

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Pianificazione Territoriale

*Dottorato di Ricerca in Tecnologie e Pianificazione
Ambientale*

- CICLO XXII -

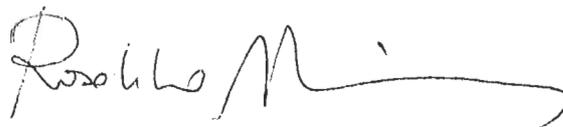
***Mix-design di conglomerati bituminosi con metodologie e
tecniche innovative per il risparmio energetico e la tutela
ambientale***

Settore disciplinare: ICAR/04 Strade, Ferrovie ed Aeroporti

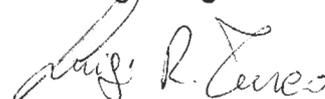
x

Coordinatore: Ch.mo Prof. **Sergio d'Elia** 

Tutor: Dott. Ing. **Rosolino Vaiana**



Dottorando: Ing. **Luigi R. Turco**



Indice

1. La sostenibilità ambientale dei processi produttivi dei conglomerati bituminosi nelle pavimentazioni stradali	
1.1 Introduzione.....	1
1.2 La Direttiva 2003/87/CE: alcune considerazioni.....	4
1.3 Life Cycle Assessment (LCA).....	5
1.3.1 La produzione di CO ₂ nel processo produttivo del conglomerato bituminoso.....	7
1.4 I conglomerati bituminosi e la salute dei lavoratori.....	12
1.5 Conglomerati bituminosi: considerazioni ed introduzione alle tecniche di risparmio energetico e tutela ambientale.....	13
1.6 <i>Bibliografia specifica cap.1</i>	17
2. I Conglomerati bituminosi	
2.1 Gli aggregati lapidei.....	19
2.2 I leganti bituminosi per uso stradale	23
2.2.1 Bitumi tradizionali.....	24
2.2.2 Bitumi modificati.....	27
2.2.3 Bitumi schiumati.....	30
2.2.4 Le emulsioni bituminose.....	33
2.3 La caratterizzazione dei leganti bituminosi.....	36
2.3.1 Introduzione.....	36
2.3.2 Il modello VLE.....	37
2.3.3 La rigidezza di creep – Test BBR.....	41
2.3.4 Lo studio dinamico della viscosità del legante bituminoso.....	44
2.3.5 Conversione dei risultati delle Funzioni Visco-elastiche.....	50
2.3.6 Il comportamento all'invecchiamento dei leganti bituminosi.....	53

2.3.7	La modellazione del comportamento reologico dei bitumi modificati e no.....	55
2.4	<i>Bibliografia specifica cap. 2</i>	58
3.	La valutazione della compattabilità (lavorabilità) dei conglomerati bituminosi	
3.1	Principali parametri di governo del grado di addensamento delle miscele di conglomerato bituminoso.....	60
3.2	Principali indicatori di lavorabilità di un conglomerato bituminoso.....	64
3.3	Norma UNI EN 12967-10: misura della compattabilità di un conglomerato bituminoso.....	67
3.3.1	Principio e scopo della prova.....	67
3.3.2	Calcolo ed espressione dei risultati per compattazione ad impatto.....	68
3.4	<i>Bibliografia specifica cap.3</i>	71
4.	Tecniche e metodologie innovative per la produzione di conglomerati bituminosi a bassa energia: stato dell'arte Warm Mix Asphalt	
4.1.	Introduzione.....	72
4.2.	Le tecniche di produzione WMA.....	76
4.2.1.	Tecniche basate sull'uso di fluidificanti del bitume.....	77
4.2.1.1.	Cere paraffiniche: Sasobit®.....	77
4.2.1.2.	Asphaltan-B®.....	88
4.2.2.	Tecniche basate sulla formazione di schiuma di bitume.....	90
4.2.2.1.	WAM-Foam®.....	90
4.2.2.2.	LT- Asphalt® (Low Temperature Asphalt®).....	93
4.2.2.3.	Additivazione con zeoliti sintetiche: Aspha-min zeolite®.....	97
4.2.2.4.	Evotherm®.....	104
4.2.2.5.	Low Energy Asphalt® (EBE).....	110
4.3.	I principali benefici delle miscele Warm Mix Asphalt.....	115
4.4.	<i>Bibliografia specifica cap.4</i>	119

5. Obiettivi e progetto della sperimentazione WMA con additivazione di zeolite sintetica.....	125
6. La sperimentazione su WMA con additivazione di zeolite sintetica: risultati ottenuti e considerazioni conclusive	
6.1. La miscela studiata e le sue componenti.....	130
6.1.1. Gli inerti.....	130
6.1.1.1. La prova di frantumazione degli inerti.....	132
6.1.1.2. Indice di forma degli inerti.....	133
6.1.2. Il bitume.....	133
6.1.3. Aspha-min® zeolite.....	135
6.2. Fase I: individuazione della quantità ottimale di zeolite sintetica.....	139
6.2.1. Generalità.....	139
6.2.2. Proprietà volumetriche.....	140
6.2.3. Risultati ottenuti in termini volumetrici.....	142
6.2.4. Analisi dei risultati.....	143
6.2.5. Caratterizzazione meccanica: prova Marshall e Trazione Indiretta.....	144
6.2.5.1. Risultati prova Marshall e considerazioni.....	144
6.2.5.2. Risultati Trazione Indiretta e considerazioni.....	145
6.3. Fase II: individuazione di un "potenziale" tempo di maturazione della miscela additivata con zeolite sintetica.....	148
6.3.1. Proprietà volumetriche.....	159
6.3.1.1. Risultati ottenuti in termini volumetrici.....	150
6.3.1.2. Analisi dei risultati ottenuti in termini volumetrici.....	150
6.3.2. Resistenza meccanica: prova Marshall e Trazione Indiretta.....	154
6.3.2.1. Risultati ottenuti in termini meccanici.....	154
6.3.2.2. Analisi dei risultati ottenuti in termini meccanici.....	155
6.3.3. Considerazioni conclusive Fase II.....	157
6.4. Fase III: le curve di addensamento UNI EN 12697-10.....	159
6.4.1. Proprietà volumetriche.....	161

6.4.1.1.	Risultati ottenuti in termini volumetrici.....	161
6.4.1.2.	Analisi dei risultati volumetrici.....	163
6.4.2.	Resistenza meccanica: prova di Trazione indiretta.....	164
6.4.2.1.	Risultati ottenuti in termini meccanici.....	164
6.4.2.2.	Analisi dei risultati meccanici.....	165
6.4.3.	Considerazioni conclusive Fase III.....	166
6.5.	Fase IV: variazione della tipologia di bitume adoperato. Il confronto tra bitume ordinario 50/70 e bitume modificato HD.....	167
6.5.1.	Proprietà volumetriche.....	169
6.5.1.1.	Risultati ottenuti in termini volumetrici.....	170
6.5.1.2.	Analisi dei risultati volumetrici.....	172
6.5.2.	Resistenza meccanica: prova di Trazione indiretta.....	173
6.5.2.1.	Risultati ottenuti in termini meccanici.....	173
6.5.2.2.	Analisi dei risultati meccanici.....	173
6.5.3.	Considerazioni conclusive Fase IV.....	176
6.6.	Verifiche a consuntivo.....	178
	Appendice: risultati sperimentali.....	181
	Appendice A: risultati Fase I.....	182
	Appendice B: risultati Fase II.....	187
	Appendice C: risultati Fase III.....	197
	Appendice D: risultati Fase IV.....	208

Capitolo 1

La sostenibilità ambientale dei processi produttivi dei conglomerati bituminosi nelle pavimentazioni stradali

1.1 Introduzione

Oggi è forte la consapevolezza che i cambiamenti climatici dell'ultimo ventennio siano, in larga parte, dovuti al surriscaldamento del pianeta per effetto dell'aumento dei gas serra (CO_2 , CO etc.). Il primo passo verso la cognizione di tale problema, in termini planetari, si è avuta nel 1992 a Rio de Janeiro, alla Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente e sullo sviluppo sostenibile. È però nel 1997 che i principali paesi industrializzati, riuniti per un incontro internazionale a Kyoto, siglarono il Protocollo omonimo che si poneva l'obiettivo di ridurre, entro il 2012, le emissioni inquinanti. L'accordo firmato dai membri delle Nazioni Unite rappresenta un impegno primario non solo per i paesi firmatari, che peraltro affrontarono il tema con un rigore estremamente “variabile”, ma per tutta la comunità internazionale.

Col protocollo di Kyoto furono messi in evidenza i gravi effetti sul clima dovuti al surriscaldamento del pianeta a causa dell'aumento dei *gas serra* e in particolare dell'*anidride carbonica* (CO_2) che nasce dalla combustione di carbone, petrolio e gas. Dal 1800 al 1990 la concentrazione di CO_2 nell'aria è passata da 280 a 380 ppm, fino a 500-600 ppm alla fine del secolo.

Le conseguenze dovute a tali alterazioni potrebbero essere disastrose: aumento delle temperature medie, scioglimento dei ghiacci delle calotte polari con probabile innalzamento dell'altezza dei mari, ondate di gelo alternate a ondate di caldo afoso che provocherebbero l'aumento delle precipitazioni in alcune regioni e desertificazioni in altre; nonché l'aumento degli eventi catastrofici quali terremoti, alluvioni, uragani.

I gas serra presi in considerazione e per i quali il protocollo di Kyoto diede precisi indirizzi furono:

- L'anidride carbonica (CO_2);
- Il metano (CH_4);
- Il protossido di azoto (N_2O);
- Gli idrocarburi fluorati (HFC);
- Gli idrocarburi perfluorati (PFC);
- L'esfluoruro di zolfo ($[\text{SF}]_{4,6}$)

E' opportuno precisare che, risultano particolarmente critici anche l'anidride solforosa (SO₂) e gli ossidi di azoto ([NO]_{1,x}), anche se non indicati dal protocollo.

Il trattato prevedeva l'obbligo per i paesi industrializzati di operare una riduzione delle emissioni degli elementi inquinanti in una misura non inferiore al 5,2% rispetto alle emissioni registrate nel 1990 — considerato come anno base — nel periodo 2008-2012. Affinché il trattato potesse entrare in vigore, si richiedeva che fosse ratificato da non meno di 55 nazioni firmatarie e che le nazioni che lo avessero ratificato producessero almeno il 55% delle emissioni inquinanti; quest'ultima condizione è stata raggiunta solo nel novembre del 2004, quando anche la Russia ha perfezionato la sua adesione.

Premesso che l'atmosfera terrestre contiene 3 milioni di megatonnellate (Mt) di CO₂, il Protocollo prevedeva che i paesi industrializzati riducessero del 5% le proprie emissioni di questo gas. Il mondo immette 6.000 Mt di CO₂, di cui 3.000 dai paesi industrializzati e 3.000 da quelli in via di sviluppo; per cui, con il protocollo di Kyōto, se ne dovrebbero immettere 5.850 anziché 6.000, su un totale di 3 milioni. Ad oggi, 174 Paesi e un'organizzazione di integrazione economica regionale (EEC) hanno ratificato il Protocollo o hanno avviato le procedure per la ratifica. Questi paesi contribuiscono per il 61,6% alle emissioni globali di gas serra.

Il protocollo di Kyōto prevedeva inoltre, per i Paesi aderenti, la possibilità di servirsi di un sistema di meccanismi flessibili per l'acquisizione di crediti di emissioni, così di seguito descritti:

- Clean Development Mechanism (CDM): 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 (CER) per i Paesi che promuovono gli interventi.
- Joint Implementation (JI): 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, congiuntamente con il paese ospite.
- Emissions Trading (ET): consente lo scambio di crediti di emissione tra paesi industrializzati e ad economia in transizione; un paese che abbia conseguito una diminuzione delle proprie emissioni di gas serra superiore al proprio obiettivo può così cedere (ricorrendo all'ET) tali "crediti" a un paese che, al contrario, non sia stato in grado di rispettare i propri impegni di riduzione delle emissioni di gas-serra.

Alcune nazioni in fase di sviluppo (India) e altre in condizioni speciali (Cina) hanno ottenuto l'esonero dal Protocollo perché esse non sono state tra le principali responsabili delle emissioni di gas serra durante il periodo di industrializzazione che si crede stia provocando oggi il cambiamento climatico. I paesi non aderenti sono responsabili del 40% dell'emissione mondiale

di gas serra. Al contrario nazioni come la Germania si imposero, all'indomani della ratifica, valori più stringenti da rispettare. Gli Stati Uniti d'America, che attualmente sono i più grandi consumatori di energia, e quindi produttori di emissioni di CO₂ e CO, non hanno ancora ratificato il Protocollo, rendendo di fatto inefficace il provvedimento su scala mondiale.

In questa direzione, anche l'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) aveva fissato per il primo decennio del XXI secolo due possibili azioni:

- La limitazione dell'impatto dell'industria sui cambiamenti climatici;
- L'ottimizzazione della gestione delle risorse naturali.

Questi motivi hanno spinto anche gli attori del processo costruttivo e manutentorio stradale (enti proprietari/concessionari ed imprese) verso l'individuazione ed applicazione di *pratiche sostenibili* dal punto di vista ambientale.

E' noto infatti che per produrre conglomerati bituminosi di qualità, accanto all'utilizzo di componenti costitutivi di qualità (legante bituminoso ed aggregati lapidei) commisurati alle condizioni di esercizio (traffico, condizioni ambientali etc.) è condizione necessaria adottare un corretto protocollo di confezionamento degli stessi, nonché di posa in opera.

Allora, sia la temperatura di miscelazione delle componenti costitutive, che la conseguente temperatura di stesa, rappresenta il parametro più sensibile per il governo della qualità finale del conglomerato bituminoso.

In particolare la temperatura necessaria alla miscelazione degli inerti con il legante bituminoso, materiale viscoso, si rende necessaria per abbattere la viscosità del legante e consentirne la lavorabilità.

Tale energia termica produce altresì l'evaporazione di alcune componenti volatili del bitume, producendo quindi emissioni gassose nocive per l'ambiente e per la salute degli operatori. Inoltre i costi di produzione dei conglomerati bituminosi sono strettamente legati al consumo di carburante necessario al riscaldamento degli inerti e del legante bituminoso [3]. Quindi un abbassamento delle temperature di lavorazione, mantenendo invariate le caratteristiche meccaniche della miscela di conglomerato bituminoso, consentirebbe di ridurre i costi di produzione, ma soprattutto di ridurre le emissioni dei fumi nocivi all'ambiente e alla salute.

E' in questa direzione che la comunità scientifica ed industria del comparto, in ambito internazionale, si sono mosse. Ed è in questo quadro che il presente lavoro è inserito.

Per completezza di informazione si riportano a seguito i “numeri” del comparto produttivo collegato alla produzione di conglomerati bituminosi in Italia:

- 40.000.000 di tonnellate di conglomerato bituminoso prodotte ogni anno per il rifacimento dei manti stradali;
- 650 impianti sparsi sul territorio;

- 11 raffinerie per la produzione di bitume;
- 480.000 km di rete stradale da monitorare e mantenere in perfetta efficienza;
- 42.000.000 di veicoli circolanti;
- 4.000 imprese stradali che concorrono ai lavori pubblici;
- 500.000 gli addetti che sono occupati nel settore.

1.2 La Direttiva 2003/87/CE: alcune considerazioni

Nel 2003, l'Unione Europea, ha emanato una propria Direttiva per dar corso al protocollo di Kyoto con l'obiettivo di stabilizzare le concentrazioni di gas serra in atmosfera a livelli tali da prevenire qualsiasi pericolosa interferenza sul clima, la cosiddetta Direttiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo.

Tale Direttiva, nota col nome di “Emission Trading”, obbligatoria per tutti gli Stati membri, formava un complesso dispositivo per il monitoraggio delle emissioni dei soggetti interessati e per lo scambio di quote, analizzandone i progressi periodicamente. Successivamente, nel luglio del 2007, furono istituite linee guida per il monitoraggio e la comunicazioni delle emissioni, tramite una nuova Decisione della Commissione Europea.

Sono soggetti a Emission Trading quegli impianti a combustione che hanno una potenza calorifera superiore a 20 MW.

In Italia, i settori rientranti nella Direttiva sono quelli indicati nella tab. 1.1 :

Termoelettrico	149,0
Cemento	27,9
Raffinazione	25,3
Acciaio	13,7
Carta	5,0
Vetro	2,9
Calce	2,7
Ceramica	0,6
TOTALE	227,1

Tab.1.1 – Settori industriali soggetti a “Emission Trading” e quantitativo di CO₂ in mil. di t

La produzione di conglomerato bituminoso non è soggetta a Emission Trading perché, salvo rarissime eccezioni, non si utilizzano impianti della necessaria potenzialità di combustione, infatti gli impianti di produzione del conglomerato bituminoso sono realizzate con bruciatori da 12/13 MW.

1.3 Life Cycle Assessment (LCA)

L'obiettivo di individuare e applicare pratiche sostenibili dal punto di vista ambientale è raggiungibile attraverso l'uso di uno strumento nato per l'analisi dei sistemi industriali ed in forte espansione a livello internazionale: il *Life Cycle Assessment (LCA)* o *Valutazione del Ciclo della Vita*.

L'LCA può essere definito come lo strumento di ottimizzazione dell'impatto ambientale di un sistema attraverso lo studio del risparmio dell'energia e delle risorse non rinnovabili.

Il Life Cycle Assessment rappresenta il principale strumento operativo del “Life Cycle Thinking” definito come “il processo oggettivo di valutazione dei carichi ambientali connessi con un prodotto/processo/attività attraverso l'identificazione e la quantificazione dell'energia e dei materiali utilizzati, dei rifiuti lasciati nell'ambiente, al fine di quantificare l'impatto, valutare e realizzare le opportunità di miglioramento ambientale” (Congresso Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1993).

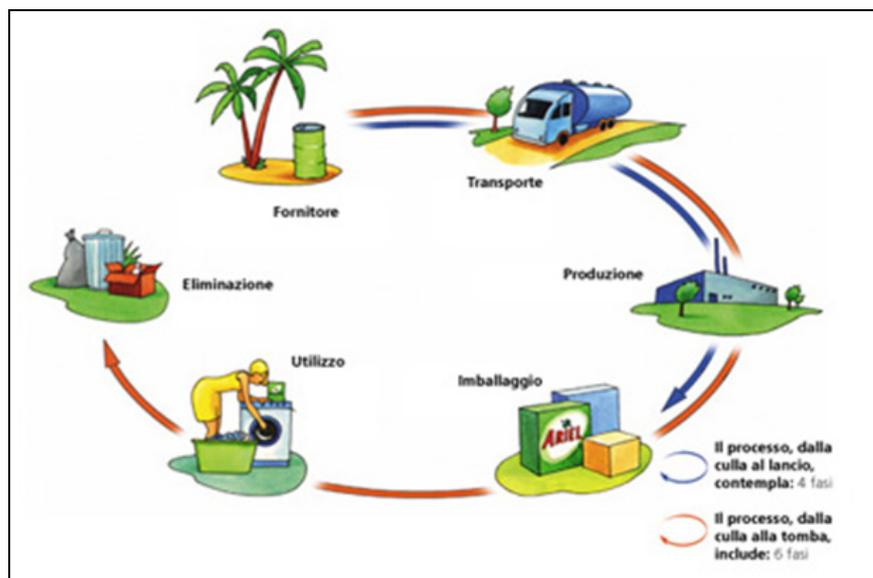


Fig. 1.1 - Schema sinottico dell'LCA.

L'analisi comprende il ciclo completo di un prodotto, processo o attività e cioè:

- Produzione di materie prime;
- Lavorazione;
- Trasporto e distribuzione;

- Uso e riutilizzo;
- Manutenzione;
- Riciclaggio, eliminazione finale o distruzione.

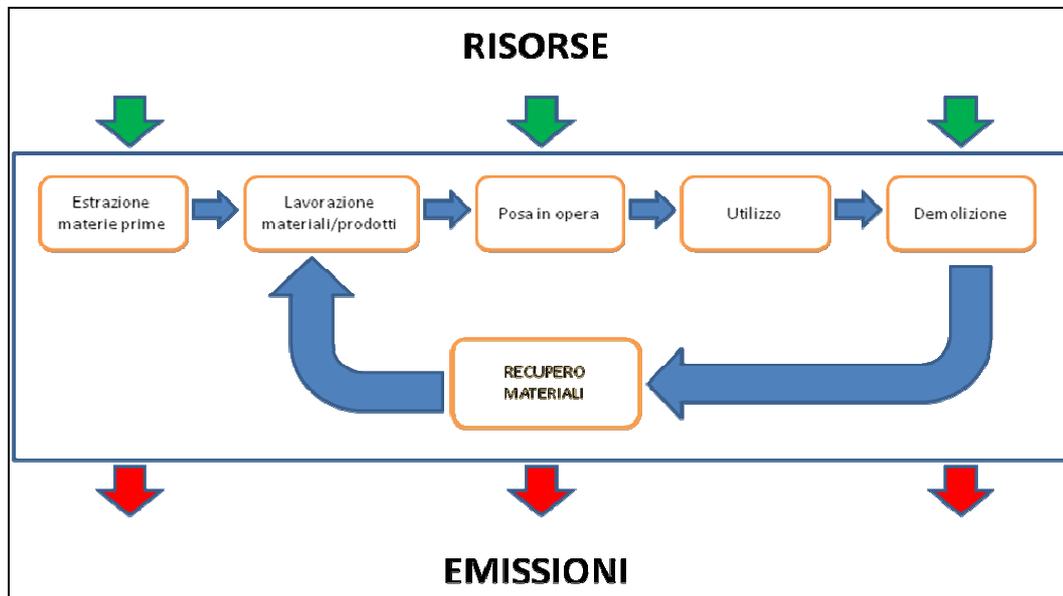


Fig. 1.2 – Schema di LCA di un conglomerato bituminoso.

La metodologia LCA è regolata dalle Norme ISO della serie 14040, recepite in ambito europeo e nazionale con la serie UNI EN; in base a tali norme, lo studio di valutazione del ciclo della vita prevede:

- La definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi (UNI EN ISO 14041);
- La compilazione di un inventario degli input e degli output di un inventario sistema (UNI EN ISO 14041);
- La valutazione del potenziale impatto ambientale correlato a tali input ed output (UNI EN ISO 14042);
- L'interpretazione dei risultati.

I motivi che spingono ad utilizzare l'LCA come strumento d'analisi di un prodotto sono molteplici, tra i più importanti possiamo sicuramente annoverare i seguenti:

- Raggiungimento di un maggior controllo delle prestazioni ambientali di un prodotto e/o di un processo;
- Evidenziare i punti deboli del processo produttivo: individuando le fasi sulle quali è

possibile intervenire per diminuire l’impatto ambientale del prodotto, si può arrivare a ridurre i consumi di energia, di materie prime e la produzione di rifiuti, diminuendo di conseguenza, i costi di produzione;

- Valutare la prestazione ambientale di un prodotto rispetto a un prodotto analogo, in modo tale da poter fare delle opportune scelte;
- Progettare e quindi realizzare un prodotto che causi un minor impatto ambientale;
- Individuare le possibili migliorie tecnologiche e gestionali di un prodotto e del suo indotto nell’ottica dello sviluppo sostenibile;
- Migliorare l’immagine del prodotto e dell’azienda, nei confronti del pubblico;
- Realizzare una raccolta completa ed organica di tutti i dati relativi alla fabbricazione di un prodotto, creando così un sistema informatico che supporti un sistema di gestione ambientale, tenendo sotto controllo le emissioni, i consumi delle risorse e gli effetti connessi.

L’utilizzo dell’LCA però può risultare anche oneroso, sia in termini di economici che di tempo, e complesso da eseguirsi in quanto si devono acquisire delle notevoli quantità di dati ambientali durante ogni fase del ciclo della vita; è per questo motivo che a volte può essere sufficiente fermarsi al primo stadio dell’analisi, il cosiddetto Life Cycle Inventory (LCI), per poter apprezzare i vantaggi e gli svantaggi ambientali collegate ad alcune scelte.

Nell’LCI sono previsti tre momenti e cioè:

- *La raccolta dei dati* (prevede la spiegazione in dettaglio delle modalità di acquisizione e delle categorie a cui i dati appartengono);
- *Il processo di calcolo* (elabora i dati in ingresso tramite algoritmi che simulano i processi industriali in esame; i risultati ottenuti dal processo di calcolo sono le emissioni gassose, solide e liquide, le quantità di prodotto finito e/o lavorato, i consumi energetici);
- *L’interpretazione dei risultati* (prevede la verifica della qualità dei dati e dei risultati e la valutazione della correttezza delle scelte metodologiche assunte nel procedimento di calcolo).

1.3.1 La produzione di CO₂ nel processo produttivo del conglomerato bituminoso

Uno step importante del metodo di analisi LCA, è noto come LCI (Life Cycle Inventory). Esso consiste nella possibilità di valutare gli effetti in termini di fumi ed emissioni prodotte, durante la

fase di produzione del conglomerato bituminoso, analizzando ogni singolo componente della miscela. Le fasi dell’analisi comprendono quindi la produzione del bitume, la preparazione degli inerti e del conglomerato bituminoso.

Per il calcolo della CO₂ nella produzione del legante bituminoso è possibile trascurare l’impiego del bitume proveniente da asfalti naturali, perché poco usato, e considerare il bitume prodotto in raffineria a partire da asfalti grezzi petroliferi.

Il ciclo di produzione del bitume a partire da greggi di petrolio può avvenire secondo differenti modalità, pertanto uno specchio riassuntivo può risultare opportuno per una immediata suddivisione delle tecniche.

