 7	241,6	254,4	254,4	241,640	254,4	254,4	250,9
Tratt 4	317,2	333,8	333,8	317,153	333,8	333,8	329,3
Polverino	10,6	-	-	-	-	-	-
Add. Superfluidificante	0,68	6,46	6,46	10,64	6,46	10,64	10,64
Add. Aerante	-	-	-	0,68	-	-	-

Tabella 7.14 - Miscele di SCC di prova

Su tali impasti di prova sono state valutate le proprietà fisiche e meccaniche allo stato fresco ed indurito. Allo stato fresco sono state osservate le proprietà in termini di lavorabilità, bleeding e segregazione. In tabella 7.15 sono state riportate le valutazioni qualitative su tali proprietà. Allo stato indurito sono state misurate le resistenze meccaniche a compressione a 2, 7, 28 giorni di stagionatura. In tabella 7.16 sono riportati i valori di resistenza meccanica a compressione medi valutati in provini cubici di calcestruzzo SCC realizzati. I valori delle resistenze meccaniche a compressione a 28 giorni sono diagrammati nella figura 7.18.

Miscela	Additivo s.f. (% sul dosaggio di cemento)	Additivo aerante (% sul dosaggio di cemento)	Lavorabilità	Bleeding	Segregazione
1 (ZC10)	2,5	-	Buona	Assente	Assente
2 (ZC20)	2,2	-	Buona	Medio	Media
3 (ZC20)	2	-	Buona	Assente	Assente
4 (ZC)	1,5	-	Scarsa	Assente	Assente
5 (ZC)	2,8	-	Buona	Assente	Assente
6 (ZC0A)	2,8	1,66	Buona	Assente	Assente
7 (Z)	2,8	-	Ottima	Assente	Assente

Tabella 7.15 - Impasti di prova con relative percentuali degli additivi utilizzati

Miscela	Res. Compr. 2 gg (MPa)	Res. Compr. 7 gg (MPa)	Res. Compr. 28 gg (MPa)
1 (ZC10)	24,59	30,04	35,42
2 (ZC20)	21,53	22,66	24,75
3 (ZC20)	24,68	34,78	40,42
4 (ZC)	35,40	38,09	4,34
5 (ZC)	34,47	54,68	65,24
6 (ZC0A)	33,74	54,04	61,53
7 (Z)	35,62	56,88	71,20

Tabella 7.16 – Impasti di prova: resistenze medie a compressione

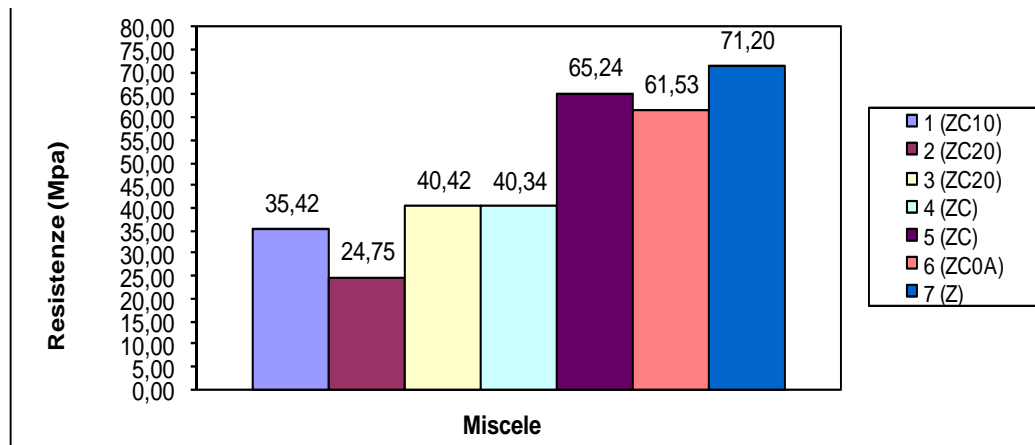


Figura 7.18 - Resistenze meccaniche a compressione medie a 28 giorni di stagionatura

In particolare si rileva che: la presenza della zeolite 5 A agisce sulla miscela allo stato fresco come un additivo viscosizzante, quindi, per ottenere buona lavorabilità, è necessario un maggiore dosaggio di additivo superfluidificante; da evidenziare che, soprattutto nelle miscele realizzate con zeolite, sono assenti i fenomeni di segregazione e di bleeding; l'aggiunta della zeolite sia agli impasti realizzati con il filler calcareo che con la gomma evita l'aggiunta dell'additivo viscosizzante consentendo di ottenere impasti con buona lavorabilità e assenza dei fenomeni di segregazione e di bleeding; il dosaggio ottimale di additivo superfluidificante è compreso tra 2,2 e 2,8% rispetto al peso del cemento. Per quanto riguarda le resistenze meccaniche e da evidenziare: i provini realizzati con la zeolite esibiscono la maggior parte della resistenza a compressione, circa il 70% del valore finale, alle brevi stagionature, cioè entro i primi sette giorni, per cui il silico alluminato idrato zeolitico può essere considerato anche come un additivo accelerante di indurimento, come verificato nella sperimentazione relativa alle malte cementizie; i provini realizzati con la zeolite e il filler calcareo esibiscono uno sviluppo più graduale della resistenza a compressione.

7.3.4 Calcestruzzi autocompattanti: miscela definitiva

Dopo aver verificato l'idoneità dei materiali da utilizzare per la produzione degli SCC e a seguito della caratterizzazione degli impasti di prova si è passati alla realizzazione degli impasti definitivi. Sono state confezionate 5 diverse miscele e per ognuna di loro sono state eseguite una serie di prove per attestarne le proprietà reologiche allo stato fresco e meccaniche allo stato indurito. Nelle tabelle 7.17-7.21 sono riportate le composizioni delle miscele definitive realizzate.

Materiale	Ps (Kg/l)	Peso (Kg/mc)	Volume (l/mc)
Cem II/A-S 42,5 R	3,1	380	122,6
Acqua	1	190	190,0
Zeolite 5A secca	2,1	106	50,5
Filler Calcareo	2,7	73	27,0
Aria	-	-	10,0
Aggr. Totali	2,65	1590	600,0
Sabbia	2,65	765	270,0
Tratt 10	2,65	207	78,0
Tratt 7	2,65	254	96,0
Tratt 4	2,65	334	126,0
Polverino	1	30	30,0
Add. Superfluidificante		9,5 kg/mc	

Tabella 7.17 - Miscela ZC10

Materiale	Ps (Kg/l)	Peso (Kg/mc)	Volume (l/mc)
Cem II/A - S 42,5 R	3,1	380	122,6
Acqua	1,0	190	190,0
Zeolite 5A secca	2,1	106	50,5
Filler Calcareo	2,7	73	27,0
Aria	-	-	10,0
Aggr. Totali	2,65	1590	600,0
Sabbia	2,65	795	300,0
Tratt 10	2,65	207	78,0
Tratt 7	2,65	254	96,0
Tratt 4	2,65	334	126,0
Add. Superfluidificante	5,7 kg/mc		

Tabella 7.18 - Miscela ZC0

Materiale	Ps (Kg/l)	Peso (Kg/mc)	Volume (l/mc)
Cem II/A - S 42,5 R	3,1	380	122,6
Acqua	1,0	190	190,0
Zeolite 5A secca	2,1	180	85,7
Aria	-	-	10,0
Aggr. Totali	2,65	1568	591,7
Sabbia	2,65	784	295,8
Tratt 10	2,65	204	76,9
Tratt 7	2,65	251	94,7
Tratt 4	2,65	329	124,3
Add. Superfluidificante	10,64 kg/mc		

Tabella 7.19 - Miscela Z00

Materiale	Ps (Kg/l)	Peso (Kg/mc)	Volume (l/mc)
Cem II/A - S 42,5 R	3,10	380	122,6
Acqua	1,1	190	190,0
Zeolite 5A secca	2,1	106	50,5
Filler Calcareo	2,7	73	27,0
Aria	-	-	40,0
Aggr. Totali	2,65	1510	569,9
Sabbia	2,65	755	284,9
Tratt 10	2,65	196	74,1
Tratt 7	2,65	242	91,2
Tratt 4	2,65	317	119,7
Add. Superfluidificante	10,64 kg/mc		
Add. Aerante	0,684 kg/mc		

Tabella 7.20 - Miscela ZC0A

Materiale	Ps (Kg/l)	Peso (Kg/mc)	Volume (l/mc)
Cem IIA 42,5 R	3,10	380	122,6
Acqua	1	190	190,0
Zeolite 5A secca	2,1	106	50,5
Filler Calcareo	2,7	73	27,0
Aria	-	-	10,0
Aggr. Totali	2,65	1590	600,0
Sabbia	2,65	795	300,0
Tratt 10	2,65	207	78,0
Tratt 7	2,65	254	96,0
Tratt 4	2,65	334	126,0
Polverino	1	60	60,0
Sabbia	2,65	734	240,0
Add. SFluidif	10,64		

Tabella 7.21 - Miscela ZC20

7.3.5 Caratterizzazione reologica allo stato fresco

La caratterizzazione delle miscele allo stato fresco è avvenuta verificando quanto previsto sui calcestruzzi autocompattanti dalla relativa normativa. In particolare,

sono state eseguite le prove dello slump flow test, dello j-ring test e del v-funnel test. Nella tabella 7.22 sono riportati i criteri di accettazione allo stato fresco previsti a livello normativo per classificare un calcestruzzo come calcestruzzo autocompattante (SCC)².

7.3.5.1 Slump flow test delle miscele definitive

Tale prova consente di determinare la consistenza (fluidità) del calcestruzzo autocompattante fresco. Le modalità di prova sono state precedentemente descritte. Dalle prove sulle miscele realizzate sono stati ottenuti i seguenti risultati (tabella 7.23). Per tutte le miscele realizzate si sono registrati valori di fluidità e di spandimento che ricadono nei criteri di accettazione previsti a livello normativo.

Caratteristica	Intervallo di Accettazione	Metodo di prova
Fluidità	> 600 mm	UNI 11041
Tempo di Spandimento (per raggiungere il diametro di 500 mm)	≤12 secondi	UNI 11041
Deformabilità (tempo di efflusso dall'imbuto a V)	(4 – 12) secondi	UNI 11042
Scorrimento confinato (attraverso l'anello a J)	Diametro ≤ 50 mm rispetto allo scorrimento senza anello	UNI 11045
Stabilità alla sedimentazione (imbuto a V dopo 5 minuti)	Valore iniziale + 3 secondi	UNI 11042

Tabella 7.22 - Criteri di accettazione previsti per i calcestruzzi autocompattanti

Miscela	Slump – Flow Test	
	Fluidità (mm)	Tempo di spandimento (Sec) per raggiungere un diametro di 500mm
ZC10	675,00	5,09
ZC0	810,00	1,89
Z00	755,00	2,61
ZC0A	750,00	4,20
ZC20	670,00	3,83

Tabella 7.23 - Risultati delle prove di Slump Flow eseguite sulle miscele definitive di SCC

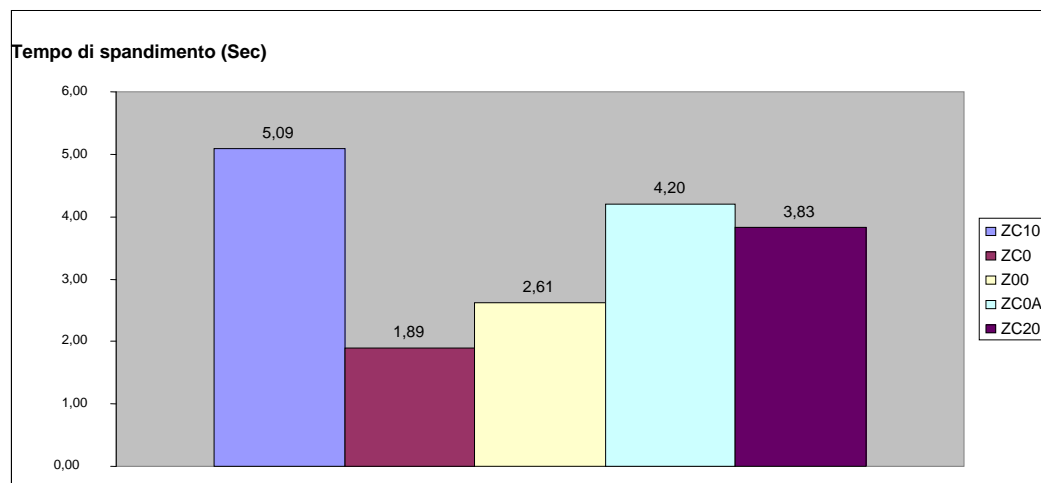


Figura 7.19 - Tempo di spandimento ottenuto dalle miscele realizzate

² Iacobini I. , Crea F. , Frontera P.: “ Calcestruzzi Autocompattanti realizzati con zeolite 5A, calcare e polverino PFU: caratterizzazione allo stato fresco ed indurito”, 10°Convegno Nazionale AIMAT Associazione Italiana d’Ingegneria dei Materiali, 2010;

Iacobini I. , Frontera P. , Crea F. : “Self-Compacting Concrete with tire rubber waste and zeolite”, 1° Workshop su “Le Nuove frontiere del calcestruzzo strutturale”, 2010

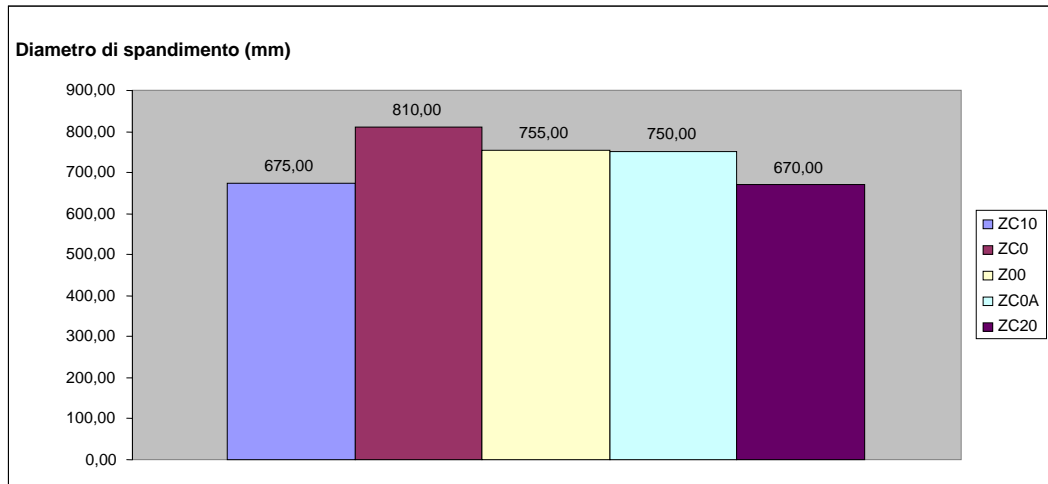


Figura 7.20 - Diametro di spandimento ottenuto dalle miscele realizzate



Figura 7.21 - Spandimento ottenuto dalla prova dello slump flow per l'impasto della miscela ZC

7.3.5.2 J-Ring test delle miscele definitive

La presente prova stabilisce un metodo per determinare la capacità del calcestruzzo autocompattante ad attraversare gli ostacoli. Nella tabella 7.24 sono riportati i risultati ottenuti. Per le miscele sperimentate si sono registrati dei valori di fluidità che ricadono nei criteri di accettazione per un SCC. L'effetto viscosizzante della zeolite 5A favorisce il trascinarsi dell'aggregato grosso, evitando così fenomeni di segregazione. Assente il fenomeno del bleeding.

Miscela	J - Ring Test	
	Fluidità (mm)	Tempo di spandimento (Sec) per raggiungere un diametro di 500mm
ZC10	670,00	5,23
ZC0	805,00	2,75
Z00	740,00	3,00
ZC0A	775,00	11,01
ZC20	660,00	4,22

Tabella 7.24 - Risultati delle prove di J-Ring eseguite sulle varie miscele

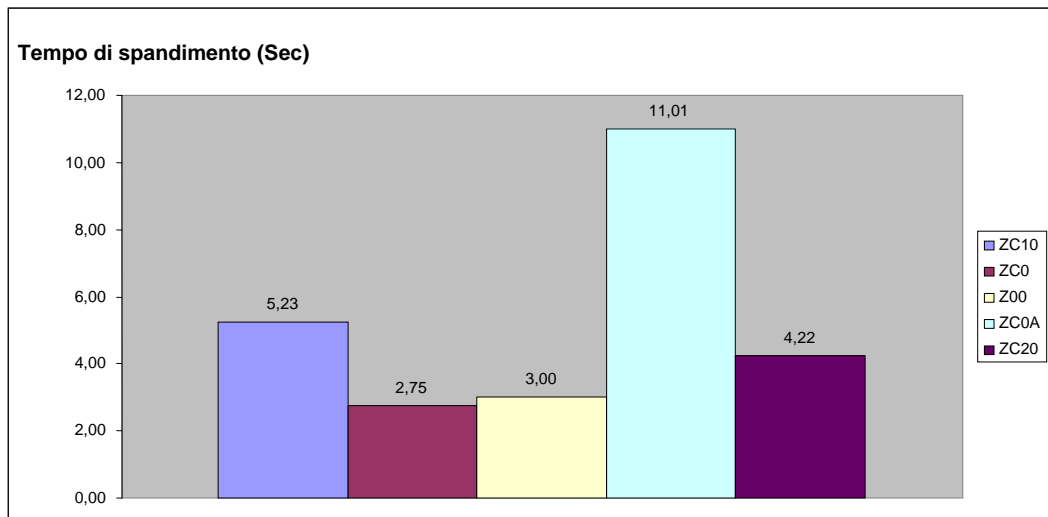


Figura 7.22 - Tempo di spandimento ottenuto dalle miscele realizzate

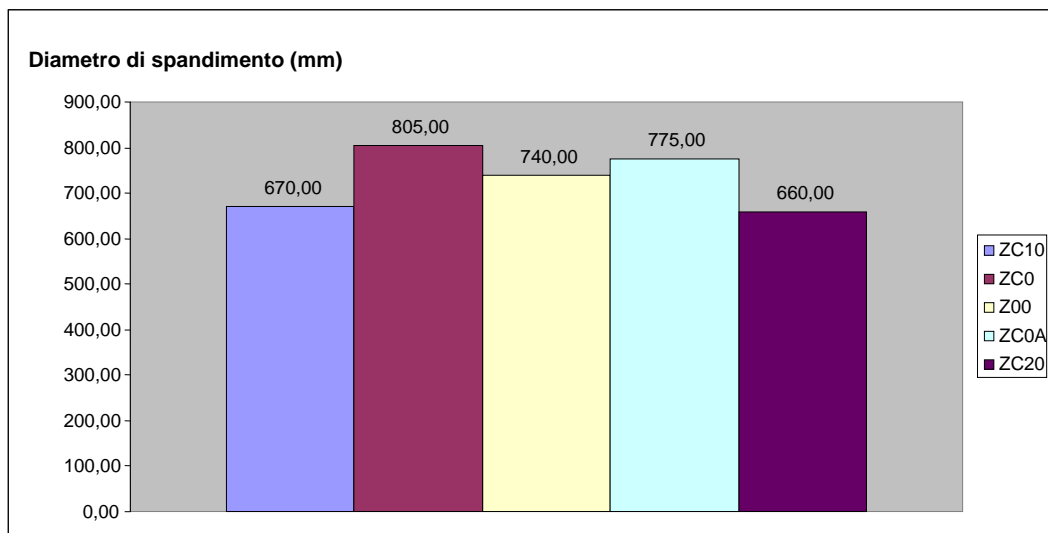


Figura 7.23 - Diametro di spandimento ottenuto dalle miscele realizzate



Figura 7.24 - Spandimento ottenuto dalla prova dello J – Ring per l'impasto della miscela ZC0

7.3.5.3 V-funnel test delle miscele definitive

Questa prova misura la lavorabilità in termini di velocità e scorrimento e l'attitudine alla sedimentazione dell'SCC attraverso la determinazione del tempo

di efflusso dopo 5 minuti di riposo. Nella tabella 7.25 sono riportati i risultati ottenuti. Si sono registrati valori di fluidità che ricadono nei criteri di accettazione per un calcestruzzo SCC per tutte le miscele. Per le miscele ZC0 e Z00 otteniamo dei valori al limite dei criteri di accettazione.

N° impasto	Materiale Finissimo	V - Funnel	
		Tempo di efflusso (Sec)	Tempo di efflusso dopo 5
ZC10	Zeolite, Calcare, 10% PFU	7,7	10,6
ZC0	Zeolite, Calcare	7,2	10,2
Z00	Zeolite	12,0	14,6
ZC0A	Zeolite, Calcare, Aerante	8,7	11,3
ZC20	Zeolite, Calcare, 20% PFU	5,2	7,6

Tabella 7.25 – Risultati del V-Funnel ottenuti per le varie miscele

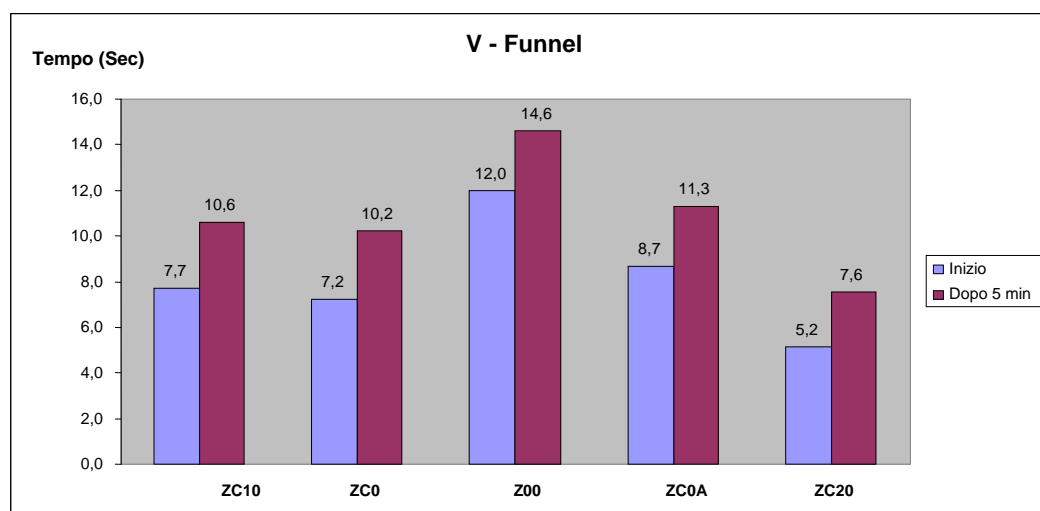


Figura 7.25 - Tempo di efflusso ottenuto dalle miscele realizzate



Figura 7.26 - Prova del V- Funnel per l'impasto della miscela ZC

7.3.6 Caratterizzazione meccanica delle miscele definitive di calcestruzzo autocompattante

Con gli impasti definitivi di calcestruzzo autocompattante, sono stati ottenuti molti provini cubici di dimensioni 100x100x100 mm e di forma parallelepipedica di dimensioni 100x100x500 mm per ogni impasto. La stagionatura dei provini è avvenuta a 20°C ed U.R. > 95%. A 2, 7, 28, 90 e 120 giorni di stagionatura sono state eseguite le prove di resistenza meccanica a compressione sui provini di lato

100mm, in accordo alla UNI EN 12390-3, mentre sui provini 100x100x500mm sono state eseguite delle prove di ritiro. I risultati medi ottenuti delle prove di compressione e delle prove di ritiro sono riportati in tabella 7.26.