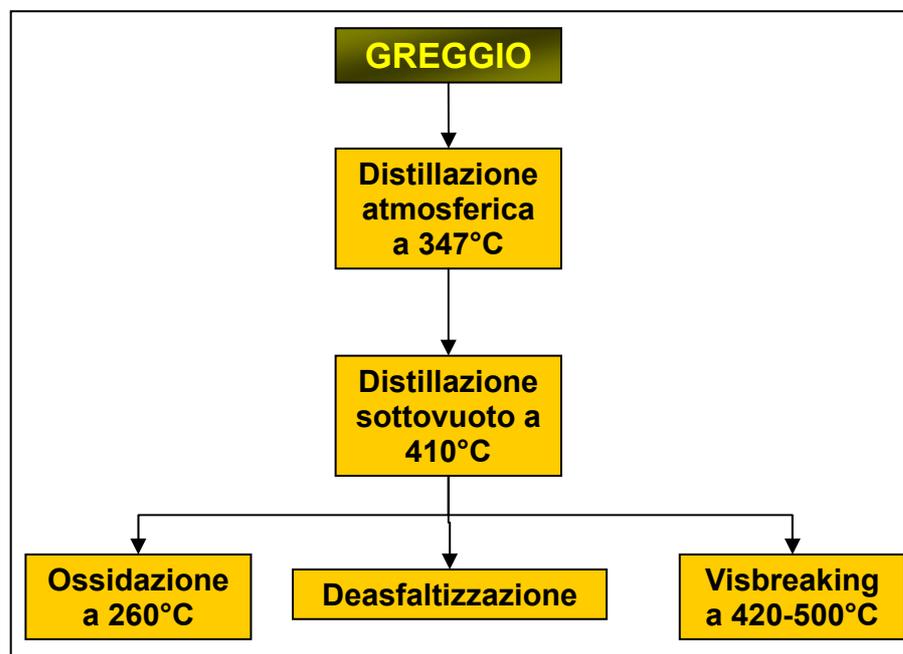


Fig. 1.3 - Schema sinottico dei processi produttivi di un bitume

Il primo processo di produzione, come è possibile osservare nella figura 1.3, consiste nella distillazione diretta dal greggio. Questo processo di produzione consiste nella distillazione del greggio inizialmente a pressione atmosferica riscaldando il greggio ad una temperatura di circa 350°C ed introducendolo in nella parte bassa di una colonna di frazionamento, ottenendo la vaporizzazione delle frazioni bollenti ad una temperatura inferiore a quella alla quale è stato introdotto. In questa fase si procede alla separazione delle varie frazione solide e liquide dal residuo ottenute il quale, rappresentato dalle frazione alto bollenti rimanenti allo stato liquido, può essere impiegato come olio combustibile o, previo flussaggio può essere avviato alla distillazione sottovuoto. Tale distillazione consente di estrarre, a pressione ridotta rispetto a quella precedente (pressione atmosferica), altro materiale distillato senza conferire un innalzamento delle

temperature, quindi evitando ulteriori possibili decomposizioni del materiale fluido. Il residuo ottenuto è composto da bitume.

Il processo denominato di Visbreaking permette invece di ridurre la viscosità dei residui provenienti dalla distillazione atmosferica sottovuoto. E' uno dei metodi più utilizzati per la distillazione dei greggi semiasfaltici dove la presenza di paraffine naturali è eccessiva. Tale processo è quindi mirato all'ottenimento di un rapporto ottimale di paraffine, resine asfalteni e soprattutto risulta essere molto conveniente per le raffinerie in quanto consente di ottenere una maggiore resa in termini di produzione di gasolio. Le condizioni del processo consistono in valori elevati di temperatura, compresa tra i 420° e 500 ° e una pressione tra 3 e 20 bar all'uscita del forno. Rispetto ai bitumi di distillazione diretta, i leganti ottenuti tramite processi di visbreaking mostrano una minore resistenza all'ossidazione, quindi presentano un decadimento più rapido delle loro proprietà nel tempo. Un altro metodo di produzione consiste nella produzione di bitume da deasfaltizzazione. Anche questo metodo, come per il visbreaking, prevede l'utilizzo dei residui della distillazione sottovuoto del greggio sottoponendolo ad estrazione con solvente (generalmente propano), ottenendo precipitazioni di sostanze asfaltiche. Il risultato di questa lavorazione consente di ottenere leganti bituminosi utilizzabili direttamente o miscelabili con bitumi più tenui. L'ultimo processo evidenziato nella precedente figura 1.3, è l'ottenimento di bitumi da processi di ossidazione. Tale processo viene applicato generalmente a residui aventi una viscosità inferiore a quella dei bitumi. Consiste nel sottoporre il bitume distillato, con alto indice di penetrazione (superiore a 100 dmm a sottolinearne la bassa viscosità), ad una corrente d'aria calda a temperature comprese tra i 200° e i 300°C. Questo procedimento produce una deidrogenazione del bitume, con conseguente formazione di acqua e aumento della fase asfaltica. I leganti bituminosi che si ottengono da questa particolare lavorazione sono meno suscettibili alle variazioni di temperature e si differenziano da quelli ottenuti dalla distillazione diretta perché, a parità di indice di penetrazione, hanno un punto di rammollimento superiore, inoltre risultano essere meno duttili e più elastici. Pertanto il loro uso è privilegiato in settori particolari, e non sono in genere adatti per usi stradali.

Per riuscire a quantificare l'intero processo occorre considerare un possibile scenario:

- Considerare grezzi provenienti sia dal Medio Oriente (70%) che dal Venezuela (30%) che sono le zone tipiche per la fornitura di petrolio adatto alla produzione di bitume. Il trasporto verso il centro di raffinazione, avverrà da queste zone;
- Definire i consumi energetici considerando una tipica raffineria europea che produce circa 400.000 tonnellate/annue di bitume;
- Definire il prodotto finito, cioè il bitume, ad esempio un 50/70 che è il più comune a livello Europeo.

Partendo da questi ipotesi, gli esperti¹ hanno calcolato l'energia necessaria e l'emissione di CO₂ riferite alla produzione di 1 kg di bitume.

La tabella 1.2 sintetizza i risultati delle analisi svolte:

	Estrazione e trasporto petrolio	Produzione e stoccaggio bitume	Produzione dell'energia elettrica	Totale
Energia [MJ/KG]	2,784	1,538	0,561	4,883
Anidride carbonica [g/KG]	155,86	100,18	20,61	276,65

Tab. 1.2 – Produzione del bitume a partire dall'estrazione del grezzo fino allo stoccaggio finale in raffineria. Energia necessaria ed emissioni di CO₂ riferite alla produzione di 1 kg di bitume.

In particolare, per ciò che concerne la CO₂, se tali dati sono confrontati con i dati forniti dai produttori di cemento in un Convegno sulla Sostenibilità nell'Industria del Cemento, si ricava che a fronte di c.a. 300 gr di CO₂ emessi per produrre un kg di bitume se ne emettono ben 800 ne quali si indicava in 800 grammi la quantità di CO₂ emessa durante la produzione di un kg di cemento. Inoltre bisogna precisare che il bitume, a differenza di altri materiali, è interamente riciclabile e recuperabile.

Il calcolo di CO₂ nella produzione degli inerti è più complesso di quello del bitume anche se il processo per ottenere gli inerti è più semplice. Ciò si può far risalire, in larga misura, ad esempio alle diverse tecniche di estrazione adottabili in termini di “aggressione” alla roccia etc.

I modelli analitici applicati per far fronte a tale stima si basano sul rapporto che lega l'energia impiegata e l'entità della riduzione dimensionale del prodotto; nel caso più generale sono del tipo:

$$dE = \frac{dx}{x^n}$$

La variazione dimensionale “dx” è direttamente proporzionale all'energia spesa la quale, a sua volta, è inversamente proporzionale alla dimensione “x” del materiale.

Dalla letteratura è possibile stimare che l'energia totale necessaria per effettuare le varie fasi di estrazione, potrebbe essere dell'ordine di 20 KJ/Kg (20 MJ/t).

¹Appartenenti alle organizzazioni Eurobitume e Concawe. La prima riunisce esperti e produttori di leganti bituminosi al fine di condividere conoscenza e ricerca sul tema. Il secondo è composto da aziende produttrici di oli industriali ed è finalizzata alla ricerca di soluzioni produttive rispettose dell'ambiente.

Per il calcolo della CO₂ si può assumere l'impiego equivalente di olio combustibile o di metano. Per ciò che attiene all'uso di olio combustibile risulta che occorrono circa 0,5 kg di olio per tonnellata di inerti e, siccome la combustione genera 3,4 kg di CO₂ per kg di olio, ne consegue un'immissione di 1,7 kg di CO₂ per tonnellata di inerte nell'aria.

Impiegando il metano invece, servirebbero circa 0,56 Nm³ di metano per tonnellata. Le emissioni di CO₂ sarebbero di circa 0,98 kg di CO₂ per tonnellata, considerando che un metro cubo di metano produce 1,96 kg di CO₂. Per il calcolo di CO₂ nella produzione del conglomerato bituminoso (Hot Mix Asphalt) per semplicità si tiene in considerazione il caso più comune e cioè la produzione di HMA a caldo tradizionale. Nella figura 1.4 è sintetizzato il processo di produzione del conglomerato bituminoso preso in esame, partendo dalla prevagliatura degli inerti, dal riscaldamento e dalla successiva deumidificazione.

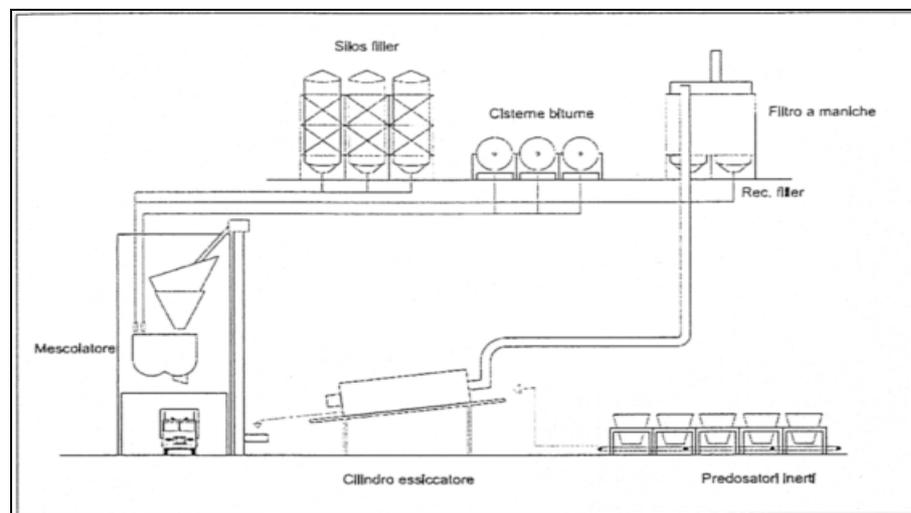


Fig. 1.4 – Schema semplificato di impianto continuo per la produzione del conglomerato bituminoso.

Successivamente avviene l'operazione denominata “miscelazione”, effettuata ad una temperatura di circa 160 °C. La temperatura media di partenza degli aggregati è di circa 15 °C. Il grado di umidità contenuto negli inerti è molto importante al fine dei calcoli; esso può variare notevolmente a seconda che si analizzi la frazione fine o quella grossolana. Inoltre può variare a seconda della stagione, della latitudine e della modalità di stoccaggio. Da letteratura possono assumersi valori di circa 300 MJ per tonnellata di conglomerato, con consumi dichiarati di 7/8 kg/t di olio combustibile o 9/10 m³ di metano. I dati si riferiscono ad impianti di media potenzialità, con umidità media del 4 – 5% e riscaldamento da 15 °C. Considerando l'impiego di 7,5 kg di olio combustibile, si sono calcolate che le emissioni di CO₂ sono di circa 25,5 kg per tonnellata di conglomerato. Il metano invece, teoricamente necessario per la combustione, è circa 8,33 m³ e la corrispondente emissione di CO₂ risulta essere circa 16,3 kg/t.

1.4 Conglomerati bituminosi e salute dei lavoratori

Le miscele di conglomerato bituminoso risultano essere dei composti eterogenei la cui produzione presenta un effetto inquinante sull'ambiente e sulla salute dei lavoratori non trascurabile, in particolare durante la fase di produzione e di messa in opera. Infatti le alte temperature di lavorazione necessarie per rendere il legante bituminoso fluido per la lavorazione, produce emissioni di fumi di oli presenti nel bitume, altamente nocivi. Il bitume viene ottenuto generalmente come residuo fisso della distillazione sottovuoto del petrolio, ed è costituito da una miscela complessa di idrocarburi ad elevato peso molecolare i cui rapporti percentuali tra i componenti variano in funzione del petrolio grezzo di provenienza e del metodo di distillazione e di lavorazione che viene utilizzato per la sua produzione.

I pericoli maggiori, associati a tutte le attività lavorative di cui si compone il ciclo di stoccaggio del legante bituminoso, sono connessi all'esposizione a vapori generati dal bitume e dagli oli B.T.Z. e diatermici. I bitumi sono classificabili dalla IARC (International Agency for Research on Cancer) nel gruppo 3, ossia *non cancerogeni per l'uomo*, in quanto vi è un'evidenza inadeguata di cancerogenicità negli studi epidemiologici sull'uomo; gli estratti di bitume che hanno subito un processo di stripping al vapore, i bitumi raffinati all'aria e le miscele ottenute dalle precedenti due tipologie, sono invece classificati nel gruppo 2B, ossia *possibili cancerogeni per l'uomo*, in quanto vi è una maggiore evidenza di cancerogenicità solo negli studi sperimentali sugli animali.

Il NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) raccomanda, invece, di considerare i fumi di conglomerato bituminoso come potenziali cancerogeni occupazionali. La cancerogenicità dei bitumi è legata alla presenza nei fumi di idrocarburi policiclici aromatici (IPA), alcuni dei quali sono classificati dalla IARC come possibili cancerogeni per l'uomo, gruppo 2A (benzo[a]antracene, benzo[a]pirene, dibenzo[a,h]antracene) o probabili cancerogeni, gruppo 2B (naftalene, indeno[1,2,3-cd]pirene, benzo[b]fluorantene, benzo[j]fluorantene, benzo[k]fluorantene). Per definire in maniera più puntuale il problema, la IARC ha promosso uno studio epidemiologico internazionale in otto paesi. I risultati, recentemente pubblicati, sembrano indicare un eccesso di tumori polmonari, che tuttavia non consente di escludere l'influenza di fattori di confondimento quali fumo di sigaretta, amianto, presenza di catrame nelle miscele di bitume, ecc. Attualmente sono in corso ulteriori approfondimenti allo scopo di valutare ed eventualmente escludere i suddetti fattori di confondimento. Gli olii combustibili B.T.Z. e gli oli diatermici sono cancerogeni riconosciuti, contrassegnati dalla frase di rischio R 45 (“*Può provocare il cancro*”); particolare importanza assume l'olio diatermico utilizzato nello scambiatore di calore per mantenere a temperatura il bitume.

Gli stessi agenti cancerogeni sopramenzionati si sviluppano anche dai processi di combustione e

pirolisi degli oli combustibili e diatermici. A questi si aggiunge l'idrogeno solforato (H₂S), irritante, non presente nelle materie prime tal quali, ma generato quale sottoprodotto, e la soda caustica (idrossido di sodio, NaOH), sostanza tossica utilizzata in quantità discrete. [6]

Quindi la necessità di ridurre i consumi energetici di produzione e le emissioni inquinanti in atmosfera, ha creato da molte decadi un dibattito all'interno della comunità scientifica del settore, allo scopo di trovare una soluzione efficace ed efficiente.

1.5 Conglomerati bituminosi: considerazioni e introduzione alle tecniche di risparmio energetico e tutela ambientale

Negli ultimi decenni, la ricerca nel settore delle pavimentazioni ha condotto alla messa a punto di tecniche innovative impostate sul risparmio energetico e sulla tutela dell'ambiente. Lo scenario tecnologico ha subito modifiche sostanziali, solo in parte attribuibile al normale processo di miglioramento delle risorse (materiali e macchinari), in grado di produrre una trasformazione radicale nell'operatività dei cantieri stradali.

Il rilancio delle tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni è certamente una risposta significativa al problema del consumo di risorse non rinnovabili e la crescente diffusione delle tecniche in sito ne aumenta ulteriormente l'efficienza, grazie al sostanziale azzeramento del trasporto di materiali da e per il cantiere. I vantaggi di natura ambientale raggiungono il loro apice nel caso dei processi di riciclaggio in sito con tecniche a freddo.

In questo quadro generale si collocano le tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi a basse temperature, ovvero i Warm Mix Asphalt – WMA che verranno ampiamente descritti al cap. 4. Emulsioni di bitume, schiuma di bitume, schiuma di emulsioni bituminose, miscele a bassa energia, additivi fluidificanti del bitume costituiscono gli elementi salienti delle tecniche di produzione dei conglomerati bituminosi per via tiepida. Rispetto alle tradizionali tecniche a caldo la riduzione di qualche decina di gradi delle temperature operative determina un sensibile risparmio energetico a cui si associa un cospicuo abbattimento delle emissioni gassose con evidenti vantaggi in termini di salvaguardia dell'ambiente e miglioramento delle condizioni di lavoro.

Il calcolo applicato all'impiego di tecnologie tiepide per la preparazione di conglomerato, ha evidenziato un aspetto molto interessante e cioè un a riduzione dell'energia richiesta del 40 – 50 %, con conseguenti riduzioni delle emissioni di CO₂.

Un elemento comune a tutte le tecniche WMA è l'ottimizzazione di alcune caratteristiche chimico-fisiche del bitume al fine di ottenere una miscela composta estremamente lavorabile durante la

messa in opera ed in grado di assumere in tempi brevi le caratteristiche prestazionali necessarie a sopportare i carichi indotti dal traffico stradale, mantenendo irrinunciabili requisiti di durabilità. Pur essendo le miscele tiepide presenti da poco tempo nel settore produttivo stradale si può affermare che esse rappresentano, per i gestori di infrastrutture, un valido complemento alla gamma degli strumenti tecnologici disponibili per soddisfare le molteplici esigenze del settore. In generale, come sarà possibile osservare al cap. 4, si può osservare che i conglomerati a bassa energia consentono maggiori riduzioni delle temperature di processo e nel contempo si rendono necessarie minori modifiche sia alla configurazione dell'impianto di confezionamento sia alle sue tradizionali modalità operative.

I punti comuni a tutte le tecniche WMA sono:

- ridotti consumi di energia;
- ridotta formazione di CO₂;
- meno fumi e aerosol in fase di messa in opera;
- meno emissioni all'impianto di confezionamento;
- minor invecchiamento del legante,
- migliori caratteristiche prestazionali della miscela.

Concordi con la necessità di abbassare le temperature di lavorazione, da anni si cerca un metodo migliore che mantenga inalterate o quasi le proprietà e le caratteristiche in termini prestazionali e dei conglomerati bituminosi. Storicamente [8], nell'ormai lontano 1956 il Prof. Ladis Csanyi dell'Iowa State University intuì per primo le potenzialità dell'uso del bitume fuso all'interno di miscele di conglomerato bituminoso, e da allora le tecnologie legate all'uso del bitume fuso, il quale consente di abbassare le temperature di miscelazione, sono state largamente diffuse ed utilizzate in molti paesi. Nel 1968 la Mobil Oil Australia, che acquistò il brevetto del prof. Csanyi, modificò il processo produttivo, sostituendo al vapore, una quantità prefissata di acqua fredda nel bitume. In questo modo il processo divenne più semplice da applicare e utilizzare. In seguito la società Conoco ottenne la licenza di commercializzare negli Stati Uniti la tecnologia del bitume fuso, rendendola allo stesso tempo più valida attraverso l'esecuzione di prove sperimentali in sito e in laboratorio. Nel 1994 Maccarrone [7] analizzò l'efficacia dei metodi di produzioni basati sull'uso di bitume fuso e legante bituminoso emulsionato, affermando che la crescita e lo sviluppo di tali metodiche nel mondo avrebbero senz'altro migliorato i parametri di accettabilità delle miscele stesse. Inoltre tali miscele sono rispettose dell'ambiente e economiche dal punto di vista produttivo in quanto, non presentano emissioni di idrocarburi nell'atmosfera, e richiedono un quantitativo notevolmente inferiore di carburante per le diverse fasi produttive. Nonostante questi aspetti positivi l'uso di queste tecniche non aveva ancora superato per frequenza di utilizzo, l'impiego delle miscele tradizionali a caldo. Nel 1999 Jenkins et al [9] introducono l'utilizzo della

metodologia denominata “half-warm foam”, che consiste nell’impiego di inerti riscaldati a temperature superiori a quelle ambientali, tipiche dei conglomerati a freddo, però inferiori ai 100°C, e miscelati con legante bituminoso flussato. Nella pubblicazione sono evidenziati tutti i benefici relativi all’impiego di questa tecnica, tra cui quelli relativi all’addensabilità in sito della miscela che è fortemente influenzata dalla fluidità della stessa, e non tanto dalla temperatura di miscelazione degli inerti, e quelli secondo cui è possibile impiegare anche materiale proveniente da fresato stradale (RAP) con la tecnica introdotta da [9] favorendo ancor di più gli aspetti relativi alla salvaguardia dell’ambiente.

La paternità dell’introduzione e dei primi studi sulle miscele di conglomerati bituminosi a basso impatto ambientale e favorevoli al risparmio energetico, va attribuita alla comunità scientifica europea, la quale fu la prima ad interessarsi alla tematica. Si ha conoscenza di ciò nella memoria [11] a cura dell’ente Australiano dell’Associazione Pavimentazioni Stradali (Australian Asphalt Pavement Association – AAPA), la quale propose nel 2001 una prima analisi sullo stato dell’arte delle metodiche definite per la prima volta “warm – mix” (notazione anglosassone per indicare le miscele di conglomerato bituminoso “tiepido”, realizzato a temperature sensibilmente inferiori a quelle utilizzate per le miscele tradizionali di conglomerato bituminoso) sviluppate in Europa. Un successivo e importante contributo fu dato inseguito da Koenders et al [10] con il loro lavoro proposto al congresso internazionale Eurasphalt & Eurobitume Congress del 2000 tenutosi a Barcellona in Spagna. Nel loro contributo viene analizzata la metodica “warm – mix” con applicazioni in laboratorio e in sito, attraverso l’utilizzo di prove su di una stesa sperimentale effettuata in Norvegia, e relativa ad uno strato di usura superficiale chiuso. La miscela da loro studiata è stata sviluppata a partire dagli studi precedenti rinvenuti in letteratura, relativamente alla metodica dell’uso del bitume flussato. Nel successivo convegno Eurasphalt & Eurobitume, tenutosi 4 anni dopo fu presentato per la prima volta, il metodo per ottenere miscele di conglomerato bituminoso “tiepide” grazie all’aggiunta di un particolare additivo: la zeolite sintetica. Infatti Berthel et al [14] ottenendo una sorta di schiuma tura del bitume per effetto della presenza della zeolite la quale a contatto con fonti di calore rilascia vapore acqueo aumentando considerevolmente la lavorabilità della miscela, come sarà dimostrato nel proseguo della presente tesi di dottorato. Successivamente a questo importante fervore, in Europa e in Australia, intorno alla produzione e allo studio di queste miscele “environmental – friendly”, arriva anche negli Stati Uniti la voce degli aspetti positivi dei warm – mix. A tal proposito l’ente di ricerca NCAT (National Centre for Asphalt Technology), nel 2005 propone due importanti contributi scientifici [12] [13], il primo relativo all’impiego di una particolare cera paraffinica, aprendo una nuova tipologia per la classificazione dei conglomerati bituminosi tiepidi, il secondo relativo all’impiego di zeolite sintetica. Successivamente nel 2006 l’istituto NCAT iniziò a studiare altre metodiche tra le quali quella che utilizza una particolare emulsione bituminosa, dando vita alla metodologia riconosciuta

con il nome Evotherm® [15]. Ad oggi questi risultano essere i passaggi focali relativi al tema delle miscele di conglomerato bituminoso “warm – mix”, nonostante in seguito siano stati proposti numerosi contributi scientifici dei quali si è tenuto ampiamente conto in questo lavoro, per realizzare un’attenta e approfondita analisi sullo stato dell’arte delle miscele “tiepide” ottenute con le diverse metodologie oggi conosciute.