Tipo di Cemento	Peso medio (gr)	2 giorni	7 giorni	28 giorni	90 giorni	120 giorni
		Rottura (Mpa)	Rottura (Mpa)	Rottura (Mpa)	Rottura (Mpa)	Rottura (Mpa)
Z00	2402	32,21	55,70	66,77	72,23	73,44
ZC0	2341	46,28	56,14	60,18	64,54	67,07
ZC0A	2148	36,65	43,34	52,25	55,26	56,44
ZC10 Polverino	1932	13,21	18,04	21,85	22,50	23,07
ZC20 Polverino	1790	7,59	8,42	10,15	11,39	11,68

Tabella 7.26 - Resistenze meccaniche a compressione medie delle miscele definitive

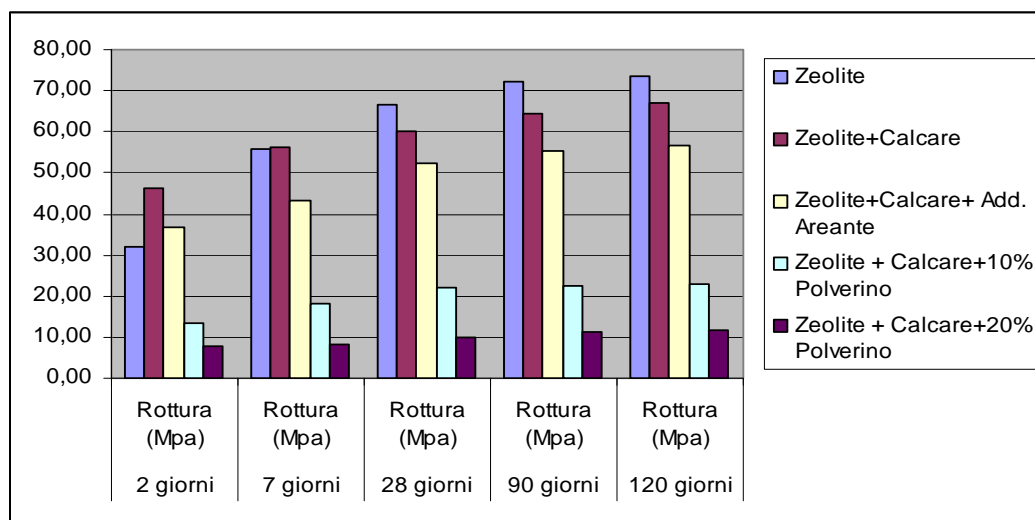


Figura 7.27 - Resistenze meccaniche a compressione medie delle miscele definitive

I risultati ottenuti per le resistenze a compressione hanno confermato quanto ottenuto dagli impasti di prova, ossia che:

- la miscela realizzata con la sola zeolite (Z00) presenta le resistenze maggiori, a riprova che tale aggiunta fornisce alla miscela un alto grado di compattezza, oltre che influire sul grado di pozzolanicità della miscela;
- la miscela realizzata con Zeolite e Filler calcareo aumenta di lavorabilità, ma riduce il valore delle resistenze rispetto alla miscela confezionata con sola zeolite;
- rispetto alla miscela realizzata con additivo aerante, quelle realizzate con polverino di gomma evidenziano un valore notevolmente più basso di resistenza meccanica, proporzionale alla percentuale di gomma utilizzata. La presenza di macrobolle presenti nelle miscele con gomma PFU (ZC10 e ZC20) rispetto alle bolle più piccole presenti nelle miscele con aerante (ZC0A), ha un effetto negativo di diminuzione delle resistenze meccaniche.

7.3.7 Caratterizzazione fisico-meccanica con prove non distruttive delle miscele definitive di calcestruzzo autocompattante

I provini di calcestruzzo autocompattante delle miscele definitive prodotti in una prima fase sono stati testati anche attraverso prove non distruttive, soprattutto al fine di valutare la possibilità di utilizzo di tali tecniche su calcestruzzi confezionati con gomma PFU. A tale categoria d'indagine appartengono diverse tipologie di analisi, ma nella sperimentazione in questione ci si è serviti delle

prove sclerometriche e delle prove ultrasonore. Per ogni misura sclerometrica ed ultrasonora effettuata, si legge un indice. Successivamente si passa al calcolo dell'indice medio, facendo la media aritmetica dei valori misurati per ogni provino. Dopo aver determinato l'indice medio si può risalire alla resistenza a compressione del calcestruzzo utilizzando, per esempio, le tabelle e le curve fornite direttamente dal costruttore dello strumento, anche se è stato evidenziato a tal proposito che non è raccomandato l'utilizzo di tali curve in quanto, sia il materiale costituente il calcestruzzo che le condizioni dello stesso in situ sono molto diverse da quelle del materiale utilizzate per la taratura dello strumento, oppure costruendo idonee curve di correlazione. È noto, infatti, che la soluzione ottimale per risalire al valore di resistenza a compressione del calcestruzzo in esame consiste nel costruire idonee curve di taratura mediante l'utilizzo del metodo dei minimi quadrati. La costruzione di queste curve passa attraverso l'esecuzione di prove distruttive e non distruttive su campioni appositamente confezionati, elaborando i risultati ottenuti mediante l'utilizzo di metodi statistici. Nel caso di strutture esistenti, non è possibile definire una curva di correlazione su campioni appositamente confezionati, ciò perché molto spesso non si conoscono né il tipo, né il dosaggio, né la provenienza dei materiali impiegati. In tal caso si possono utilizzare metodologie semplificate che si basano sull'utilizzo di correlazioni desunte dalla letteratura scientifica e predisposte per calcestruzzi standard, applicando solo opportuni coefficienti correttivi, ricavati anch'essi per via sperimentale e dipendenti dalle caratteristiche chimico-fisiche delle componenti, oppure mediante il confronto con i risultati di prove a compressione eseguite su un campione di carote di numerosità minima. Per strutture grandi è opportuno ricorrere a carotaggi e, quindi, alla costruzione di una curva di taratura basata su un'attendibile elaborazione statistica dei risultati. La migliore interpretazione dei dati ottenuti con lo sclerometro e con l'indagine ultrasonora è rappresentata dall'applicazione dei minimi quadrati, mediante l'assunzione di una correlazione del tipo:

$$R = a \cdot i_m^b$$

dove a , b sono i parametri da tarare di volta in volta, R la resistenza a compressione e i_m l'indice medio fornito dalla prova non distruttiva. Per calcolare i coefficienti a , b si linearizza la precedente equazione effettuando un passaggio per i logaritmi:

$$\text{Log}(R) = \text{Log}(a) + b \cdot \text{Log}(I_m)$$

ponendo

$$\begin{aligned} \text{Log}(R) &= y; \\ \text{Log}(a) &= q; \\ b &= m; \\ \text{Log}(I_m) &= X; \end{aligned}$$

si ottiene che

$$Y = mX + q$$

che è proprio l'equazione di una retta. Il metodo dei minimi quadrati si basa sul principio che la migliore curva modello che interpreta i dati sperimentali sia quella per la quale valga la relazione:

$$\sum w_i (y_i - y_i')^2 = \min$$

in cui w_i rappresenta il peso attribuito all' i -esimo dato sperimentale, mentre y_i rappresenta l' i -esimo valore misurato sperimentalmente ed y_i' quello calcolato sulla curva modello in corrispondenza dello stesso valore della variabile indipendente. Applicando il principio di massima verosimiglianza, ovvero

minimizzando la somma dei quadrati degli scarti si può arrivare a stimare i due coefficienti incogniti a e b:

$$\sum (\text{Log}(R_i) - \text{Log}(a) + b \cdot \text{Log}(\text{Im}_i))^2 = \min$$

Per un noto teorema di analisi matematica, il punto di minimo si trova annullando la derivata prima della precedente equazione rispetto ai parametri da calcolare:

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum (\text{Log}(R_i) - \text{Log}(a) + b \cdot \text{Log}(\text{Im}_i))^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum (\text{Log}(R_i) - \text{Log}(a) + b \cdot \text{Log}(\text{Im}_i))^2 = 0$$

Si ottiene, dunque, un sistema di due equazioni (equazioni normali della retta dei minimi quadrati) nelle 2 incognite a e b facilmente risolvibile. Un indice per valutare gli errori collegati all'applicazione della correlazione consiste nel valutare il coefficiente di correlazione r^2 . La norma ACI 214 propone come indice di dispersione dei dati intorno al valore medio, il coefficiente di variazione Cv dato come rapporto tra la deviazione standard e la media di un insieme di dati. Il coefficiente Cv rappresenta un indice per stabilire la validità della correlazione. Tale norma propone una classificazione della stima in funzione di tale indice.

Classificazione	Coefficiente di variazione
Eccellente	$0 < Cv < 10$
Buona	$10 < Cv < 15$
Discreta	$15 < Cv < 20$
Scadente	$20 < Cv$

Tabella 7.29 – Classifica della correlazione proposta dall'ACI

7.3.7.1 Prove sclerometriche: fase di rilevazione

Sono stati riportati in tabella 7.30, come esempio, i risultati delle battute sclerometriche effettuati su ogni singolo provino con i relativi dati di peso, dimensioni, tipologia di miscela ed il calcolo dell'indice medio Im .

n. provino	Dimensioni provino (mm)	Miscela	Peso (g)
1.1	100x100x100	ZC10	1778.5
Indice Sclerometrico (misurato)			
n° Battuta	Faccia 1	Faccia 2	Faccia 3
1	20	20	23
2	22	21	24
3	24	21	22
4	22	21	26
5	22	22	20
6	22	19	26
7	20	23	22
8	23	22	22
9	24	22	25
Media faccia	22.11	21.22	23.33
Media provino (Im)	22.22		

Tabella 7.30 – Battute sclerometriche e indice medio Im (esempio)

7.3.7.2 Prove sclerometriche: fase di stima

Le curve di regressione sono state stimate associando i diversi provini di ogni serie. Per la costruzione delle curve sono stati utilizzati provini opportunamente prelevati durante la preparazione delle miscele per effettuare tale operazione. Nelle tabelle successive sono indicati i parametri statistici apprezzati per ogni miscela, in cui:

- $m = b$ (coefficiente angolare della retta);
- $b_0 = \text{Log}(a)$ (intercetta).

Med.valori	Im	21,9
varianza	σ^2	0,63
dev.standard	σ	0,79
coeff. Variazione	Cv	0,03
parametri retta	m	0,81
	b0	0,24

Tabella 7.31 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela ZC10

Med.valori	Im	42,89
varianza	σ^2	2
dev.standard	σ	1,41
coeff. Variazione	Cv	0,03
parametri retta	m	0,09
	b0	1,66

Tabella 7.32 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela ZC00

Med.valori	Im	46,30
varianza	σ^2	0,37
dev.standard	σ	0,60
coeff. Variazione	Cv	0,01
parametri retta	m	-0,35
	b0	2,42

Tabella 7.33 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela Z00

Med.valori	Im	41,67
varianza	σ^2	1,66
dev.standard	σ	1,28
coeff. Variazione	Cv	0,03
parametri retta	m	-0,08
	b0	1,87

Tabella 7.34 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela ZC0A

Med.valori	Im	26,96
varianza	σ^2	1,85
dev.standard	σ	1,36
coeff. Variazione	Cv	0,05
parametri retta	m	0,62
	b0	0,19

Tabella 7.35 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela ZC20

7.3.7.3 Prove sclerometriche: fase di verifica

Una volta tarate le curve di regressione, è stata condotta una verifica per confermare l'attendibilità del metodo, confrontando la resistenza a compressione effettiva dei provini non utilizzati nella costruzione delle curve con la resistenza a compressione stimata in funzione dell'indice di rimbalzo dei provini utilizzati nella costruzione delle curve appartenenti a miscele uguali, ma confezionate in date diverse. Nelle tabelle 7.36–7.40 si riportano i confronti, in termini di variazione percentuale, tra i valori di resistenza effettiva valutati con prove distruttive e la relativa resistenza stimata a partire da prove non distruttive. Nelle figure 7.28-7.34 sono riportate le curve di regressione stimate ed il confronto con le resistenze effettive valutate con prove distruttive. Come si può notare oltre ai valori numerici sono stati riportati i grafici delle relative curve di regressione. Appare chiaro che la stima delle curve di regressione ha consentito l'ottenimento, nella maggioranza dei casi, di valori accettabili di resistenza a compressione.

Provino	Im	Res.effettiva	Res.stima	% Δ R
4.1	25,81	24,6	25,12	-2,11
5.1	27,37	25,2	26,35	-4,57
6.1	18,99	18,8	19,53	-3,89

Tabella 7.36 – Variazione di resistenza a compressione, miscela ZC10

Provino	Im	Res.effettiva	Res.stima	%ΔR
4.2	38,77	65,1	64,72	0,56
5.2	46,29	64,2	65,80	-2,50

Tabella 7.37 – Variazione di resistenza a compressione, miscela ZC00

Provino	Im	Res.effettiva	Res.stima	%ΔR
4.3	58,37	67,8	63,06	6,98
5.3	50,88	64,8	66,20	-2,17

Tabella 7.38 – Variazione di resistenza a compressione, miscela Z00

Provino	Im	Res.effettiva	Res.stima	%ΔR
4.4	41,40	56,44	55,96	0,84
5.4	43,14	56,8	55,77	1,80

Tabella 7.39 – Variazione di resistenza a compressione, miscela ZC0A

Provino	Im	Res.effettiva	Res.stima	%ΔR
3.5	27,18	12,61	12,30	2,45
4.5	24,22	11	11,44	-4,06

Tabella 7.40 – Variazione di resistenza a compressione, miscela ZC20

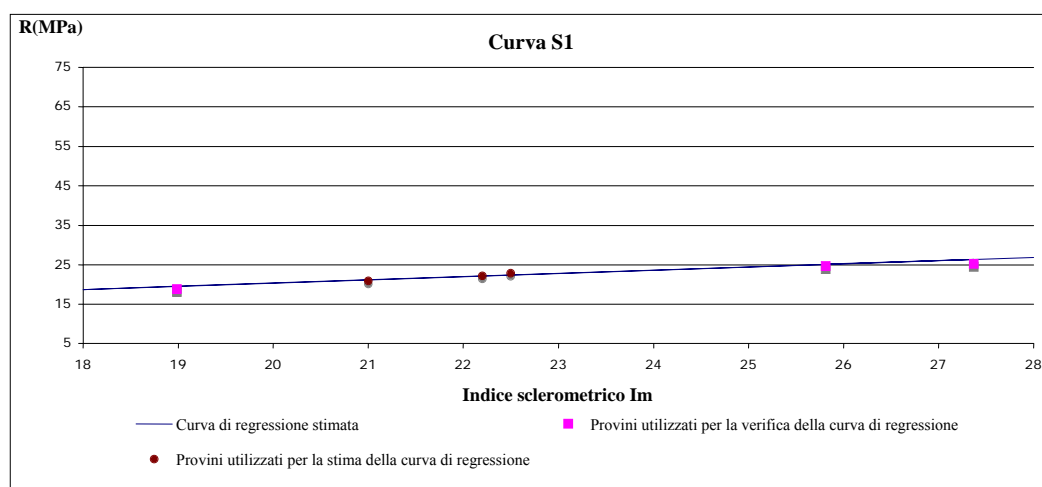


Figura 7.28 – Curva di regressione S1, Miscela ZC10

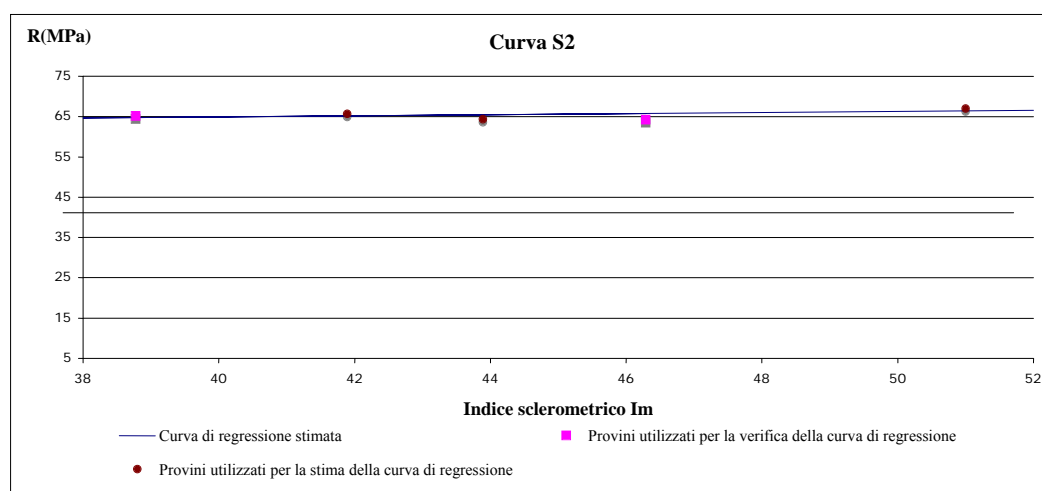


Figura 7.29 – Curva di regressione S1, Miscela ZC00

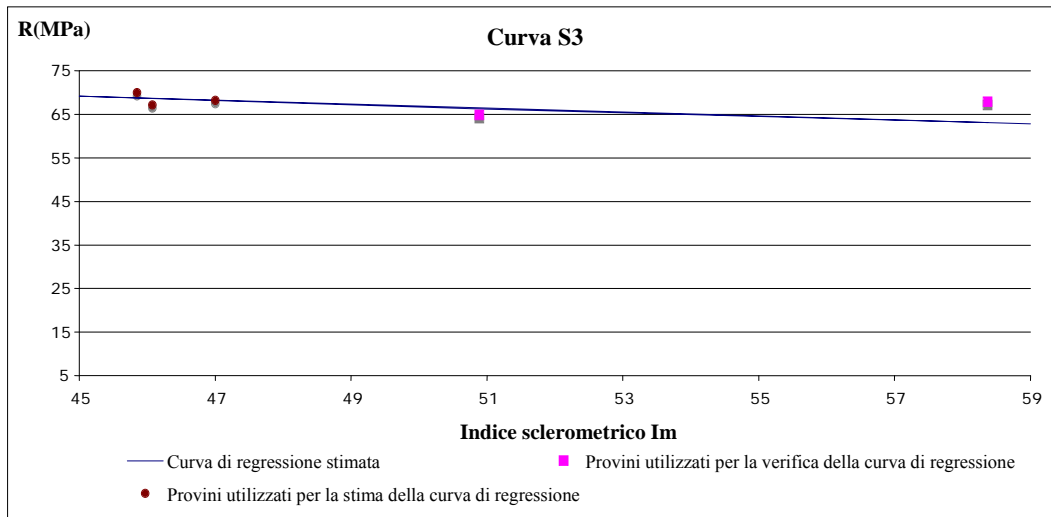


Figura 7.30 – Curva di regressione S1, Miscela Z00

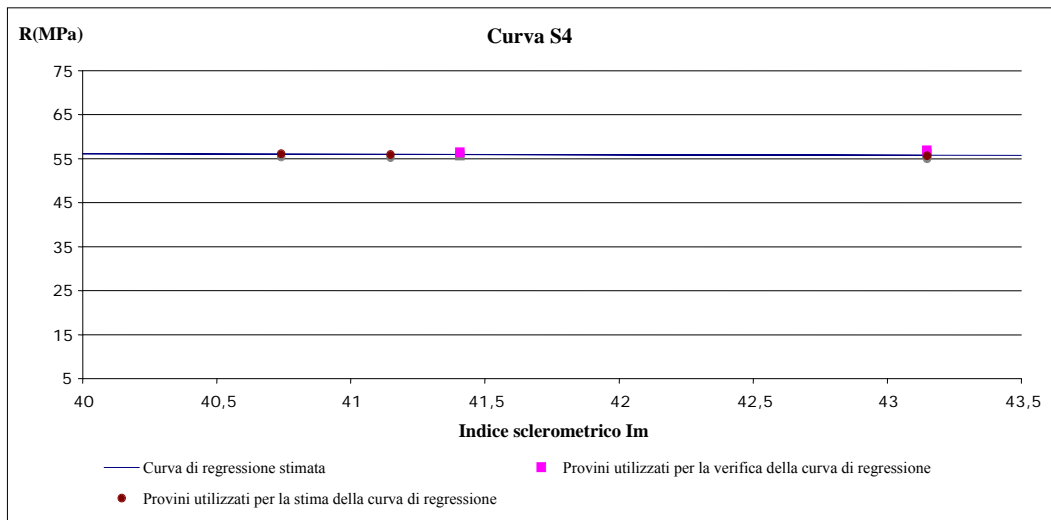


Figura 7.31 – Curva di regressione S1, Miscela ZC0A

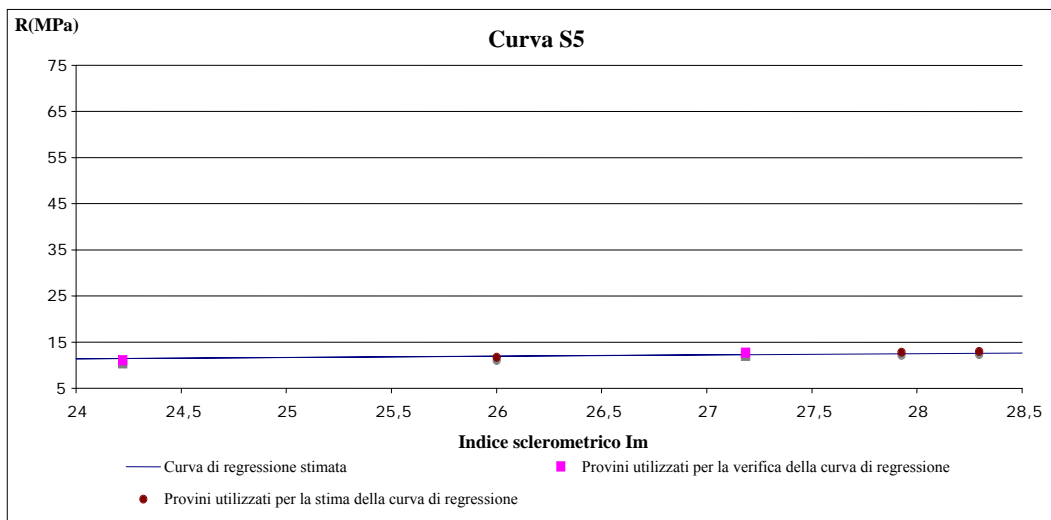


Figura 7.32 – Curva di regressione S1, Miscela ZC20

7.3.7.4 Prove ultrasonore: fase di rilevazione

Nella tabella seguente 7.39 si riportano, come esempio, i valori di velocità

ultrasonore stimate per un provino sottoposto a test. In tale tabella si riportano anche i valori del modulo elastico E stimato dall'apparecchiatura ultrasonora.

Provino	Peso (g)	Distanza (m)	Tempo X-X (ms)	Tempo Y-Y (ms)	Velocità X-X (m/s)	Velocità Y-Y (m/s)	E x-x (kg/cm ²)	E y-y (kg/cm ²)
1.1	1778,5	0,1	37,2	37,9	2674	2841	146732	139900

Tabella 7.39 – Velocità ultrasonore e modulo elastico E (esempio)

7.3.7.5 Prove ultrasonore: fase di stima

Le curve di regressione vengono stimate associando i provini di ogni serie, suddivise per tipologie e componenti. Per la costruzione delle curve sono stati utilizzati provini opportunamente prelevati durante la preparazione delle miscele per effettuare tale operazione di stima. Nelle tabelle successive (tabelle 7.40-7.44) sono indicati i parametri statistici stimati per ogni miscela, in cui m uguale a b (coefficiente angolare della retta) e bo pari a Log(a) (intercetta).