1.6 Bibliografia specifica cap.1

- [1] G. Fore; H. Marks - *Documenting emissions and energy reductions of wma and conventional hma* – National Pavement Asphalt Association, August 2006;
- [2] O. Kristjánsdóttir - *Warm mix asphalt for cold weather paving* - Thesys of Master of Science in Civil Engineering University of Washington 2006;
- [3] S. Ravaioli – *Asfalto, CO₂, e protocollo di Kyoto. La riduzione dell’anidride carbonica per uno sviluppo eco sostenibile.* – Rivista Siteb “Rassegna del bitume” n° 57/07;
- [4] M. Maschietto – *Lyfe Cycle Assessment (LCA). Verso la sostenibilità ambientale delle pavimentazioni stradali* – Rivista Siteb “Rassegna del bitume” n° 58/08;
- [5] M.M. Hassan – *Life Cicle Assassment of Warm Mix Asphal: an Enviromental and Economic Prospective* – Trasportation Research Board Annual meeting 2009;
- [6] Inail Consulenza Tecnica: *Accertamento rischi e prevenzione – Impianti di produzione dei conglomerati bituminosi, valutazione e contenimento dei rischi lavorativi* – pubblicazione INAIL 2004;
- [7] Maccarore S. et ali – *Cold Asphalt system as an alternative to ho hot mix* – APA International conference, November 1994;
- [8] O. Kristjánsdóttir - *Warm mix asphalt for cold weather paving* - Thesys of Master of Science in Civil Engineering University of Washington 2006;
- [9] J.K. Jenkins et ali – *Half-warm foamed bitumen treatment, a new process* – 7th International conferences on Asphalt pavement in South Africa, 1999;
- [10] B.G. Koenders et ali - *Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures* – 2° Eurasphalt & Eurobitumen, Barcelona Spain 2000;
- [11] *Advisory note 17 – Warm mix asphalt – a state of the art review* – Australian Asphalt pavement Association

<http://www.aapa.asn.au/content/aapa/download/AdvisoryNote17.pdf> ;

- [12] B. Prowell, R. C. West – *A Case for reducing production and laydown temperatures: Today – Hot Mix Asphalt Magazine July/August 2005*;
- [13] Hurley, G. and Prowell, B., - *Evaluation of Sasobit® for Use in Warm Asphalt Mixes* - NCAT Report No. 05- 06, Auburn University, Auburn, AL, June 2005;
- [14] Berthel W. et ali – *Warm mix asphalt by adding synthetic zeolite* – Eurovia www.asphamin.com Online since 2005;
- [15] Hurley, G. and Prowell, B., - *Evaluation of Evotherm® for Use in Warm Asphalt Mixes* - NCAT Report No. 06-02, Auburn University, Auburn, AL, June 2006.

Capitolo 2

I conglomerati bituminosi

2.1 Gli aggregati lapidei

Gli aggregati lapidei costituiscono, all'interno della miscela di conglomerato bituminoso per uso stradale, lo scheletro portante solido della miscela stessa. Generalmente la loro presenza varia da un minimo di circa il 75% nel caso di conglomerati bituminosi drenanti, particolarmente “aperti”, ad un massimo di circa 90% per stradi di pavimentazioni stradali tipici di usura. Gli aggregati lapidei per essere impiegati all'interno di pavimentazioni stradali, devono rispettare alcune stringenti prescrizioni.

Una classificazione adeguata agli scopi dell'ingegneria stradale si basa su prove che valutano caratteristiche geometriche, fisico-meccaniche e chimiche degli aggregati, indipendentemente dalla loro natura.

Tutti gli aggregati devono essere identificati mediante il loro intervallo dimensionale significativo, espresso dal rapporto tra il diametro minimo (d) e il diametro massimo (D). Le analisi granulometriche devono essere effettuate in conformità alla norma UNI EN 933-1, mediante una delle serie di setacci indicati dalla norma UNI EN 13043.

L'esecuzione della prova di analisi granulometrica deve essere fatta secondo la norma UNI EN 933-1, e in funzione dei risultati ottenuti, si identifica la categoria alla quale appartiene l'aggregato esaminato in relazione alla tabella “Requisiti generali di granulometria” di seguito proposta in tab. 2.1:

Aggregato	Dimensione [mm]	Percentuale passante in massa					Categoria
		2 D	1,4 D	D	D	d/2	
Grosso	D > 2	100	100	Da 90 a 99	Da 0 a 10	Da 0 a 2	Gc 90/10
		100	Da 98 a 100	Da 90 a 99	Da 0 a 15	Da 0 a 5	Gc 90/14
		100	Da 98 a 100	Da 90 a 99	Da 0 a 20	Da 0 a 5	Gc 90/20
		100	Da 98 a 100	Da 85 a 99	Da 0 a 15	Da 0 a 2	Gc 85/15
		100	Da 98 a 100	Da 85 a 99	Da 0 a 20	Da 0 a 5	Gc 85/20
		100	Da 98 a 100	Da 85 a 99	Da 0 a 35	Da 0 a 5	Gc 85/35
Fine	D ≤ 2	100	-	Da 85 a 99	-	-	G _F 85
Frazione unica	D ≤ 45 e d = 0	100	Da 98 a 100	Da 90 a 99	-	-	G _A 90
		100	Da 98 a 100	Da 85 a 99	-	-	G _A 90

Tab. 2.1 – Requisiti generali di granulometria

Oltre ai requisiti di dimensione, nella caratterizzazione di un aggregato per l'impiego in miscele di conglomerato bituminoso per uso stradale è importante valutare anche la forma dell'aggregato stesso.

Tale caratteristica viene determinata mediante l'indice di appiattimento e l'indice di forma. Il primo viene indicato mediante la categoria FI (ad es. FI 30 indica un indice di appiattimento ≤ 30). La prova consiste nel suddividere il campione di prova mediante una normale setacciatura in frazioni granulometriche diverse, comprese fra i setacci “d” e “D”, con $D \approx 1,25 d$ e nel setacciare il materiale di ciascuna frazione al vaglio avente un'apertura delle maglie uguale a $D/2$. Non sono ritenuti idonei i granuli della frazione granulometrica d/D che passano attraverso la griglia di apertura $D/2$ in quanto considerati troppo appiattiti. Analogamente, la prova per stabilire l'indice di forma (Norma UNI EN 933-4) indica il risultato con il parametro SI (per es. SI₃₀ indica che l'indice di forma è ≤ 30). Secondo tale norma, hanno forma idonea i granuli “poliedrici”, per i quali il rapporto tra la massima e la minima dimensione risulti ≤ 3 (coefficiente di forma ≤ 3).

La prova, eseguita su un provino costituito da una certa quantità di elementi lapidei, consiste nell'esaminare manualmente, mediante l'ausilio di un apposito calibro, ciascun elemento lapideo, individuando quali sono i granuli di forma non idonea, per i quali il coefficiente di forma (rapporto tra la massima e la minima dimensione) è ≥ 3 , cioè tutti i granuli, con dimensione massima “L” che passano attraverso il calibro secondario, di spessore “S” = $L/3$.

Dal punto di vista fisico-meccanico, risulta molto importante valutare alcuni parametri degli aggregati lapidei, che rappresentano indicatori delle performance dello scheletro litico nella miscela di conglomerato bituminoso.

Un parametro caratterizzante le prestazioni meccaniche di un aggregato lapideo, p la resistenza alla frammentazione. Questa proprietà si valuta attraverso l'esecuzione della prova Los Angeles.

Tale resistenza viene stimata attraverso il coefficiente Los Angeles, indicato secondo la norma EN 1097-2, punto 5, con l'acronimo LA (es. LA₃₀ indica che il coefficiente Los Angeles è ≤ 30). La prova misura la perdita di percentuale in peso, per abrasione, di un aggregato lapideo sottoposto ad un'azione di rotolamento ed urto insieme con sfere metalliche, poste insieme all'aggregato, in un apposito cilindro. La norma prevede inoltre, che la prova sia eseguita su una massa P1 di 5000 grammi di aggregato, considerando la quantità di materiale fino (< 1,6 mm) prodotto, al termine delle rotazioni del cilindro metallico, in presenza di 11 sfere metalliche di massa complessiva di 4840 grammi. La frazione di aggregato da esaminare è costituita un unico assortimento granulometrico (10-14 mm), con alcune precisazioni: la percentuale di passante ad un setaccio di 12,5 mm deve essere compresa tra il 60 ed il 70%, altresì la percentuale di passante al setaccio di 11,2 mm deve essere compresa tra il 30 ed il 40% della massa totale. Il coefficiente LA viene valutato attraverso una relazione il cui risultato è funzione unicamente della massa m trattenuta al setaccio da 1,6 mm, dopo le rotazioni, ed espressa in grammi:

$$LA = (5000 - m)/50$$

Tra le altre caratteristiche meccaniche, che un buon aggregato lapideo per conglomerati bituminosi per uso stradale deve possedere, è necessario citare la resistenza all'usura per abrasione superficiale. Questa risulta essere una caratteristica molto importante dal punto di vista della sicurezza stradale in quanto, il corretto contatto e l'adesione tra pavimentazione stradale e pneumatico di un qualsiasi mezzo di trasporto, è garantito dalla scabrosità superficiale della pavimentazione stessa. Utilizzare aggregati lapidei che possano mantenere il più a lungo possibile questa caratteristica superficiale, consente di avere superfici viarie più sicure e durevoli. Anche nell'ambito del programma SHRP è stata riconosciuta la particolare importanza di alcuni parametri quali:

- la spigolosità dell'aggregato grosso e fine;
- l'appiattimento e l'allungamento dei grani;
- il contenuto di argilla;
- la granulometria.

E' proprio l'accentuata *spigolosità* degli elementi litici che fa aumentare l'attrito fra i grani e dunque la resistenza a taglio e all'ormaiamento; per questo motivo, in strati di usura e in pavimentazioni soggette ad elevati carichi, si richiede fino al 100% di materiale frantumato.

La presenza di *grani piatti e allungati* può risultare dannosa in fase di costruzione in quanto possono frantumarsi variando la granulometria. Tale comportamento è tanto più accentuato quanto più il materiale è tenero. Particelle appiattite possono inoltre disporsi parallelamente tra di

loro creando piani preferenziali di scorrimento e riducendo la resistenza a taglio.

La presenza di argilla all'interno della miscela di aggregati risulta dannosa poiché ne determina la sensibilità all'acqua compromettendone le prestazioni.

Per quanto riguarda la *granulometria*, le caratteristiche degli aggregati generalmente richieste dai capitolati sono riportate nelle seguenti tab. 2.2, 2.3, 2.4:

AGGREGATO GROSSO					
Indicatori di qualità			Strato di pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Los Angeles (*)	UNI EN 1097-2	%	≤ 30	≤ 30	≤ 20
Micro Deval Umida (*)	UNI EN 1097-1	%	≤ 25	≤ 25	≤ 15
Quantità di frantumato	ENI EN 933-5	%	≥ 70	≥ 80	100
Dimensione max	UNI EN 933-1	mm	40	30	20
Sensibilità al gelo	UNI EN 1097-6	%	≤ 30	≤ 30	≤ 30
Spogliamento	UNI EN 12697-11	%	≤ 5	≤ 5	0
Passante allo 0,075	UNI EN 933-1	%	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Indice di appiattimento	UNI EN 933-3	%		≤ 30	≤ 30
Porosità	UNI EN 1936	%		≤ 1,5	≤ 1,5
CLA	UNI EN 1097-8	%			≥ 40

(*) Uno dei due valori dei coefficienti Los Angeles e Micro Deval Umida può risultare maggiore (fino a due punti percentuali) rispetto al limite indicato, purché la loro somma risulti inferiore o uguale alla somma dei valori limite indicati.

Tab. 2.2 - Caratteristiche dell'aggregato grosso

AGGREGATO FINO					
Indicatori di qualità			Strato di pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Equivalente in sabbia	UNI EN 933-8	%	≥ 50	≥ 60	≥ 70
Indice di plasticità	UNI CEN ISO/TS 17892	%	N.P.		
Limite liquido	UNI CEN ISO/TS 17982	%	≤ 25		
Passante allo 0,075	UNI EN 933-1	%		≤ 2	≤ 2
Quantità di frantumato	AASHTO T304-A	%		≥ 40	≥ 50

Tab. 2.3 - Caratteristiche dell'aggregato fino

FILLER			
Indicatori di qualità			Strato di pavimentazione
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base - Binder - Usura
Spogliamento	UNI EN 12697-11	%	≤ 5
Passante allo 0,18	UNI EN 933-10	%	100
Passante allo 0,075	UNI EN 933-10	%	≥ 80
Indice Plasticità	UNI CEN ISO/TS 17892	%	N.P.
Vuoti Ridgen	UNI EN 1097-4	%	30-45
Stiffening Power (filler/bitume = 1,5)	UNI EN 13179-1	ΔPA	≥ 5

Tab. 2.4- Caratteristiche del filler

2.2 I leganti bituminosi per uso stradale

Un legante bituminoso può immaginarsi come una complessa struttura le cui componenti principali sono di seguito riassumibili in:

- Carboidi: componenti del bitume insolubili in solfuro di carbonio;
- Carbeni: componenti solubili in solfuro di carbonio, ma insolubili in tetracloruro di carbonio;
- Asfaltini: frazione solida a temperatura ambiente, insolubile in *n*-pentano e neptano con struttura molecolare piuttosto complessa, costituita da composti aromatici condensati, con pesi molecolari anche di molto superiori a 2000, in cui si riscontra la copresenza di ossigeno, azoto, zolfo e metalli (vanadio, nickel, ecc.); costituisce circa l'8-20% del bitume;
- Resine: frazione molto viscosa a temperatura ambiente. Ha la funzione di disperdere le strutture macromolecolari asfalteniche, ed è caratterizzata da un peso molecolare intermedio tra gli asfaltini e gli oli aromatici. La percentuale di resine nel bitume varia tra 10-25%;
- Olii aromatici: frazione liquida viscosa, contenente numerosi composti con anelli aromatici, con un peso molecolare compreso tra 500 e 1000. Sono i componenti principali del bitume costituendone il 40-70%;
- Olii saturi: frazione liquida viscosa costituita essenzialmente da idrocarburi saturi a lunga catena e da cicloparaffine, con peso molecolare compreso tra 500 e 1000. Sono presenti generalmente in concentrazioni comprese tra il 5-20%. [21]

Ad oggi è generalmente accettata la natura colloidale del bitume ove si può ipotizzare che esso sia costituito da una dispersione di micelle in un mezzo oleoso (Nellenstein, 1928-33). Il nucleo di

tali micelle costituisce la fase dispersa ed è formato dagli asfalteni e da malteni ad alto peso molecolare (ovvero le resine) aventi funzioni stabilizzanti. In funzione della natura più o meno aromatica della frazione maltenica le micelle potranno essere disperse e stabilizzate nel bitume oppure non stabilizzate e quindi essere più o meno flocculate. Una completa peptizzazione delle micelle è possibile se il sistema contiene, in rapporto alla concentrazione di asfalteni, un quantitativo sufficiente di costituenti aromatici. Nel primo caso il bitume si troverà nello stato di “sol” e si comporterà come un fluido Newtoniano (di cui sarà enunciata la definizione nel seguito), nel secondo caso si troverà nello stato di “gel” e si comporterà come un fluido non Newtoniano. I bitumi per uso stradale generalmente si trovano in uno stato intermedio mostrando un comportamento visco-elastico, quindi sol-gel. Alla componente degli asfalteni è attribuito il comportamento viscoso, mentre le resine svolgendo un'azione disperdente degli asfalteni, giocano un ruolo molto importante per la stabilità dell'equilibrio dello stato colloidale. Inoltre forniscono al bitume flessibilità, consentendogli di comportarsi come un corpo elastico quando esso viene sottoposto a rapidissime sollecitazioni meccaniche, come sfrozi di taglio, compressione ecc.

Rispetto all'uso in ambito stradale è possibile effettuare la seguente classificazione:

- Bitumi tradizionali;
- Bitumi modificati;
- Bitumi schiumati;
- Emulsioni bituminose.

2.2.1 Bitumi, tradizionali

La prima classificazione tra i leganti per uso stradale è tra asfalti naturali e bitumi distillati. Gli *asfalti naturali* erano già ben conosciuti dall'epoca dei Romani, come legante in edilizia, quindi ben prima della scoperta e dello sfruttamento dei giacimenti petroliferi. Ancor prima che dai Romani, l'asfalto naturale veniva utilizzato dai Sumeri e degli Egizi per i loro processi tradizionali di mummificazione. Gli asfalti di origine naturale si formano nel sottosuolo per filtrazione del petrolio greggio, impregnando le rocce o insinuandosi in filoni cavi creando affioramenti, e alterandosi a causa dell'evaporazione degli idrocarburi più leggeri e a causa dell'ossidazione e polimerizzazione di quelli più pesanti, si trasforma in bitume. In questo processo di risalita verso la superficie della crosta terrestre, i petroli trasportano con se frazioni fini di sabbia e materiale inerte, e per tale motivi, gli asfalti naturali contengono sempre una frazione di materiale insolubile. Le principali tipologie di asfalti naturali, risultano essere le seguenti:

- *Trinidad Epurè*: trae il suo nome dal lago di asfalto naturale da quale viene stoccato nell'isola di Trinidad. Ha un contenuto di bitume puro pari a c.a. il 55% e la restante parte è formata da frazione di materiale insolubile di natura minerale;
- *Selenizza*: anche esso trae il nome dall'omonimo lago di asfalto sito in Albania. Esso presenta una percentuale di bitume molto più alta del precedente, ossia di c.a. l'85%. La restante aliquota è composta da materiale minerale;
- *Gilsonite*: si tratta di un asfalto naturale di tipo solido con la più alta percentuale di bitume. Infatti la frazione di materiale insolubile minerale è di solo c.a. l'1%, mentre la corrispettiva aliquota di complemento a 100, è bitume. Particolarmente alto è il punto di rammollimento di questo asfalto, dell'ordine di 110° - 180° C.

La seconda categoria di leganti bituminosi per uso stradale, invece proviene dallo sfruttamento dei giacimenti petroliferi presenti nel sottosuolo, e pertanto si parlerà di *bitumi da distillazione*.

Attualmente i bitumi ordinari provengono da processi di raffinamento del greggio di origine petrolifera. In particolar modo dai greggi più pesanti dai quali è possibile ottenere una resa di estrazione di c.a. il 50%. I greggi petroliferi a loro volta sono suddivisi in funzione del contenuto di bitume, nelle seguenti tipologie:

- *Greggi asfaltici*: sono particolarmente ricchi di asfalteni, e privi o quasi di paraffine naturali solide, e contengono spesso quantità significative di zolfo;
- *Greggi semiasfaltici*: può essere presente una certa percentuale di paraffine solide, e contengono valori medio alti di zolfo;
- *Greggi non asfaltici*: sono greggi caratterizzati da un basso peso di volume, e ricchi di paraffine, hanno un basso tenore di zolfo e non contengono sostanze asfaltiche.

Le possibilità di fabbricazione del bitume a partire da greggi di petrolio sono diverse, pertanto uno specchietto riassuntivo può risultare opportuno per una immediata suddivisione delle tecniche.



Fig. 2.1 - Diversi comportanti ad una prova di Creep

Il primo processo di produzione, come è possibile osservare nella figura 2.1, consiste nella distillazione diretta dal greggio. Questo processo di produzione consiste nella distillazione del greggio inizialmente a pressione atmosferica riscaldando il greggio ad una temperatura di circa 350°C ed introducendolo nella parte bassa della colonna di frazionamento, ottenendo la vaporizzazione delle frazioni bollenti ad una temperatura inferiore a quella alla quale è stato introdotto. In questa fase si procede alla separazione delle varie frazioni solide e liquide dal residuo ottenuto il quale, rappresentato dalle frazioni alte bollenti rimanenti allo stato liquido, può essere impiegato come olio combustibile o, previo flussaggio può essere avviato alla distillazione sottovuoto. Tale distillazione consente di estrarre, a pressione ridotta rispetto a quella precedente (pressione atmosferica), altro materiale distillato senza conferire un innalzamento delle temperature, quindi evitando ulteriori possibili decomposizioni del materiale fluido. Il residuo ottenuto è composto da bitume.

Il processo denominato di Visbreaking permette invece di ridurre la viscosità dei residui provenienti dalla distillazione atmosferica sottovuoto. E' uno dei metodi più utilizzati per la distillazione dei greggi semiasfaltici dove la presenza di paraffine naturali è eccessiva. Tale processo è quindi mirato all'ottenimento di un rapporto ottimale di paraffine, resine asfalteni e soprattutto risulta essere molto conveniente per le raffinerie in quanto consente di ottenere una maggiore resa in termini di produzione di gasolio. Le condizioni del processo consistono in valori elevati di temperatura, compresa tra i 420° e 500 ° e una pressione tra 3 e 20 bar all'uscita del forno. Rispetto ai bitumi di distillazione diretta, i leganti ottenuti tramite processi di visbreaking

mostrano una minore resistenza all'ossidazione, quindi presentano un decadimento più rapido delle loro proprietà nel tempo. Un altro metodo di produzione consiste nella produzione di bitume da deasfaltizzazione. Anche questo metodo, come per il visbreaking, prevede l'utilizzo dei residui della distillazione sottovuoto del greggio sottoponendolo ad estrazione con solvente (generalmente propano), ottenendo precipitazioni di sostanze asfaltiche. Il risultato di questa lavorazione consente di ottenere leganti bituminosi utilizzabili direttamente o miscelabili con bitumi più tenui.

L'ultimo processo evidenziato nella precedente figura 2.1, è l'ottenimento di bitumi da processi di ossidazione. Tale processo viene applicato generalmente a residui aventi una viscosità inferiore a quella dei bitumi. Consiste nel sottoporre il bitume distillato, con alto indice di penetrazione (superiore a 100 dmm a sottolinearne la bassa viscosità), ad una corrente d'aria calda a temperature comprese tra i 200° e i 300°C. Questo procedimento produce una deidrogenazione del bitume, con conseguente formazione di acqua e aumento della fase asfaltica. I leganti bituminosi che si ottengono da questa particolare lavorazione sono meno suscettibili alle variazioni di temperature e si differenziano da quelli ottenuti dalla distillazione diretta perché, a parità di indice di penetrazione, hanno un punto di rammollimento superiore, inoltre risultano essere meno duttili e più elastici. Pertanto il loro uso è privilegiato in settori particolari, e non sono in genere adatti per usi stradali.

2.2.2 Bitumi modificati

La necessità di realizzare miscele di conglomerato bituminoso più performanti sotto l'azione dei carichi esterni, ma anche sotto l'influsso delle condizioni atmosferiche e ambientali al contorno, la necessità di ottenere pavimentazioni stradali la cui vita utile fosse la più lunga possibile, ha portato allo sviluppo di leganti bituminosi le cui caratteristiche reologiche risultassero migliorate. Gli obiettivi alla base della modifica reologia di un legante bituminoso, consistono nella riduzione della suscettibilità termica, ossia nell'innalzamento del punto di rammollimento e nell'abbassamento del punto di rottura Fraas. In altri termini, la modifica risulta essere necessaria per aumentare l'intervallo di elastoplasticità del legante bituminoso contenuto nella miscela di conglomerato bituminoso in esercizio.

Le caratteristiche che dovrebbe avere un legante bituminoso ideale, e a cui dovrebbe tendere il risultato della modifica di un bitume sono:

- Una elevata e costante consistenza al variare delle temperature di esercizio;
- Minore consistenza alle più basse temperature di esercizio.

Ovvero il legante ideale dovrebbe avere un comportamento più rigido alle alte temperature e più elastico alle basse temperature. Un bitume modificato riesce a posizionarsi in termini prestazionali tra un legante tal quale ed uno ideale. La modifica di un legante bituminoso deve inoltre assolvere ad altri importanti obiettivi che possono essere nell'ordine:

- il miglioramento dell'adesione tra inerte e bitume;
- il miglioramento della resistenza all'invecchiamento dovuto all'ossidazione e agli agenti esterni;
- il miglioramento delle caratteristiche visco-elastiche in opera

Tutti questi obiettivi, se raggiunti, si traducono in termini di migliori prestazioni meccaniche della miscela di conglomerato bituminoso messa in opera, una maggiore durata della vita utile della pavimentazione, e la possibilità di poter far affidamento ad un legante bituminoso tale da prestarsi alla progettazione di strati di pavimentazione speciali.

Per ottenere tutto ciò, è necessario modificare il legante bituminoso. In campo internazionale sono ormai riconosciuti diversi metodi che consentono di ottenere, da un bitume ordinario, un bitume tal quale che presenti le caratteristiche di cui sopra. I metodi principalmente utilizzati sono di seguito riportati:

- *utilizzo di additivi minerali*: quali filler di natura calcarea, talco. Polvere di amianto, cemento normale, ceneri volatili ottenute dalla combustione di carbone, zolfo;
- *utilizzo di modificanti organici*: polvere di roccia asfaltica, asfalti naturali, polvere di asfalteni, composti organici-metallici, attivanti di adesione denominati in gergo tecnico “dopes”, attivanti chimici funzionali (sigla ACF);
- *utilizzo di polimeri di origine naturale e sintetica*: in campo industriale l'utilizzo più frequente riguarda gli elastomeri termoplastici come lo stirene-butadiene-stirene (SBS), e in misura l'uso di etilene-vinilacetato (EVA).

La modifica di un legante bituminoso richiede la compatibilità del legante stesso a legarsi intimamente, a livello molecolare, con le molecole dell'additivo che si sceglie per effettuare la modifica. I risultati di tale interazione possono dar luogo a tre diversi risultati:

1. *Miscela eterogenea*. Questo risulta essere la situazione più probabile nella quale il polimero ed il legante bituminoso si dimostrano essere incompatibili a livello molecolare. In tale situazione, ciò che si ottiene è una miscela i cui elementi risultano essere separati e non si hanno le caratteristiche tipiche di un legante stradale.
2. *Miscela totalmente omogenea*. È il caso meno frequente rappresentativo della compatibilità perfetta. In questo caso gli olii del bitume disciolgono perfettamente il

polimero distruggendo le interazioni inter-molecolari. Il legante risultante presenta una grande stabilità, ma le proprietà ottenute dalla modifica risultano essere di poco superiori a quelle del legante bituminoso di origine. Aumenta solo la sua viscosità quindi anche questo risultato non è il più ricercato.

3. *Miscela micro-eterogenea*. La miscela è costituita da due fasi distinte finemente sovrapposte. E' il caso della compatibilità ricercata ed ideale che permette di conferire al bitume delle caratteristiche e prestazione effettivamente modificate rispetto al legante bituminoso usato come base di partenza. In questo sistema il polimero modificante subisce una sorta di “rigonfiamento” in quanto assorbe una parte delle frazioni oleose del legante bituminoso per formare una fase polimero distinta dalla fase di bitume residuo costituita dalle frazioni pesanti del legante stesso (ad esempio gli olii rimanenti, le resine e gli asfalteni).