Med.valori	Vm	2738
varianza	σ^2	23354,33
dev.standard	σ	152,82
coeff. Variazione	Cv	0,05
parametri retta	m	0,61
	b0	-0,76

Tabella 7.40 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela ZC10

Med.valori	Vm	3869,5
varianza	σ^2	1568
dev.standard	σ	39,59
coeff. Variazione	Cv	0,01
parametri retta	m	0,66
	b0	-0,57

Tabella 7.41 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela ZC00

Med.valori	Vm	4097,66
varianza	σ^2	2296,33
dev.standard	σ	47,92
coeff. Variazione	Cv	0,011
parametri retta	m	0,59
	b0	-0,30

Tabella 7.42 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela Miscela Z00

Med.valori	Vm	3752,83
varianza	σ^2	2092
dev.standard	σ	45,73
coeff. Variazione	Cv	0,01
parametri retta	m	-0,11
	b0	2,16

Tabella 7.43 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela ZC0A

Med.valori	Vm	2688,75
varianza	σ^2	19208
dev.standard	σ	138,59
coeff. Variazione	Cv	0,05
parametri retta	m	0,81
	b0	-1,71

Tabella 7.44 – Parametri statistici per la curva relativa alla miscela ZC20

7.3.7.6 Prove ultrasonore: fase di verifica

Tarate le curve di regressione, è stata condotta una verifica per confermare l'attendibilità del metodo, confrontando la resistenza a compressione effettiva dei provini non utilizzati nella costruzione delle curve con la resistenza a compressione stimata in funzione della velocità media dei provini utilizzati nella

costruzione delle curve appartenenti a miscele uguali, ma confezionate in date diverse. Nelle tabelle 7.45-7.49 si riportano il confronto tra i valori di resistenza effettiva valutati con prove distruttive e la resistenza stimata a partire da prove non distruttive. Nelle figure 7.33-7.37 sono riportate le diverse curve di regressione stimate ed il confronto con le resistenze effettive valutate con prove distruttive.

Provino	Vm (m/s)	Res.effettiva (MPa)	Res.stima (MPa)	%ΔR
4.1	3063,5	24,6	23,51	4,40
5.1	3065	25,2	23,52	6,65
6.1	2240	18,8	19,41	-3,29

Tabella 7.45 – Variazione di resistenza a compressione, miscela ZC10

Provino	Vm (m/s)	Res.effettiva (MPa)	Res.stima (MPa)	%ΔR
4.2	3802,5	65,1	64,29	1,23
5.2	3921,5	64,2	65,62	-2,22

Tabella 7.46 – Variazione di resistenza a compressione, miscela ZC00

Provino	Vm (m/s)	Res.effettiva (MPa)	Res.stima (MPa)	%ΔR
4.3	3922	67,8	66,71	1,60
5.3	3880,5	64,8	66,29	-2,30

Tabella 7.47 – Variazione di resistenza a compressione, miscela Z00

Provino	Vm (m/s)	Res.effettiva (MPa)	Res.stima (MPa)	%ΔR
4.4	3731,395236	56,44	55,97	0,83
5.4	3697,5	56,8	56,03	1,35

Tabella 7.48 – Variazione di resistenza a compressione, miscela ZC0A

Provino	Vm (m/s)	Res.effettiva (MPa)	Res.stima (MPa)	%ΔR
3.5	2640,5	12,61	12,05	4,38
4.5	2153,5	11	10,20	7,21

Tabella 7.48 – Variazione di resistenza a compressione, miscela ZC20

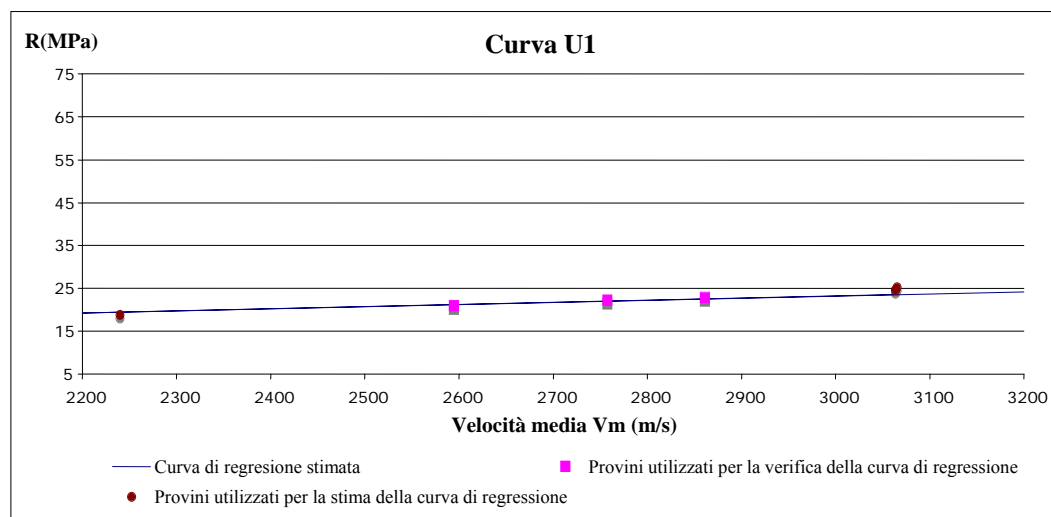


Figura 7.33 – Curva di regressione U1, miscela ZC10

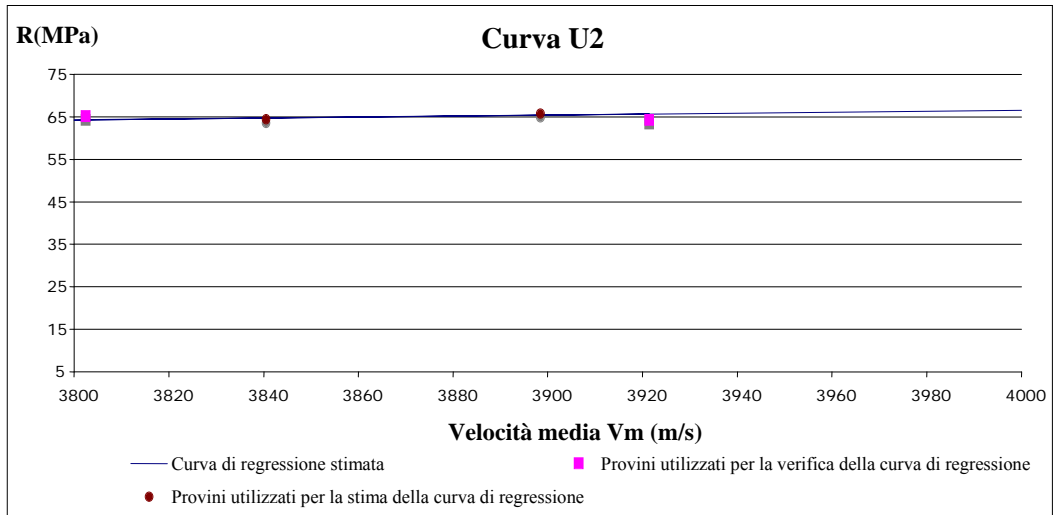


Figura 7.34 – Curva di regressione U2, miscela ZC00

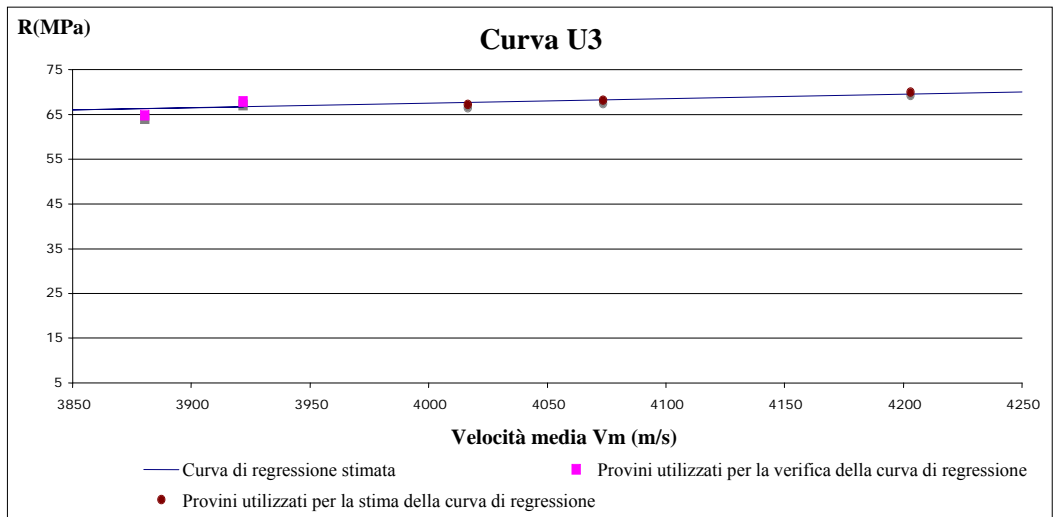


Figura 7.35 – Curva di regressione U3, miscela Z00

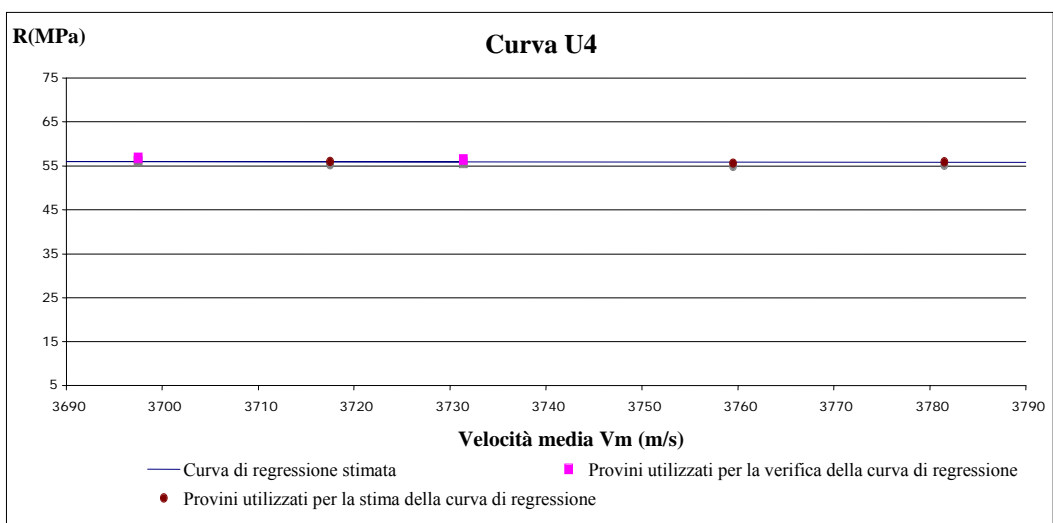


Figura 7.36 – Curva di regressione U4, miscela ZC0A

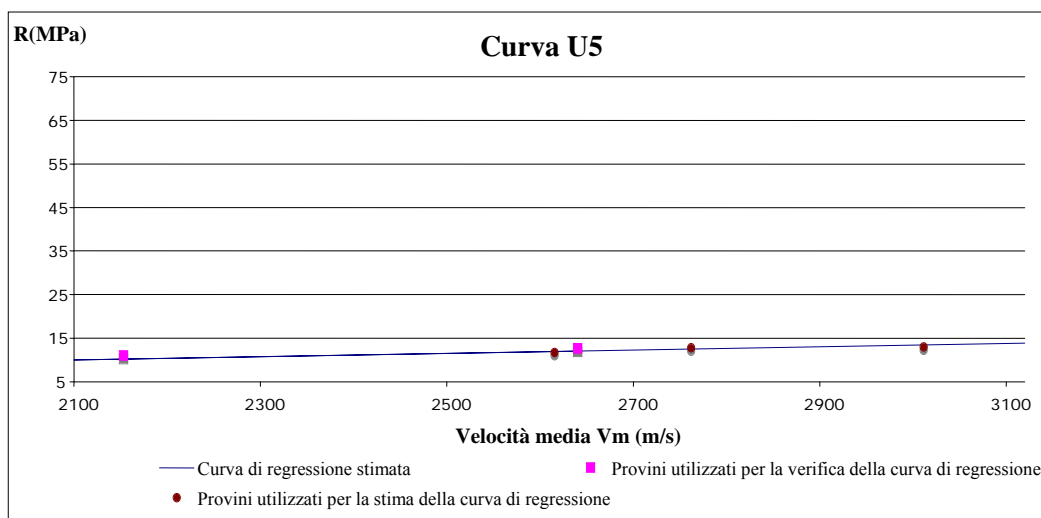


Figura 7.37 – Curva di regressione U5, miscela ZC20

7.3.7.7 Metodo combinato SonReb

Le prove non distruttive, citate nei paragrafi precedenti, hanno fornito risultati attendibili in termini qualitativi e quantitativi delle prestazioni meccaniche dei campioni indagati. Per migliorare ulteriormente l'indagine ed affinare le stime è stato necessario adottare una combinazione delle due metodiche d'indagine, sclerometrica e ultrasonora. Tale combinazione consiste nell'utilizzare il metodo SonReb che offre notevoli vantaggi rispetto all'uso delle singole analisi non distruttive. La metodologia SonReb è stata applicata al termine delle singole prove non distruttive e sull'intero campione d'indagine al fine di accertare e stabilire ulteriori differenze di valori rispetto alle resistenze effettive. Il principio del metodo consiste nel fatto che i valori dell'indice di rimbalzo, Im, e quelli di velocità di trasmissione delle onde ultrasonore nel calcestruzzo, Vm, opportunamente tarati con valori rappresentativi del calcestruzzo, consentono di ottenere più affidabili riferimenti di resistenza a compressione, fornendo una più ampia e precisa visione delle qualità meccaniche delle miscele. Per fare ciò occorre assumere una più articolata legge di correlazione dipendente dai parametri con i quali si intende svolgere l'indagine. La correlazione assunta dal metodo è del tipo:

$$R = b_0 \cdot Vm^m \cdot Im^n$$

dove le costanti a, b e c sono determinate sempre con il principio dei minimi quadrati. Per ottenere delle buone correlazioni si è deciso di applicare il metodo associando i vari provini per miscela. Si sono adottati gli stessi raggruppamenti delle prove ultrasonore e delle prove sclerometri che, utilizzando allo stesso modo alcuni provini per tarare le superfici di correlazione e altri per compiere delle verifiche di affidabilità. Di seguito, si riportano le tabelle usate per la calibrazione dei parametri delle superfici. Infatti, in questo metodo il modello non genera delle curve, ma delle superfici in quanto si ha la dipendenza da 2 parametri indipendenti (Vm e Im). Appare evidente come, a differenza delle prove singole, si abbia una visione che tiene conto dei singoli fattori in maniera simultanea generando, quindi, un risultato che può essere raffigurato come una superficie in cui la variabile dipendente della resistenza è funzione delle due variabili indipendenti, velocità ultrasonora media e indice sclerometrico medio. Nelle figure 7.38-7.42 sono riportate le varie superfici di regressione stimate con il metodo SonReb.

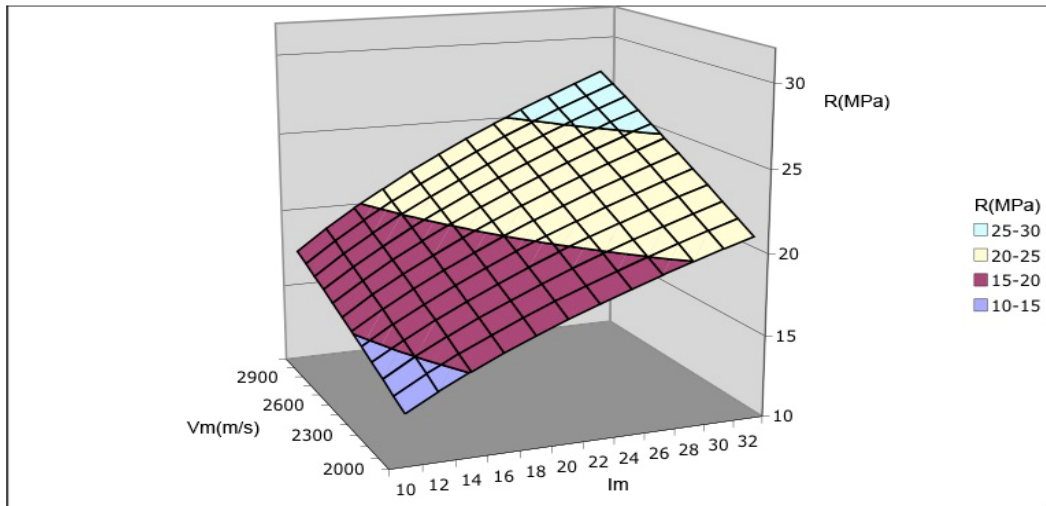


Figura 7.38 – Superficie di regressione SU1, miscela ZC10

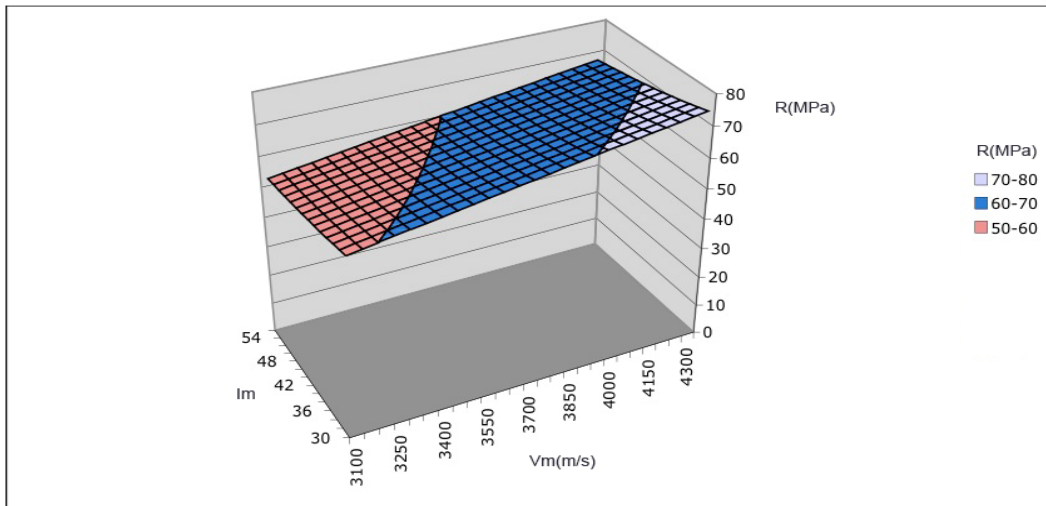


Figura 7.39 – Superficie di regressione SU2, miscela ZC00

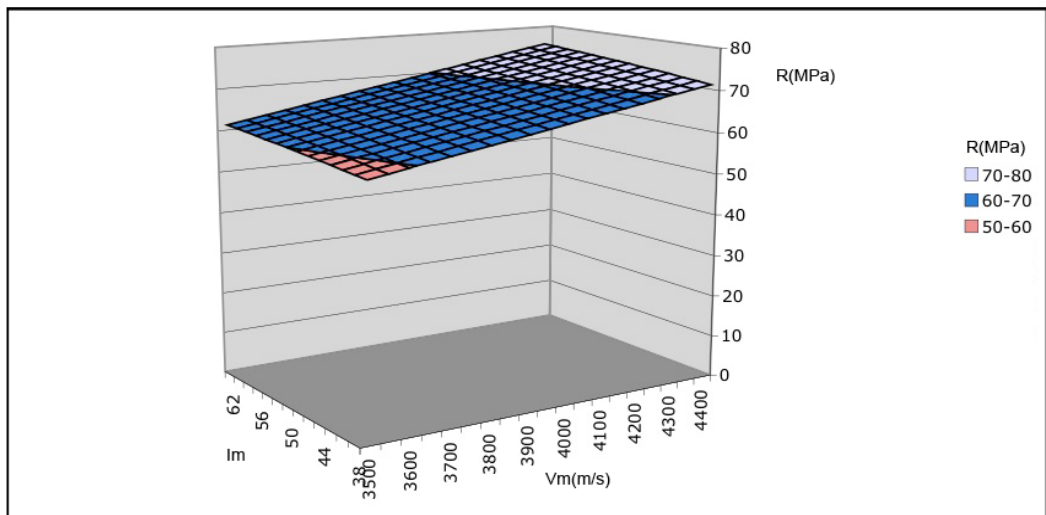


Figura 7.40 – Superficie di regressione SU3, miscela Z00

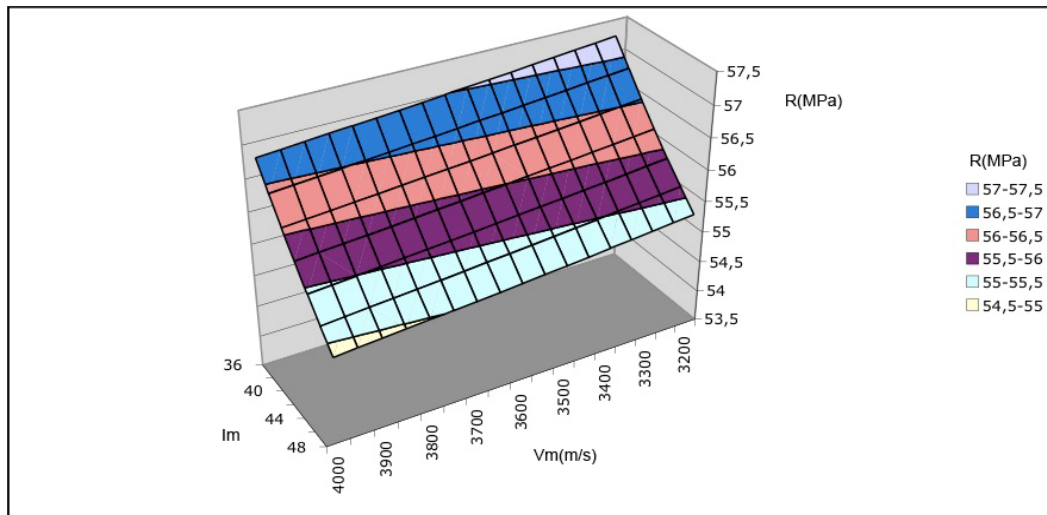


Figura 7.41 – Superficie di regressione SU4, miscela ZC0A

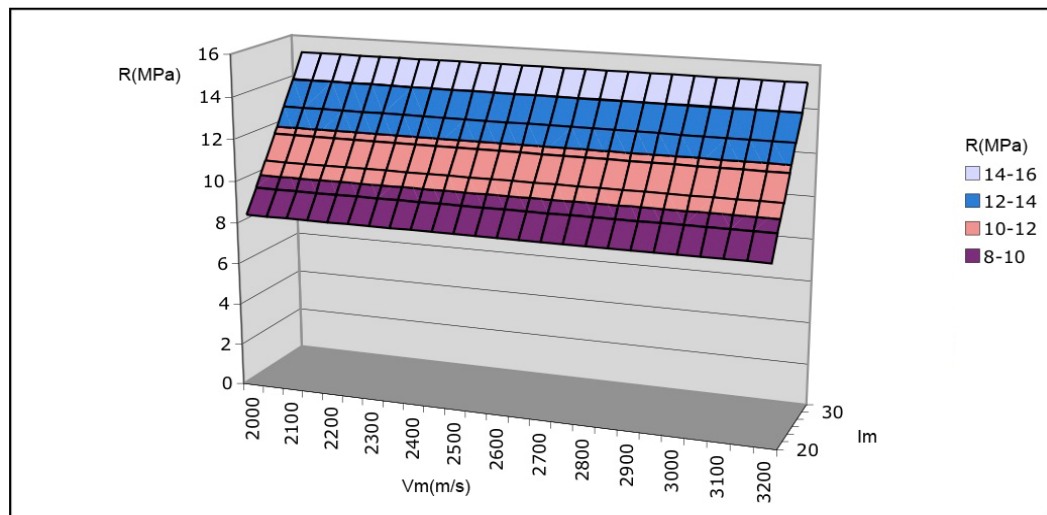


Figura 7.42 – Superficie di regressione SU5, miscela ZC20

7.3.7.8 Confronto resistenze

Nelle figure 7.43-7.47 si riportano i confronti tra le diverse resistenze effettive e stimate con i vari metodi non distruttivi (metodo ultrasonico, metodo sclerometrico, metodo SonReb). L'aspetto principale su cui soffermarsi riguarda i valori di resistenza ottenuti con i metodi non distruttivi impiegati. Oltre tale aspetto risulta necessario fare un confronto delle stime effettuate con i vari metodi ed in funzione delle resistenze effettive ottenute con metodo distruttivo. Dalle indagini eseguite si è potuto apprezzare il fatto che la variazione di resistenza stimata con prove non distruttive rispetto a quelle ottenute da prove distruttive è risultata al massimo nell'ordine del 5%. E' importante far rilevare che il metodo combinato SonReb ha consentito di abbassare ancora di più le percentuali di errore rispetto agli altri metodi, fino a valori massimi del 2%. Avendo registrato percentuali di errore così basse è difficile capire quali resistenze siano state ben approssimate e quali meno, in quanto l'ordine di grandezza degli errori è stato molto limitato. A livello qualitativo è emersa una tendenza dei metodi SonReb e sclerometro a sottostimare la resistenza in maniera maggiore nel caso di quest'ultimo. Tuttavia, in conclusione della campagna di indagine non distruttiva, è possibile affermare che i metodi ultrasonoro, sclerometrico e combinato SonReb

possono essere utilizzati con buone approssimazioni anche per calcestruzzi SCC a basso impatto ambientale confezionati con gomma PFU.