Da questa disamina risulta necessario per ottenere miscele composte da bitume-polimero, ricordare che:

- *non esiste un bitume di tipo universale*: ovvero non esiste una tipologia o classe di legante bituminoso che possa assicurare e quindi garantire la compatibilità e la stabilità della miscela composta con il polimero modificante;
- generalmente i migliori risultati in termini di modifica si ottengono utilizzando *leganti bituminosi provenienti da distillazione diretta*, e meglio ancora con le gradazioni più molli rispetto a quelle più dure;
- la compatibilità tra il bitume ed il polimero modificante e la stabilità delle miscele ottenute sono comunque connesse alla natura e alla composizione della chimica (in particolare dei gruppi di idrocarburi) del bitume ed alla natura della sua struttura colloidale, così come analogamente risultano essere connesse alla natura, alla composizione e al dosaggio del polimero modificante.

La scelta dell'additivo per la modifica dei leganti bituminosi più diffusa ad oggi, è senz'altro quella relativa all'utilizzo dei polimeri. Esistono però dei requisiti che i polimeri devono rispettare affinché la miscela risultante presenti le caratteristiche ricercate e richieste dalla modifica, ovvero:

- essere compatibili con il bitume scelto come base per la modifica;
- cercare di migliorare le proprietà di adesione tra bitume ed inerti e non peggiorarle
- possedere una sufficiente stabilità termica, ovvero non degradarsi o decomporsi alle alte temperature necessarie per eseguire la miscelazione secondo i canoni;
- possibilmente non devono innalzare la viscosità del legante bituminoso di partenza a livelli tali da non consentire l'ordinaria lavorabilità a caldo (mescolamento con gli inerti);

- essere resistenti all'azione degradante degli agenti atmosferici esterni e non provocare un aumento del normale fenomeno dell'invecchiamento in opera dei leganti bituminosi, ma in qualche misura devono cercare di ridurlo.

I polimeri che essenzialmente risultano essere compatibili ai leganti bituminosi, e che possedendo le caratteristiche appena menzionate sono anche i più utilizzati sono i seguenti:

- *plastomeri*: si tratta di copolimeri di etilene e di acetato di vinile (EVA) di differenti gradazioni in funzione della percentuale di vinile e della massa molecolare (riscontrabile attraverso l'indice di fluidità);
- *elastomeri termoplastici*: i più noti sono i copolimeri in catene di stirene e butadiene (SBS). Si distinguono per la percentuale di stirene, per la massa molecolare e per la loro configurazione lineare o radiale. E' possibile riscontrare anche copolimeri di stirene e isoprene (SIS).

2.2.3 Bitumi schiumati

Una variante al bitume tradizionale è invece costituita dal bitume flussato, detto anche schiumato. Storicamente fu studiato per la prima volta sul finire degli anni '50 dal professore Ladis H. Csanyi, dell'Iowa State University, degli Stati Uniti [12]. La schiumatura del bitume avveniva tramite l'iniezione, ad alta pressione e temperatura, di vapore acqueo all'interno di un flusso caldo di bitume. Negli anni '70, fu sviluppato invece, dalla Mobile Oil Australia, un sistema di schiumatura a bassa pressione, che prevedeva l'iniezione di acqua fredda all'interno di un flusso di bitume caldo, passando per una speciale camera di espansione. Con il decadimento del brevetto della Mobile Oil Australia, nel 1991, diversi enti di ricerca e gruppi scientifici, effettuarono delle modifiche, sviluppando delle tendenze all'abbandono delle alte pressioni e facendo uso controllato di additivi. Il bitume schiumato trova oggi grande applicazione nei processi di riciclaggio a freddo, ma l'effetto di schiumatura è presente ed è offerto anche in alcune delle tecnologie di produzione di conglomerati bituminosi “tiepidi”, come verrà trattato nel seguito.

Il bitume schiumato è un sistema bifasico composto dal 97-98% c.a. in peso di legante bituminoso, da vapore acqueo nella percentuale da 1-3% e da additivi in quantità variabile, la cui presenza nella miscela è temporanea in quanto hanno una durata transitoria. Per ottenere il bitume schiumato è necessario iniettare all'interno di una camera di espansione del bitume surriscaldato alla temperatura di c.a. 170-180°C insieme a dell'acqua fredda e/o tiepida. I due fluidi, miscelandosi l'un l'altro vengono iniettati tramite un particolare iniettore, verso l'esterno

della camera di espansione. L'acqua, in condizioni di pressione atmosferica, si vaporizza istantaneamente nell'atto di uscire dalla camera di espansione, e le molecole di bitume si stirano formando una pellicola dello spessore di c.a. 0,01 mm. L'utilizzo di questa tecnica è necessaria per alterare le proprietà fisiche del legante bituminoso. Infatti quando l'acqua fredda viene iniettata nel bitume caldo si trasforma in vapore acqueo, il quale viene trattenuto all'interno di numerosissime e microscopiche bollicine di bitume. Questo processo aumenta notevolmente la superficie specifica del legante bituminoso, ne abbassa la viscosità e lo rende particolarmente adatto alla miscelazione con inerti freddi, tiepidi e/o umidi. Poiché l'effetto di schiumatura dura pochi minuti, dopo i quali il legame tra bitume e vapore acqueo viene meno, la miscelazione con gli inerti deve avvenire con una certa sollecitudine al fine di avere la sicurezza di miscelare un bitume schiumato.

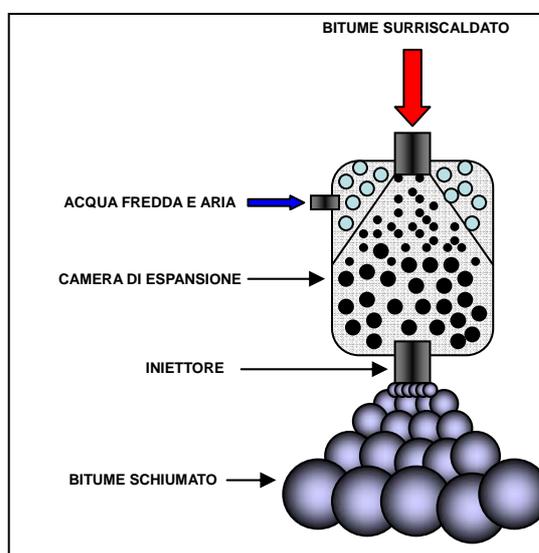


Fig. 2.2 - Rappresentazione schematica del processo di formazione del bitume schiumato

I principali requisiti di un bitume schiumato o flussato sono:

- Il rapporto di espansione (ER_m): è il rapporto tra il valore osservato di schiuma in funzione del volume di bitume liquido iniettato all'interno della camera di espansione;
- Il tempo di semi-trasformazione ($t_{1/2}$): è il tempo, valutato in secondi, a partire dal momento in cui la schiuma raggiunge il massimo volume, fino all'istante in cui si riduce fino a metà del volume massimo stesso.

Il primo parametro, ovvero l'indice di espansione ER_m risulta essere governato dai seguenti fattori:

- La temperatura del legante bituminoso;
- Il quantitativo di acqua iniettata nella camera di espansione;
- Il diametro degli iniettori;
- La natura e la tipologia di bitume;
- La pressione alla quale avviene la miscelazione.

Possibili variazioni nel rapporto di espansione, comportano una variazione della viscosità del legante bituminoso durante la miscelazione, con una forte influenza sul grado di dispersione del legante, mentre le variazioni del tempo di semi-trasformazione $t_{1/2}$ sono legate al tempo ottimale per la miscelazione prima che la schiuma collassi al suo stato originario di semplice legante.

Il coefficiente di espansione può assumere sia valori circa nulli, come nel caso dei leganti bituminosi con bassa attitudine alla schiumatura, che valori dell'ordine di 8-10 nelle situazioni ordinarie, fino a valori prossimi a 20 e/o 30, per particolari tipologie di bitumi decisamente adatti alla schiumatura. Il tempo di semi-trasformazione, indica il tempo di cui si dispone per poter confezionare la miscela di conglomerato bituminoso, nella certezza di miscelare un bitume ancora sotto effetto della schiumatura, con gli inerti. Se questo tempo risulta essere molto breve, il bitume ritorna alla sua fase liquida e si unisce intimamente con il filler presente nella miscela di inerti, dando vita a quelle formazioni di forma sferica che prendono il nome di “lumps”. Altresì avere un bitume schiumato con elevato valore del tempo di semi-trasformazione, non risulta essere necessariamente un handicap, ma ciò si ottiene unitamente ad una diminuzione del rapporto di espansione. Infatti il rapporto che lega i due parametri caratterizzanti un bitume schiumato è inversamente proporzionale.

La letteratura scientifica consiglia di utilizzare un tempo di semi-trasformazione non inferiore ai 12 secondi. Un ulteriore parametro utile al fine di caratterizzare in maniera completa le performance del bitume immesso tramite schiumatura all'interno di una miscela di conglomerato bituminoso, è l'Indice di Schiuma (FI). Ciò che influenza la predisposizione alla schiumatura di un legante bituminoso è riassunto nel seguente elenco:

- Dal volume di schiuma prodotta;
- Dalla quantità di acqua adoperata;
- Dalla temperatura di schiumatura del bitume.

2.2.4 Le emulsioni bituminose

L'emulsione è una miscela costituita da due fasi: la prima continua costituita dall'acqua, e la seconda dispersa costituita dal bitume. Dal punto di vista scientifico, un'emulsione è un sistema eterogeneo “*termicamente instabile*”. Possiede infatti una stabilità minima che può essere aumentata tramite l'aggiunta di opportuni agenti che abbassano la tensione superficiale tra le due fasi, favorendo la dispersione.

Il Bitume utilizzato per la realizzazione delle emulsioni è bitume *tal quale* o bitume *modificato* tramite l'aggiunta di polimeri eventualmente flussati o fluidificati. In passato le emulsioni venivano realizzate con l'uso di bitume ad alto valore di penetrazione, quindi molto tenero, oggi invece si riesce ad emulsionare bitumi di qualsiasi grado di consistenza, comprese quelle più dure. Il contenuto di bitume in un'emulsione è variabile, ma il range di variabilità è compreso tra il 50% e il 70%, anche se in Italia esiste un limite fiscale che impone come limite superiore un valore del 69%.

I Fluidificanti vengono generalmente miscelati insieme al bitume. In passato venivano usati come fluidificanti, oli di catrame di carbon fossile. Attualmente invece, tali prodotti sono stati banditi in quanto considerati prodotti pericolosi, e non possono essere assolutamente utilizzati. Per tale motivo vengono utilizzati prodotti oleosi a bassa viscosità.

L'Acqua usata nella realizzazione dell'emulsione, non deve contenere né impurità organiche, né minerali. In genere si utilizza acqua di pozzo o di acquedotto, ma in alcuni casi è necessario trattare l'acqua per renderla della durezza adeguata. Ciò si ottiene sostituendo alcuni ioni contenuti nell'acqua con altri.

ACF: Attivanti Chimici Funzionali o Tensioattivi sono un prodotto chimico definito “tensioattivo”, che ha la funzione di abbassare la tensione superficiale fra bitume ed aggregati consentendo così al bitume di ricoprire perfettamente il materiale lapideo, indipendentemente se la sua natura sia acida o basica. Sono prodotti chimici classificabili in base al loro comportamento in dissociazione con l'acqua, che prima favoriscono la dispersione del bitume in acqua, poi dopo la rottura, favoriscono l'adesione del bitume con gli inerti. Si caratterizzano per la loro consistenza liquida o pastosa che ne condiziona la manipolazione, lo stoccaggio ed il dosaggio. Sono costituiti da molecole caratterizzate dalla presenza di due “gruppi” con affinità opposte:

- un gruppo polare (COO^- oppure NH_3^+) che gli conferisce proprietà *idrofile*, rendendoli affini all'acqua;
- una catena idrocarburica apolare $\text{R} = \text{CH}_3(\text{CH}_2)_n$ che gli conferisce proprietà *lipofile*, che li rende affini ai grassi, ovvero al bitume.

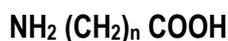
Esistono *attivanti chimici funzionali anionici* caratterizzati dall'aver la parte polare caricata negativamente (saponi di acidi grassi):



Esistono anche *attivanti chimici funzionali cationici* caratterizzati dall'aver la parte polare caricata positivamente (ammine non aromatiche o Sali di ammonio):



Esiste anche una terza classe di tensioattivi detti “Nonionici o Anfolitici”, che sono costituiti da proteine o amminoacidi che manifestano la loro polarità in base alle caratteristiche di pH del mezzo nel quale sono inseriti. La loro formula chimica è la seguente:



E' importante sottolineare che gli ACF sono insolubili in acqua, e pertanto necessitano di essere trasformati in “saponi” per permettere lo scioglimento nella fase disperdente (l'acqua appunto).

A tal fine si fanno reagire o con acido cloridrico in concentrazione del 32% nello specifico delle emulsioni acide; oppure con soda per quelle di pH basico. Il fenomeno dell'adesione tra bitume ed inerte costituisce il punto critico di tutto il processo di realizzazione di una pavimentazione stradale. L'utilizzo dell'attivante d'adesione provvede a:

- abbassare la tensione interfacciale fra bitume ed inerte;
- promuovere reazioni che favoriscono un legame più forte, di tipo chimico, tra il bitume e gli inerti;

L'utilizzo dell'ACF permette di ovviare ad una serie di inconvenienti riscontrabili nella produzione e nella posa in opera dei conglomerati bituminosi, quali:

- Favorisce l'adesione del bitume anche in presenza di aggregati difficili da coprire;
- Facilità di messa in opera del conglomerato prodotto soprattutto alle basse temperature ed in presenza di umidità;
- Da la possibilità di eseguire lavori di stesa a grandi distanze dai cantieri di confezionamento;
- Riduce la tendenza dei conglomerati al fenomeno dell'ormaiamento;
- Riduce i fenomeni di spogliamento e di sgranamento;
- Consente di ridurre il rapporto bitume/inerte.

Il principio usato per la classificazione delle emulsioni bituminose non è unico, ma si può basare su alcuni parametri tipici delle emulsioni, quali: *carattere ionico* dell'emulsione, *velocità di rottura*, e contenuto di *bitume residuo*.

- Classificazione secondo il carattere ionico: i tensioattivi introdotti nell'emulsione si possono raggruppare in anionici e cationici, in base alla carica elettrica che essi conferiscono alle particelle di bitume, quindi si avranno:
 - o Emulsioni bituminose anioniche (basiche) con carica⁻
 - o Emulsioni bituminose cationiche (acide) con carica⁺
- Classificazione secondo la percentuale di bitume residuo: si classificano in base al rapporto volumetrico percentuale di bitume disperso nella soluzione sul volume totale. In commercio si trovano emulsioni con i seguenti valori percentuali di bitume residuo:

50%	55%	60%	65%	69%
------------	------------	------------	------------	------------

Tab. 2.5 – Percentuali di bitume riscontrabili nelle varie emulsioni bituminose

- Classificazione secondo la velocità di rottura: dove per “rottura” si intende il momento in cui l'acqua si separa dal bitume ed avviene il fenomeno di presa. Per questo si avranno Emulsioni Rapide (R), Medie (M) e Lente (L), ma anche Emulsioni Super Rapide (RR) e Sovrastabilizzata (LL).

Le proprietà delle emulsioni si possono distinguere in due gruppi distinti:

- Proprietà intrinseche: si tratta di quelle proprietà che dipendono esclusivamente da se stesse e non dalle sostanze minerali con le quali vengono utilizzate. Tali proprietà sono appunto:
 - o *la viscosità*: essa dipende dalla concentrazione di bitume disperso, dal petrolio di origine e dall'emulsionante utilizzato.
 - o *la stabilità allo stoccaggio*: un'emulsione stabile non si separa nei suoi elementi costituenti. Un fattore che influenza questa proprietà in maniera determinante è granulometria dell'emulsione che a sua volta dipende da parametri quali: tipologia e quantità di emulsionanti (tensioattivi), pH della fase acquosa, origine e gradazione del bitume.
- Proprietà estrinseche: sono quelle proprietà legate al loro comportamento nelle diverse tipologie di impiego. Esse sono:
 - o *la velocità di rottura*: è la velocità con la quale avviene la separazione del bitume con l'acqua, ovvero il fenomeno elettrofisico di separazione delle due fasi. La rottura si sviluppa attraverso le seguenti fasi: decantazione (sedimentazione dei

globuli di bitume); flocculazione (avvicinamento dei globuli sedimentati); coagulazione (fusione dei globuli di bitume flocculati e formazione del coagulo). La presa invece è il fenomeno successivo alla coagulazione che si verifica quando l'emulsione è in contatto con gli inerti.

- *l'adesione*: essa dipende dalla carica elettrostatica conferita dagli emulsionanti ai globuli di bitume ed è funzione della temperatura e degli eventuali agenti perturbatori, quali ad esempio la polvere.

La produzione delle emulsioni bituminose deve avvenire in impianti che consentano la frantumazione del bitume in particelle di dimensioni piccolissime, dell'ordine di alcuni micron, che conferiscano cariche elettriche alle stesse particelle, dotandole di forza repulsiva le une verso le altre.

2.3 La caratterizzazione dei leganti bituminosi: generalità

2.3.1 Introduzione

I leganti bituminosi sono stati utilizzati nella produzione di conglomerati stradali per almeno cento anni, ed in questo periodo sono stati utilizzati diversi metodi di caratterizzazione del legante. La caratterizzazione dei leganti ad uso stradale, viene tuttora effettuata, in Italia ed in Europa, attraverso metodi tradizionali che in certi casi risalgono alla fine del 1800 (come la prova di penetrazione). Ci si rende sempre più conto che le misure “classiche” di palla e anello, duttilità, viscosità dinamica e penetrazione, non sono sufficienti a prevedere il comportamento di un legante stradale prima della sua posa in opera. Anche la loro estensione allo studio dei bitumi modificati con polimero (PMB) solleva molti dubbi, che impongono attenzione nell'applicazione di queste metodologie. Per cercare di risolvere questo problema, la ricerca tenta di mettere a punto delle tecniche che misurino direttamente delle proprietà reologiche fondamentali.

La reologia è lo studio dello scorrimento e della deformazione, più propriamente delle relazioni che intercorrono tra la forza applicata ad un materiale e le deformazioni che essa provoca nel materiale stesso. La normativa statunitense SHRP, facente parte del sistema Superpave, ha il merito e la peculiarità di aver posto le basi per una visione prestazionale dei leganti stradali.

La normativa sui leganti sviluppata con Superpave ed oggi in uso negli Stati Uniti è definita di tipo prestazionale, perché sfruttando proprio le proprietà reologiche del legante, permette la classificazione dei leganti secondo criteri che tengono conto di quelle che saranno le prestazioni

richieste al materiale una volta messo in opera.

E' importante notare come non si parla più di bitumi, ma di leganti, dovendo risultare chiaro che un legante per usi stradali possa anche non essere un bitume tal quale, ma un legante a base di bitume, eventualmente modificato ma pur sempre rientrante nei limiti proposti. In pratica la normativa prevede di effettuare una serie di prove reologiche dinamiche (con diverse geometrie) sul legante stradale. I risultati dei test danno la possibilità di collocare il legante nella giusta “categoria prestazionale” (performance grade PG).

Con questa nuova metodologia di prova si è sostituito il concetto di valutazione della consistenza a varie temperature, con criteri che premiano determinazioni di tipo reologico.

La conseguenza più importante a questo tipo di approccio è che esso garantisce la possibilità di creare una relazione tra le caratteristiche ottenute dai test e il comportamento della pavimentazione una volta realizzata. L'elemento di più forte innovazione nella strategia dello SHRP, sta nell'aver realizzato una procedura che dovrebbe garantire delle buone prestazioni del legante, in un dato intervallo di condizioni d'utilizzazione, indipendentemente dalla sua composizione e dalla sua modifica o meno. Nello scegliere il legante più adatto ad una specifica applicazione quindi, ci si interessa a quali caratteristiche il materiale deve avere per rispondere efficacemente alle sollecitazioni alle quali sarà sottoposto. La differenza tra le varie classi di legante non sta nella soddisfazione di diversi criteri, ma nella temperatura alla quale tali criteri devono essere soddisfatti. I test che stabiliscono la classe d'appartenenza del legante, sono effettuati all'interno di un vasto campo di temperature e condizioni d'invecchiamento, per poter così simulare cosa accadrà al legante sotto diverse condizioni climatiche e di carico, una volta posto in opera.

Attraverso tali test vengono tenuti in considerazione gli effetti sulle proprietà del legante dovuti alla variazione di temperatura, al tipo di carico ed all'invecchiamento. Il legante, infatti, influenza vari aspetti del comportamento del conglomerato in condizioni d'esercizio, come deformazioni permanenti, rottura da fatica e fessurazioni a basse temperature. La normativa Superpave in definitiva ha l'obiettivo di guidare la scelta del progettista verso un legante che influisca positivamente sul comportamento della pavimentazione

2.3.2 Il modello VLE

La funzionalità delle miscele di conglomerato bituminoso “tiepido” è basata sul concetto della riduzione di viscosità del legante bituminoso nonostante l'abbassamento delle temperature operative, attraverso varie metodiche al variare della tipologia di warm – mix utilizzata. La

riduzione di viscosità consente quindi di avere un legante bituminoso fluido in grado di rivestire completamente gli inerti che costituiscono lo scheletro solido della miscela, così come avviene per le miscele tradizionali a caldo (hot – mix) a temperature sensibilmente superiori. Inoltre la riduzione di viscosità ottenuta anche a temperature ridotte, facilita la lavorabilità e l'addensabilità delle miscele “tiepide”, favorendone la compattazione in sito, in modo tale da garantire le prestazioni, in termini di durata e di resistenza meccanica, che vengono offerte dalle miscele tradizionali a caldo. Quindi le caratteristiche fisiche di un legante bituminoso descrivono in maniera diretta il comportamento che esso assumerà all'interno di una miscela di conglomerato bituminoso. A tal proposito una caratterizzazione rigorosa delle proprietà del legante bituminoso che compone la pavimentazione stradale, risulta essere quanto mai necessaria.

Una caratterizzazione completa di un legante per uso stradale occorre valutare le seguenti caratteristiche fisiche:

- la consistenza;
- il comportamento sotto effetto di sforzi esterni (studio reologico);
- il comportamento alle basse temperature;
- l'invecchiamento.

L'aspetto più importante, sottolineato dalle ricerche più raffinate rinvenibili in letteratura scientifica internazionale, è senza dubbio lo studio reologico del legante bituminoso. La reologia è la scienza che studia il comportamento dei materiali come i leganti per uso stradale. Consiste nello studio dello scorrimento e della deformazione, ma più propriamente delle relazioni che intercorrono tra la forza applicata ad un materiale e le deformazioni che essa provoca nel materiale stesso.

Il concetto di viscosità può essere espresso in prima istanza come, la resistenza che offre un fluido ad una azione esterna di taglio. Tale resistenza può essere anche intesa come attrito interno dovuto alle forze di coesione presenti tra le molecole del fluido. Poiché il concetto di viscosità è fondamentale per la trattazione del tema in esame, risulta essere importante approfondire i concetti relativi a questa proprietà del legante bituminoso. Lo studio della caratterizzazione reologica esteso ai leganti bituminosi ha avuto ampio slancio sicuramente a metà degli anni '90 dal Consiglio nazionale di Ricerca degli Stati Uniti d'America (National Research Council, NRC), il quale istituì un ampio programma di ricerca sui materiali stradali, in particolare sui conglomerati e leganti bituminosi, denominato “Strategic Highway Research Program”, noto anche come programma SHRP [2] [3]. Le principali indagini di caratterizzazione delle proprietà fisiche dei leganti bituminosi sono state condotte in ottemperanza al raggiungimento di 2 importanti obiettivi:

1. sviluppare un metodo razionale in grado di descrivere le principali caratteristiche fisiche dei leganti bituminosi:
2. sviluppare metodi che potessero essere applicati a leganti condizionati al fine di simulare processi di invecchiamento e di danni provocati dall'umidità agli stessi.

In tale studio al legante bituminoso viene attribuito per ipotesi, per semplificarne lo studio già di per se molto complesso, un comportamento alle sollecitazioni esterne di tipo visco-elastico lineare (VLE) [2]. Tale assunzione semplifica notevolmente la modellazione del comportamento fisico dei leganti in termini di reologia e di rigidità. Per tale caratterizzazione è necessario introdurre il concetto di modello (matematico) visco-elastico lineare (VLE-model). Le ragioni che giustificano la necessità di utilizzare un modello matematico per l'analisi del comportamento viscoso elastico dei leganti bituminosi, sono riassumibili nei seguenti punti:

- La risposta meccanica del bitume, come di un qualsiasi altro materiale visco-elastico, è funzione continua della temperatura (T) e del tempo (t) e il suo comportamento complessivo è ottenibile tramite una serie teoricamente infinita di azioni di carico e lettura del dato relativo. Utilizzare quindi un modello matematico semplifica ad un limitato numero di variabili, questo comportamento.
- In alcune situazioni è necessario conoscere il comportamento del legante bituminoso a diverse frequenze di sollecitazione o temperature rispetto alle quale si hanno di dati. Un modello matematico rende possibile un simile approccio.
- Per prevedere le risposte meccaniche della miscela di conglomerato bituminoso posta in opera, è importante prevedere il comportamento sotto sforzo e fatica del legante al variare delle diverse temperature operative, dei livelli e frequenze di sollecitazioni esterne.