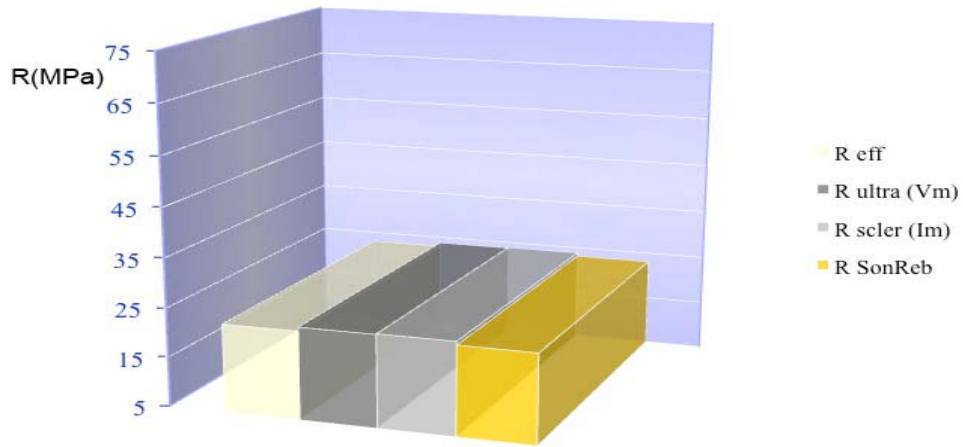


Figura 7.43 – Confronto tra le resistenze ottenute con i vari metodi e la resistenza effettiva, miscela ZC10

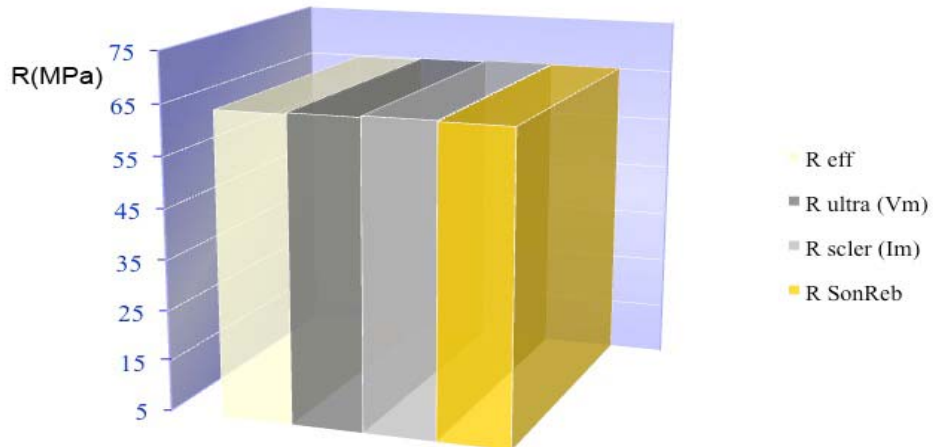


Figura 7.44 – Confronto tra le resistenze ottenute con i vari metodi e la resistenza effettiva, miscela ZC00

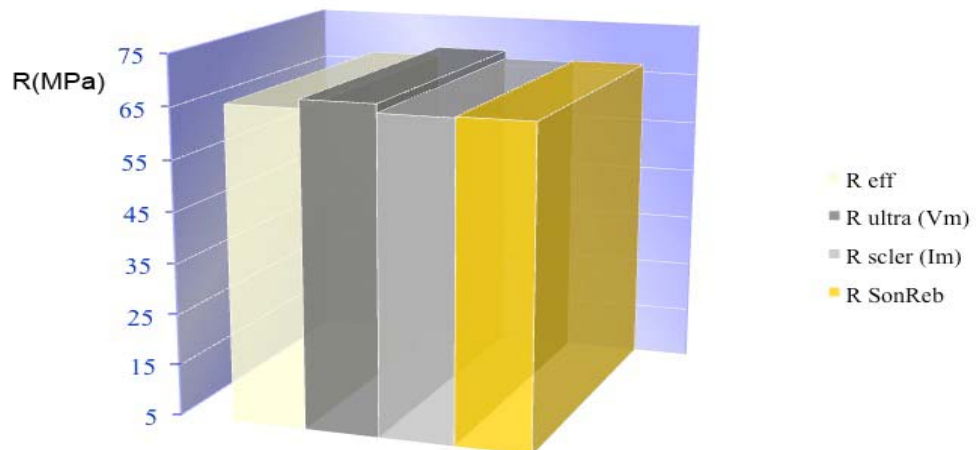


Figura 7.45 – Confronto tra le resistenze ottenute con i vari metodi e la resistenza effettiva, miscela Z00

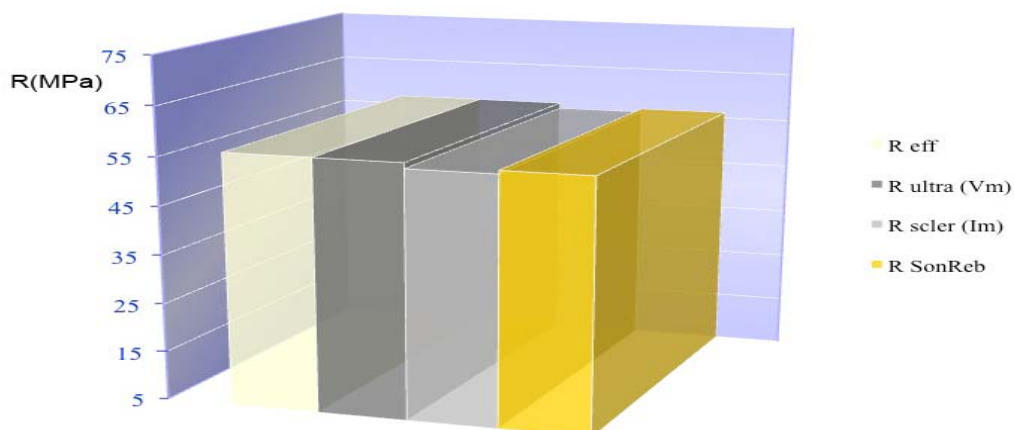


Figura 7.46 – Confronto tra le resistenze ottenute con i vari metodi e la resistenza effettiva, miscela ZC0A

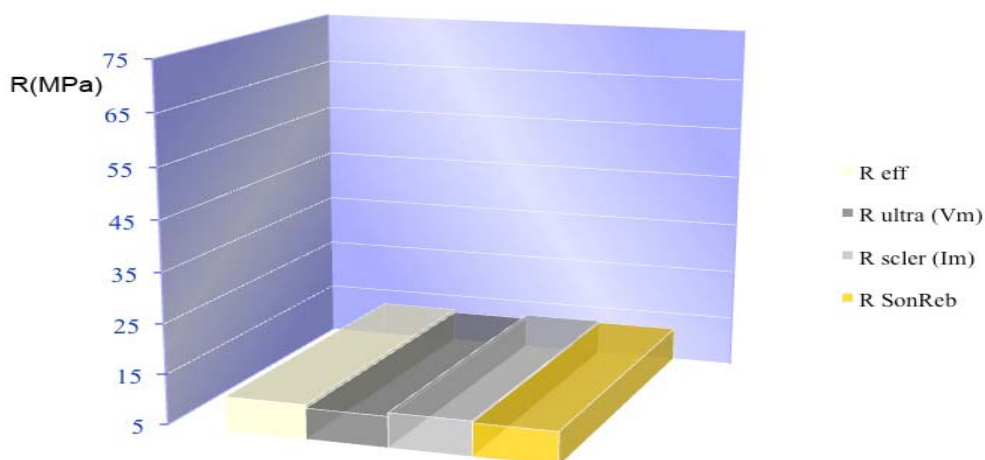


Figura 7.47 – Confronto tra le resistenze ottenute con i vari metodi e la resistenza effettiva, miscela ZC20

7.3.8 Caratterizzazione chimico-fisica delle miscele di calcestruzzo auto-compattante

7.3.8.1 Prove di ritiro sulle miscele definitive di calcestruzzo auto-compattante

Sui provini 100x100x500mm realizzati con le miscele definitive di calcestruzzo autocompattante è stato misurato il ritiro. Secondo il D.M.14/01/08 “nuove norme tecniche per le costruzioni” la deformazione assiale per ritiro del calcestruzzo può essere determinata a mezzo di apposite prove, da eseguirsi secondo le norme UNI 6555:1973 e UNI 7086:1972, rispettivamente per calcestruzzi confezionati con aggregati aventi dimensioni massime sino a 30 mm, od oltre 30 mm, Nel caso delle miscele realizzate è stato opportuno riferirsi alla UNI 6555:1973, essendo il diametro massimo degli aggregati pari a 16 mm. La norma stabilisce la modalità per la determinazione del ritiro assiale di provini di dimensione 100 x 100 x 500 mm. Lo stampo metallico utilizzato per il confezionamento dei provini è composto da due fiancate, due testate (portospina) e una piastra di base. Tutte le parti dello stampo sono in acciaio, in accordo con le UNI 7070-72 e UNI 6900-71, sono saldamente collegate tra di loro e, inoltre, i punti di giunzione degli elementi sono a perfetta tenuta per impedire perdite della miscela. Le superfici interne dello stampo, prima del riempimento, sono state trattate con disarmante per facilitare il distacco del provino alla sformatura. Alle estremità dello stampo sono state

inserite, prima di versare il calcestruzzo, due spine per permettere la misura del ritiro. Tale misura è eseguita tramite un micrometro, un apparecchio atto a valutare le variazioni di lunghezza tra le estremità delle spine stesse. Subito dopo il confezionamento, i provini realizzati sono stati coperti con un telo mantenuto umido e sfornati dopo 24 ore, posizionati su appoggi e distanziati opportunamente per permettere la libera circolazione dell'aria. Le misure sono state eseguite per un periodo di analisi di 90 giorni per valutare l'evoluzione del fenomeno del tempo. Nelle tabella 7.49 e nel grafico di figura 7.48 sono stati riportati i valori di ritiro misurati sperimentalmente nel tempo per le varie miscele di SCC realizzate.

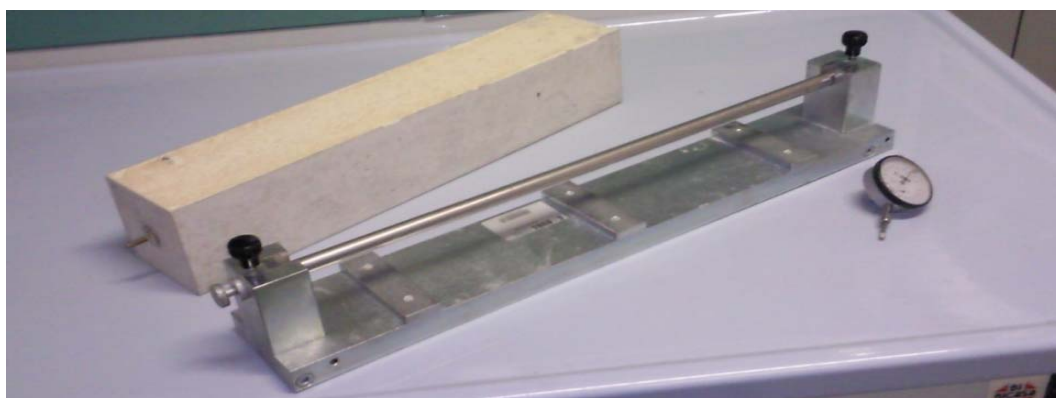


Figura 7.48 - Attrezzatura per la misurazione del ritiro dei provini di calcestruzzo

Tempi di stagionatura (gg)	Ritiro (micron/m)				
	ZC10	ZC20	ZC0	ZC0A	Z00
0	0	0	0	0	0
1	300	245	160	650	85
2	500	331	324	1469	550
3	580	470	520	1510	620
7	930	850	620	1585	744
14	1040	980	740	1700	800
28	1120	1072	798	1792	898
40	1200	1112	822	1880	944
90	1280	1190	925	1930	1050

Tabella 7.49 – Valori medi di ritiro misurati

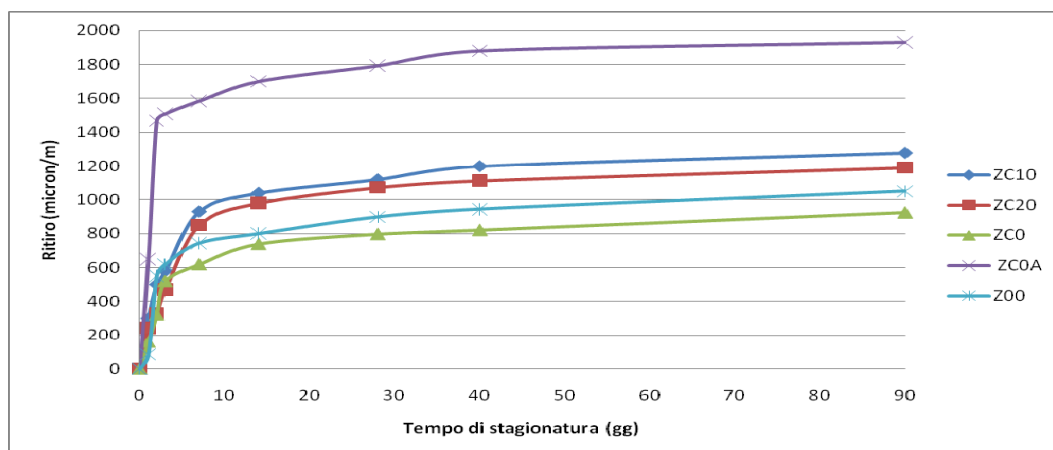


Figura 7.48 – Andamento del ritiro nel tempo

Dai risultati ottenuti si evince che il ritiro maggiore si è ottenuto per la miscela confezionata con aggiunta di additivo aerante (ZC0A), mentre il ritiro minore è stato valutato per la miscela realizzata con aggiunta di zeolite e filler calcareo (ZC0). Il ritiro dei provini di calcestruzzo della miscela Z00 sono tendenzialmente superiori a quello dei provini di ZC00. Il ritiro dei provini confezionati con polverino di gomma PFU è di poco superiore rispetto al ritiro misurato per i

provini delle miscele ZC00 e Z00, anche se i dati sperimentali hanno dimostrato che c'è una diminuzione di ritiro all'aumentare della percentuale di materiale PFU usato e comunque tale differenza, rispetto alle miscele confezionate senza gomma, non è molto consistente. Sicuramente, però, la differenza di ritiro è risultata molto accentuata rispetto alla miscela realizzata con l'additivo aerante (ZC0A), che ha mostrato valori di contrazione longitudinali pari a circa il doppio rispetto alle altre miscele.

7.3.8.2 Valutazione del ritiro tramite prescrizioni normative e parametro correttivo "T"

Il D.M. 14/01/2008 "Nuove norme tecniche per le costruzioni" suggerisce al progettista delle strutture in calcestruzzo un metodo di calcolo da utilizzare opportunamente in fase di progetto per stimare la deformazione prodotta dal ritiro. Secondo la normativa vigente, nel territorio italiano, in sede di progettazione, il ritiro del calcestruzzo può essere valutato, infatti, sulla base delle indicazioni di seguito fornite. La deformazione totale da ritiro si può esprimere come:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

dove:

- ε_{cs} è la deformazione totale per ritiro;
- ε_{cd} è la deformazione per ritiro da essiccamento;
- ε_{ca} è la deformazione per ritiro autogeno.

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro di essiccamento può essere valutato mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{c0}$$

Lo sviluppo della deformazione ε_{cd} nel tempo può essere valutato come:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t - t_s) \cdot \varepsilon_{cd,\infty}$$

dove la funzione di sviluppo temporale assume la forma:

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \frac{(t - t_s)}{\left[(t - t_s) + 0,04h_0^{\frac{3}{2}} \right]}$$

in cui:

- t è l'età del calcestruzzo nel momento considerato (in giorni);
- t_s è l'età del calcestruzzo a partire dalla quale si considera l'effetto del ritiro da essiccamento (in giorni);
- h_0 è la dimensione fittizia (in mm) pari al rapporto $2Ac/u$.

essendo:

- u è il perimetro della sezione di conglomerato esposto all'aria;
- Ac è l'area della sezione di calcestruzzo.

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro autogeno $\varepsilon_{ca,\infty}$ può essere valutato mediante l'espressione:

$$\varepsilon_{ca,\infty} = -2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad \text{con } f_{ck} \text{ in } \frac{N}{mm^2}$$

La formulazione del modello proposto dalla normativa è funzione dell'umidità relativa dell'ambiente in cui l'elemento in calcestruzzo è esposto. Da ricerche fatte, si è riuscito a definire un intervallo di variazione dei valori minimi medi nazionali di umidità relativa, riferiti all'ultimo ventennio³, questi variano dal 36%

³ "Il clima in Italia nell'ultimo ventennio" Collana Meteo, Mario Giuliaci, Simone Abelli, Giovanni Dipierro, Alpha test

al 58% in autunno-inverno e dal 28 al 52% in primavera-estate. A fronte di questi dati, ci è sembrato opportuno considerare per il calcolo del ritiro secondo il D.M. 14/01/2008 considerare più valori dell'umidità relativa, quali 20%, 40% e 90%, affinché i nostri risultati rientrino sicuramente nell'intervallo scelto. Si è proceduto, quindi, con il confronto tra il valore reale misurato sperimentalmente e il metodo di calcolo indicato dalla normativa vigente. Si riportano di seguito nelle figure 7.49-7.53 gli andamenti del ritiro sperimentalmente e del ritiro calcolato nel rispetto della normativa in funzione di diverse umidità relative (UR) e del tempo di stagionatura per ogni miscela realizzata. Dal confronto tra i risultati ottenuti sperimentalmente con i valori calcolati utilizzando i modelli di calcolo previsti dalla normativa vigente è emerso che non risulta possibile progettare in sicurezza, riguardo al ritiro, strutture in c.a. qualora si adoperi un calcestruzzo autocompattante, in quanto i valori di ritiro che si considererebbero nel calcolo strutturale secondo i modelli proposti dalla norma, validi per i calcestruzzi ordinari, sarebbero di gran lunga inferiori rispetto ai valori reali determinati sperimentalmente, e, quindi, si sottostimerebbe l'entità del fenomeno. A tale proposito, per i calcestruzzi autocompattanti, è stato opportuno formulare un parametro correttivo "I" che leghi il valore del ritiro degli SCC misurato sperimentalmente con i valori di ritiro misurati con il D.M. 14/01/2008 valido per i calcestruzzi ordinari. Nel caso dei provini confezionati con le diverse tipologie di calcestruzzo oggetto della sperimentazione il calcolo del parametro correttivo di prima approssimazione "I" è stato ottenuto effettuando un rapporto tra i valori sperimentali valutati su calcestruzzi autocompattanti e le medie dei valori ottenibili alle diverse stagionature e ai diversi gradi di umidità usando il metodo normativo. La deformazione da ritiro, nel caso di utilizzo di un calcestruzzo autocompattante, può essere determinato, quindi, con la seguente formula:

$$\varepsilon_{SCC} = I \cdot \varepsilon_{cs} = I \cdot (\varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca})$$

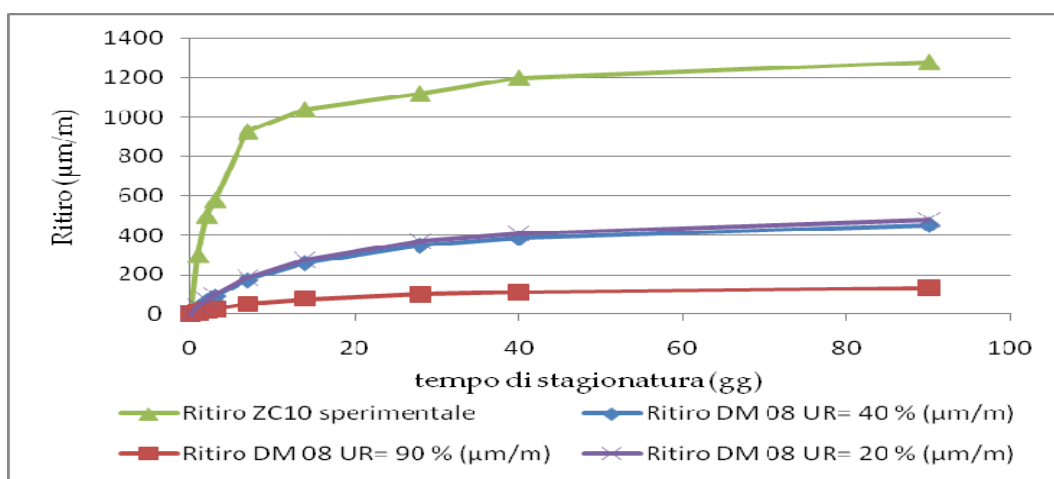


Figura 7.59 - Confronto tra i valori di ritiro sperimentale della miscela ZC10 e i valori calcolati con il D.M. 14/01/2008 in funzione del tempo di stagionatura

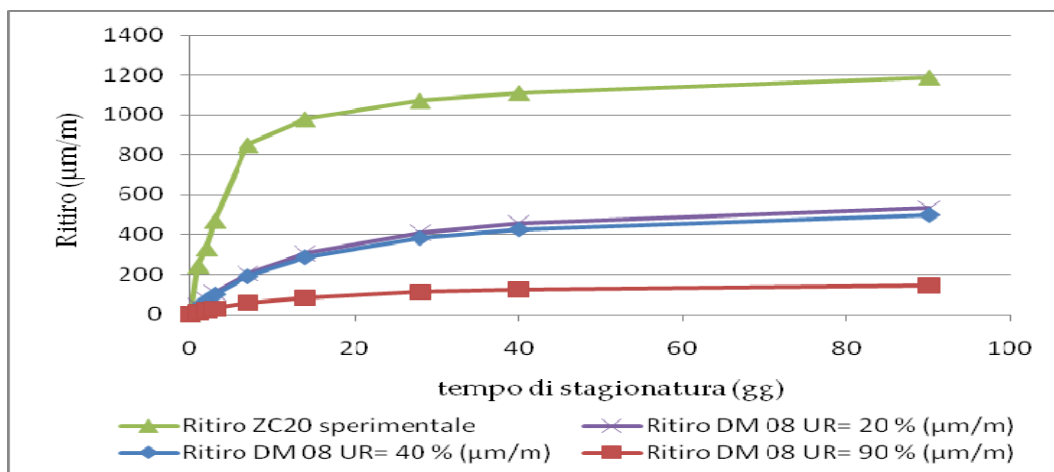


Figura 7.60 - Confronto tra i valori di ritiro sperimentale della miscela ZC20 e i valori calcolati con il D.M. 14/01/2008 in funzione del tempo di stagionatura