Per analizzare il comportamento visco-elastico di un legante bituminoso, è necessario valutare il suo comportamento in termini di tensioni e deformazioni indotte da carichi esterni. Al fine di valutare ciò, in laboratorio si eseguono test di carico (uni assiali, generalmente di allungamento di un campione da testare) e test di taglio. Tali test sono condotti sotto valori di carico e di fatica controllati. L'interpretazione delle risposte dei materiali a tali test, consente di stabilire il naturale comportamento dei materiali esaminati. Materiali per i quali il legame tra tensione e deformazione risulta essere lineare, sono definiti materiali elastici, e il loro comportamento è largamente indipendente dalla temperatura e dal tempo. Questi vengono caratterizzati attraverso l'uso del modulo elastico di Young. I fluidi invece detti Newtoniani sono fluidi ideali caratterizzati dal coefficiente di viscosità, e il loro comportamento viscoso è indipendente dalla natura dello sforzo di taglio. I materiali invece come i leganti bituminosi, presentano entrambe le caratteristiche, per

tale motivo sono definiti come fluidi visco-elastici e necessitano di test di caratterizzazione che tengano conto della natura degli sforzi di taglio indotti e della temperatura alla quale essi vengono testati. Una delle prove di laboratorio più semplici per caratterizzare il comportamento alle sollecitazioni esterne di un materiale, è la prova di creep. Per il leganti bituminosi il protocollo SHRP prevede l'utilizzo della prova del Bending Beam Rheometer (BBR) [3]. Essa prevede l'applicazione di un carico uni assiale di valore costante al tempo t_0 e la sua rimozione al tempo t_1 , su di un provino confezionato appositamente e dalla forma di una micro trave di forma prismatica. Questa prova serve per valutare il modulo di rigidezza allo scorrimento viscoso $S(t)$ alle basse temperature. Le differenti risposte in termini di deformazioni, classificano i materiali nelle diverse categorie, come è mostrato in fig. 2.3:

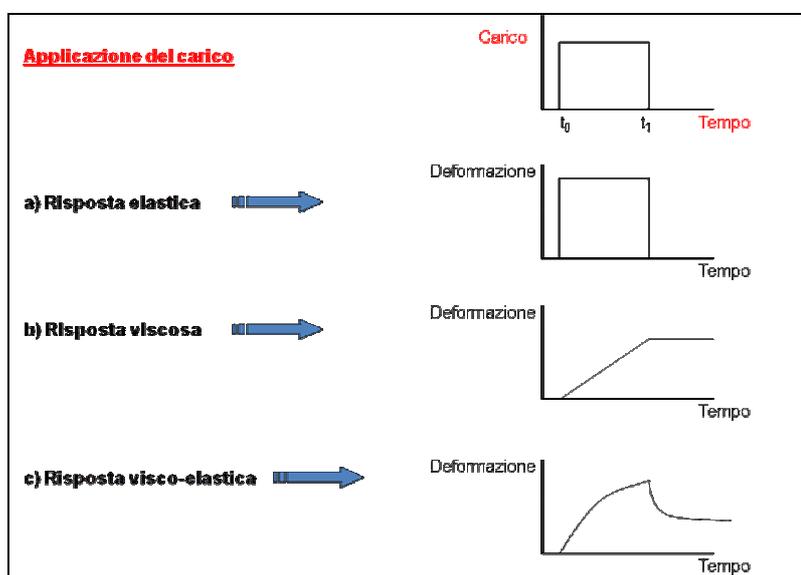


Fig.2.3 - Diversi comportanti ad una prova di Creep

Come si evince dai 3 diagrammi in fig. 2.3, un materiale perfettamente elastico, al momento dell'applicazione del carico all'istante t_0 , risponde con una deformazione costante nel tempo. All'atto della rimozione del predetto carico, al tempo t_1 , lo stato deformativo cessa di esistere, ripristinando la forma iniziale, in maniera perfettamente elastica (fig 2.3-a). Un materiale viscoso, al tempo t_0 presenta un valore di deformazione crescente nel tempo, e alla rimozione del carico al tempo t_1 corrisponde un valore di deformazione pari a quello relativo all'ultimo istante di carico. La deformazione non viene riassorbita (fig. 2.3-b). Un materiale visco-elastico invece (fig. 2.3-c) ha entrambe le componenti. Sotto la presenza di un carico di creep, presenta una deformazione iniziale assimilabile alla deformazione elastica, crescente però nel tempo. Al tempo t_1 , ovvero quando il carico viene rimosso, resta una parte della deformazione viene recuperata come nei materiali elastici, un'altra aliquota invece non viene riassorbita così per come accade nei materiali

viscosi. Le descrizioni appena esposte sono riferite a risposte lineari in cui la deformazione a qualsiasi temperatura e in qualsiasi lasso temporale, è direttamente proporzionale solo all'entità del carico applicato. Un comportamento non lineare, tipico dei materiali visco-elastici come i leganti bituminosi, risulta essere estremamente difficilmente da modellare dal punto di vista matematico. Altresì i modelli lineari approssimati per i più vari problemi di natura ingegneristica, offrono dei compromessi di semplicità accettabili per interpretare fenomeni ben più complessi.

2.3.3 La rigidità di creep – Test BBR

La prova di laboratorio più indicata per investigare in merito alle proprietà visco-elastiche di un legante bituminoso alle temperature ambientali, risulta essere, secondo protocollo SHRP, la prova del Bending Beam Rheometer (o BBR) nota anche come la prova di Creep [3]. Durante l'esecuzione di tale prova, come accennato in precedenza, un carico di 100 gr viene applicato in maniera costante nel tempo per 240 secondi, ad un provino predisposto per l'occorrenza di forma prismatica, e i risultati della inflessione dello stesso sono monitorati in continuo, in funzione del tempo. Lo studio dei risultati della prova di creep vengono generalmente analizzati attraverso lo studio del Modulo di Rigidità S , che è definito attraverso la seguente formula [2]:

$$S(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad (1)$$

dove:

- $S(t)$ = modulo di rigidità funzione del tempo [Pa]
- σ_0 = tensione uni assiale applicata, costante nel tempo [Pa]
- t = tempo di applicazione del carico [s]
- $\varepsilon(t)$ = deformazione risultante uni assiale al tempo t [m/m]

Sfruttando la teoria della trave semplice appoggiata appoggiata, è possibile ottenere l'equazione specifica della rigidità allo scorrimento viscoso $S(t)$ per il campione di legante bituminoso sottoposto a test BBR:

$$S(t) = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \varepsilon(t)}$$

dove:

- $S(t)$ = modulo di rigidezza funzione del tempo [Pa]
- P = carico applicato costante pari a 980 ± 20 mN, ottenuto usando un peso di 100 gr;
- L = lunghezza tra gli appoggi del travetto prismatico, ovvero la luce (102 mm);
- b = larghezza del travetto (12,5 mm);
- h = spessore del travetto (6,25 mm);
- $\epsilon(t)$ = deflessione al tempo t 0 60 secondi.

Nella seguente immagine in fig. 2.4 è rappresentato lo schema tipo di una prova utilizzando il Bending Beam Rheometer (BBR):

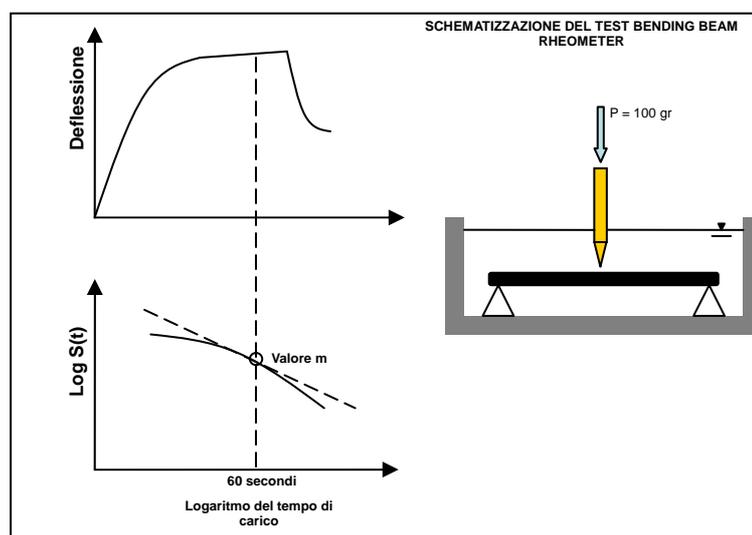


Fig. 2.4 - Schematizzazione di una prova BBR

Il valore m indica la suscettibilità della rigidezza al tempo $t = 60$ secondi e viene utilizzata per descrivere il rilassamento del legante bituminoso sottoposto ad un carico esterno flessionale. La prova tende a simulare la rigidezza del legante dopo essere stato sottoposto al carico per 2 ore alla minima temperatura di progetto. La rigidezza relativa agli scorrimenti viscosi (creep) è correlata alle sollecitazioni termiche in un conglomerato bituminoso e dovute al fenomeno del ritiro. Il valore m invece rappresenta la capacità del conglomerato ad attenuare queste sollecitazioni.

Un esempio di tipico legame tra il Modulo di rigidezza e il tempo, è riportato nella prossima immagine, in un diagramma con entrambe le scale logaritmiche. Per tempi molto brevi di applicazione di carico, la rigidezza del legante bituminoso tende ad un valore limite, definito

“*modulo vetroso*” (cit. anglosassone *glassy modulus*) [2], che assume un valore pari a circa 3 MPa per qualsiasi tipologia di legante bituminoso. L’aliquota “vitre” del modulo di rigidezza del bitume, è dovuta alla rigidezza dello scheletro compositivo del bitume, basato su legami carbonio-carbonio, dei quali le molecole dei leganti bituminosi sono largamente composti. Infatti molti altri polimeri le cui molecole sono basate sullo stesso tipo di legame, presentano un tratto della curva del modulo di rigidezza del tutto analogo.

All’aumentare del tempo di carico del campione sottoposto a creep, il modulo decresce con gradiente crescente fino a tendere ad un valore quasi nullo. A questo punto il legante bituminoso si comporta come un fluido ideale Newtoniano, e l’aliquota di deformazione permanente è direttamente proporzionale al carico applicato. L’asintoto tracciato nel tratto decrescente alla curva, prende il nome di asintoto viscoso. Se invece si traccia un asintoto orizzontale a partire dall’aliquota di modulo di rigidezza “vetroso”, fino ad intersecare l’asintoto viscoso, si ottiene in una grafico in scala log-log un punto che proiettato sull’asse delle ascisse da luogo al tempo t_c , detto “*crossover time*” [2]. La pendenza della curva del modulo di rigidezza in funzione del tempo, nell’intorno di questo punto, sarà prossima al valore di 0,5. Il valore t_c è un parametro fondamentale per lo studio in termini reologici del modulo di rigidezza dei conglomerati bituminosi.

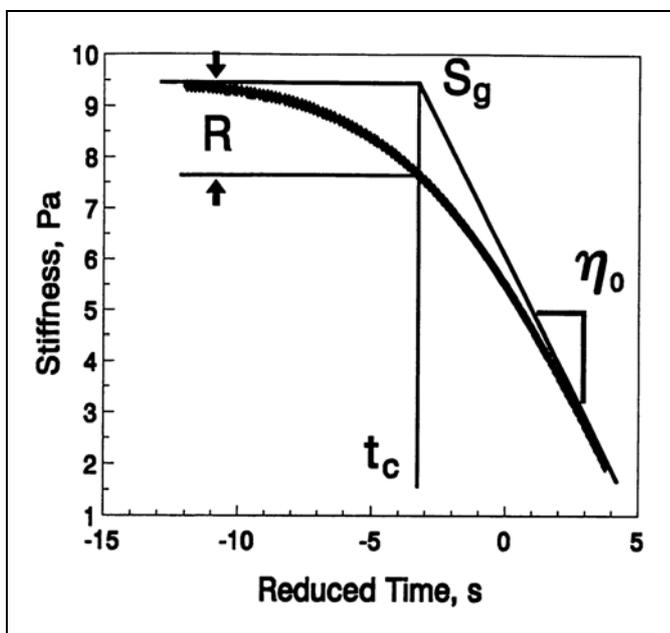


Fig. 2.5 - Diversi comportanti ad una prova di Creep

2.3.4 Lo studio dinamico della viscosità del legante bituminoso

Analizzando un fluido visco-elastico come il bitume, è necessario effettuare dei test meccanici di tipo dinamico. Questa tipologia di test si dividono in due categorie:

1. “a tensione controllata”;
2. “a deformazione controllata”.

La prova più comune e diffusa appartiene alla seconda categoria, ovvero a “deformazione controllata” o in termini anglofoni “strain controlled”. In tali prove di laboratorio una deformazione nota sinusoidale è applicata ad un provino di legante bituminoso, e la risposta dello stesso in termini di tensioni, è monitorata costantemente in funzione della frequenza del carico. Mentre nella tipologia a “tensioni controllate”, si applica un carico sinusoidale, e si esegue il monitoraggio delle deformazioni.

Le proprietà meccaniche dinamiche dei leganti bituminosi sono legate alle caratteristiche di deformabilità delle prove di creep, attraverso una notazione matematica complessa. Entrambe le caratteristiche analizzate parallelamente, forniscono una completa indicazione del comportamento visco-elastico dei leganti bituminosi.

Sia il modulo complesso G^* che il modulo di rigidezza sono degli indicatori della resistenza del bitume sottoposto ad una serie di combinazioni di carico.

Il primo risultato di un’analisi meccanica dinamica, è l’ottenimento del Modulo Dinamico Complesso G^* che attraverso un modello del tipo a “deformazione controllata” può essere espresso attraverso la seguente equazione:

$$G^*(\omega) = \frac{|\tau(\omega)|}{|\gamma(\omega)|} \quad (2)$$

Dove:

- $G^*(\omega)$ = Modulo Dinamico Complesso alla frequenza ω [Pa];
- $|\tau(\omega)|$ = valore assoluto dell’intensità della risposta allo sforzo dinamico di taglio, [Pa];
- $|\gamma(\omega)|$ = valore assoluto dell’intensità della deformazione dinamica a taglio applicata [m/m]

I moduli dinamici complessi sono valutati in termini di risposta a sollecitazioni al taglio. Un importante parametro risulta essere l’angolo di fase δ il quale rappresenta lo sfasamento tra la tensione di risposta e la relativa deformazione controllata applicata. In tab. 2.6 sono evidenziate le differenze tra i diversi fluidi:

Angolo di Fase δ	Tipo di comportamento
$= 0^\circ$	Comportamento elastico
$= 90^\circ$	Comportamento plastico
$0^\circ < \delta < 90^\circ$	Comportamento visco-elastico

Tab. 2.6 – Angolo di fase δ

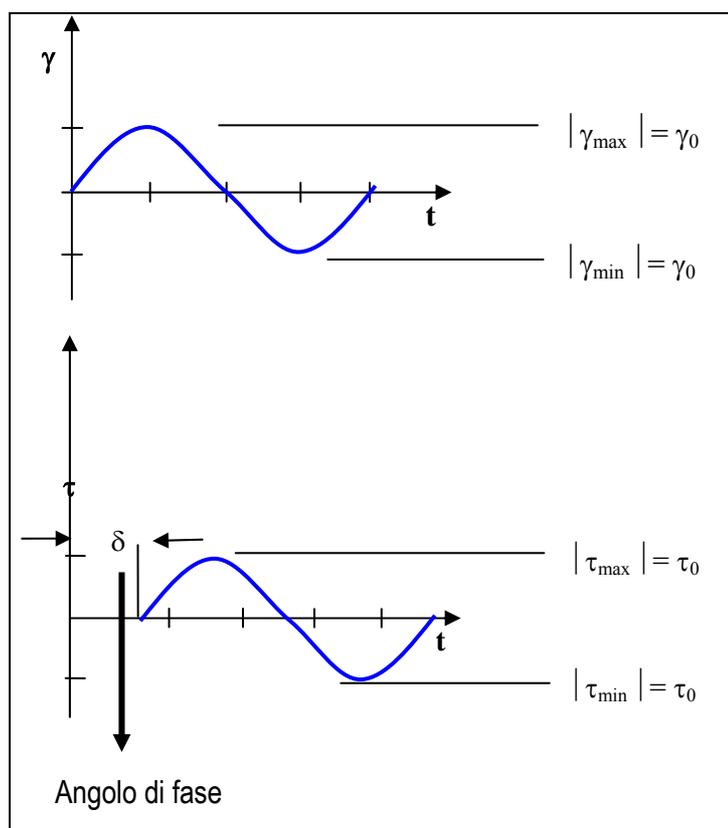


Fig. 2.6 - Rappresentazione grafica dell'angolo di fase

La determinazione del modulo complesso dinamico $G^*(\omega)$ e dell'angolo di fase δ avviene, secondo il protocollo SHRP SUPERPAVE [3], attraverso l'esecuzione del test di laboratorio denominato Dynamic Shear Rheometer – DSR – (Reometro dinamico a taglio), il quale testa le caratteristiche fisiche del legante bituminoso ad alte temperature di esercizio.

Com'è noto il legante è un materiale viscoelastico, che presenta quindi contemporaneamente le caratteristiche di un materiale elastico, e di uno viscoso. Il test DSR è utilizzato per caratterizzare il comportamento elastico e viscoso di un legante per uso stradale, si cerca cioè di ricavare, tramite delle variabili reologiche, una valutazione della capacità di resistere alle deformazioni

permanenti, ed alla rottura a fatica. In maniera sintetica si può affermare che per resistere alle deformazioni permanenti il legante deve presentare un comportamento rigido-elastico; per resistere alla fatica deve essere invece flessibile-elastico. La ricerca del punto d'equilibrio tra questi due comportamenti, sta alla base del test effettuato con il DSR.

Il principio su cui si basa questo test è semplice. Un campione di legante è inserito tra due piatti, uno oscillante ed uno fisso.

Il piatto oscillante ruota attorno ad un'asse: partendo dalla posizione A, il piatto ruota fino a portarsi nella posizione B, a questo punto il verso di rotazione si inverte e, ripassando per la posizione A, il piatto si porta nella posizione C.

L'oscillazione dal punto A al punto B al punto C, consiste in un ciclo. In fig. 2.7 è rappresentato uno schema esemplificativo:

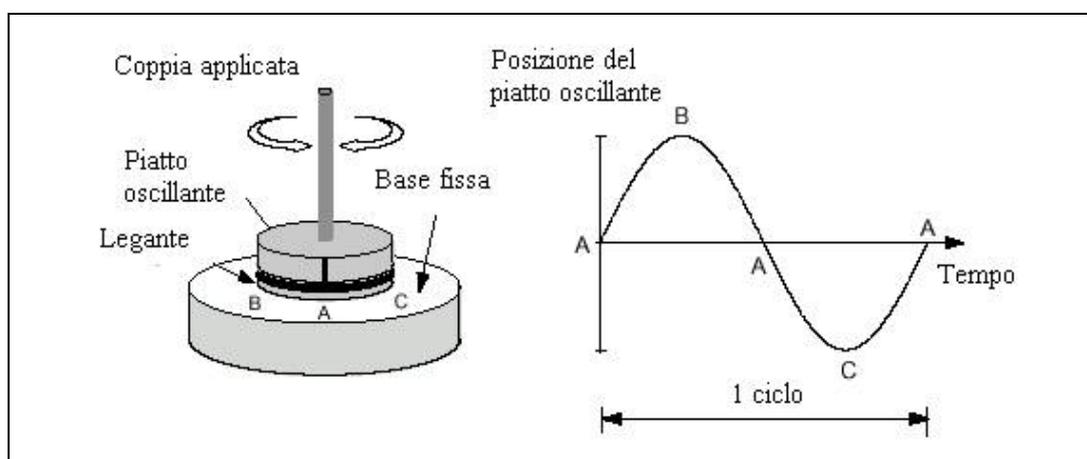
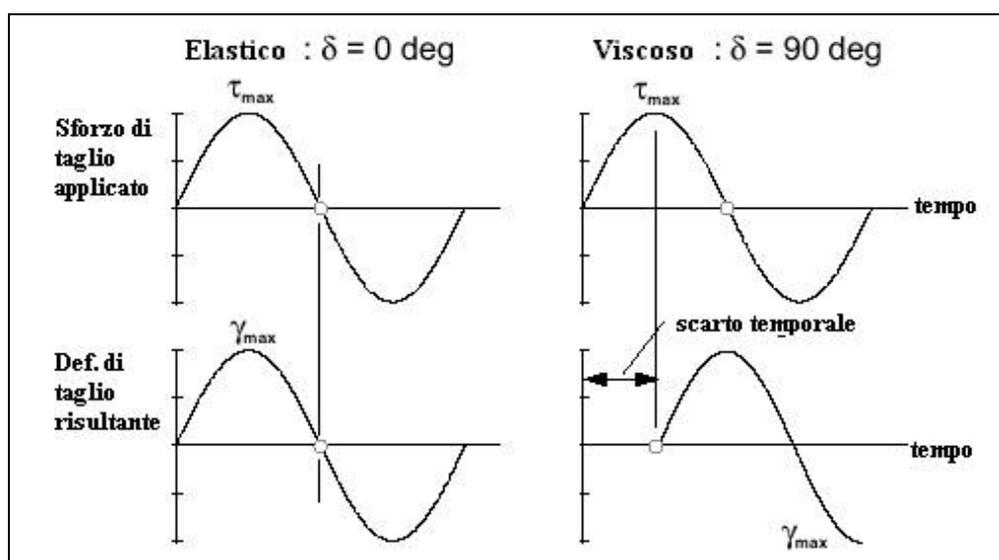


Fig. 2.7 - Rappresentazione grafica del test Dynamic Shear Rheometer DSR

Lo sforzo di taglio è applicato al campione attraverso il piatto oscillante, ed automaticamente l'apparecchiatura misura la risposta del legante in termini di deformazione di taglio. Se il legante fosse un materiale perfettamente elastico, la risposta alla sollecitazione seguirebbe immediatamente l'applicazione di quest'ultima, e il ritardo tra le due sarebbe nullo. Per contro un materiale perfettamente viscoso, presenterebbe un elevato ritardo nella risposta alla sollecitazione applicatagli:


 Fig. 2.8- Rappresentazione grafica dell'angolo di fase δ

Attraverso la relazione tra lo sforzo applicato, e la deformazione ottenuta, il reometro dinamico permette di calcolare i due importanti parametri, che forniscono informazioni importanti sul comportamento del legante, ovvero il modulo complesso dinamico $G^*(\omega)$ e l'angolo di fase δ . Esistono in letteratura altri 3 parametri necessari allo studio del comportamento visco-elastico dei leganti bituminosi. Questi parametri sono nell'ordine:

- Lo “storage modulus”: $G'(\omega)$
- Il “loss modulus”: $G''(\omega)$
- $\tan \delta$

Queste grandezze sono strettamente legate al Modulo Complesso $G^*(\omega)$ e l'angolo di fase δ , secondo le seguenti relazioni:

$$G'(\omega) = G^*(\omega) \cdot \cos(\delta)$$

$$G''(\omega) = G^*(\omega) \cdot \sin(\delta)$$

$$\tan(\delta) = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)}$$

Dal punto di vista grafico le relazioni tra il modulo complesso e le sue componenti è rappresentata in fig.2.9:

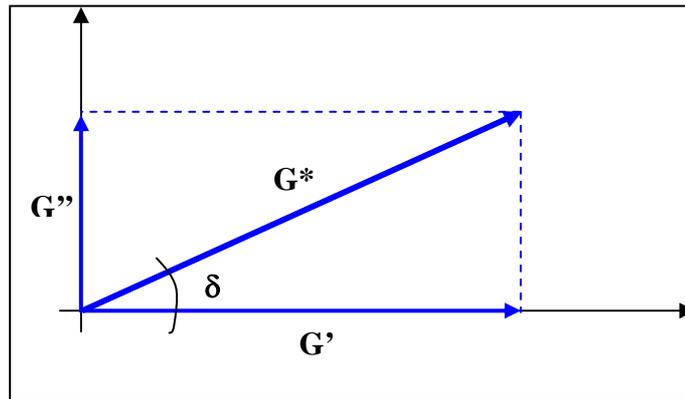


Fig. 2.9 - Rappresentazione grafica delle relazioni tra le componenti del modulo complesso e lo stesso

Lo “storage modulus” può essere inteso secondo la normativa SHRP, come la componente “in-fase” del modulo complesso $G^*(\omega)$ facendo riferimento alla relazione tra sollecitazione esterna e deformazione indotta nel legante visco-elastico. Il “loss modulus” invece rappresenta la componente “non in fase” del modulo complesso calcolato con test meccanici dinamici su leganti bituminosi. Sono spesso mal interpretati come rispettivamente: la componente elastica e viscosa del modulo complesso, inducendo in errore, in quanto secondo i protocolli SHRP, la componente elastica del legante è solo una parte dello “storage modulus”, mentre la componente viscosa è solo un’aliquota del “loss modulus”. In un qualsiasi diagramma di output di una prova meccanica dinamica, una qualsiasi grandezza in uscita è sempre plottata su di un grafico in funzione della frequenza ω . Il diagramma più comunemente diffuso tra la comunità scientifica del settore prevede la rappresentazione del modulo complesso dinamico $G^*(\omega)$ e dell’angolo di fase δ in funzione della frequenza ω , in un grafico in doppia scala logaritmica.