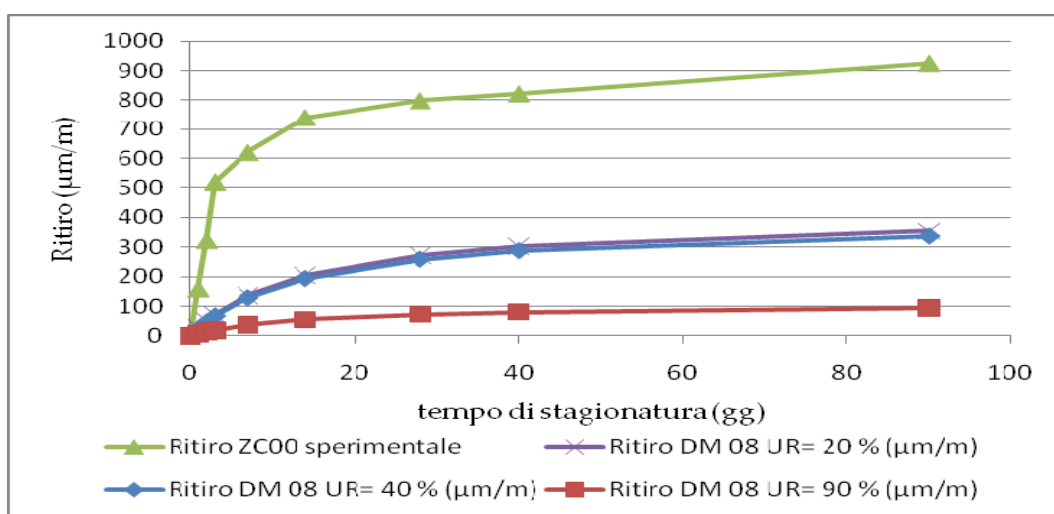


Figura 7.61 - Confronto tra i valori di ritiro sperimentale della miscela ZC00 e i valori calcolati con il D.M. 14/01/2008 in funzione del tempo di stagionatura

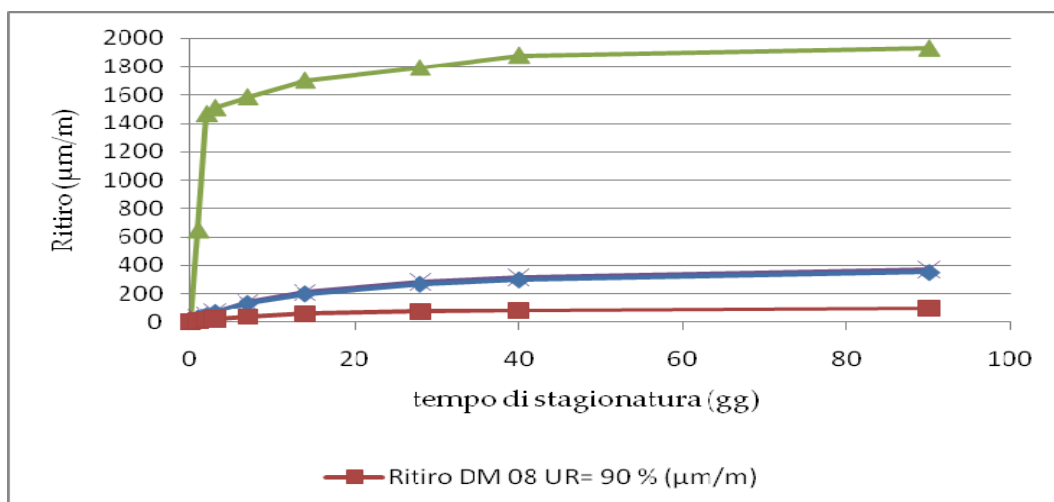


Figura 7.62 - Confronto tra i valori di ritiro sperimentale della miscela ZC0A e i valori calcolati con il D.M. 14/01/2008 in funzione del tempo di stagionatura

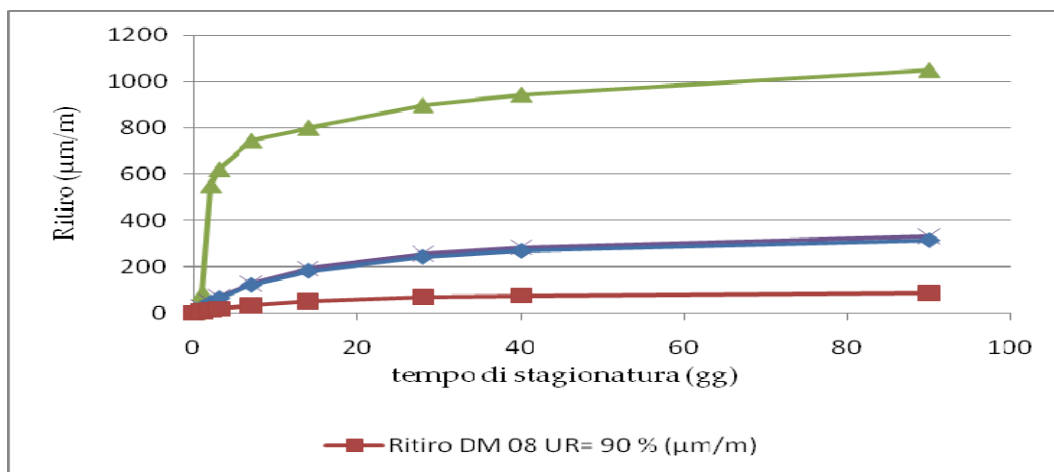


Figura 7.63 - Confronto tra i valori di ritiro sperimentale della miscela Z00 e i valori calcolati con il D.M. 14/01/2008 in funzione del tempo di stagionatura

Nella procedura descritta sono stati esclusi i risultati sperimentali della miscela ZC0A perché i valori sono molto differenti dai risultati sperimentali ottenuti con le altre miscele e, quindi, incomparabili. Dai calcoli effettuati, il valore del parametro correttivo “I” è risultato essere pari a 6,28. Tale valore è risultato plausibile in virtù del fatto che prove di laboratorio eseguite in precedenza su altri provini di calcestruzzo SCC appartenenti a diverse miscele rispetto a quelle realizzate con gomma PFU, con aggiunte di zeolite e filler calcareo, hanno fornito un valore di “I” pari a 5,73. Ricerche più specifiche e su un maggior campione di provini permetteranno, in futuro, di ottenere un valore correttivo più rappresentativo e magari funzione del rapporto a/c, del dosaggio di cemento, della tipologia di aggiunta minerale, ecc., attraverso il quale sarà possibile calcolare il ritiro in fase di progetto anche nel caso di strutture in calcestruzzo autocompattante. Di seguito, sono riportati i diagrammi di confronto tra i valori di ritiro sperimentali e quelli determinati con il D.M. 14/01/2008 corretti con il coefficiente “I”. Dall’analisi dei diagrammi è emerso il fatto che l’utilizzo del parametro correttivo “I” ha permesso a i valori di ritiro sperimentali di rientrare in un range accettabile di valori al fine di progettare in maniera adeguata la deformazione da ritiro anche in caso di utilizzo di calcestruzzi SCC. L’ipotesi correttiva avanzata nel presente lavoro sperimentale potrà essere la base per le future sperimentazioni finalizzate all’ottenimento di un più preciso ed efficace parametro correttivo “I”.

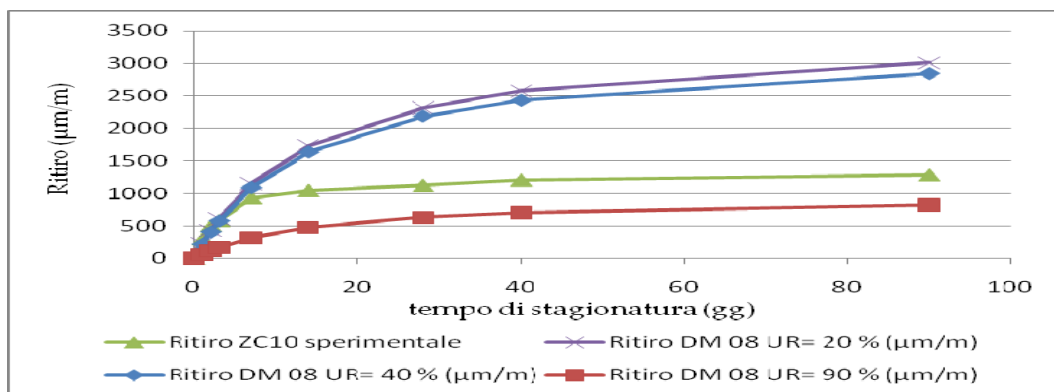


Figura 7.64 - Confronto tra i valori di ritiro della miscela ZC10 calcolati sperimentalmente e con il D.M. 14/01/2008 corretto con il parametro “I”

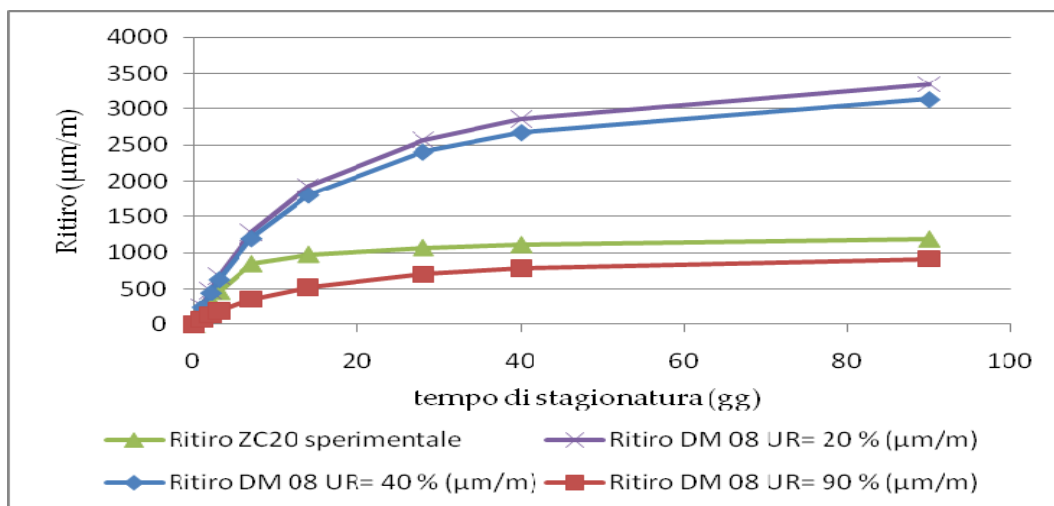


Figura 7.65 - Confronto tra i valori di ritiro della miscela ZC20 calcolati sperimentalmente e con il D.M. 14/01/2008 corretto con il parametro "I"

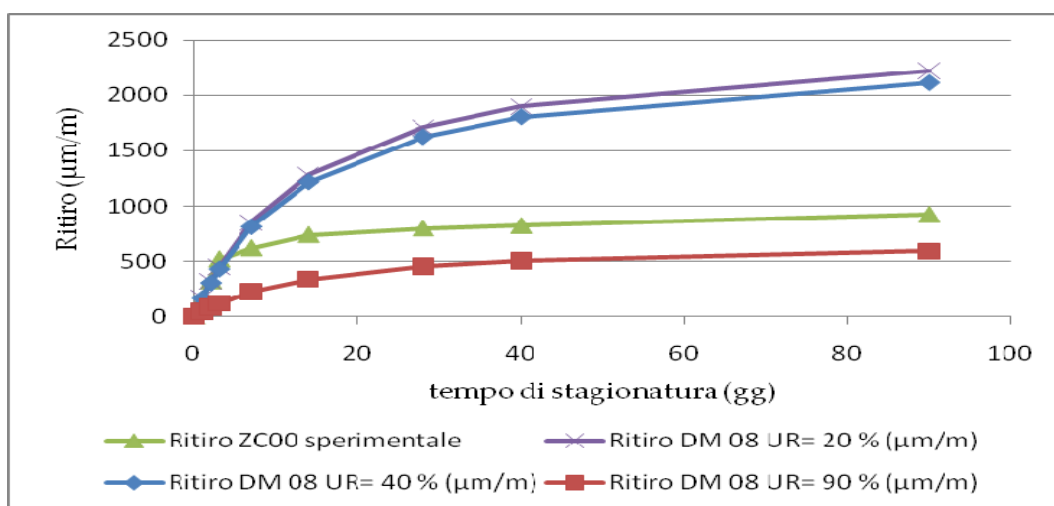


Figura 7.66 - Confronto tra i valori di ritiro della miscela ZC00 calcolati sperimentalmente e con il D.M. 14/01/2008 corretto con il parametro "I"

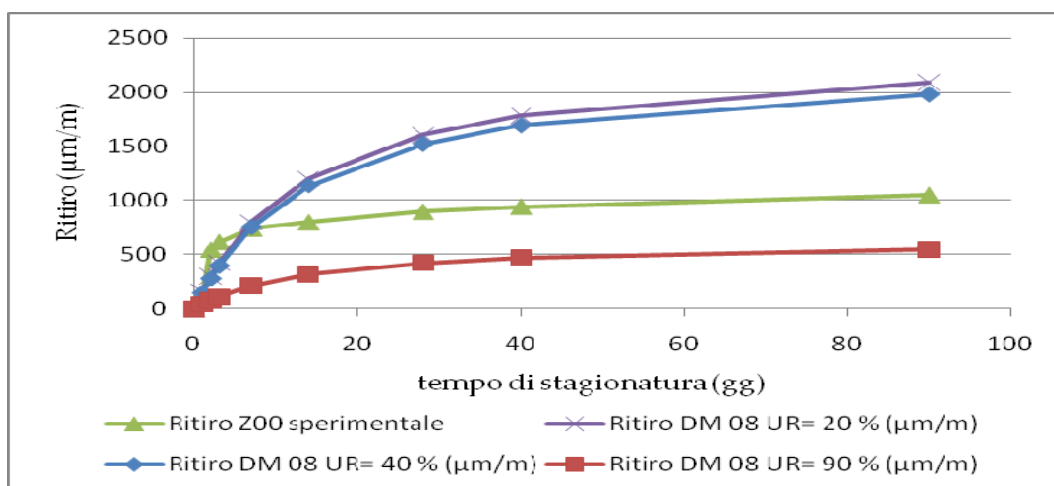


Figura 7.67 - Confronto tra i valori di ritiro della miscela Z00 calcolati sperimentalmente e con il D.M. 14/01/2008 corretto con il parametro "I"

7.3.8.3 Prove di durabilità sui provini realizzati con le miscele definitive di calcestruzzo autocompattante

Oltre a testare i requisiti delle miscele definitive di calcestruzzo autocompattante allo stato fresco tramite le prove previste a livello normativo per questa tipologia

di calcestruzzo, oltre a indagare sulle prestazioni delle stesse miscele allo stato indurito con prove di resistenza meccanica a compressione e con prove di ritiro, sui provini eseguiti sono state condotte anche delle prove di durabilità. In particolare, sono state verificate le resistenze al degrado promosso dallo ione cloruro, dallo ione solfato, dai cicli di gelo e disgelo e dai cicli di riscaldamento ad alta temperatura. I risultati ottenuti per le singole prove sulle diverse miscele sperimentate sono stati riportati nei paragrafi seguenti.

7.3.8.3.1 Attacchi chimici promossi dagli ioni cloruro e solfato: peso a secco prima degli attacchi

Le prove eseguite sono regolamentate da specifiche norme. I provini utilizzati per le prove di degrado chimico sono stati inseriti per 12 mesi in parte in una soluzione acquosa con cloruro di calcio e in parte in una soluzione acquosa di solfato di sodio. Prima dell'immissione dei provini nelle relative soluzioni, si è proceduto alla pesatura degli stessi, previo trattamento in stufa a 80°C per 24 ore per rilevarne il peso a secco. Nella tabella 7.50 sono riportati i pesi a secco medi dei provini di SCC, per tipologia di miscela, registrati prima dell'immissione nelle soluzioni saline. I provini da sottoporre alle prove chimiche sono stati denominati e raggruppati convenzionalmente in quattro serie: A, B, C, e D. I provini etichettati con le lettere A e B sono stati destinati alle prove di attacco promosso da Cloruri, mentre quelli con le lettere C e D alle prove di attacco da solfati.

Peso medio a secco dei provini (g)				
Miscela	Serie A	Serie B	Serie C	Serie D
ZC10	1780,5	1841,0	1716,5	1755,0
ZC00	2288,5	2249,5	2330,5	2319,5
Z00	2290,0	2276,5	2258,5	2241,0
ZC0A	1933,0	2186,5	2066,5	2067,0
ZC20	1621,0	1641,5	1660,0	1615,5

Tabella 7.50 – Pesi medi rilevati prima degli attacchi chimici

7.3.8.3.2 Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro

Lo ione cloro è frequente negli scarichi civili ed industriali, nei terreni prossimi al mare, in quelli contenenti salemma e nelle acque che li attraversano. Il meccanismo di degrado che essi generano da problemi ai ferri dell'armatura, perché il cloruro è in grado di distruggere lo strato protettivo che avvolge le barre d'acciaio, accelerando o dando vita alla loro corrosione. Il metodo di verifica utilizzato per l'esecuzione della prova di penetrabilità dello ione cloruro è regolamentato dalla UNI 7928. Al termine della stagionatura in acqua a 28 giorni di stagionatura, rilevato il peso a secco, i provini sono stati inseriti in un recipiente contenente una soluzione acquosa in cui sono stati versati e sciolti 0,27 mol/l di cloruro di calcio (CaCl₂). La permanenza in questa soluzione, è avvenuta per 12 mesi, allo scadere dei quali, i provini sono stati prelevati, messi ad asciugare per due giorni e, infine, ognuno di essi è stato diviso in due metà. Per la valutazione della profondità di penetrazione dello ione Cl⁻ sono stati utilizzati due composti chimici: nitrato d'argento e fluorescina. La normativa prescrive per il nitrato d'argento (AgNO₃) una soluzione titolata di concentrazione pari a 0,1 mol/l, mentre per la fluorescina una soluzione composta di 0,1 g in 100 cm³ d'alcool etilico al 70%. Per quanto riguarda l'esecuzione della prova, una volta prelevati i provini dal recipiente, asciugati e divisi a metà, si è proceduto all'esecuzione della prova necessaria per determinare l'avanzamento dello ione cloro nel calcestruzzo. Metà provino è stata spruzzata mediante un nebulizzatore, con una soluzione di

fluoresceina e si è lasciata asciugare. Dopo aver ripetuto questo procedimento per 5 volte è stata spruzzata per due volte una soluzione di nitrato d'argento (figura 7.68). In presenza di ioni Cl^- si ha formazione di cloruro di argento che diventa progressivamente più scuro per azione della luce. La zona di calcestruzzo non permeata dalla soluzione salina assorbe la fluoresceina mantenendo persistente in superficie la colorazione caratteristica rossa del colorante.

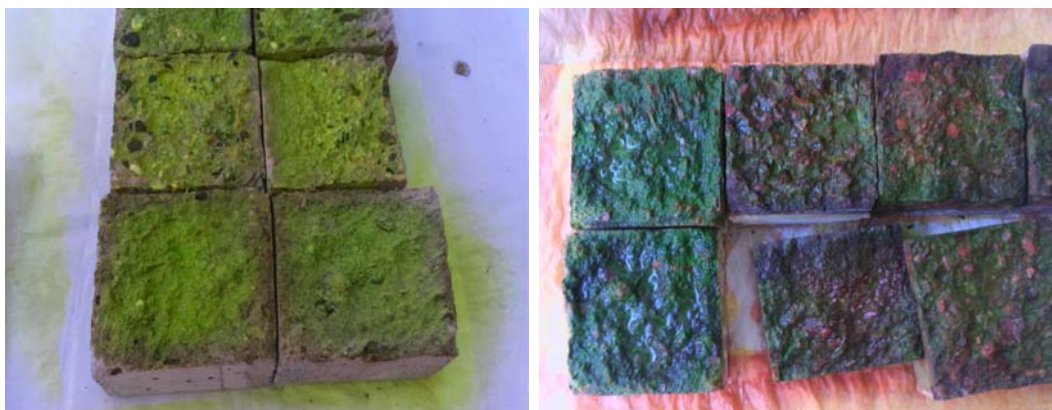


Figura 7.68 – Provini trattati con fluoresceina e nitrato d'argento

Al termine del trattamento, asciugata la superficie dei provini, è possibile misurare la penetrazione dello ione cloruro all'interno del calcestruzzo. Per ottenere questa misura occorre utilizzare delle accortezze. Se il fronte d'avanzamento non corre parallelamente alla superficie (figura 7.69 a) bisogna determinare la misura nel modo seguente:

- se il fronte avesse l'aspetto mostrato nella figura 7.69 b, occorrerebbe considerare una misura media ed eventualmente registrare anche il punto di massimo;
- se il fronte corresse parallelo alla superficie salvo zone più profonde come in figura 7.69 c, si riporterebbe la profondità normale e se fosse molto marcata anche la profondità massima senza calcolare la profondità media.

Analizzati i provini singolarmente e in maniera molto dettagliata, sono stati in definitiva valutati i valori di penetrazione dello ione cloruro e in tabella 7.51 sono stati riportati i valori medi di profondità per ogni serie. Come si può osservare i valori sono bassi, il che ci permette di affermare che le miscele proposte manifestano una buona opposizione all'avanzamento dello ione cloruro. In base ai risultati sperimentali registrati è possibile affermare che:

- tutti i provini delle miscele di calcestruzzo SCC realizzati, a 12 mesi di trattamento chimico in soluzione ricca di cloruri, hanno esibito valori di penetrazione del relativo ione molto bassi;
- i valori di penetrazione dello ione cloruro più elevati sono stati registrati per la miscela realizzata con l'additivo aerante (ZC0A), mentre quelli più bassi si sono avuti per la miscela realizzata con la sola zeolite (Z00);
- i valori di penetrazione dello ione cloruro nelle miscele di calcestruzzo SCC realizzate con polverino di gomma PFU (ZC10 e ZC20) sono risultati alquanto contenuti e addirittura i relativi valori di avanzamento delle miscele sono più bassi di quelle registrate per la miscela confezionata con calcare e zeolite (ZC0).

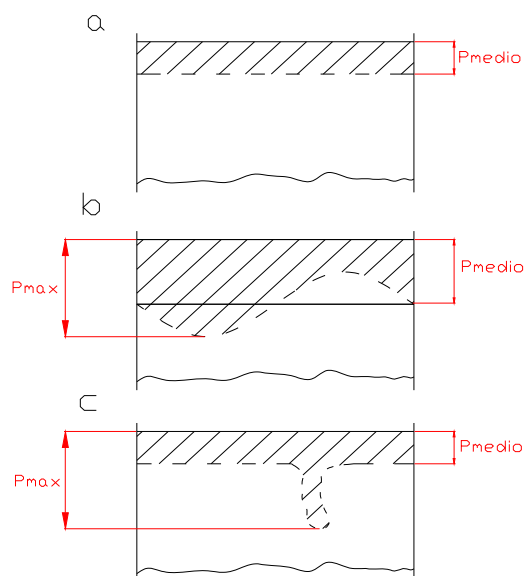


Figura 6.69 - Misura della penetrazione dello ione cloruro

Serie	Miscela	Penetrazione media dello ione cloruro (mm)
A	ZC10	7,0 mm
A	ZC00	10,0 mm
A	Z00	5,0 mm
A	ZC0A	15,0 mm
A	ZC20	8,0 mm
B	ZC10	9,0 mm
B	ZC00	12,0 mm
B	Z00	7,0 mm
B	ZC0A	17,0 mm
B	ZC20	9,5 mm

Tabella 7.51 – Penetrazione media per serie e per miscela dello ione cloruro



Figura 7.70 – Alcuni provini soggetti sottoposti a prova

7.3.8.3 Determinazione della penetrabilità dello ione solfato

Lo ione solfato SO_4^- è anch'esso frequente negli scarichi civili ed industriali, nelle piogge acide, nei terreni contenenti sali solfatici e nelle acque naturali che li attraversano. Si tratta in genere di solfato di sodio, di potassio, di calcio, di magnesio e di ammonio. Le reazioni che avvengono nel calcestruzzo esposto all'aggressione solfatica sono distruttive perché comportano fortissimi aumenti di volume dovuti alla formazione di particolari sostanze cristalline: ettringite secondaria e thaumasite. Il metodo di verifica adottato per l'esecuzione della prova di penetrabilità dello ione solfato è disciplinato dalla norma UNI 8019. Al

termine dei 28 giorni di stagionatura, previa rilevazione del peso a secco dei provini, gli stessi sono stati inseriti in un recipiente contenente una soluzione acquosa in cui sono stati versati e sciolti 0.5 mol/l di solfato di sodio (Na_2SO_4). La permanenza in questa soluzione dei provini è stata di 12 mesi, allo scadere dei quali sono stati prelevati, asciugati e divisi in 2 metà. Per valutare la profondità di penetrazione sono stati utilizzati due composti chimici: cloruro di bario e permanganato di potassio. La normativa prevede l'impiego di una soluzione titolata di concentrazione pari a 2,1 mol/l di cloruro di bario (BaCl_2) e una concentrazione di 2,1 mol/l di permanganato di potassio (KMnO_4). Prescrive, inoltre, di miscelare 3 parti di soluzione titolata di BaCl_2 con 1 parte di soluzione titolata di KMnO_4 . Prelevati dal recipiente, asciugati e divisi a metà, sulle superfici dei provini, al fine di rendere evidente la profondità della penetrazione dello ione solfato, è stata spruzzata mediante un nebulizzatore una soluzione di cloruro di bario e permanganato di potassio. Dopo aver eseguito per una sola volta questa operazione, il provino viene immerso per 1 minuto in acqua distillata, allo scopo di eliminare l'eccesso della soluzione in precedenza spruzzata. In presenza di ioni SO_4^{2-} si ha formazione di solfato di bario che ingloba il permanganato di potassio, assumendo e conservando la sua colorazione violetta. La zona di conglomerato non permeata dalla soluzione salina di solfato di sodio si decolora durante il lavaggio con l'acqua distillata. E' così possibile tracciare una linea di demarcazione sulla superficie del provino, corrispondente al fronte d'avanzamento dello ione solfato e, quindi, determinarne la profondità di penetrazione.



Figura 7.71 – Provini sottoposti a trattamento

Come può osservare dalla tabella 7.52, nelle prove effettuate si è riscontrato un avanzamento dello ione nei provini basso, quindi, la penetrazione dei solfati è stata minima. Ciò ci permette di affermare che le miscele proposte manifestano una buona opposizione all'avanzamento dello ione solfato.

Serie	Miscela	Penetrazione media dello ione cloruro (mm)
C	ZC10	4,0 mm
C	ZC00	2,0 mm
C	Z00	1,0 mm
C	ZC0A	2,0 mm
C	ZC20	7,0 mm
D	ZC10	5,0 mm
D	ZC00	4,0 mm
D	Z00	1,0 mm
D	ZC0A	3,0 mm
D	ZC20	9,0 mm

Tabella 7.52 – Penetrazione media per serie e per miscela dello ione solfato



Figura 7.72 – Esempi di provini della miscela ZC20 sottoposto a prova

Sperimentalmente sui provini sottoposti ad attacco chimico da solfati è stato osservato che:

- tutti i provini di calcestruzzo SCC sottoposti ad attacco solfatico hanno mostrato una buona resistenza alla penetrazione del relativo ione, in quanto in tutti i casi l'avanzamento non ha superato i 10 mm di profondità;
- la miscela realizzata con sola zeolite (miscela Z00) è quella che, praticamente non ha registrato attacco solfatico;
- le miscele realizzate con gomma PFU (miscela ZC10 e ZC20) hanno fatto registrare valori di penetrazione dello ione bassi, per cui i calcestruzzi realizzati con il materiale PFU consentono di realizzare manufatti capaci di resistere agli attacchi promossi dai solfati.

7.3.8.3.4 Variazione di peso provocato dagli attacchi chimici (ioni cloruro e solfato)

Prelevati i provini dalla soluzione salina in cui sono stati a contatto per 1 anno, si è provveduto alla misurazione del peso a secco degli stessi. Valutato il peso di ogni provino è stato calcolato per ogni miscela il relativo peso medio. Tali pesi medi sono stati confrontati con i pesi medi registrati prima di riporre i provini stessi nelle soluzioni saline ed è stata calcolata la variazione di peso percentuale. In tabella 7.53 sono riportati i pesi medi rilevati dopo gli attacchi, mentre in tabella 7.54 le variazioni percentuali di peso medio a secco dei provini prima di essere immersi in soluzione salina e dopo un anno di trattamento. Il segno “-” indica che è avvenuta una perdita di peso, il segno “+” è da intendersi come una sostanziale non variazione del peso medio (in alcuni rari casi non si è riusciti ad espellere con il riscaldamento in stufa l’acqua inglobata dei provini).

Peso medio a secco dopo agli attacchi (g)				
Miscela	Serie A	Serie B	Serie C	Serie D
ZC10	1760,5	1824,0	1720,5	1755,0
ZC00	2288,5	2225,5	2301,0	2325,5
Z00	2271,0	2243,0	2274,0	2246,0
ZC0A	1890,5	2121,0	1993,5	1990,0
ZC20	1632,5	1640,5	1641,0	1618,0

Tabella 7.53 – Peso medio a secco dei provini dopo trattamento in soluzione salina

Variazione (%)				
Miscela	Serie A	Serie B	Serie C	Serie D
ZC10	-1,1%	-0,9%	0,2%	0,0%
ZC00	0,0%	-1,1%	-1,3%	0,3%
Z00	-0,8%	-1,5%	0,7%	0,2%
ZC0A	-2,2%	-3,0%	-3,5%	-3,7%
ZC20	0,7%	-0,1%	-1,1%	0,2%

segno “-” = perdita di peso

Tabella 7.54 – Variazione di peso medio

In tutti i casi esaminati le variazioni di peso sono state molto basse. Infatti, al massimo si è avuta una perdita di peso del 3,7%. Ovviamente le variazioni significative di peso sono da valutarsi essenzialmente per i provini sottoposti ad attacco da solfati, in quanto con la loro azione possono provocare la disintegrazione della matrice cementizia. L'attacco da cloruri influenza soprattutto la durabilità delle armature metalliche presenti nel calcestruzzo. Le variazioni di peso più consistenti si sono verificate per la miscela confezionata con additivo aerante, quelle più esigue per le miscele realizzate senza gomma PFU e senza additivo aerante (ZC00 e Z00). Le miscele con gomma (ZC10 ZC20) hanno manifestato bassi livelli di penetrazione degli ioni con valori molto prossimi a quelli valutati sulle migliori miscele senza PFU (ZC00 e Z00).

7.3.8.3.5 Prove di gelo e disgelo sui provini realizzati con le miscele definitive di calcestruzzo autocompattante

La prova di gelo e disgelo è stata eseguita in conformità alla normativa UNI 7087:2002. La prova di gelo-disgelo consiste nell'introdurre i provini nella cella ad una temperatura di -25°C per 4 ore e successivamente per altrettanto tempo in acqua alla temperatura di +5°C. In particolare, i provini sono stati sottoposti ad escursioni termiche secondo un ciclo costituito da quattro fasi: raffreddamento, mantenimento alla temperatura di gelo, riscaldamento, mantenimento alla temperatura di disgelo della durata di 8 ore. Si è provveduto, prima dell'inizio della prova, alla pesatura dei provini. Con cadenza periodica di 25 cicli, come previsto da normativa, i provini sono stati pesati al fine di valutare l'andamento del peso. Di seguito nei grafici 7.73 e 7.74 sono stati riportati:

- l'andamento dei pesi medi registrati durante la prova di gelo-disgelo, determinati in condizione satura a superficie asciutta;
- le variazioni percentuali di peso in funzione del numero di cicli rispetto alla condizione iniziale.

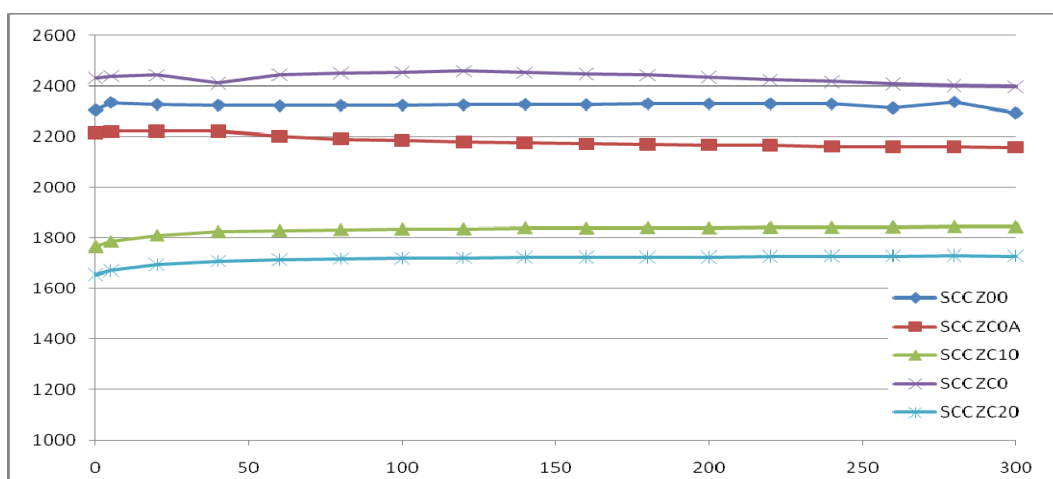


Figura 7.73 - Andamento del peso medio dei provini durante i cicli

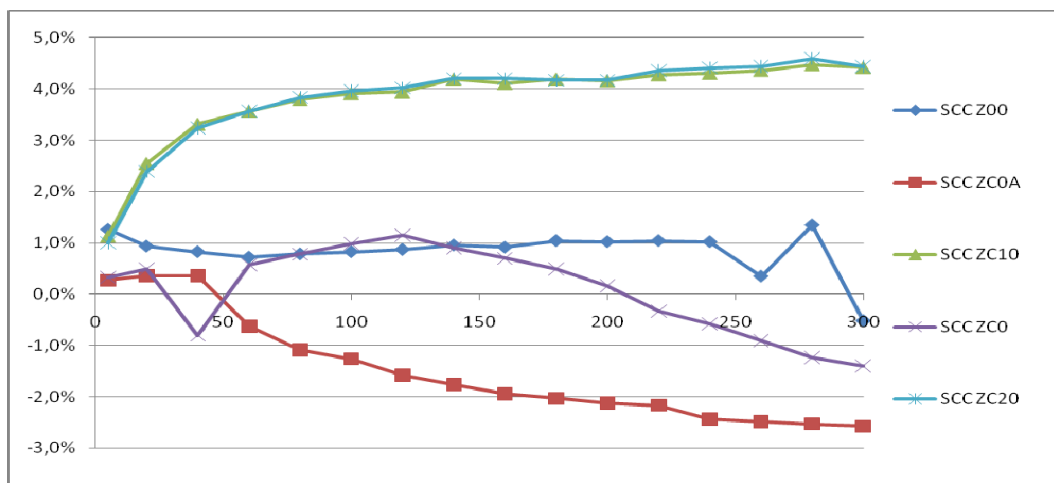


Figura 7.74 - Variazioni percentuali del peso medio dei provini durante i cicli rispetto alla condizione saturata iniziale

La percentuale massima di variazione del peso, dei provini di calcestruzzo, è stata sempre inferiore al 3%, pertanto la prova può essere ritenuta superata per tutti i provini realizzati, mantenutisi entro questo parametro. Dai risultati sperimentali registrati sul peso medio dei provini è possibile evidenziare quanto segue:

- i provini confezionati con polverino PFU (ZC10 e ZC20), esibiscono un'ottima resistenza ai cicli di gelo-disgelo, in quanto si evidenziano solo piccole variazioni di peso in aumento, che denotano il fatto che i provini di queste serie dopo 300 cicli di gelo/disgelo si trovano ancora in una situazione in cui stanno assorbendo acqua, per cui non si sono verificati ancora fenomeni di degrado;
- il degrado esibito dai provini confezionati con additivo aerante (ZC0A) è superiore rispetto a quello presente (in realtà assente) nei provini delle miscele realizzate con gomma PFU (ZC10 e ZC20);
- l'utilizzo di zeolite nell'impasto consente sicuramente un miglioramento delle prestazioni dei manufatti in termini di resistenza al degrado promosso dalle escursioni termiche.

Dopo i cicli di gelo e disgelo, i provini di calcestruzzo sono stati sottoposti a prova meccanica di resistenza a compressione. I risultati ottenuti sono stati messi in relazione con la resistenza meccanica a compressione a 120 giorni di stagionatura dei provini appartenenti alla medesima miscela ma non sottoposti a cicli termici. Nella tabella 7.55 sono stati riportati di valori ottenuti.

Miscela	Resistenza a compressione media dei provini non sottoposti a cicli a 120 giorni di stagionatura (MPa)	Resistenza a compressione media dei provini sottoposti a cicli (MPa)	Variazione percentuale
Z00	73,44	46,54	-36,6%
ZC0	67,07	43,52	-35,1%
ZC0A	56,44	37,94	-32,8%
ZC10	25,60	17,83	-30,4%
ZC20	16,55	11,33	-31,5%

Tabella 7.55 - Variazione di resistenza meccanica a compressione

Dai risultati delle prove di resistenza meccanica a compressione eseguite è stato possibile constatare che:

- mediamente le perdite di resistenza meccanica a compressione originata dai cicli di gelo/disgelo nei calcestruzzi autocompattanti realizzati è dell'ordine del 30%;
- le miscele che hanno manifestato una minore perdita di resistenza sono state le miscele realizzate con gomma PFU (ZC10 e ZC20) e additivo aerante (ZC0A) e tra queste la migliore in assoluto è stata quella realizzata con il 10% di materiale polimerico (ZC10);
- il materiale polimerico derivante dalla triturazione dei pneumatici a fine vita può essere utilizzato in alternativa all'additivo aerante per il confezionamento di calcestruzzi resistenti all'azione dirompente dei cicli di gelo/disgelo.

Durante la prova, ogni 50 cicli, si è effettuata una valutazione circa l'evoluzione dello stato di danno manifestato dai provini, fornendo cioè un contrassegno, che ne ha individuato le condizioni nel tempo. In particolare, la valutazione ha previsto il contrassegno dei provini appartenenti ad una data miscela con:

- Ottimo, relativo ad un ottimo stato di conservazione (assenza di fessure);
- Buono, relativo ad un buono stato di conservazione (comparsa delle prime fessurazioni non estese sulla superficie del provino);
- Discreto, relativo ad un discreto stato di conservazione (presenza di fessurazioni più o meno diffuse sulla superficie del provino);
- Sufficiente, relativo ad un sufficiente stato di conservazione (presenza di fessure diffuse e profonde su tutta la superficie del provino);
- Non sufficiente, relativo ad un insufficiente stato di conservazione (distacchi di materiale, su tutta la superficie).

Nella tabella 7.56 sono riportate le evoluzioni dello stato di conservazione durante la prova di gelo-disgelo

MISCELA	Stato dei provini					
	50	100	150	200	250	300
Z00	Ottimo	Buono	Buono	Buono	Sufficiente	Sufficiente
ZC0	Discreto	Buono	Buono	Buono	sufficiente	Sufficiente
ZC10	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Buono
ZC20	Ottimo	Ottimo	Buono	Buono	Buono	Buono
ZC0A	Ottimo	Ottimo	Buono	Buono	Buono	Buono

Tabella 7.56 - Evoluzione dello stato di danno

Per dare maggiore comprensibilità alla tabella 7.56, nelle seguenti immagini (figure 7.75-7.79) sono riportati degli esempi fotografici degli stati di danno considerati.



Figura 7.75 - Condizioni Ottime



Figura 7.76 - Condizioni Buone



Figura 7.77 - Condizioni Discrete



Figura 7.78 - Condizioni Sufficienti



Figura 7.79 - Condizioni Insufficienti

7.3.8.4 Prove termiche ad alta temperatura sui provini realizzati con le miscele definitive di calcestruzzo autocompattante

Come è noto dalla letteratura scientifica in materia⁴, tutte le tipologie di calcestruzzo, se esposti all'azione di alte temperature, subiscono trasformazioni microstrutturali e meccaniche. Per verificare la resistenza dei calcestruzzi autocompattanti realizzati rispetto a questa particolare tipologia di attacco, le indagini sperimentali hanno previsto escursioni termiche fino a 300°C. In particolare, sono stati effettuati dei cicli termici a 80°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C. Durante i cicli si è provveduto anche alla rilevazione delle velocità ultrasonore su ogni provino sottoposto a trattamento. Nel dettaglio, per ogni provino la procedura eseguita ad ogni ciclo termico è stata:

- pesatura mediante bilancia elettronica;
- rilevazione della velocità di transito delle onde ultrasonore;
- allocazione in forno per 48 ore a temperatura costante (i provini sono stati disposti in modo da non venire a contatto tra di loro e in posizione orizzontale);

⁴ Phat L.T., Lawson J.R., Davis F.L.: Effects of elevated temperature exposure on heating, characteristic, spalling and residual properties of high performance concrete, National Institute of Standards and Technology, reprinted from Materials and Structures, Vol. 34, pp. 83-91 (2001);

Grattan-Bellew P.E.: Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 1, pp. 3-16 (1999);

Chan Y.N.: Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures, Cement & Concrete Composites, Vol. 1, pp. 23-27 (1999).

- prelievo dal forno (per evitare una brusca escursione termica, allo scadere delle 48 ore, il forno è stato lasciato aperto per 2 ore circa e solo successivamente i provini sono stati tolti);
- pesatura a secco, subito dopo aver tolto i provini dal forno;
- esposizione a temperatura ambiente per 48 ore.

In figura 7.80 sono riportati gli andamenti del peso medio dei provini durante i cicli termici per i provini di ogni miscela eseguita, mentre in figura 7.81 sono riportate le relative variazioni percentuali. L'analisi dei pesi medi effettuata durante i cicli termici ha permesso di evidenziare che all'aumentare della temperatura si verifica una perdita di peso. Tale perdita a fine cicli è risultata inferiore all'8% in peso in tutte le miscele realizzate. È importante sottolineare che i provini che hanno perso meno peso sono stati quelli relativi alle miscele confezionate con gomma PFU (ZC10 e ZC20). Addirittura, i provini della miscela ZC20, cioè in cui vi è il 20% di gomma PFU in sostituzione in volume rispetto alla sabbia, sono quelli che hanno perso il minor peso in assoluto. Durante i cicli termici si è pensato di misurare, come accennato in precedenza, anche un'altra grandezza legata⁵ alla resistenza a compressione: la velocità ultrasonica. In tabella 7.57 sono riportati i valori medi di velocità ultrasonica misurati per ogni miscela in funzione della temperatura del ciclo termico. Nel grafico di figura 7.82 è riportata, invece, la variazione percentuale di velocità ultrasonica rispetto alla velocità misurata al primo ciclo (80°C). Dall'analisi dei valori di velocità è stato riscontrato che all'aumentare della temperatura è stata verificata una diminuzione di velocità ultrasonica, dunque un decadimento delle proprietà meccaniche del materiale. Cioè, man mano che aumenta la temperatura del ciclo, si innescano all'interno dei manufatti dei meccanismi di degrado dovuti probabilmente al decadimento di alcune fasi presenti nella matrice cementizia. Altri fattori di degrado potrebbero essere dovuti al fatto che all'aumentare della temperatura, la pasta cementizia tende a diventare più fragile e gli aggregati tendano di dilatarsi, per cui la coesione all'interfaccia legante-aggregato diventa più sempre più debole e provoca il decadimento delle prestazioni del calcestruzzo⁶. Al termine dei cicli termici è stata valutata la resistenza a compressione residua dei provini ed è stata valutata la relativa perdita percentuale. I valori medi registrati sono riportati in tabella 7.58.

⁵ I. Iacobini, P. Frontera, F. Crea, G. Porco: Prove non distruttive su calcestruzzi autocompattanti ad alte prestazioni (HPSCC) realizzati con fini non convenzionali, Conferenza Nazionale sulle Prove non distruttive Monitoraggio e Diagnostica (2007);

M. Cetraro, S. De Paola, M. Massaccesi, G. Menditto, G. Porco: Curve di correlazione per il controllo dell'affidabilità dei calcestruzzi ordinari, Atti del Convegno "Calcestruzzi autocompattanti e calcestruzzi ordinari: progettazione, produzione e controlli sperimentali, pp. 7-35 (2003);

A. Di Leo, G. Pascale: La stima della resistenza in situ dei calcestruzzi con i metodi non distruttivi, Inarcos (1991)

⁶ G. Epasto, G. Campanella: Valutazione della durabilità di calcestruzzi fibrerforzati con fibre di acciaio, Criteri e metodi per l'analisi dei crolli: studi ed esperienze, Dario Flaccovio Editore, pp. 839-844 (2007)

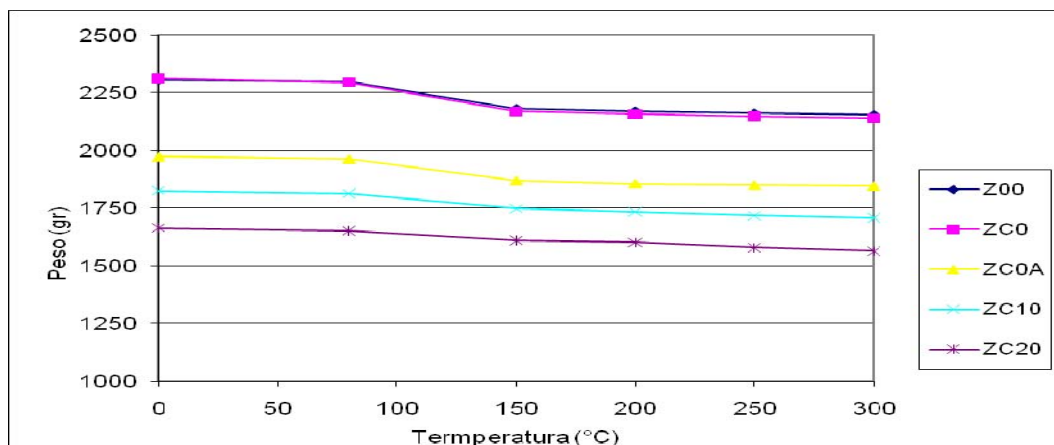


Figura 7.80 – Andamento del peso medio dei provini registrato durante i cicli termici

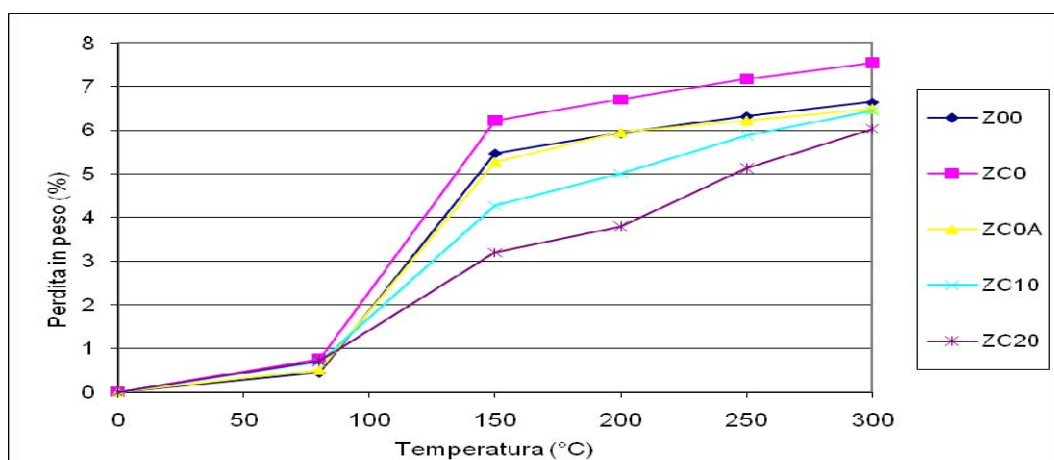


Figura 7.81 – Variazioni percentuali del peso medio dei provini registrato durante i cicli termici

Miscela	80 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
Z00	4205,00	3376,25	2996,88	2711,50	2307,25
ZC0	4048,13	3492,50	3090,13	2788,63	2396,50
ZC0A	3998,25	3423,13	2963,75	2476,63	2200,25
ZC10	2646,63	2302,00	2000,25	1665,00	1443,13
ZC20	2390,38	2110,88	1768,63	1462,75	1201,25

Tabella 7.57 – Valori medi di velocità ultrasonica valutate durante i cicli termici