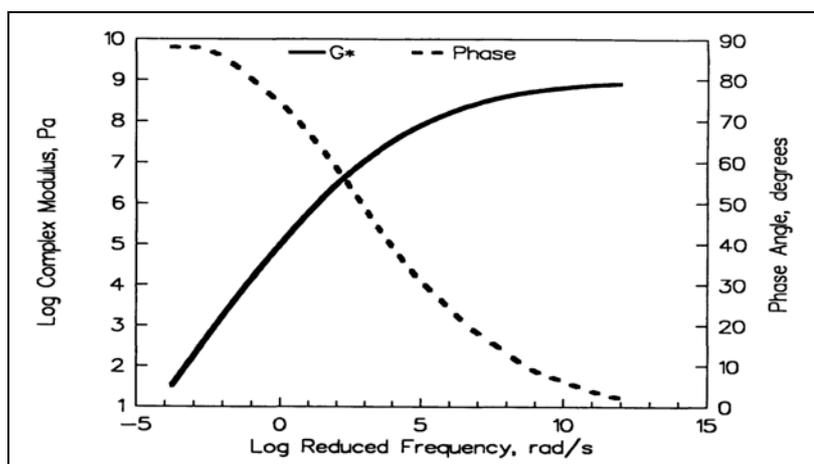


Fig.2.10 - Grafico di output di una prova dinamica meccanica eseguita su legante bituminoso

Analizzando il diagramma rappresentativo di un legante bituminoso tipo, per elevati valori di frequenza ω (espressa in rad/s), la curva del modulo complesso dinamico $G^*(\omega)$, tende ad un valore asintotico orizzontale che rappresenta il modulo “vetroso” a taglio. Tale modulo, rappresenta circa 1/3 del valore del modulo vetroso comune per tutti i leganti bituminosi precedentemente introdotto, ovvero circa 1 GPa. Per bassi valori di frequenza, la pendenza dell’andamento del modulo complesso $G^*(\omega)$ risulta essere pari a c.a. 45° , rappresentando in scala log-log un rapporto 1:1 con la frequenza ω . Ciò può essere interpretato come il raggiungimento del flusso viscoso completo, e il legante bituminoso in questa porzione di diagramma, può essere assimilato ad un fluido ideale Newtoniano. Nel range intermedio di frequenza, tra i due estremi descritti, il comportamento del legante sottoposto al test del reometro dinamico a taglio, presenta un comportamento che va da quello di un fluido, a quello rigido di un solido. In questa regione centrale, nell’intorno dell’intersezione tra l’asintoto viscoso e l’asintoto del modulo vetroso (vedi fig. 2.6 Diversi comportamenti ad una prova di Creep), la maggior parte della deformazione sarà del tipo elastico con il ritardo di riassorbimento. Il diagramma del modulo complesso dinamico $G^*(\omega)$ in funzione della frequenza ω , rappresenta lo specchio della curva della rigidità del legante bituminoso, sebbene vi sia una leggera traslazione verso il basso dovuta alla differenza tra il modulo a taglio e il modulo calcolato a prova di estensione. La frequenza di crossover ω_c , che è il valore di frequenza alla quale corrisponde un valore di $\tan(\delta)$ pari a 1, è l’inverso del tempo di crossover introdotto in precedenza relativamente alla prova di creep, quando la frequenza ω è espressa in Hertz o giri al secondo. Analizzando analogamente l’andamento della curva dell’angolo di fase δ in funzione della frequenza ω si nota che l’andamento è del tipo sinusoidale. A valori bassi di frequenza, l’angolo di fase assume un valore molto prossimo a 90° , di contro ad alti valori di frequenza di rotazione l’angolo di fase assume un valore di c.a. 0° . In corrispondenza della frequenza di crossover ω_c , l’angolo di fase assume circa il valore di 45° . L’angolo di fase ottenuto da test meccanici dinamici, risulta essere direttamente proporzionale, in una scala log-log, allo sviluppo della curva di rigidità ottenuta da una prova di creep, esprimendo l’ascissa dei tempi come $1/\omega$ quando la frequenza è espressa in Hertz. Questa conversione risulta essere necessaria per confrontare i risultati di una prova di caratterizzazione dinamica e di una prova di creep eseguita su leganti bituminosi. Un tipico andamento di una curva ottenibile dal test DSR è rappresentato in figura 2.11. Sono inoltre evidenziati tutti i parametri caratteristici della curva:

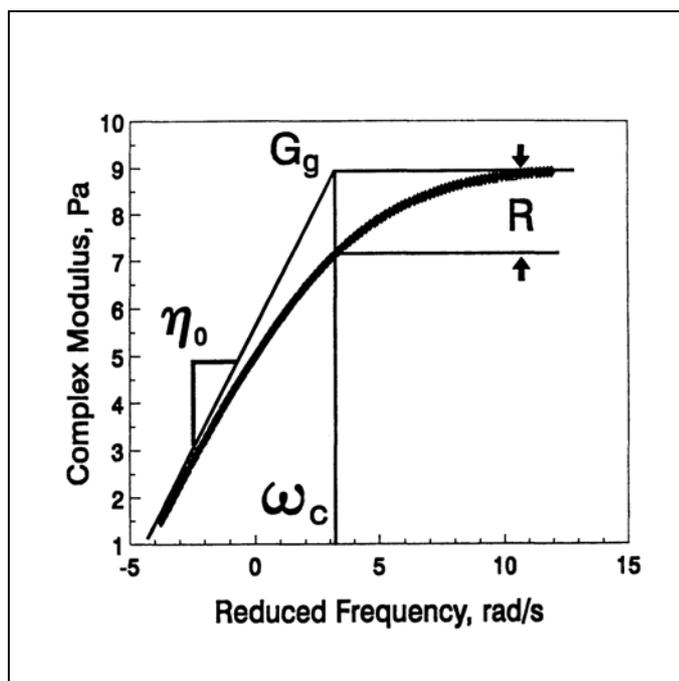


Fig. 2.11 - Tipica curva maestra ottenuta tramite test DSR per legante bituminoso

2.3.5 Conversione dei risultati delle Funzioni Visco-elastiche

Poiché i differenti moduli visco-elastici dei leganti bituminosi possono essere stimati a partire da diversi tipi di test meccanici e poiché tutti i diversi test sono necessari per valutare il comportamento dei leganti sotto diverse condizioni di carico, risulta essere comodo poter effettuare conversioni tra una funzione visco-elastica ed un'altra. La possibilità di convertire in forma matematica chiusa le diverse funzioni visco-elastiche di materiali reali, tra di loro, non esiste. Pertanto devono essere utilizzati metodi numerici o equazioni affette da approssimazioni accettabili. Questo approccio risulta essere in letteratura, il più adatto ed indicato [2]. Il metodo più semplice e diffuso per convertire il modulo complesso dinamico a taglio di una prova DSR, in un modulo di rigidezza desunto da una prova uniassiale, tipo quella di creep, richiede l'adozione delle seguenti 2 ipotesi:

1. il legante bituminoso deve essere considerato come un fluido incompressibile;
2. il legante si ipotizza avere un rapporto di Poisson pari a 0,5.

Queste due semplici assunzioni, consentono di esprimere il rapporto tra i moduli nella seguente formula:

$$E^*(\omega) = 3 \cdot G^*(\omega)$$

Dove:

- $E^*(\omega)$ = modulo complesso uni assiale o estensionale alla frequenza ω espresso in Pa;
- $G^*(\omega)$ = modulo complesso dinamico a taglio alla frequenza ω espresso in Pa.

Analogamente la deformabilità uniassiale o estensionale $D(t)$, può essere calcolata a partire dalla deformabilità a taglio $J(t)$, dividendo quest'ultima per un fattore di 3. Conversioni simili possono essere effettuate anche tra altri tipi di moduli a taglio ed estensionali, o tra deformabilità a taglio e uniassiale e/o estensionali, ricordando che quando viene assunta come ipotesi che il coefficiente di Poisson per il legante bituminoso è pari a 0,5, i moduli uniassiali e/o estensionali saranno sempre pari a tre volte i corrispondenti moduli complessi a taglio, mentre le deformabilità assiali e/o estensionali saranno sempre 1/3 delle corrispondenti deformabilità a taglio.

Sebbene questo metodo di conversione sia affetto da approssimazione, risulta essere sufficientemente efficace per ciò che concerne l'analisi dei leganti bituminosi in campo ingegneristico.

Un'altra importante equazione di conversione è tra la rigidità a creep e il modulo complesso a taglio. Nel 1954 Van der Poel nel definire la rigidità indicò che questa può essere trattata sia come l'inverso della deformabilità a taglio di creep al tempo di carico t , sia come il modulo dinamico uniassiale alla frequenza di carico $1/t$, la quale è basata sulla più semplice approssimazione tra la deformabilità a creep e il modulo dinamico complesso [2]:

$$G^*(\omega) \approx \frac{1}{J(t)}$$

$$t \rightarrow \frac{1}{\omega}$$

dove:

- $G^*(\omega)$ = Modulo Dinamico Complesso alla frequenza ω [Pa];
- $J(t)$ = deformabilità a taglio di creep al tempo t , [Pa].

In altri termini la deformabilità a taglio $J(t)$ ottenuta al tempo t_i è approssimativamente uguale in termini numerici al modulo complesso a taglio $G^*(\omega)$ alla frequenza ω , dove $t_i = \frac{1}{\omega_i}$ espressa in Hertz. Una delle prime tecniche analitiche adoperate per analizzare i risultati di tests meccanici dinamici, nelle dinamiche SHRP, prevede la costruzione delle curve maestre del modulo complesso dinamico $G^*(\omega)$ e dell'angolo di fase δ , come precedentemente esposto. Nel costruire le predette curve, viene adoperato il principio di sovrapposizione relativamente alle grandezze del tempo e della temperatura, analogamente il principio di riduzione delle variabili. Applicando il

metodo di sovrapposizione i risultati della prove meccanica dinamica (DSR) vengono raccolti per un determinato range di temperature e di frequenze. Viene in seguito stabilita una temperatura standard di riferimento pari a 25°C oppure in alternativa 0°C. Nel documento SHRP prodotto dall'ente di ricerca statunitense [2] viene scelta come temperatura di riferimento quella di 25°C al fine di costruire le curve maestre. I risultati ottenuti a tutte le altre temperature sono traslati rispetto al tempo, finché le funzioni non si fondono in un'unica curva. La traslazione può essere effettuata basandosi su una qualsiasi funzione visco-elastica. Se il metodo di sovrapposizione tempo-temperatura è corretto, tutte le altre funzioni visco-elastiche formeranno tutte una funzione continua dopo la traslazione.

L'entità di traslazione delle funzioni per ogni temperatura, al fine di formare un unico involucro, è di fondamentale importanza e prende il nome di fattore di traslazione $a(T)$. Un diagramma in cui è rappresentato il logaritmo di $a(T)$ rispetto alla temperatura, deve essere generalmente predisposto in parallelo alla formazione della curva maestra. Tale diagramma consente di constatare visivamente come le proprietà di un materiale visco-elastico come può essere il legante bituminoso, variano al variare della temperatura. Una rappresentazione grafica del procedimento schematico necessario da seguire al fine di ottenere le curve maestre del modulo complesso a taglio $G^*(\omega)$ rispetto alla frequenza ω , è riportato di seguito, in fig. 2.12:

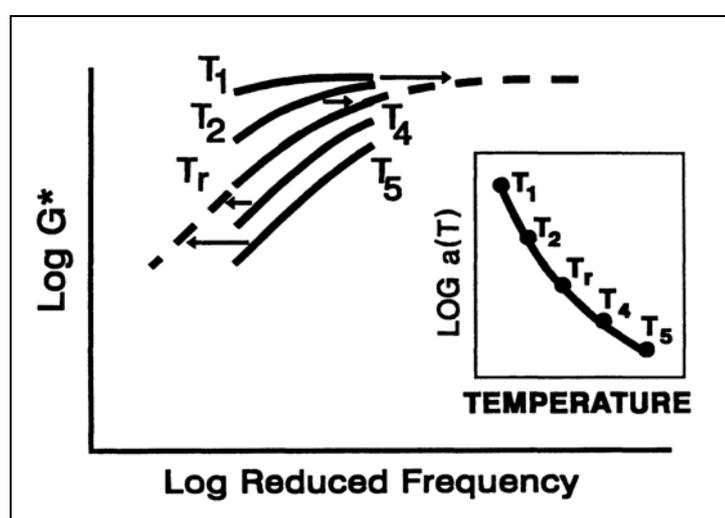


Fig. 2.12 - Utilizzo del metodo di sovrapposizione tempo-temperatura per la costruzione della curva maestra del modulo complesso a taglio rispetto alla frequenza

La scala del tempo o della frequenza utilizzate nelle curve maestre, è riferita sempre ad una scala di riduzione del tempo o delle frequenze.

2.3.6 Il comportamento all’invecchiamento dei leganti bituminosi

Il solo studio reologico eseguito sui leganti bituminosi in condizioni ideali, non sempre risulta bastevole per poter comprendere le prestazioni del legante una volta messo in opera all’interno della miscela di conglomerato bituminoso, in termini di durabilità. E’ necessario, per valutare ciò, effettuare test su campioni di leganti bituminosi invecchiati. Un legante si può definire invecchiato quando subisce fenomeni di evaporazione delle proprie sostanze volatili e quando subisce ossidazione. Nel primo caso si ha un processo di invecchiamento totalmente reversibile, in quanto se si rimescolassero con altro legante tutte le sostanze volatili evaporate si rigenererebbero le condizioni iniziali pre-invecchiamento. L’ossidazione è invece un processo chimico in gran parte irreversibile, che si genera dall’interazione dell’ossigeno con i componenti più attivi del legante bituminoso, provocando modifiche chimiche e strutturali. Valutare l’effetto di evaporazione e di ossidazione per un legante bituminoso miscelato con la matrice di inerti e posto in opera, risulta essere notevolmente difficile data la variegata combinazione di inerti bitume che si possono avere. Esiste però una normativa, introdotta dall’ente di ricerca statunitense, all’interno del protocollo SHRP, che consente di provocare artificialmente le modifiche provocate da un invecchiamento nel legante, e di studiarne l’evoluzione dei parametri reologici con l’invecchiamento nel tempo, simulando l’invecchiamento provocato dalle fasi lavorative e dall’esposizione agli agenti atmosferici durante la vita in esercizio di una pavimentazione. Le più diffuse metodologie di invecchiamento messe a punto dai protocolli SHRP [3], sono riassunte nel seguente quadro di sintesi in tab. 2.7:

Loss on Heat (L.O.H.)	Una capsula spessa 20 mm contenente 50 g di legante bituminoso, posta a 163°C e a 200°C per 5 ore in stufa, con convezione naturale;	ASTM
Thin Film Oven Test (T.F.O.T.)	Uno spessore tra 1,4 e 3,2 mm di legante bituminoso posto a 163°C per 5 ore in stufa con ventilazione forzata;	ASTM
Rolling Thin Film Oven Test (R.F.T.O.T.)	Un sottile strato di bitume pari ad 1 mm posto all'interno di bicchierini rotanti a 163°C per 85 minuti con circolazione d'aria forzata;	ASTM
Rotating Flask	Sistema identico al precedente, ma con atmosfera in azoto;	ASTM
Tilted Oven Durability test (T.O.D.T.)	Test eseguito nella R.T.F.O.T. a 113°C per 7 giorni (pari a 168 ore) con bicchierini inclinati;	ASTM
Thin Film Accelerated Aging Test (T.F.A.A.T.)	Test eseguito nella stufa R.T.F.O.T. alla temperatura di 113°C per 3 giorni, preceduto dalla stesa di campioni di bitumen sui bicchierini in vetro con l'ausilio di un solvente.	ASTM

Tab. 2.7 – Sistemi per l'invecchiamento in laboratorio di leganti bituminosi

I risultati ottenibili attraverso gli appena citati test consentono di simulare in laboratorio situazioni di “stress” al quale il legante può essere sottoposto una volta in opera, in tab 2.8 si riassumono come segue

R.T.F.O.T & T.F.O.T	Entrambi i test riproducono con una buona correlazione ciò che subisce il bitume durante le fasi di stesa e messa in opera.	ASTM
Rotating Flask	Riproduce le modificazioni che intervengono in laboratorio durante i test	ASTM
L.O.H.	Riproduce l'invecchiamento provocato da stoccaggio prolungato	ASTM
T.O.D.T.	Test particolare di invecchiamento a lungo termine che riproduce lo stato di bitume invecchiato per 2 anni nel deserto della California	ASTM
T.F.A.A.T.	Test che riproduce l'invecchiamento in sito durante 11 ÷ 13 anni di esercizio.	ASTM

Tab. 2.8 – Correlazione tra i test di invecchiamento e le condizioni reali in esercizio

Un ulteriore test introdotto dal protocollo SHRP [3], e riproposto in Europa attraverso la norma UNI EN 14769, è il Pressure Aging Vessel (PAV), che simula l'invecchiamento della pavimentazione stradale dopo un periodo variabile di esercizio, dai 5 ai 10 anni. Il metodo di prova consiste nel disporre all'interno di un recipiente a pressione e temperatura controllate, i campioni che sono stati preventivamente invecchiati tramite la prova R.T.F.O.T. ad alta pressione

e ad alta temperatura in funzione delle condizioni climatiche previste per 20 ore.

L'utilizzo delle alte pressioni, oltre che delle alte temperature per l'invecchiamento di un legante bituminoso, è un aspetto vantaggioso, in quanto permette di limitare la perdita delle sostanze volatili, mantenute solidali al legante grazie alla pressione, il processo di ossidazione possa essere accelerato senza ricorrere a temperature eccessivamente alte.

2.3.7 La modellazione del comportamento reologico dei bitumi modificati e no

L'analisi reologia effettuata su leganti bituminosi modificati con polimeri, consente di prevedere il comportamento degli stessi all'interno delle miscele di conglomerato bituminoso. Senza scomodare le prove meccaniche dinamica, è sufficiente eseguire una prova di creep, ovvero di misura della deformazione di un campione di legante bituminoso sottoposto all'azione di un carico costante nel tempo, per valutarne le caratteristiche reologiche e il comportamento visco-elastico.

In tutti i casi è usuale riscontrare che al cessare della sollecitazione si presenta un immediato recupero di una quota di deformazione riconducibile ad una risposta elastica (assimilabile ad un solido di Hooke). All'aumentare dei tempi di carico invece, la risposta in termini di deformazione risulta essere del tutto differente.

- Il sistema bitume-elastomero reticolato presenta una risposta elastica ritardata (assimilabile ad un solido di Kelvin), tale da consentire il completo recupero della deformazione imposta in tempi relativamente brevi (dell'ordine di decine di minuti);
- Il sistema bitume-plastomero è caratterizzato dalla possibilità di recupero a medio termine molto limitate (assimilabile al liquido di Maxwell);
- Tutte queste considerazioni valgono anche per miscele di leganti bituminosi con elastomeri non reticolati, nel cui comportamento reologico sembra prevalere, a causa dell'assenza di legami intermolecolari, il carattere visco-elastico.

Se si semplificasse il comportamento di un solido ideale con una molla e quello di un di un liquido ideale con un pistone che si muove in un cilindro riempito da un liquido, quanto appena enunciato si può rappresentare come segue in fig. 2.12, 2.14, 2.15 e 2.16:

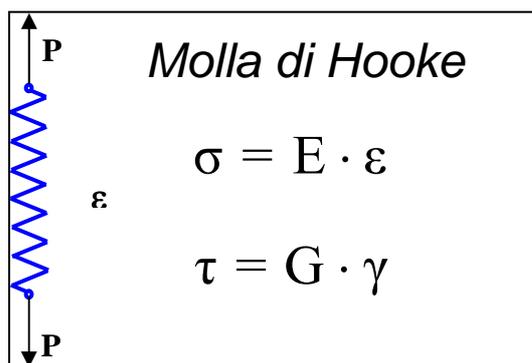


Fig. 2.13 - Schematizzazione del modello elastico

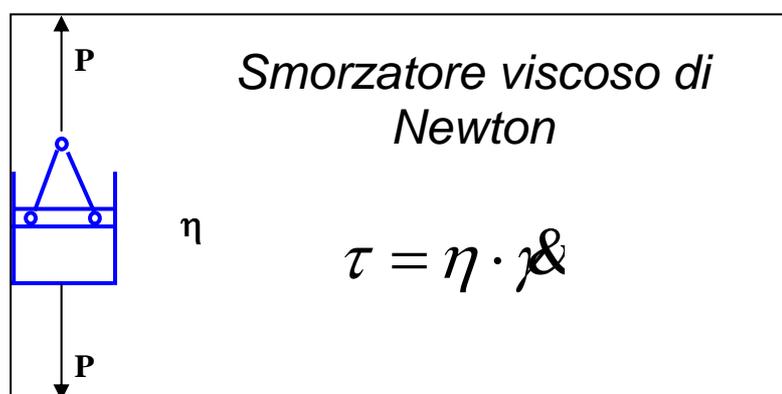


Fig. 2.14 - Schematizzazione del modello viscoso

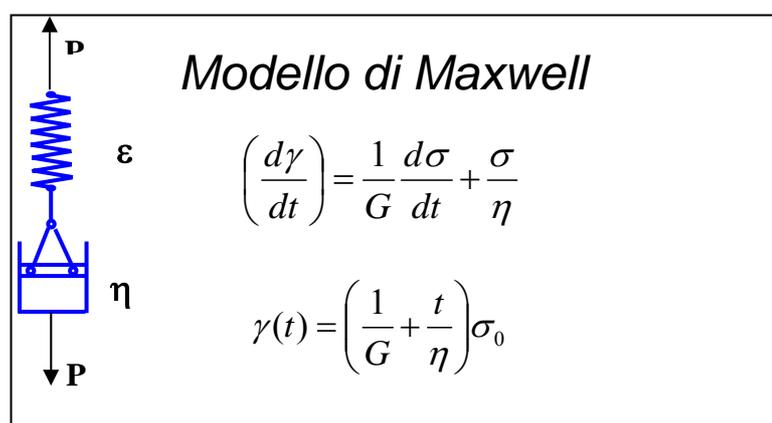


Fig. 2.15 - Schematizzazione del modello visco-elastico di Maxwell

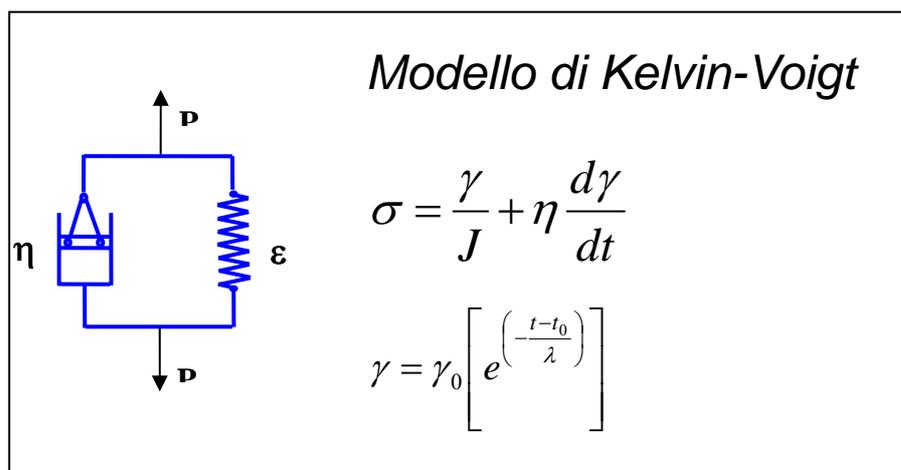


Fig. 2.16 - Schematizzazione del modello visco-elastico di Kelvin-Voigt

La molla rappresenta le forze intermolecolari e lo stantuffo la viscosità del legante bituminoso. La scelta di un modello per descrivere la reologia di un legante bituminoso dipende essenzialmente dalla tipologia del legante bituminoso stesso e dalla temperatura. I comportamenti dei leganti bituminosi, tal quali e modificati, dipendono essenzialmente dalla temperatura in cui essi si trovano a lavorare, e dalla natura dei carichi.

2.4 Bibliografia specifica cap. 2

- [1] Maccarore S. et ali – *Cold Asphalt system as an alternative to ho hot mix* – APA International conference, November 1994
- [2] D.A. Anderson et ali – *Binder characterization and evaluation – Vol.3 Physical characterization* – Strategic Highway Research Program, SHRP, National Council, Washington, 1994
- [3] J. Peterson et ali – *Binder characterization and evaluation – Vol.4 Tests Methods* – Strategic Highway Research Program, SHRP, National Council, Washington, 1994
- [4] J.K. Jenkins et ali – *Half-warm foamed bitumen treatment, a new process* – 7th International conferences on Asphalt pavement in South Africa, 1999.
- [5] B.G. Koenders et ali - *Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures* – 2° Eurasphalt & Eurobitumen, Barcelona Spain 2000.
- [6] Hazard review – Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt – U.S. Department of Healt and Human Services, USA December 2000.
<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2001-110/pdfs/2001-110.pdf>
- [7] *Advisory note 17 – Warm mix asphalt – a state of the art review* – Australian Asphalt pavement Association
<http://www.aapa.asn.au/content/aapa/download/AdvisoryNote17.pdf>
- [8] W. Jones – *Warm Mix Asphalt Pavements: tecnology of the future?* – Asphalt Magazine Autumn 2004;
- [9] B. Prowell, R. C. West – *A Case for reducing production and laydown temperatures: Today* – Hot Mix Asphalt Magazine July/August 2005;
- [10] Hurley, G. and Prowell, B., - *Evaluation of Sasobit® for Use in Warm Asphalt Mixes* - NCAT Report No. 05- 06, Auburn University, Auburn, AL, June 2005.