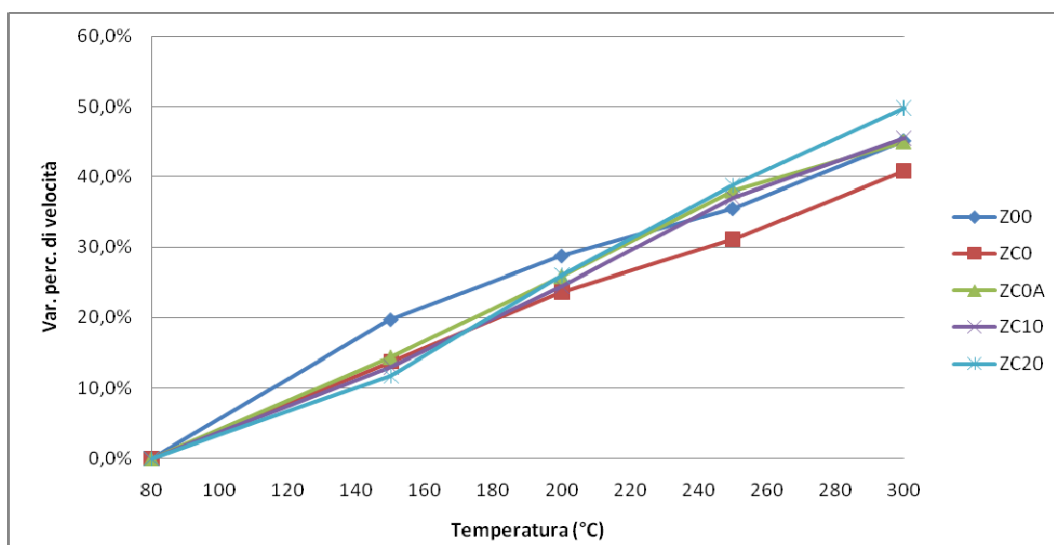


Figura 7.82 – Variazione percentuale di velocità ultrasonica in funzione della temperatura

Miscela	Resistenza a compressione a 120 giorni di stagionatura (MPa)	Resistenza a compressione dopo i cicli termici (MPa)	Variazione Percentuale di resistenza a compressione (%)
Z00	73,44	49,97	-31,96
ZC0	67,07	44,89	-33,07
ZC0A	56,44	35,78	-36,61
ZC10	23,07	15,32	-33,58
ZC20	11,68	7,49	-35,89

Tabella 7.58 – Resistenza a compressione residua dopo i cicli termici e relativa perdita rispetto ai valori registrati a 120 giorni di stagionatura

Dall'analisi dei valori riportati in tabella è possibile evidenziare che:

- i cicli termici condotti sui provini di calcestruzzo SCC realizzati hanno prodotto un forte degrado dei manufatti in termini di perdita di resistenza a compressione;
- mediamente, tale perdita di resistenza è stata superiore al 30% in tutte le miscele realizzate;
- la miscela che meglio ha resistito a tale attacco è stata la miscela confezionata con la sola aggiunta di zeolite (Z00);
- le miscele realizzate con filler calcareo e zeolite (ZC0) e con zeolite, filler calcareo ed il 10% di gomma (ZC10) hanno mostrato buoni risultati in quanto hanno mostrato perdita di resistenza molto prossimi a quelli registrati sulla miscela Z00;
- la miscela realizzata con un alto contenuto di gomma e quella confezionata con additivo aerante hanno mostrato valori più alti di perdita di resistenza;
- la miscela ZC10, dopo i cicli, pur subendo una perdita di resistenza del 33,58%, può ancora essere utilizzata per il confezionamento di calcestruzzi strutturali in quanto la resistenza meccanica a compressione residua è di 15,32 MPa.

7.4 Ottimizzazione dei calcestruzzi autocompattanti: miscele SCC di seconda serie

Compiuta un'approfondita indagine di caratterizzazione allo stato fresco ed indurito sui calcestruzzi autocompattanti di prima serie, nonostante gli ottimi risultati ottenuti soprattutto circa l'utilizzo di gomma PFU per la realizzazione di SCC durevoli e dalle buone prestazioni meccaniche, si è pensato di effettuare, come nel caso delle malte, una indagine suppletiva nel tentativo di ottimizzare ulteriormente i risultati ottenuti. In questo processo di miglioramento delle miscele è stato compiuto uno studio, soprattutto sulle distribuzioni granulometriche degli aggregati. Si è pensato, inoltre, di abbassare il dosaggio di cemento nelle miscele al fine di ottenere miscele relativamente più economiche in termini di costo a metro cubo di impasto, lasciando invariato il rapporto a/c. Anche in questo processo, come nel caso dei calcestruzzi di prima serie, prima di effettuare impasti definitivi, è stato necessario formulare degli impasti di prova per ricercare i dosaggi ideali soprattutto per gli additivi utilizzati. Per quanto riguarda il proporzionamento delle miscele, la scelta dei dosaggi, anche in questo caso, è stata guidata dalle prescrizioni della Normativa Italiana, soprattutto la norma UNI 11040. In base a queste condizioni sono state utilizzate le seguenti quantità:

- 340 kg/m³ di cemento (rispetto a 380 kg/m³ usata per le miscele di prima serie);

- 200 kg/m³ di aggiunte minerali (rispetto a 180 kg/m³ usata per le miscele di prima serie);
- 170 litri/m³ di acqua (rispetto a 190kg/m³ usata per le miscele di prima serie).

Si sono ottenuti, quindi, 540 kg/m³ di finissimi (rispetto a 560 kg/m³ ottenuti per le miscele di prima serie) ed un rapporto acqua/finissimi $\approx 0,32$ (rispetto a 0,34 ottenuto per le miscele di prima serie). Il rapporto a/c è stato mantenuto per ogni impasto pari a 0,50. La grana di gomma PFU somministrata agli impasti ha un diametro massimo delle particelle di 2,88 mm.

Anche la curva granulometrica degli aggregati è cambiata. Di seguito si riporta la distribuzione utilizzata:

- il trattenuto a 10 è passato dal 13% al 15%;
- il trattenuto a 7 è passato dal 16% al 15%;
- il trattenuto a 4 è passato dal 21% al 20%;
- il dosaggio di sabbia è rimasto uguale, pari al 50% del volume totale degli aggregati.

Dopo aver progettato le miscele oggetto della sperimentazione, si è proceduto alla realizzazione di impasti di prova (9 litri), utilizzando la seguente legenda per identificarle singolarmente: Z1: miscela realizzata con l'aggiunta di zeolite 5A industriale; ZC1: miscela realizzata con l'aggiunta di zeolite 5A industriale e filler calcareo; ZC10G: miscela realizzata con l'aggiunta di zeolite 5A industriale, filler calcareo e 10% di grana in gomma in sostituzione, in volume, sul dosaggio degli aggregati totali. I parametri osservati durante la realizzazione degli impasti allo stato fresco sono stati: lavorabilità della miscela in termini di spandimento e velocità di spandimento, presenza di bleeding e presenza di segregazione. Non è stato ritenuto opportuno ottimizzare la miscela avente un elevato dosaggio di gomma PFU (ZC20) in quanto per le applicazioni a cui potrebbe essere destinata (massetti leggeri, sottofondi stradali e ferroviari, ecc.) non sono richiesti particolari prestazioni meccaniche, per cui i livelli già raggiunti possono ritenersi più che soddisfacenti.

MISCELA	LAVORABILITA'	BLEEDING	SEGREGAZIONE
Z1	Buona	Assente	Assente
ZC1	Buona	Assente	Assente
ZC10G	Buona	Assente	Assente

Tabella 7.59 – Miscele ottimizzate di prova: parametri osservati allo stato fresco

In tabella 7.60 sono riportati i valori di resistenza meccanica a compressione 2, 7, 28 giorni di stagionatura valutati su provini cubici di calcestruzzo SCC di lato 10cm delle miscele di prova ottimizzate.

MISCELA	Rc (2gg) - MPa	Rc (7gg) - MPa	Rc (28gg) - MPa
Z1	48,01	54,48	58,88
ZC1	49,00	54,63	58,07
ZC10G	40,02	44,06	47,68

Tabella 7.60 – Miscele ottimizzate di prova: resistenza a compressione media

In tutte le miscele di prova realizzate si è evidenziata una buona lavorabilità e una totale assenza dei fenomeni di bleeding e di segregazione. Per quanto riguarda l'aggiunta di additivo superfluidificante la percentuale di additivo non varia in modo sostanziale tra le miscele (intorno al 2,5% sul peso del cemento). Per quanto

riguarda le resistenze meccaniche è da evidenziare che i provini realizzati per le tre miscele presentano una elevata resistenza. La miscela confezionata con gomma PFU, se confrontata con le miscele di prima serie, presenta più alti valori di resistenza. Gli impasti definitivi sono stati realizzati tenendo presente i risultati ottenuti negli impasti di prova; le modifiche hanno riguardato soprattutto la percentuale di additivo superfluidificante. Come per le miscele di prima serie, sono state confezionate diverse miscele definitive ottimizzate e per ognuna di loro sono state eseguite prove per attestarne le proprietà reologiche allo stato fresco e meccaniche allo stato indurito. Nella tabella seguente (tabella 7.61) sono riportati i dosaggi delle miscele definitive realizzate.

Miscela	Z1	ZC1	ZC10G
Componente	Peso (Kg/mc)	Peso(Kg/mc)	Peso (Kg/mc)
Cem IIA 42,5 R	340,00	340,00	340,00
Acqua	170,00	170,00	170,00
Zeolite 5A secca	200,00	100,00	100,00
Filler Calcareo	-	100,00	100,00
Aria	-	-	-
Aggr. Totali	1658,02	1658,02	1658,02
Sabbia	829,01	829,01	746,11
Tratt 10	248,70	248,70	223,83
Tratt 7	248,70	248,70	223,83
Tratt 4	331,60	331,60	298,44
Gomma PFU	-	-	62,57
Additivo SuperFluidif.	12,24	8,84	8,84

Tabella 7.61 – Miscele definitive realizzate

Realizzate le miscele definitive, queste sono state caratterizzate allo stato fresco tramite le prove dello slump flow test, j-ring test e v-funnel test. Nelle tabelle 7.62–7.64 sono riportati i dati medi ottenuti dalle prove eseguite sulle miscele definitive ottimizzate allo stato fresco. Tutte le miscele sottoposte a prove hanno superato i limiti imposti dalla normativa vigente sui calcestruzzi autocompattanti per la caratterizzazione allo stato fresco delle stesse.

Miscela	Slump – Flow Test	
	Fluidità (mm)	Tempo di spand. (Sec) per raggiungere un diametro di 500mm
Z1	680,00	5,35
ZC1	735,00	2,69
ZC10G	680,00	6,29

Tabella 7.62 - Risultati delle prove di Slump Flow eseguite sulle miscele definitive ottimizzate

Miscela	J – Ring Test	
	Fluidità (mm)	Tempo di spandimento (Sec) per raggiungere un diametro di 500mm
Z1	690,00	4,35
ZC1	732,50	5,05
ZC10G	675,00	8,85

Tabella 7.63 - Risultati delle prove di J-Ring eseguite sulle miscele definitive ottimizzate

N° impasto	V - Funnel	
	Tempo di efflusso (Sec)	Tempo di efflusso dopo 5 minuti di riposo
Z1	11,80	13,50
ZC1	11,00	13,64
ZC10G	12,00	14,89

Tabella 7.64 – Risultati del V-Funnel ottenuti per le miscele definitive ottimizzate

Allo stato indurito i provini realizzati con le miscele definitive ottimizzate sono stati sottoposti a prove meccaniche al fine di valutare la resistenza a compressione. La stagionatura dei provini è avvenuta a 20°C e U.R.>95%, in accordo alla UNI EN 12390-3. In tabella 7.65 sono riportati i valori medi di peso e di resistenza a compressione valutati su provini cubici 100mmx100mmx100mm.

Resistenze meccaniche delle miscele					
Miscela	Peso medio (gr)	Res.Mecc.	Res.Mecc.	Res.Mecc.	Res.Mecc.
		2 giorni	7 giorni	28 giorni	90 giorni
Z1	2381	51,86	57,86	68,70	73,46
ZC1	2373	46,88	53,66	59,86	59,92
ZC10G	1980	41,67	43,82	47,49	47,51

Tab. 7.65 – Peso medio e resistenze a compressione a 2, 7, 28 e 90 giorni di stagionatura

Per quanto riguarda le resistenze meccaniche a compressione è da evidenziare che i provini realizzati per le tre miscele presentano un incremento di resistenza graduale nel tempo. I risultati raggiunti per le resistenze a compressione convalidano in parte quanto ottenuto dagli impasti di prova, ovvero, che la miscela realizzata con la sola Zeolite presenta le resistenze maggiori, a conferma che tale aggiunta dà alla miscela un alto grado di consistenza. In seguito alla realizzazione di diversi impasti ed all'esecuzione dei test di laboratorio nelle due differenti serie di miscele (miscele SCC di prima serie e ottimizzate) si è ritenuto opportuno effettuare dei confronti in base ai risultati ottenuti. Dal confronto tra le diverse miscele emerge quanto segue:

- le miscele confezionate con zeolite 5A non dimostrano sostanziali differenze di resistenza meccanica a compressione sia alle brevi che alle lunghe stagionature, anche se i valori relativi alle miscele ottimizzate sono sempre superiori alle altre miscele;
- pur avendo diminuito la quantità di cemento di 40Kg/m³, è stata mantenuta la stessa classe di resistenza dei calcestruzzi ottenendo addirittura dei miglioramenti in merito alle resistenze;
- tra le miscele confezionate con filler calcareo e zeolite 5A non si notano notevoli differenze di resistenze meccaniche né alle brevi né alle lunghe stagionature;
- nelle miscele confezionate con materiale PFU si evidenzia una notevole differenza in termini di resistenza meccanica sia alle brevi che alle lunghe stagionature, per cui utilizzando il mix-design ottimizzato è stato verificato che è possibile raggiungere classi di resistenza del calcestruzzo molto elevate anche nel caso di utilizzo di gomma PFU. Addirittura a 28 giorni di stagionatura è stata superata, per la miscela ZC10G, la resistenza di 45MPa. L'incremento di resistenza è dovuta probabilmente sia all'ottimizzazione della curva granulometrica degli aggregati e sia alla dimensione dei granuli di gomma utilizzati, che consentono di ottenere una struttura del conglomerato più compatta.

7.5 Calcestruzzi autocompattanti ottimizzati di terza serie: uso di gomma PFU trattata termicamente

Analogamente a quanto effettuato sulle malte cementizie, al fine di incrementare ulteriormente le proprietà meccaniche dei calcestruzzi realizzati con gomma PFU, si è provveduto a trattare termicamente il materiale polimerico prima di essere somministrato all'impasto. Il trattamento termico subito dalla gomma è stato

essenzialmente, un riscaldamento in stufa a 120°C per 12 ore al fine di provocare nello stesso un effetto di “ingottimento”. Con tale materiale PFU trattato è stato realizzato un impasto di calcestruzzo autocompattante ripetendo l’impasto ZC10G. Cioè è stata riconfezionata la miscela ZC10G con l’unica eccezione dovuta al fatto che all’impasto è stata somministrata gomma trattata termicamente, invece della gomma naturale. Verificate le proprietà della miscela allo stato fresco, al fine di poter caratterizzare l’impasto come un calcestruzzo autocompattante, si è proceduto successivamente con l’esecuzione di prove meccaniche di resistenza a compressione a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura sui provini cubici di lato 10cm confezionati con tale miscela. Nel confezionamento della miscela è stato necessario incrementare leggermente la percentuale di additivo superfluidificante. Non sono state registrate significative variazioni di peso medio dei manufatti in riferimento alle analoghe miscele precedentemente confezionate. Per quanto riguarda la resistenza meccanica a compressione per la miscela realizzata con gomma trattata termicamente a 2 giorni di stagionatura è stato registrato un incremento del 6,47%, a 7 giorni di stagionatura dell’8,05% e a 28 giorni di stagionatura del 9,56% rispetto alla analoga miscela ottimizzata di seconda serie realizzata con gomma naturale. Per cui, in base ai valori di resistenza a compressione registrati, è possibile affermare che il non oneroso trattamento termico effettuato sulla gomma PFU, consente di migliorare ulteriormente le resistenze valutate per la miscela confezionata con gomma non trattata. Tale incremento di resistenza è probabilmente causato dall’aumento della durezza del materiale PFU, che potrebbe comportare di conseguenza una migliore adesione con la matrice cementizia. Quindi, nella sperimentazione è stato dimostrato che è possibile realizzare calcestruzzi autocompattanti utilizzando gomma PFU dalle elevate prestazioni in termini di durabilità e resistenza meccanica. Ovviamente, è necessario prima di procedere con le miscelazioni dei componenti formulare un buon mix design ed effettuare degli impasti di prova da migliorare in base all’esperienza che si acquisisce con l’impasto precedente. L’uso di gomma PFU consente comunque l’ottenimento di calcestruzzi leggeri e strutturali da utilizzare in particolari ambienti aggressivi. Sperimentalmente è stato verificato, ad esempio, che il materiale polimerico gommoso potrebbe sostituire l’additivo aerante prescritto a livello normativo in ambienti soggetti a cicli di gelo/disgelo. Rispetto ai manufatti realizzati con questo additivo, l’uso di PFU ha permesso di ottenere alcuni miglioramenti di prestazioni: un esempio di ciò è stato evidenziato nelle prove di ritiro, in cui i manufatti realizzati con additivo aerante hanno manifestato valori di deformazione molto più elevati rispetto a quelli realizzati con la gomma PFU.

Conclusioni

Nel presente lavoro sperimentale è stato analizzato il comportamento del materiale polimerico derivante dalla triturazione di pneumatici fuori uso o a fine vita (PFU) all'interno di conglomerati cementizi di vario genere (malte, calcestruzzi ordinari, calcestruzzi autocompattanti) sia allo stato fresco che allo stato indurito. Dall'analisi della letteratura scientifica in materia si è potuto constatare che, pur avendo notevoli potenzialità di utilizzo, il materiale PFU, ancora oggi, incontra notevoli difficoltà di impiego nel campo dei manufatti cementizi dovute principalmente alla riduzione di resistenza causata dal basso valore di resistenza meccanica compressione, tipico del materiale, e dalla scadente adesione tra le particelle di gomma e la matrice cementizia. Per ridurre al minimo questo aspetto, tra i principali obiettivi del lavoro sperimentale condotto vi è stato proprio quello di sperimentare nuove miscele di conglomerato cementizio con un elevato dosaggio di gomma PFU, aventi buone prestazioni in termini di resistenza e durabilità. In particolare, previo confezionamento di un elevato numero di miscele di diversa composizione e tipologia, si è provveduto ad analizzare il comportamento degli impasti allo stato fluido, tramite prove ed osservazioni qualitative e quantitative, ed il comportamento dei provini sia subito dopo il loro confezionamento (a partire da qualche giorno dopo la loro formatura) che dopo qualche anno di stagionatura. Le prove eseguite sono state di tipo fisico, chimico e meccanico e tutte, per il loro svolgimento, hanno fatto riferimento alle normative attualmente vigenti in materia. Ogni tipologia di indagine è stata ripetuta su un elevato numero di campioni al fine di ottenere valori attendibili dal punto di vista statistico. I risultati ottenuti sono stati suddivisi per tipologia di conglomerato cementizio (malta o calcestruzzo) e riassunti sinteticamente per proprietà (lavorabilità, peso, resistenza meccanica, durabilità).

Malte

In questo lavoro sperimentale sono state confezionate numerose miscele di malta cementizia variando la tipologia di cemento, la tipologia, la granulometria ed il dosaggio di gomma PFU, la tipologia ed il dosaggio di aggiunta minerale (miscele di prima serie). Dopo di che, si è provveduto ad ottimizzare i dosaggi dei diversi componenti della miscela al fine di ottenere prestazioni più elevate (miscele di seconda serie). Quindi, si è pensato di affinare ulteriormente il mix design e di effettuare un trattamento termico sul materiale polimerico, ottenendo da ciò un considerevole miglioramento soprattutto a livello di prestazioni meccaniche.

- **Lavorabilità**

A livello qualitativo, in base alle numerose miscelazioni effettuate in laboratorio, si è avuto modo di osservare che l'utilizzo di materiale polimerico PFU all'interno delle miscele di malta provoca una perdita di lavorabilità degli impasti proporzionale al quantitativo di gomma utilizzata. Inoltre, tale perdita di lavorabilità è funzione anche della granulometria della frazione di gomma somministrata all'impasto: all'aumentare della dimensione dei grani si ha un decremento di lavorabilità. Le miscele confezionate con polverino di gomma sono quelle che perdono di meno sotto questo aspetto. Il trattamento termico effettuato sulla gomma PFU utilizzata per il confezionamento delle malte di terza serie non provoca significative variazioni di lavorabilità rispetto alle analoghe miscele realizzate con gomma PFU tradizionale. In tutti i casi esaminati, la perdita di

lavorabilità è stata, comunque, alquanto contenuta: solo per le miscele confezionate con un elevatissimo contenuto di gomma (50% in sostituzione in volume rispetto alla sabbia) si è verificato qualche difficoltà di messa in opera. L'aggiunta di zeolite e di silica fume non comporta significative variazioni di lavorabilità delle miscele.

- **Peso**

Sperimentalmente si è verificato che, ovviamente, all'aumentare della percentuale di gomma PFU somministrata all'impasto in sostituzione della sabbia, è corrisposta una perdita di peso dei manufatti, mentre all'aumentare della percentuale di aggiunta minerale (zeolite o silica fume) non si sono verificate significative variazioni. Aspetto fondamentale rilevato dall'analisi statistica dei diversi valori di peso dei provini è che esso dipende linearmente ed esclusivamente dalla percentuale di gomma PFU somministrata all'impasto: non influiscono significativamente sul peso dei provini né la tipologia di gomma (polverino, grana fine, grana mista), né la natura (naturale o pretrattata termicamente), né la tipologia (zeolite o silica fume), né la percentuale di aggiunta minerale (0, 5, 10 o 15% in aggiunta in peso sul dosaggio di cemento), né il tipo di cemento. L'uso di materiale polimerico PFU, anche in piccole percentuali, nelle miscele di malta consente di ottenere manufatti leggeri.

- **Resistenza meccanica**

E' stato confermato sperimentalmente sulle miscele di prima serie il dato negativo presente in letteratura scientifica, cioè che l'utilizzo di gomma PFU nelle miscele di malta provochi una perdita di resistenza a flessione ed a compressione. Tuttavia, tale perdita può essere ridotta somministrando agli impasti aggiunte minerali ad attività pozzolanica quali silica fume e zeolite. In entrambi i casi la percentuale ottimale di aggiunta in peso sul dosaggio di cemento è stata dell'ordine del 10%. La zeolite, rispetto alla silica fume, contribuisce allo sviluppo delle resistenze meccaniche soprattutto alle brevi stagionature, comportando variazioni in aumento anche dell'ordine del 30-40%. Alle medio - lunghe stagionature, ai fini meccanici, non c'è significativa variazione di resistenza tra le malte cementizie confezionate con zeolite e con silica fume. Un'ulteriore riduzione delle perdite di resistenza, si può avere distribuendo granulometricamente in maniera opportuna il materiale polimerico. Come verificato per le miscele di seconda serie, l'utilizzo di gomma, distribuita secondo la curva granulometrica della sabbia, comporta un recupero della resistenza persa anche dell'ordine del 10-20%. Il risultato più apprezzabile dal punto di vista scientifico in termini di resistenza meccanica si è registrato, però, nelle miscele di terza serie dove si provveduto ad utilizzare materiale PFU trattato termicamente. In queste serie, previa idonea progettazione delle miscele, si è riusciti ad azzerare la perdita di resistenza meccanica dovuta all'utilizzo di gomma PFU ed in alcuni casi si è riusciti addirittura ad ottenere, per i provini confezionati con gomma, valori di resistenza meccanica a compressione superiori rispetto ai provini confezionati senza gomma. Ad esempio, somministrando il 10% di zeolite ed il 15% di gomma PFU trattata termicamente distribuita secondo la curva granulometrica della sabbia è possibile raggiungere lo stesso livello di resistenza ottenuto nelle miscele di prima serie senza gomma. Per di più, usando il 15% di zeolite ed il 15% di gomma PFU trattata termicamente si riescono a superare nettamente le resistenze a compressione registrate con le miscele di malta di prima

serie confezionate senza materiale polimerico. Anche non utilizzando la zeolite è possibile avere, con le miscele confezionate con il 15% di gomma trattata, all'incirca la stessa resistenza valutata nelle miscele di prima e di seconda serie senza gomma. Tutto questo è, dunque, possibile effettuando un modesto trattamento termico sulla gomma PFU prima di somministrarlo all'impasto. Tale importantissimo risultato ha consentito il raggiungimento del principale obiettivo prefissato di questo lavoro sperimentale, cioè quello di realizzare manufatti cementizi con elevato dosaggio di materiale PFU in cui non vi siano particolari perdite di resistenza che ne limiterebbero l'utilizzo sul mercato.

- **Durabilità**

Sulle miscele di malta di terza serie sono state effettuate delle prove termiche al fine di verificarne la durabilità in termini di resistenza al degrado promosso da questa particolare condizione ambientale. Dall'analisi dei risultati ottenuti in termini di variazione di peso e di resistenza meccanica a flessione ed a compressione è emerso che le malte confezionate con PFU, dopo i trattamenti termici, perdono meno resistenza a flessione rispetto a quelle "Tal Quali", in particolare quelle con il 10% di gomma.

Calcestruzzi

Nella sperimentazione, in seguito ed in funzione dei risultati ottenuti sulla campagna di indagine effettuata sulle miscele di malta, si è provveduto alla progettazione, realizzazione e caratterizzazione di diverse tipologie di calcestruzzo al fine di ottenere dei manufatti dalle elevate prestazioni, non solo in termini di resistenza meccanica, ma anche di lavorabilità e di durabilità.

- **Lavorabilità**

Per i calcestruzzi ordinari (NC), a livello qualitativo, e per i calcestruzzi autocompattanti, a livello quantitativo, è stato verificato che l'utilizzo di gomma PFU e di zeolite non influiscono in maniera significativa sulla lavorabilità degli impasti.

- **Peso**

L'utilizzo di materiale polimerico consente l'ottenimento di calcestruzzi classificabili come calcestruzzi "leggeri", in quanto il loro peso per metro cubo di miscela è inferiore al valore di 2000kg/m^3 . La zeolite consente l'ottenimento di calcestruzzi tendenzialmente più pesanti perché riesce a conferire al manufatto un più elevato grado di compattezza

- **Resistenza meccanica**

Nella stragrande maggioranza di miscele realizzate, anche per quelle confezionate con un elevato dosaggio di gomma PFU, è stato possibile ottenere dei manufatti cementizi identificabili come "calcestruzzi strutturali", cioè utilizzabili addirittura per la realizzazione di elementi strutturali portanti. L'uso di gomma nelle miscele ha comportato una perdita di resistenza a compressione, ma tale decremento è stato limitato grazie all'uso di un materiale ad attività pozzolanica come la zeolite. L'effettuazione sull'aggregato gommoso di un trattamento termico di lieve entità ha consentito il raggiungimento di valori di resistenza meccanica più elevati rispetto a quelli realizzati con gomma PFU naturale o non trattata dell'ordine del 10%.

- **Durabilità**

I calcestruzzi realizzati sono stati caratterizzati anche dal punto di vista della resistenza al degrado. Infatti, sono state eseguite prove di resistenza ai cicli di gelo/disgelo, prove di ritiro, prove di valutazione del modulo elastico secante, prove non distruttive alle brevi ed alle lunghe stagionature, prove chimiche (attacchi chimici promossi dagli ioni cloruro e solfato) e prove termiche ad alta temperatura. Dall'analisi dei risultati ottenuti è possibile affermare che i calcestruzzi confezionati con gomma PFU hanno un'elevata durabilità al pari o, in alcuni casi, migliore rispetto ai calcestruzzi realizzati senza materiale polimerico.

In conclusione del presente lavoro sperimentale, testate le diverse tipologie di malte e di calcestruzzi prodotti e valutati i particolari requisiti prestazionali che le miscele sono riuscite a raggiungere, appare opportuno suggerire gli ambiti di utilizzo dove le stesse potrebbero trovare collocazione. Per le malte confezionate con gomma PFU, il mercato principale potrebbe essere soprattutto quello relativo al campo dei massetti leggeri, per le malte termo e fono isolanti. Per i calcestruzzi, invece, il campo di utilizzo principale potrebbe addirittura essere relativo ai manufatti posti in opera in ambienti soggetti a cicli di gelo e disgelo, dove l'aggregato polimerico potrebbe sostituire il tradizionale additivo aerante, il cui uso è prescritto a livello normativo in questa tipologia di ambiente. Inoltre, tali calcestruzzi ecocompatibili potrebbero essere impiegati nella realizzazione di calcestruzzi strutturali e leggeri. Tuttavia, al fine di promuovere maggiormente l'utilizzo di questi materiali ecocompatibili sarebbe opportuno l'emanazione di un disposto normativo che obblighi maggiormente ed incentivi lo smaltimento dei materiali PFU.

Bibliografia

Principali testi consultati:

- Barbarito B.:“Collaudo e Risanamento delle Strutture”, UTET Libreria, 1993;
- Bebi G.:“Calcestruzzo in Pratica”, ATE, 2007;
- Bertolini L.:“Materiali da costruzione”, Volume I, Città Studi Edizioni, 2006;
- Bertolini L.,“Materiali da costruzione”, Volume II, Città Studi Edizioni, 2006;
- Centro Studi e Ricerche Sposato P&P s.r.l., Atti del convegno: “Calcestruzzi autocompattanti ordinari: Progettazione, produzione e controlli sperimentali”, 2003;
- Centro Studi e Ricerche Sposato P&P s.r.l., Atti del convegno: “Progettazione, produzione e controllo di calcestruzzi durevoli ad alte prestazioni”, 2002;
- Collepari M., Coppola L.:“Durabilità e restauro delle opere in calcestruzzo”, Edizioni Enco, 1992;
- Collepari M.:“Il nuovo calcestruzzo”, terza edizione, Tintoretto, 2003;
- Collepari M.:“Materiali organici da costruzione”, Enciclopedia della chimica, Isedi, 1977;
- Coppola L.:“Concretum”, McGraw-Hill, 2007;
- Frigione G.: “Materiali per l’edilizia”, Hoepli, 2006;
- Koenig G.K., Furiozzi B., Brunetti F., Ceccarelli G.:“Tecnologia delle Costruzioni”. Edizioni Le Monnier, 2008;
- Macchia C., Ravetta F: “Intonaci, requisiti progettazione applicazione”, Maggioli Editore, 1997;
- Magliocco. “Il riciclo: La Gomma”. Appunti del corso di Ecodesign, 2005;
- Marotta R.: “Il Calcestruzzo, il controllo della qualità”, 1975;
- Micocci F., Pulcini G.: “Gli Intonaci, materiali, tipologie, tecniche di posatura e finitura, degrado e recupero”, NIS (La Nuova Italia Scientifica), 1991;
- Nilson L.O., Tang L.:“The modelling of microstructure and its potential for studying transport properties and durability”, Kluwer Ac. Pub., 1996;
- Pacanti V.: “Le malte”, A.I.T.E.C. (Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento), 1996;
- Pigni I.:“Vantaggi derivanti dall’impiego del calcestruzzo autocompattante confezionato con filler calcareo”, Comitato Tecnico ASSIAD, 2004;

Pucinotti R.: "Patologia e Diagnostica del cemento armato", Dario Flaccovio Editore, 2006;

Rossetti V.A.: "Il Calcestruzzo materiali e tecnologia", McGraw-Hill Libri Italia srl, 1995;

Smith W. F.: "Scienza e Tecnologia dei Materiali", McGraw-Hill Libri Italia srl, 1995;

Venturi V., Venturi M.: "Diagnosi delle strutture, Prove e laboratorio", 1998;

Principali articoli consultati:

Aïtcin P.C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. Cement and Concrete Composites, 2003;

Albiero E., SCC: calcestruzzo speciale per il basamento del mulino di Barletta, 2006;

Ali N. A., Amos A. D. and Roberts M., "Use of ground rubber tires in Portland cement concrete", Proc. Int. Conf. Concrete 2000, University of Dundee, UK 1993;

Bazant Z P. Fracture process zone in concrete tension specimen. Eng Frac Mech, 2002;

Bignozzi M.C., Sandrolini F., "Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, 2006;

Brameshuber W., Calcestruzzi ad alte prestazioni, Detail – Rivista di architettura, 2004;

Carpinteri A, Chiaia B, Ferro G. Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder. Mater Struct, 1995;

Carpinteri A. Mechanical damage and crack growth in concrete. Dordrecht-Boston: Martinus Nijhoff-Kluwer, 1986;

Chesner W.H.; Collins R.J.; MacKay M.H. Users guidelines for waste and by-product materials in pavement construction. Commack: Chesner Engineering, P.C. Report No. FHWA-RD, 1998;

Eldin N N, Senouci A B. Rubber-tire particles as concrete aggregate. J Mater Civ Eng, 1993;

Eldin N.; Senouci A. Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete. Cement Concrete Comp., 1994;

Ersoz. E., "Physical and Mechanical Properties of Rubberized Concrete (with coarse aggregate)", BS. Thesis, Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of CE, January. 1994;

Fattuhi N.; Clark L. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Constr. Build. Mater.*, 1996;

Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A.A., "Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete", *Construction and Building Materials*, 2009;

Girsen E., "Physical and Mechanical Properties of Rubberized Concrete (with fine aggregate)", BS. Thesis, Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of CE, January 1994;

Han-Seung Yang a, Dae-Jun Kim, Young-Kyu Lee, Hyun-Joong Kim, Jin-Yong Jeon, Chun-Won Kang, "Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials", *Bioresource Technology* , 2004;

Hadjab1 H S, Thimus1 J, Chabaat M. The use of acoustic emission to investigate fracture process zone in notched concrete beams. *Current Sci*, 2007;

Hernandez-Olivares F., Barluenga G., "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete", *Cement and Concrete Research*, 2004;

Huynh H.; Raghavan D.; Ferraris C. Rubber particles from recycled tires in cementitious composite materials. NISTIR 5850 R, 1996;

Huynh H., Raghavan D. "Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments", Elsevier Science, 1997;

Kaplan M F. Crack propagation and the fracture concrete. *ACI J*, 1961;

Khatib Z K, Bayomy F M. Rubberized Portland cement concrete. *Mater Civ Eng*, 1999;

Lee H S, Lee H, Moon J S, et al. Development of tire-added latex concrete. *ACI Mater*, 1998;

Li F, Li Z. Acoustic emission monitoring of fracture of fiber reinforced concrete in tension. *ACI Mater J*, 2000;

Li Z, Shah S P. Microcracking in concrete under uniaxial tension. *ACI Mater J*, 1994;

Maji A, Ouyang C, Shah S P. Fracture mechanisms of concrete based on acoustic emission. *J Mater Res*, 1990;

Ohtsu M, Okamoto T, Yuyama S. Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in concrete. *ACI Struct J*, 1998;

Oikonomou N., Mavridou S., "Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires", *Cement & Concrete Composites*, 2009;

Otsuka K, Date H. Fracture process zone in concrete tension specimen. *Eng Frac Mech*, 2000;

Raghavan D., Huynh H., Ferraris C.F., “Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite, *Journal of Materials Science*, 1998;

Reda Taha M M, El-Dieb A S, Abd El-Wahab M A, et al. Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete. *J Mater Civ Eng*, 2008;

Rostami H.; Lepore J.; Silverstraim T.; Zandi I. Use of recycled rubber tires in concrete. *Proceedings of the international conference on concrete 2000*. UK: University of Dundee, 1993;

Scofield L.A. The history, development, and performance of asphalt rubber at Adot. Adot, Report No. AZ-SP-8902, 1989;

Segre N., Joekes L., “Use of tire rubber particles as addition to cement paste”, *Cement and Concrete Research*, 2000;

Sukontasukkul P.; Chaikaew C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 2006;

Sukontasukkul P., “Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel”, *Construction and Building Materials*, 2009;

Tavano S., Albiero E.:“Parametri utili alla valutazione delle proprietà reologiche del calcestruzzo SCC”, *Congresso CTE*, 2000;

Topcu I. The properties of rubberized concrete. *Cement Concrete Res.*, 1995;

Topcu I. B., Avcular N., “Analysis of rubberized concrete as a composite material”, *Cement and Concrete Composites*, 1997;

Topcu I. B., “Assessment of the brittleness index of rubberized concretes”, *Cement and Concrete Composites*, 1997;

Topcu I. B., Avcular N., “Collision behaviours of rubberized concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 1997;

Topcu. I. B., Ozcelikors. Y., "Rubberized Concrete", *Akdeniz University, Isparta Engineering Faculty*, 7. Engineering Week, 1991;

Topcu I. B., *Concrete Barriers Using Rubbers as Aggregate* , *Antalya Bulletin*, Union of Turkish Engineers and Architects, Chamber of Cir. Eng., Branch of Antalya, 1993;

Toutanji H.A., “The Use of Rubber Tire Particles in concrete to Replace Mineral aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, 1996;

Zhang YaMei, Wang Chao, Lu Yi, Ma AiBin, “Comparison of the fracture process of the rubberized concrete and plain concrete under bending load”, *Science China Technological Sciences*, 2010;

Principali norme UNI consultate:

UNI-EN 196, Metodi di prova dei cementi;

UNI-EN 197, Cemento. Composizione, specificazioni e criteri di conformità.
Cementi comuni;

UNI EN 206, Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità;

UNI EN 480, Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione – Metodi di prova;

UNI EN 771, Specifica per elementi di muratura;

UNI EN 932, Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati;

UNI EN 933, Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati;

UNI EN 934, Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione;

UNI EN 998, Specifiche per malte per opere murarie;

UNI EN 1008, Acqua d'impasto per calcestruzzo;

UNI EN 1015, Metodi di prova per malte per opere murarie;

UNI EN 1097, Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati;

UNI EN 1367, Prove per determinare le proprietà termiche e la degradabilità degli aggregati;

UNI EN 1744, Prove per determinare le proprietà chimiche degli aggregati;

UNI 6131, Prelevamento campioni di calcestruzzo indurito;

UNI 6132, Prove distruttive sui calcestruzzi. Prova di compressione;

UNI 6393, Controllo della composizione del calcestruzzo fresco;

UNI 7044, Determinazione della consistenza delle malte cementizie mediante l'impiego di tavola a scosse;

UNI 7087, Calcestruzzo. Determinazione della resistenza alla degradazione per cicli di gelo e disgelo;

UNI 7929, Calcestruzzo. Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro;

UNI 8019, Calcestruzzo. Determinazione della penetrabilità dello ione solfato;

UNI 8520, Aggregati per confezione di calcestruzzi;

UNI 8981, Durabilità delle opere e manufatti in calcestruzzo;

UNI 9156, Cementi resistenti ai solfati. Classificazioni e composizione;

UNI 9189, Calcestruzzo indurito, Determinazione dell'indice sclerometrico;

UNI 9418, Calcestruzzo fresco – Determinazione della consistenza – Prova di abbassamento al cono;

UNI 9524, Calcestruzzo indurito – Rilievi microsismici mediante impulsi d'onde vibrazionali di alta frequenza, in campo o strutture di calcestruzzo, semplici, armate o precomprese;

UNI 9536, Calcestruzzo indurito. Determinazione della forza di estrazione con inserti preinglobati nel getto;

UNI 9944, Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo;

UNI 10924, Beni culturali - Malte per elementi costruttivi e decorativi;

UNI 11013, Aggregati leggeri - Argilla e scisto espanso - Valutazione delle proprietà mediante prove su calcestruzzo convenzionale;

UNI EN 11040, Calcestruzzo Autocompattante. Specifiche, caratteristiche e controlli;

UNI EN 11041, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco. Determinazione dello spandimento e del tempo di spandimento;

UNI EN 11042, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco; Determinazione del tempo di efflusso dall'imbutto;

UNI EN 11043, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco. Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola ad L;

UNI EN 11044, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco. Determinazione dello scorrimento confinato mediante anello a J;

UNI EN 11045, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco. Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola ad L;

UNI 11104, Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1;

UNI 11156, Valutazione della durabilità dei componenti edilizi;

UNI 12350, Prove sul calcestruzzo fresco;

UNI 12390, Prove sul calcestruzzo indurito;

UNI 12504, Prove sul calcestruzzo nelle strutture;

UNI EN 12620, Aggregati per calcestruzzo;

UNI EN 13055, Aggregati leggeri;

UNI EN 13139, Aggregati per malta;

Principali leggi consultate:

D. Lgs. n. 22 del 5 febbraio 1997;

Dir. Europea CE n°31 del 26 aprile del 1999;

D.lgs. n°36 del 13 gennaio 2003.

D.M. del 14 gennaio 2008.

Principali siti internet consultati:

www.argo.it

www.arpa.it

www.alterecosrl.it

www.AmbienteDiritto.it

www.argo.it

www.arpa.it

www.ateservizi.it

www.ATECAP.it

www.aziendedibologna.it

www.BuildUp.it

www.coralaquarium

www.corigo.it

www.decorare.info

www.enderle.it

www.iza-online.org

www.loscalino.com

www.Mapei.com

www.matrec.it

www.picenamacchine.com

www.prismi.it

www.rapidmix.it

www.rifiuti.it

www.rpntyres.it

www.Ruredil.it

www.salvadori.it

www.shredders.finlane.com

www.wikipedia.org

Articoli pubblicati:

Iacobini I. , Crea F. , Frontera P., Calcestruzzi Autocompattanti realizzati con zeolite 5A, calcare e polverino PFU: caratterizzazione allo stato fresco ed indurito, 10° Convegno Nazionale AIMAT Associazione Italiana d'Ingegneria dei Materiali, 978-88-7458-114-6;

Iacobini I. , Frontera P. , Crea F., Self-Compacting Concrete with tire rubber waste and zeolite 1° Workshop su "Le Nuove frontiere del calcestruzzo strutturale", 978-88-95028-55-2;

Iacobini I. , Frontera P. , Crea F. , Porco G., Prove di ritiro su paste malte e calcestruzzi autocompattanti realizzati con fini non convenzionali, Convegno Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica – 13° Congresso AIPnD, 978-88-89758-04-5;

Iacobini I. , Frontera P. , Crea F. , Porco G., Materiali cementizi innovativi confezionati con materiale PFU e zeolite 5A: prove meccaniche a compressione e resistenza ai cicli di gelo/disgelo, Convegno Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica – 13° Congresso AIPnD, 978-88-89758-04-5;

Frontera P., Iacobini I., Scarpino L.A., Crea F., Optimization of the zeolite 3A production by direct synthesis in seeded systems, IX National Conference on Science and Technology of Zeolites (AIZ 2009) and 3th Czech-Italian-Spanish Trilateral Meeting on Catalysis and Micro/Meso-Porous Materials, 21-25 giugno 2009, Acireale. 978-88-89758-04-5;

I. Iacobini, F.Crea, P.Frontera, S. Marchese, Caratterizzazione Meccanica di Malte Cementizie Confezionate con Materiali Derivanti dai Pneumatici a Fine Vita e Zeolite Sintetica, 9° Convegno Nazionale AIMAT Associazione Italiana, ISBN 978 – 88 – 900948 – 6 – 6;

I.Iacobini, P.Frontera, F.Crea, G.Porco, Prove non distruttive su calcestruzzi autocompattanti ad alte prestazioni (HPSCC) realizzati con fini non convenzionali, Conferenza Nazionale sulle Prove non distruttive Monitoraggio e Diagnostica, ISBN 978 – 88 – 89758 – 03 – 8

Tesi di laurea in materia di PFU:

"Conglomerati cementizi realizzati con materiali derivanti dal riutilizzo di pneumatici", Candidato G. Ciano, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini,

A.A. 2006-07.

“Malte realizzate con CEM II/A-S 42.5 R, materiale microporoso e gomma di pneumatici fuori uso (P.F.U.)”, Candidato R. Acri, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2007-08.

“Malte realizzate con CEM III/A 32.5 N, zeolite e gomma di pneumatici a fine vita (ELT)”, Candidata M. Bartalotta, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2007-08.

“Calcestruzzo: quadro normativo di riferimento”, Candidato M. Laurito, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2007-08.

“Calcestruzzi confezionati con materiale polimerico PFU e zeolite 5A: resistenze meccaniche alle medie e lunghe stagionature, resistenza ai cicli di gelo e disgelo”, Candidato A. Lo Giudice, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2007-08.

“Riuso di materiale proveniente da pneumatici a fine vita o fuori uso (PFU): manufatti realizzabili”, Candidato B. Vito, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2007-08.

“Influenza dei fini non convenzionali e della gomma PFU sulla resistenza meccanica a compressione e sul modulo elastico secante dei calcestruzzi”, Candidato G. Piro, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2007-2008.

“Influenza del fumo di silice e della gomma PFU sulle proprietà meccaniche di malte cementizie”, A. Commisso, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2008-2009.

“Produzione di Calcestruzzi autocompattanti (SCC) con l’impiego di materiali fini non convenzionali”, S. Lopetrone, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2008-2009.

“Valutazione del ritiro di calcestruzzi realizzati con materiale P.F.U e fini”, E. Zaccone, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2008-2009.

“Malte cementizie confezionate con materiali polimerici P.F.U. e fumo di silice”, I. Sciammarella, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2008-2009.

“Ottimizzazione di miscele di calcestruzzo autocompattante realizzate con aggiunte non convenzionali: importanza della curva granulometrica”, L. Scanga, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2008-2009.

“Realizzazione e caratterizzazione meccanica con prove non distruttive di calcestruzzi auto compattanti SCC a basso impatto ambientale”, F. Coscarelli, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2009-2010.

“Incremento delle proprietà meccaniche di malte realizzate con materiale PFU trattato termicamente e fini non convenzionali”, Patania N., Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2008-2009.

“Caratteristiche meccaniche di malte confezionate con pneumatici a fine vita (PFU) e zeolite”, G. Imbrogno, Relatori Prof. Ing. F. Crea, Ing. I. Iacobini, A.A.

2009-2010.

“Malte realizzate con CEM III/A 32.5N e gomma di pneumatici a fine utilizzo (PFU)”, M.Chiera, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2009-2010.

“Caratterizzazione ai cicli di gelo e disgelo di calcestruzzi SCC realizzati con microgranuli di PFU”, A.Belcastro, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2009-2010.

“Caratterizzazione meccanica con prove non distruttive di malte trattate termicamente realizzate con cementi con classe di resistenza 42.5R e 32.5N e gomma PFU”, R.Filice, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2009-2010.

“Trattamento termico sul materiale PFU per l’ottimizzazione delle proprietà meccaniche di malte cementizie”, A.Larosa, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2009-2010.

“Calcestruzzi autocompattanti realizzati con polverino PFU e Zeolite: resistenza agli attacchi da cloruri e da solfati”, F.Gualtieri, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2009-2010.

“Proprietà meccaniche di malte realizzate con PFU, fumo di silice e CEM II A-S 42.5R”, A.Boschelli, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I. Iacobini, A.A. 2009-2010.

“Progettazione e caratterizzazione di malte realizzate con PFU e fumo di silice”, A. Demasi, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I.Iacobini, A.A. 2009-10.

“Valutazione delle caratteristiche meccaniche e del ritiro di calcestruzzo autocompattante (SCC) realizzati con l’impiego di materiale PFU, F.Borrelli, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I.Iacobini, A.A. 2009-10.

“Malte cementizie innovative a basso impatto ambientale: prove meccaniche, prove ultrasoniche e correlazioni tra le grandezze fisico-meccaniche rilevate”, U.Gagliardi, Relatori Prof. Ing. F.Crea, Ing. I.Iacobini, A.A. 2009-10.