- [11] Berthel W. et al. – *Warm mix asphalt by adding synthetic zeolite* – Eurovia www.asphamin.com Online since 2005
- [12] O. Kristjánisdóttir - *Warm mix asphalt for cold weather paving* - Thesis of Master of Science in Civil Engineering University of Washington 2006;
- [13] Hurley, G. and Prowell, B., - *Evaluation of Evotherm® for Use in Warm Asphalt Mixes* - NCAT Report No. 06-02, Auburn University, Auburn, AL, June 2006.
- [14] G. Fore; H. Marks - *Documenting emissions and energy reductions of wma and conventional hma* – National Pavement Asphalt Association, August 2006
- [15] F. Santella – *Tutti I vantaggi del tiepido* – Le Strade 11/2007;
- [16] J. D'angelo et al. – *Warm Mix Asphalt: European Practice* – FHWA Technical report PL-08-007;
- [17] O. Kristjánisdóttir et al. - *Assessing the potential of warm mix asphalt technologies adoption* - Transportation Research Board Annual Meeting 2007 Paper n. 07-2359 ;
- [18] M.M. Hassan – *Life Cycle Assessment of Warm Mix Asphalt: an Environmental and Economic Perspective* – Transportation Research Board Annual meeting 2009;
- [19] A. Ventura et al. – *Environmental comparison at industrial scale of hot and half-warm mix asphalt manufacturing processes* - Transportation Research Board Annual meeting 2009;
- [20] R. B. Mallick et al. – *A laboratory study on CO₂ emission reductions through the use of warm mix asphalt* - Transportation Research Board Annual meeting 2009;
- [21] M.F. Saleh – *Cost evaluation of foam bitumen and other stabilization alternatives* - The International journal of Pavement Engineering Vol. 8 n.2 June 2007, pag. 157-161;

Capitolo 3

La valutazione della compattabilità (lavorabilità) dei conglomerati bituminosi

L'addensabilità delle miscele di conglomerato bituminoso in fase di posa in opera è il parametro che forse meglio può riassumere le proprietà finali di un conglomerato in opera. Una miscela correttamente progettata accanto ad inderogabili proprietà ponderali compositive e di qualità intrinseca dei componenti del conglomerato bituminoso, deve possedere una lavorabilità e quindi un'addensabilità tale che, durante la delicata fase di posa in opera, tutta l'energia di addensamento fornita attraverso macchine finitrici e rulli compattatori, risulti essere efficacemente utilizzata per ridurre la sua percentuale dei vuoti. Tale condizione, se la miscela e la pavimentazione rispondono a requisiti di “buona progettazione”, rappresenta garanzia consolidata del conglomerato bituminoso ad offrire prestazioni meccaniche consone alle sollecitazioni attese durante l'esercizio nell'arco di vita utile.

3.1 Principali parametri di governo del grado di addensamento delle miscele di conglomerato bituminoso

Lo strato superficiale di una pavimentazione per uso stradale in conglomerato bituminoso, ha il compito ben noto, di opporsi alle sollecitazioni esterne derivanti dal volume di traffico veicolare che su di essa transita, proteggendo al contempo gli strati sottostanti, dall'azione degli agenti atmosferici.

Tali sollecitazioni generano nel tempo un mutamento delle proprietà volumetriche e prestazionali (meccaniche, superficiali etc.) dello strato, manifestando concretamente la comparsa di ammaloramenti (ormae, irregolarità puntuali, sgranamenti superficiali etc.). Ammaloramenti tanto più “importanti” e distribuiti in archi temporali più o meno lunghi in funzione sia della qualità dei materiali utilizzati che della “qualità” delle tecniche di esecuzione impiegate per la realizzazione del comparto sovrastrutturale e più in generale del complesso infrastrutturale (opere d'arte idrauliche di difesa del corpo stradale, muri di sostegno etc.). [4]

Nella fattispecie, la salvaguardia della sovrastruttura dal precoce innescarsi di fenomeni di invecchiamento presuppone non solo attente regole di mix-design ma soprattutto appropriate azioni di stesa e compattazione dei conglomerati nell'intento di ottenere livelli di addensamento ottimali. Gli obiettivi da perseguire durante la fase di compattazione degli strati superficiali di una pavimentazione in conglomerato bituminoso possono essere riassunti nei seguenti punti:

- riduzione delle deformazioni permanenti (ormaie);
- miglioramento della resistenza alla fatica;
- migliore impermeabilità alle acqua meteoriche e di scolo e quindi maggiore resistenza;
- buona regolarità superficiale;
- lento invecchiamento del legante.

Da uno studio bibliografico è possibile stimare che il costo della compattazione è di circa 3÷5% dei costi totali di costruzione e che ad ogni 1% di maggiore densità del materiale corrisponde almeno il 15% in più di resistenza e di qualità della struttura [1], garantendo di conseguenza una riduzione dei costi di manutenzione. In tal senso i Capitolati Speciali d'Appalto degli Enti Gestori di infrastrutture stradali indicano precisi parametri compositivi nonché adeguate soglie minime di addensamento degli strati del pacchetto pavimentazione per prevenire l'insorgenza di ammaloramenti precoci che causerebbero la necessità di intervenire con azioni manutentive che aumenterebbero i costi totali dell'opera. Di seguito, nelle tabelle 3.1-a, b, c, d, viene tracciato un quadro generale dei principali parametri di governo dell'addensamento nei conglomerati bituminosi, considerando costanti ed ottimali le condizioni di tutti gli altri parametri non considerati

Distribuzione granulometrica	Effetto sull'addensamento
<p>Se la miscela di aggregati che compongono la curva granulometrica, tende alla Curva Teorica di Massimo Addensamento, ottenibile tramite la seguente formula tratta dal FWHA:</p> $P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{0,45}$ <p>dove: P = percentuale di passante; d = diametro medio dei più grandi elementi passanti da ciascun setaccio; D = dimensione massima dei granuli della curva.</p> <p>Cresce l'attitudine della miscela di CGB all'addensamento</p>	<p>↑</p>
Forma e natura degli inerti: <u>incremento diametro massimo</u>	Effetto sull'addensamento
<p>Al crescere del diametro massimo degli aggregati cresce la sensibilità all'addensamento del conglomerato</p>	<p>↑</p>

Legenda: ↑ : effetto positivo; ↓ : effetto negativo;

Fig. 3.1.a – Parametri di governo del grado di addensamento delle miscele di conglomerato bituminoso

Forma e natura degli inerti: inerti frantumati	Effetto sull'addensamento
In miscele di cgb in cui è presente una curva granulometrica composta da inerti provenienti da frantumazione, l'attitudine all'addensamento della miscela diminuisce	↓
Forma e natura degli inerti: maggiore durezza litologica	Effetto sull'addensamento
Al crescere della durezza della roccia utilizzata per la produzione degli inerti impiegati nella miscela di conglomerato bituminoso, decresce l'attitudine all'addensamento delle miscele di CGB	↓
Forma e natura degli inerti: quantitativo di filler	Effetto sull'addensamento
Al crescere del tenore di filler aumenta la superficie specifica dell'aggregato riducendosi l'effettivo spessore della pellicola di legante che avvolge i singoli grani. Il mastice (bitume + filler) migra verso gli interstizi del conglomerato. Ciò comporta un incremento della sensibilità all'addensamento del conglomerato.	↑
Tenore di legante bituminoso: dosaggio sottodimensionato	Effetto sull'addensamento
Per basse percentuali di bitume durante la compattazione si innesca un fenomeno detto di “lubrificazione”: il legante interposto tra i grani riduce l'attrito interno tra gli aggregati. Cresce la sensibilità all'addensamento del conglomerato.	↑
Tenore di legante bituminoso: dosaggio di medio dimensionamento	Effetto sull'addensamento
Per percentuali di bitume crescenti rispetto ad un sottodosaggio si innesca un fenomeno detto di “distanziamento”: il bitume saldamente ancorato ai grani aumenta di spessore accrescendo la distanza reciproca tra i grani. Coesiste la lubrificazione. Decresce la sensibilità all'addensamento del conglomerato.	↓
Tenore di legante bituminoso: dosaggio sovradimensionato	Effetto sull'addensamento
Per alte percentuali di bitume si innesca un fenomeno detto di “migrazione”: il bitume in eccesso che non risente più delle forze di adesione aggregato-bitume migra verso i vuoti interni al conglomerato. Coesiste la lubrificazione. Cresce la sensibilità all'addensamento del conglomerato.	↑
Spessore dello strato di pavimentazione	
Incremento dello spessore	Effetto sull'addensamento
Al crescere dello spesso della pavimentazione stradale, diminuisce l'attitudine all'addensamento della miscela in quanto l'energia compattante non è in grado di raggiungere efficacemente la parte inferiore dello strato.	↓
Legenda: ↑ : effetto positivo; ↓ : effetto negativo;	

Fig. 3.1.b – Parametri di governo del grado di addensamento delle miscele di conglomerato bituminoso

Temperature nella fase iniziale di costipazione	
Intervallo ottimale: 110°C – 145°C	Effetto sull'addensamento
<p>Premettendo che la temperatura ideale di compattazione dipende da molteplici fattori, quali:</p> <ul style="list-style-type: none"> • la composizione del conglomerato bituminoso (tipo di legante, additivi etc); • lo spessore dello strato; • le condizioni climatiche: vento, umidità e temperature dell'aria e del supporto; • la composizione del parco macchine per la compattazione. <p>In condizioni normali di esecuzione si può considerare come regola generale che il massimo grado di addensamento si può raggiungere per temperature di inizio compattazione intorno ai 145°C, spingendo l'azione compattante fino a che il conglomerato non raggiunga temperature intorno ai 90° C:</p> <ul style="list-style-type: none"> • il predetto limite superiore può anche essere più elevato per sottostrati, a condizione che non si creino problemi di rifluimento laterale al rullo e/o eccessivo accumulo di materiale anteriormente al rullo; • il limite inferiore per una buona “incastonatura” dei grani superficiali nello strato è di circa 110°C. Solo in caso di necessità, è ancora possibile “recuperare” qualche percento di densità con un'azione compattante di tipo vibrante per temperature comprese tra 90°C e i 110°C, col rischio però di frantumare la graniglia di superficie; • può essere, inoltre, interessante compattare al di sotto dei 90°C: in tal caso non si aumenta il grado di addensamento, ma si migliora la regolarità superficiale. Tale azione va intrapresa per mezzo di un rullo liscio pesante di tipo statico. 	↑
Energia di compattazione	
Tipologia dell'azione compattante: da statica a vibrante	Effetto sull'addensamento
<p>Nel passare da un'azione di tipo statico ad una di tipo vibrante cresce la sensibilità all'addensamento del conglomerato.</p> <p>L'azione vibrante infatti pone le particelle del conglomerato in movimento, riducendo l'attrito interno e facilitando l'aggregazione delle particelle garantendo la presenza di interstizi tra i grani sempre più piccoli, spingendo altresì tale effetto a profondità superiori che nel caso statico.</p> <p>La frequenza e l'ampiezza di vibrazione ottimali per i conglomerati bituminosi oscillano rispettivamente entro i seguenti valori: 33±50Hz e 0,2±0,8mm. Nel caso statico l'azione compattante viene “sentita” in genere per spessori non superiori a 5 cm.</p>	↑
Entità del carico compattante	Effetto sull'addensamento
<p>Al crescere del carico compattante applicato, sia esso statico o vibrante, cresce la sensibilità all'addensamento del conglomerato.</p>	↑
<p>Legenda: ↑ : effetto positivo; ↓ : effetto negativo;</p>	

Fig. 3.1.c – Parametri di governo del grado di addensamento delle miscele di conglomerato bituminoso

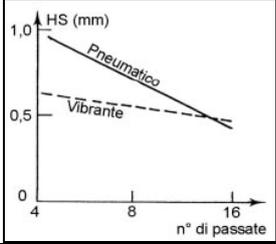
Numero di passaggi e tipologia di contatto	Effetto sull'addensamento
<p>Al crescere del numero di passaggi di rullo cresce la sensibilità all'addensamento del conglomerato. Per ciò che concerne le caratteristiche superficiali post rullatura, un rullo gommato restituisce un migliore tessuto rispetto ad un rullo liscio.</p> 	↑
Velocità di avanzamento del compattatore	Effetto sull'addensamento
<p>Per velocità di avanzamento del compattatore esterne all'intervallo 2÷6Km/h (intervallo ottimale della velocità di avanzamento) la sensibilità all'addensamento del conglomerato decresce. In generale le velocità 2÷4Km/h vengono assunte durante i primi 2÷4 passaggi del compattatore sullo strato da addensare; oltre i 4 passaggi la velocità viene incrementata fino 6Km/h.</p>	↓
<p>Legenda: ↑ : effetto positivo; ↓ : effetto negativo;</p>	

Fig. 3.1.d – Parametri di governo del grado di addensamento delle miscele di conglomerato bituminoso

3.2 Principali indicatori di lavorabilità di un conglomerato bituminoso

Analizzati i parametri di governo ed influenza del grado di addensabilità di una miscela di conglomerato bituminoso, è importante introdurre alcuni parametri di misurazione della lavorabilità. In letteratura esistono indici in grado di valutare l'attitudine all'addensabilità di una miscela di conglomerato bituminoso, a partire dai risultati di addensamento ottenuti tramite l'impiego della Pressa a taglio Giratoria. Lo studioso Bahia [3] [4] ha introdotto per la prima volta il concetto secondo cui è possibile utilizzare il valore dell'energia di addensamento, misurata con la pressa giratoria, per valutare l'addensabilità delle miscele di conglomerato bituminoso. L'area al disotto della curva di addensamento, output della pressa a taglio giratoria, calcolata tra due punti di riferimento, rappresenta l'adeguatezza della miscela nelle fasi di costruzione e di esercizio, sotto l'azione del traffico veicolare. Entrambi gli indici energetici possono essere determinati integrando la curva di addensamento fornita dalla SGC tra due punti notevoli noti. Ad esempio, per 2 medesime miscele costipate a temperature diverse, le aree sottostanti alla curva di addensamento presenteranno sicuramente due diversi valori, la cui differenza rappresenta la differenza di energia necessaria affinché possano essere ridotti i vuoti residui della miscela costipata a temperatura inferiore, sotto le condizioni della prova della pressa giratoria.

Gli indici sono noti con gli acronimi CEI (Compaction Energy Index) e TDI (Traffic Densification Index).

Il primo (CEI) rappresenta l'energia da fornire in fase di addensamento alla miscela, affinché abbia al termine della compattazione, il grado di addensamento desiderato e previsto in fase progettuale. Tale indice viene determinato integrando la curva di addensamento della Pressa a taglio giratoria, tra i punti rappresentativi in corrispondenza del primo giro di pressa e del 92% G_{mm} , che rappresenta l'addensamento richiesto alla fine della fase di costruzione della sovrastruttura stradale.

Il secondo indice (TDI) è l'energia necessaria per addensare la miscela di conglomerato bituminoso, attraverso la pressa a taglio giratoria, fino al valore di 98% G_{mm} ¹. Questo valore di energia rappresenta la resistenza della miscela ai carichi veicolari che su di essa transitano. In analogia al primo indice, anche il TDI viene calcolato integrando la curva di addensamento della pressa a taglio a taglio giratoria, tra i punti in ascissa corrispondenti ai punti in ordinate di 92% G_{mm} e 98% G_{mm} . Un alto valore di TDI è un risultato auspicabile in quanto rappresenta un maggiore livello energetico necessario per far raggiungere alla miscela il grado di addensamento finale.

Altri due indici rinvenibili in letteratura e strettamente connessi all'impiego della Pressa a Taglio Giratoria, sono il CFI (Compressor Force Index) e il TFI (Traffic Force Index). Entrambi per la loro valutazione, necessitano di una Pressa a Taglio Giratoria dotata di un particolare apparecchio ideato dallo studioso Guler, che è il PDA (acronimo inglese di Pressure Distributor Analyzer). Tale apparecchiatura aggiuntiva, consente di misurare la resistenza al taglio di una miscela di conglomerato bituminoso durante l'addensamento. L'indice CFI viene determinato integrando la curva relativa alla resistenza a taglio a partire dai punti in corrispondenza, sulla curva di addensamento, dello stato di addensamento al primo giro fino al livello di addensamento di 92% G_{mm} . L'indice TFI viene invece valutato integrando la curva di resistenza al taglio a partire dal punto in corrispondenza del grado di addensamento 92% G_{mm} fino alla fine della curva stessa.

Nella seguente immagine sono riportati graficamente i valori delle aree al disotto delle curve di output della pressa a taglio giratoria, relativi ai 4 indici di addensabilità fin qui citati

¹ G_{mm} è il peso specifico massimo teorico.

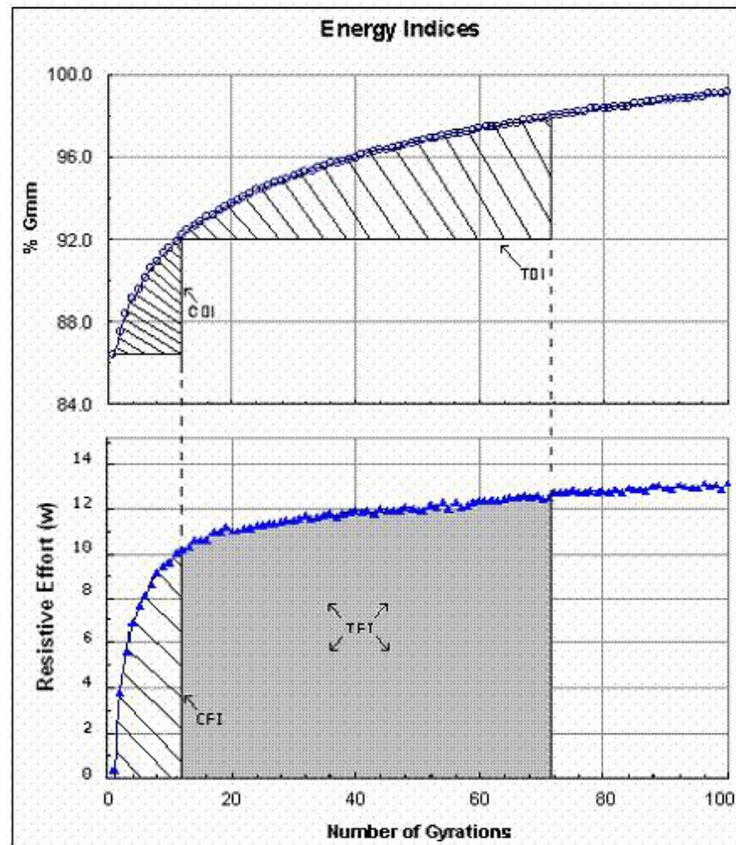


Fig. 3.1 – Determinazione degli indici CDI, TDI, CFI, TFI

Esistono metodi alternativi per la valutazione degli ultimi due indici introdotti (CFI e TFI) che prescindono dalla presenza dell'apparecchiatura aggiuntiva PDA collegata alla Pressa a taglio Giratoria. In particolare questi studi dimostrano che esiste una forte correlazione tra gli indici TDI e TFI. Inoltre alcuni studi hanno dimostrato l'esistenza di una forte correlazione tra la resistenza alle deformazioni permanenti di una miscela di conglomerato bituminoso, e l'indice TFI. In particolare un alto valore di TFI è rappresentativo di una alta resistenza alle deformazioni permanenti.

Per la valutazione della lavorabilità delle miscele Warm Mix Asphalt, nella presente Tesi di Dottorato, è stata utilizzata una metodologia normata da protocollo UNI EN, che prescinde dall'utilizzo della pressa a taglio giratoria, e consente di ottenere curve di addensamento sfruttando anche sistemi di compattazione impulsiva. Nel paragrafo successivo questo argomento troverà completa trattazione

3.3 La norma UNI EN 12967-10: misura della compattabilità di un conglomerato bituminoso

3.3.1 Principio e scopo della prova

Gli strumenti per la valutazione della lavorabilità di una miscela di conglomerato bituminoso, che essa sia “tiepida” o a “caldo”, sono forniti in campo scientifico da prove di laboratorio codificate attraverso norma standard. In particolare un’importante norma internazionale, utile ai fini dello studio dell’attitudine all’addensamento delle miscele di conglomerato bituminoso, è la Norma UNI-EN 12697-10.

Lo scopo della presente norma è quello di descrivere, attraverso l’uso di tre metodi differenti dispositivi di addensamento, l’attitudine alla compattabilità di una miscela di conglomerato bituminoso, mediante la relazione fra la sua massa volumica o percentuale dei vuoti e l’energia di compattazione applicata ad essa. Essa si applica a miscele bituminose a caldo, ma estensibile anche miscele “tiepide” (sia quelle preparate in laboratorio sia quelle risultanti dal campionamento da miscele fabbricate in impianto), con D non maggiore di 31,5 mm in conformità al prEN 13043 per i compattatori a impatto (usati nella nostra prova e che noi tratteremo) e giratori, e 40 mm per il compattatore vibrante.

Il principio su cui si basa la presente norma è di seguito enunciato.

La miscela bituminosa è compattata ad una temperatura prestabilita con energie di compattazioni variabili.

Si utilizza uno dei due metodi:

1. *Metodo 1*: due o più provini sono compattati con differenti quantità di energia di compattazione e le loro masse volumetriche sono misurate.
2. *Metodo 2*: viene utilizzato un solo provino e l’incremento della sua massa volumica è determinato dopo ogni stadio della sua compattazione dal suo decremento in spessore.

Per la compattazione a impatto è possibile utilizzare ambedue i metodi e il risultato del test è l’ottenimento di un diagramma in cui la massa volumica (o percentuale dei vuoti) è riportata in funzione dell’energia di compattazione.

Quando si utilizza la compattazione a impatto, ed è il caso utilizzato nella sperimentazione presentata nel presente lavoro l’energia di compattazione è caratterizzata dal numero di colpi di maglio di un pestello standard Marshall. Dai risultati sperimentali si ottiene un’equazione matematica, i cui parametri sono essenziali per valutare e caratterizzare l’attitudine alla compattabilità, e quindi a valutare la lavorabilità della miscela bituminosa.

Per la determinazione di un singolo valore della compattabilità, è necessario preparare e costipare i provini Marshall in conformità al prEN 12697-30 per ogni valore di Energia di compattazione, stabilito in numero di colpi di maglio. I numeri di colpi possono essere 5, 15, 25, 35, 50, e 100 su ogni lato del provino, ma è possibile individuare un limitato spettro di energie di addensamento, in numero non inferiore a 4.

Se richiesto, è necessario determinare la massa di miscela bituminosa da utilizzare nel provino per ottenere lo spessore del provino in conformità al prEN 12697-30 mediante prova di compattazione preliminare.

Una volta realizzati i provini per ciascuna classe di energia, è necessario determinare il peso di volume dei provini compattati in conformità al prEN 12697-6.

3.3.2 Calcolo ed espressione dei risultati per compattazione a impatto

La variazione del peso di volume dei provini compattati in funzione dell'energia di compattazione è determinata dalla seguente formula:

$$\gamma(E_i) = \gamma_\infty - (\gamma_\infty - \gamma_0) \cdot \exp\left[\frac{-E_i}{C}\right]$$

dove:

3. $\gamma (E_i)$ è il peso di volume dei provini compattati all'energia di compattazione, utilizzando un compattatore a impatti, espresso in megagrammi per metro cubo (Mgm^3);
4. γ_∞ è il peso di volume calcolato massimo ottenibile, espresso in megagrammi per metro cubo (Mg/m^3);
5. γ_0 è il peso di volume calcolato iniziale del provino, espresso in megagrammi per metro cubo (Mg/m^3);
6. E_i è l'energia di compattazione espressa con 42 Nm come unità, il suo valore numerico uguale al numero di colpi su ogni lato del provino;
7. C è la resistenza alla compattazione espressa con 42 Nm.

Per valutare la lavorabilità di una miscela di conglomerato bituminoso, è necessario calcolare i tre parametri dell'equazione, γ_0 , γ_∞ e C utilizzando il *metodo dei minimi quadrati* applicato alle masse volumetriche calcolate e sperimentali per ottenere la migliore approssimazione dei dati

sperimentali.

Per una prova singola, la resistenza alla compattazione C , viene approssimata alla seconda cifra decimale.

La resistenza alla compattazione, C , di una miscela è la media aritmetica di tre valori singoli, espressa con una cifra decimale. La differenza fra i tre valori singoli non deve essere maggiore della variazione ammessa come mostrato in tab. 3.2:

	Resistenza alla compattazione, C , fino a 12	Resistenza alla compattazione, C , oltre 12 fino a 25	Resistenza alla compattazione, C , oltre a 25
Variazione ammessa	Valore assoluto 3.18	26.5% del valore numerico	Non è possibile un'indicazione affidabile

Tab.3.2 - Resistenza alla compattazione

Il metodo dei minimi quadrati è necessario per calcolare la soluzione della funzione a partire dai dati sperimentali di addensamento. In particolare la funzione trovata deve essere quella che minimizza la somma dei quadrati delle distanze dai punti dati.

L'utilizzo più frequente è nell'approssimare l'andamento dei dati sperimentali con linee di tendenza.

Per evitare l'intervento del giudizio individuale nel costruire le curve interpolanti, è necessario accordarsi sulla definizione di *migliore interpolante*.

Per un dato valore X , ad esempio X_1 , ci potrà essere una differenza tra il valore di Y_1 ed il corrispondente valore determinato dalla curva C . Tale differenza può essere indicata con D_1 , che è talvolta denominata *deviazione o errore* e che può essere positiva, negativa o nulla. Analogamente, in corrispondenza dei valori X_2, \dots, X_N otteniamo le deviazioni D_2, \dots, D_N .

Una misura della “bontà dell'interpolazione” effettuata per mezzo della curva C è fornita dalla somma $D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_N^2$ è minima, è detta *migliore interpolante*.

Una curva avente questa proprietà è detta *curva dei minimi quadrati*. Così una retta avente questa proprietà è detta *retta dei minimi quadrati*, una parabola è detta *parabola dei minimi quadrati* ecc.

E' usuale servirsi della precedente definizione quando X è la variabile indipendente e Y è la variabile dipendente. Se X è la variabile dipendente, la definizione è modificata considerando deviazioni orizzontali invece che verticali, che equivale ad un interscambio degli assi delle X e delle Y . Queste due definizioni in generale conducono a differenti curve dei minimi quadrati. A meno che non sia altrimenti specificato, considereremo Y come variabile dipendente e X come

variabile indipendente.

La ripetibilità e la riproducibilità della resistenza alla compattazione, C , sono state determinate utilizzando una miscela di conglomerato bituminoso preparata in un impianto di miscelazione. I risultati ottenuti sono mostrati in tab. 3.3:

	Ripetibilità	Riproducibilità
Miscela con una resistenza alla compattazione $C \leq 12$	Valore assoluto 1,4	Valore assoluto 3,6
Miscela con una resistenza alla compattazione $C > 12$ e ≤ 25	12% del valore numerico dei risultati	30% del valore numerico del risultato
Miscela con una resistenza alla compattazione $C > 25$	Non è possibile un'indicazione affidabile	

Tab. 3.3 - Ripetibilità e riproducibilità

3.4 Bibliografia specifica cap. 3

- [1] R. Vaiana. – *Compatibilità tra sperimentazione in laboratorio ed in sito su strati di conglomerato bituminoso* – Atti convegno SIIV Parma, 2002;
- [2] Norma UNI EN 12697-10;
- [3] Bahia, Het al. – “Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor – Journal of the Association of Paving Technologist, Volume 67, pp. 189-232
- [4] O. Kristjánsdóttir - *Warm mix asphalt for cold weather paving* - Thesys of Master of Science in Civil Engineering University of Washington 2006;

Capitolo 4

Tecniche e metodologie innovative per alla produzione di conglomerati bituminosi a bassa energia: stato dell’arte sui Warm Mix Asphalt

4.1 Introduzione

Il settore produttivo dei conglomerati bituminosi per uso stradale, al fine di preservare la qualità dell’ambiente e di ridurre i costi di produzione delle miscele di conglomerato bituminoso, sta proponendo negli anni una serie di alternative tecnologiche alle miscele tradizionali a caldo, che sebbene necessitino ancora di una validazione nel lungo periodo per ciò che concerne la durabilità in opera delle stesse, si possono considerare come valide soluzione per l’attenuazione dei problemi legati all’impatto ambientale, al risparmio energetico e alla salute degli operatori del settore, evidenziati nel primo capitolo della presente tesi di dottorato. Basti pensare alle tecniche di produzione a freddo o alle tecniche di riciclaggio, in particolare a quelle a freddo ed in sito, dove la nuova miscele viene realizzata a partire dalla vecchia pavimentazione, senza apporto di energia termica e con una minima integrazione di materiale inerte vergine, e di legante bituminoso sottoforma di bitume flussato e/o di emulsioni bituminose. Da uno studio della letteratura scientifica nazionale ed internazionale afferente a queste tematiche, è facile evincere l’importanza e la diffusione delle tecniche di riciclaggio, ma l’obiettivo del presente lavoro è quello di analizzare le tecniche di produzione delle miscele di conglomerato bituminoso attraverso l’uso di tecniche, le cui temperature operative sono intermedie ai due estremi (Freddo a 60°C c.a. e Caldo a 150°C c.a.), e per tale motivo prendono il nome di miscele “tiepide”.

La scelta di trattare le miscele di conglomerato bituminoso tiepide è dovuta alla consapevolezza che la riduzione della temperatura di produzione, anche di soli 10°C rispetto alla temperatura canonica delle miscele a caldo, consente un abbattimento delle emissioni inquinanti di c.a. il 50%, ed inoltre in un periodo in cui la crisi petrolifera fa sentire il proprio peso su tutti i settori produttivi, un risparmio energetico è quanto mai ben atteso. Le miscele di conglomerato bituminoso tiepide sono note secondo la notazione anglosassone come miscele WMA ovvero “WARM MIX ASPHALT” (traducibile in: miscele di conglomerato bituminoso tiepido), e sono

ottenibili attraverso delle metodologie produttive che consentono di ridurre le temperature di produzione di alcune decine di gradi Centigradi rispetto alle classiche miscele a caldo, note secondo la terminologia anglosassone come HMA, ovvero “HOT MIX ASPHALT” (traducibile in: miscele di conglomerato bituminoso a caldo).

Se una riduzione di c.a. 10°C, secondo quanto è proposto in letteratura, consente una riduzione del 50% delle emissioni inquinanti, un abbassamento di 40° - 50°C consente di ottenere miscele esenti dall’emissione di odori e fumi inquinanti, nocivi per l’ambiente e per la salute.

Prima di intraprendere un’attenta analisi di tutte le tecniche per la produzione di conglomerati bituminosi tiepidi, è opportuno descrivere le fasi necessarie alla produzione in una miscela di conglomerato bituminoso, per poter meglio comprendere, in che misura, le modifiche apportate dalle tecniche WMA, consentano di ottenere i benefici annunciati.

La produzione di un conglomerato bituminoso può avvenire attraverso tecniche, convalidate da anni e anni di test in sito e in laboratorio, che necessitano di una importante quantità di energia termica o di una totale assenza della stessa. In funzione della tecnica adottata, risulta necessaria l’adozione di un legante bituminoso specifico in luogo di un altro. Nel primo caso avremo tecniche a caldo che prevedono il riscaldamento del legante bituminoso tal quale o modificato a circa 160°C, mentre nel secondo caso delle tecniche a freddo, si utilizza un’emulsione bituminosa impiegata a temperatura ambiente.

La seguente immagine in fig. 4.1 rappresenta la suddivisione dei processi basati sulla differenziazione “freddo – caldo”:

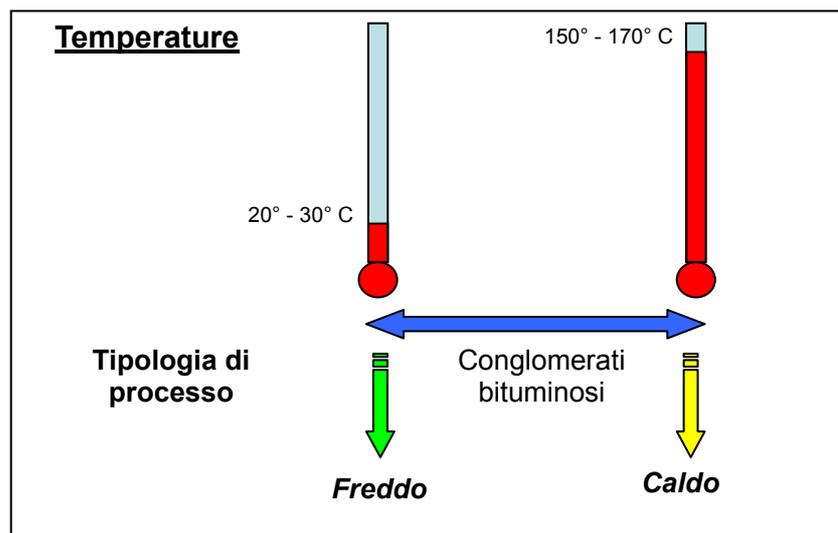


Fig. 4.1 - Suddivisione delle tipologie di processo produttivo di conglomerato bituminoso (Cgb) secondo la suddivisione freddo – caldo

La suddivisione delle tecniche in caldo – freddo, è però stata messa in discussione da quando, da qualche tempo, hanno iniziato a svilupparsi tecniche che introducono l’utilizzo di temperature intermedie per la produzione di conglomerato bituminoso. L’incremento delle tecniche disponibili nel settore produttivo delle pavimentazioni stradali, richiede la necessità in introdurre una nuova classificazione di tali metodi, che esuli dalla mera distinzione caldo – freddo.

Nel seguente schema in fig. 4.2 è rappresentata una classificazione più rigorosa delle diverse famiglie di tecniche di produzione di conglomerati bituminosi:

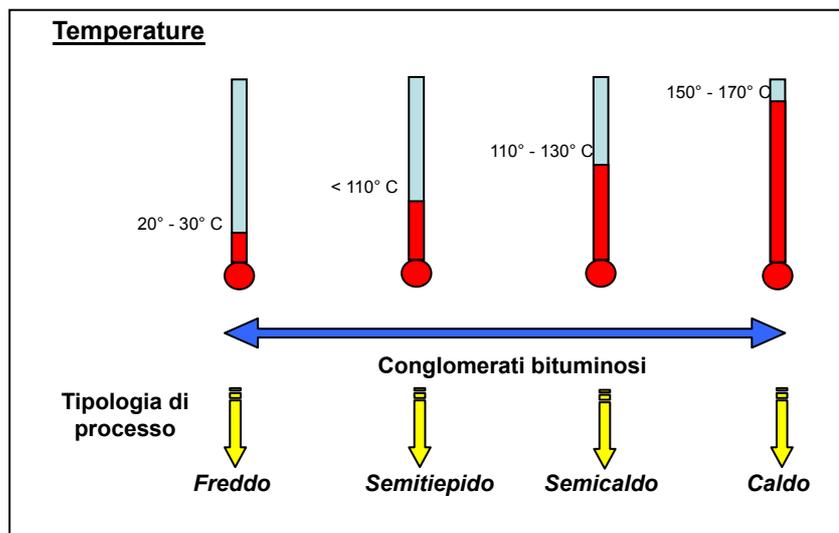


Fig. 4.2 - Suddivisione delle tipologie di processo “WMA” di conglomerato bituminoso (Cgb) includendo le tecnologie intermedie [15]

Questa suddivisione dei diversi tipi di processo, consente di impostare e scegliere la tipologia di tecnica WMA a partire da uno dei due estremi utilizzando i metodi tipici per ridurre le emissioni inquinanti ed abbattere i consumi energetici. Per quanto riguarda i procedimenti a caldo, le alte temperature (150° - 160°C) sono necessarie per rendere il legante bituminoso talmente fluido (abbassando la sua viscosità) da avvolgere completamente gli inerti che costituiscono lo scheletro solido della miscela, prima dell’aggiunta del filler. Inoltre tali temperature consentono di ottenere un essiccamento ottimale degli inerti, eliminando tutta l’umidità presente, la quale potrebbe creare problemi di adesione bitume – inerte, nel tempo. Le tecniche a freddo invece si caratterizzano per la bassa temperatura operativa e per l’assenza della fase di riscaldamento. Infatti il legante bituminoso utilizzato per queste tecniche è l’emulsione bituminosa, che è un sistema di dispersione bifasico composto da acqua e bitume, tenuti insieme da additivi chimici specifici. Per queste tecniche l’adesione tra legante e inerte è garantita nel momento in cui avviene la “rottura” dell’emulsione, ovvero quando la fase bituminosa si separa dalla fase acquosa, grazie all’evaporazione dell’acqua stessa. Tali tecniche non producono emissioni

inquinanti e sono considerate a bassa energia.

Risulterebbe scontato chiedersi allora, come mai si stanno sviluppando le tecniche tiepide, se già le tecniche a freddo riescono ad assolvere agli stessi obiettivi?

La risposta è riassumibile in 2 punti focali:

1. esiste un certo conservatorismo da parte dei produttori di conglomerati bituminosi nei confronti delle tecniche tradizionali a caldo e dei loro metodi di produzione in impianto, che non consente uno slancio di questi ultimi verso le tecniche a freddo;
2. il confronto delle prestazioni in sito con le miscele tradizionali a caldo è spesso a favore di queste ultime.

Il problema più evidente delle tecnologie a freddo è quello relativo alla non completa copertura degli inerti grossolani da parte dell'emulsione bituminosa, che al contrario non è presente nelle tecniche a caldo, e quindi esse offrono una maggiore durabilità per quanto riguarda la durata complessiva della miscela stesa.

Per questo motivo a partire dall'estremo superiore delle classi di temperatura di produzione, abbassando i valori termici di energia fornita, ci si avvicina alle tecniche tiepide o warm.

I vantaggi di queste tecniche consistono nell'impiego in maniera ridotta rispetto alle tecniche a caldo, di energia termica, prodotta attraverso il consumo di risorse non rinnovabili, e il drastico abbattimento delle emissioni inquinanti in atmosfera. Inoltre la riduzione delle temperature operative garantisce una maggiore longevità agli organi dei macchinari di produzione in impianto, e riducono notevolmente il fenomeno invecchiamento del legante bituminoso dovuto all'ossidazione e alla perdita delle sostanze aromatiche dello stesso, a causa delle alte temperature.

Per questi motivi è facile comprendere che le tecniche tiepide offrono delle potenzialità notevolmente superiori alle tecniche a freddo, e la comunità scientifica sta tentando di raggiungere in termini di durata nel tempo e quindi di prestazioni, le miscele di conglomerato bituminoso prodotte a caldo in maniera tradizionale.

A valle di queste considerazioni, i benefici che ne conseguono in termini pratici dell'effetto dell'abbassamento delle temperature e della riduzione notevole delle emissioni inquinanti, si può riassumere come segue:

- grazie alle temperature operative inferiori rispetto alle classiche temperature a caldo, la produzione e la stesa di conglomerato bituminoso, può essere eseguita anche nei mesi più freddi dell'anno;
- a parità di temperatura di produzione, le miscele prodotte secondo tecniche WMA, possono percorrere nei cassoni dei camion, distanze di gran lunga maggiori rispetto alle miscele HMA, tra il luogo di produzione e il sito di stesa;

- consentono una riduzione dei tempi di attesa per la riapertura al traffico di una tratto di pavimentazione stradale appena stesa.

4.2 Le tecniche di produzione WMA

Tra le tecniche di produzione di conglomerati bituminosi tiepide, rinvenute in letterature scientifica nazionale, ma soprattutto internazionale, è necessario distinguere processi proprietari e non.

Per processo proprietario si intende quel tipo di processo coperto da brevetto relativamente alla metodologia di produzione oltre che alla tutela della nomenclatura intesa come marchio.

La prima divisione dei metodi di produzione WARM MIX ASPHALT può essere fatta in funzione dell’effetto indotto al legante bituminoso, tal quale o modificato, dalla presenza dell’additivo di turno, o del particolare processo di produzione della miscela.

Si distinguono pertanto processi che riducono la viscosità del legante attraverso: la schiumatura del bitume, o attraverso l’utilizzo di fluidificanti del bitume stesso.

Nella prima casistica sono inseriti i seguenti processi proprietari: Aspha-min® zeolite, WAM Foam®, Low Energy Asphalt® (noto in Francia come EBE).

Nella seconda categoria sono invece annoverati i seguenti sistemi: Sasobit® che è processo proprietario, Evotherm® e Asphaltan- B® che sono protetti da copyright ma non sono considerati sistemi proprietari.

Nel seguente diagramma sono riassunti i principali sistemi di produzione di conglomerati bituminosi tiepidi:

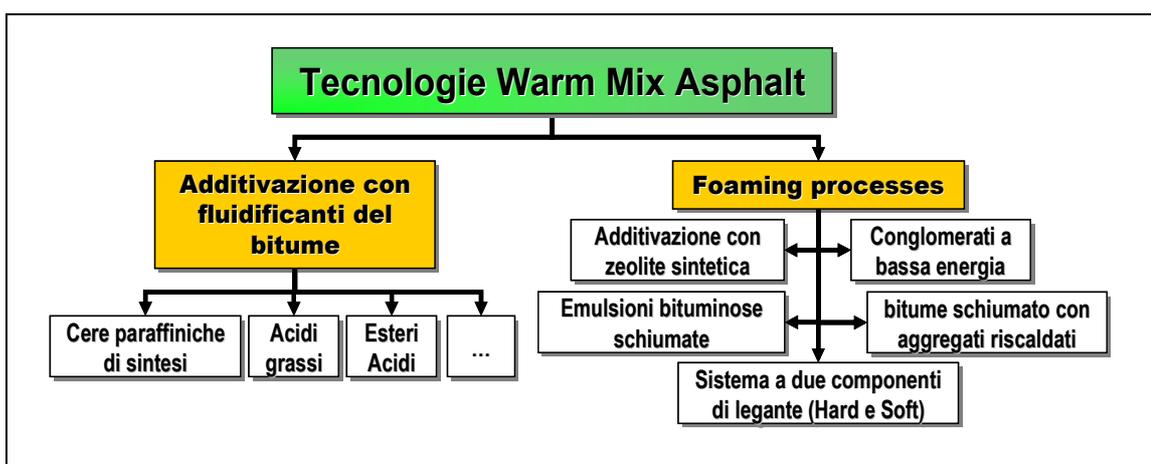


Fig. 4.3 - Classificazione delle tecniche di produzione di conglomerati bituminosi WMA

Di seguito è presentata un’analisi dettagliata delle diverse tecnologie WMA rinvenute in

letteratura, esaminando tutti i parametri di governo delle stesse, e valutando l’efficacia in relazione alle miscele di conglomerato bitumi sono tradizionali a caldo HMA.

4.2.1 Tecniche basate sull’additivazione di fluidificanti del bitume

Tra le due famiglie di metodiche necessarie alla produzione di conglomerati bituminosi tiepidi, la tecnica basata sull’uso di additivi in grado di modificare reologicamente il bitume, risulta essere quella più sperimentata negli anni. I primi approcci al tema del risparmio energetico e alla tutela ambientale, sono stati condotti utilizzando additivi paraffinici in grado di modificare le caratteristiche viscosi del legante bituminoso al variare delle temperature operative. Di seguito sono analizzate le principali tecniche rinvenute in letteratura.

4.2.1.1 Cere paraffiniche: Sasobit®

Nella fase iniziale della ricerca sulle tecniche “tiepide” vi fu un orientamento a favore dell’impiego di sostanze organiche solubili nel bitume atte a modificarne le caratteristiche reologiche in rapporto alle variazioni di temperatura. Tra tali additivi, maggior successo ebbero le paraffine o cere cristalline. Le cere paraffiniche sono cere organiche caratterizzate dall’aver una lunga catena molecolare composta da atomi di carbonio. In particolare le cere utilizzate in campo stradale per la realizzazione di miscele di conglomerato bituminoso tiepido sono cere paraffiniche di sintesi la cui catena molecolare risulta essere ben più lunga rispetto alle catene molecolari della normali cere. Gli additivi che si sono distinti in campo stradale nelle varie sperimentazioni condotte in merito alla produzione di miscele di conglomerato bituminoso WMA, sono le cere di sintesi caratterizzate da idrocarburi alifatici con catena lunga che si formano nella fase di massificazione del carbone nel processo Fischer – Tropsh per la produzione dei carburanti.

All’interno della categoria dei processi atti a ridurre la viscosità del legante bituminoso, a temperature di utilizzo inferiori a quelle classiche delle miscele HMA, si posiziona il processo proprietario noto con il nome di Sasobit®. Si tratta in particolare di un additivo prodotto dalla Sasol Wax. E’ un cristallino fine, una lunga catena alifatica di idrocarburi di polimetilene, prodotto dalla gassificazione del carbone utilizzando processi Fischer-Tropsch. In breve, in una sintesi Fischer-Tropsch, il carbone o un gas naturale (metano) è parzialmente ossidato a monossido di carbonio (CO) e viene fatto reagire in seguito con l’idrogeno (H₂) in condizioni catalitiche, producendo una miscela di idrocarburi aventi lunghe catene molecolari di carbonio (C)₅. Le lunghe catene di carbonio nelle paraffine Fischer-Tropsch consentono punti di fusione più alti; inoltre le strutture cristalline più piccole riducono la fragilità alle basse temperature se comparate

alle paraffine da bitume. Sasobit® ha la proprietà di ridurre la viscosità del bitume; questa riduzione della viscosità permette di ridurre le temperature di lavorazione di 18 - 54 °C. Sasobit® ha una temperatura di solidificazione di circa 102°C ed è completamente solubile nel bitume a temperature maggiori di 120 °C. A temperature inferiori al suo punto di fusione, Sasobit®, formerebbe una struttura cristallina nel bitume che aggiunge stabilità alla miscela. La Sasol Wax ha sviluppato una tecnologia di modificazione di Sasobit® con polimero SBS. La capacità di Sasobit® di essere combinato con dei polimeri per raggiungere la specifica di bitume modificato con polimeri mentre ancora possiede i vantaggi propri del WMA ha portato alla creazione di Sasoflex®, che è un composto di un plastomero (Sasobit®) con un elastomero (per esempio SBS). La componente plastomera riduce la viscosità della miscela alle temperature di lavorazione e stesa e riduce la rigidità del conglomerato alle temperature di esercizio della pavimentazione, mentre la componente elastomera mantiene la flessibilità alle basse temperature. Durante la produzione del WMA la Sasol Wax raccomanda un aggiunta di Sasobit® dello 0,8% o più sul peso del bitume, ma mai oltre il 3%. Sasobit® è disponibile in commercio in due forme: fiocchi per essere aggiunti fusi, o in piccole palline per una aggiunta diretta nella miscela.



Fig. 4.4 - A sinistra Sasobit® in fiocchi, a destra sottoforma di palline

L’aggiunta di Sasobit® con il bitume è favorita dalle peculiarità specifiche del suddetto additivo. Esso infatti, a differenza delle tradizionali cere paraffiniche presenta un valore più alto di punto di fusione. Infatti al disotto e al disopra di tale valore di temperatura, Sasobit® presenta due diversi stati fisici:

1. Fuso a temperature superiori ai 90°C c.a. favorisce la riduzione della viscosità dei leganti bituminosi, che vengono con esso additivati, rispetto ai valori di viscosità che avrebbero a parità di temperatura in condizioni tal quali;

2. Cristallizzato al di sotto dei 90°C conferisce maggiore rigidità al legante bituminoso e quindi alla miscela di conglomerato bituminoso anche a regimi termici di esercizio elevati.

Le attività di laboratorio furono correlate ad applicazioni sul campo finalizzate ad ottenere miscele “tiepide” con prestazioni del tutto simili o superiori a quelle dei tradizionali conglomerati a caldo, specie per quanto riguarda la resistenza a fatica, la resistenza alle deformazioni permanenti e la lavorabilità sul cantiere (temperatura di compattazione 100 – 120 °C). L’additivazione del bitume, sia modificato che tal quale, avviene a circa 120 °C mediante agitazione per circa due ore e senza necessità di un miscelatore ad elevata azione meccanica. Tale additivazione induce delle modifiche reologiche al legante bituminoso da consentire la riduzione delle temperature di miscelazione e messa in opera dei conglomerati bituminosi, senza comprometterne lo stato di addensamento finale. Ciò è possibile in quanto l’aggiunta di Sasobit® consente al bitume di rimanere fluido anche a temperature inferiori rispetto a quelle tradizionali. In accordo con quanto afferma il produttore, il quantitativo ottimale di Sasobit® da aggiungere al legante bituminoso è del 3% c.a. rispetto al peso del bitume, e la sua presenza nella miscela di conglomerato bituminoso consente di ridurre le temperature operative da 18° a 54°C. Esistono 2 modalità equivalenti di utilizzo di Sasobit®: miscelato sottoforma di pellets tra gli aggregati prima dell’aggiunta del bitume, oppure premiscelato direttamente con il legante bituminoso e successivamente mescolato con la matrice di inerti [15]. Da una attenta analisi della bibliografia nazionale ed internazionale relativa a questa specifica tecnologia di produzione di miscele di warm mix asphalt, si evince in primo luogo che l’aggiunta di Sasobit® ad un bitume tradizionale provoca in esso un mutamento del suo stato visco-elastico originario.

Una delle prime e più approfondite indagini relative all’utilizzo della cera paraffinica Sasobit®, è da attribuire all’ente di ricerca statunitense NCAT [12]. Nella sperimentazione, gli autori utilizzano 2 tipologie di aggregati (di natura calcarea e di natura granitica) e due tipologie di bitumi classificati secondo la normativa SHRP con i seguenti Performance Grade: PG 64-22 e PG 58-28. Sulla base di queste due tipologie di bitume, miscelando questi ultimi con quantità differenti di Sasobit®, sono state ottenute le seguenti miscele:

- bitume PG 64-22: ottenuto a partire dal PG 58-28 aggiungendo Sasobit® nella quantità di 2,5%;
- bitume PG 70-22: ottenuto a partire dal PG 58-28 aggiungendo Sasoflex® nella quantità del 4%;
- bitume PG 76-22: ottenuto a partire dal PG 64-22 aggiungendo Sasoflex® nella quantità del 4%.

Queste ultime miscele di legante bituminoso e additivo paraffinico sono l’esempio di come è possibile aumentare la temperatura massima di esercizio di un performance grade, senza modificare il valore minimo. Attraverso l’utilizzo della Pressa a taglio giratoria, utilizzando un numero di giri pari a 125, è stata desunta la quantità ottimale di legante bituminoso per tipologia di inerti, a partire dal fuso granulometrico di progetto. Per gli inerti di natura calcarea è stato utilizzato un quantitativo di legante bituminoso pari a 4,8%, mentre per gli aggregati granitici pari a 5,1%. Dopo aver verificato le miscele alla temperatura di 149°C, sono state scelte ai fini delle prove di valutazione del grado di addensamento delle varie miscele, 3 temperature di costipazione inferiori pari a 129°C, 110°C e 88°C.



Fig. 4.5– Test reologico su un legante additivato con Sasobit®

Dalle prime analisi sul comportamento reologico effettuate sui leganti bituminosi additivati e non con Sasobit, attraverso l'utilizzo del viscosimetro rotazionale, si riscontra una diminuzione della viscosità nel legante contenente l'additivo organico per valori di temperatura superiori a 80° - 90°C. Il legante additivato presenta una fluidità maggiore in luogo della riduzione di viscosità all'interno del range di temperatura che generalmente vengono impiegate per la produzione e messa in opera della miscela, come è possibile notare dalla seguente immagine:

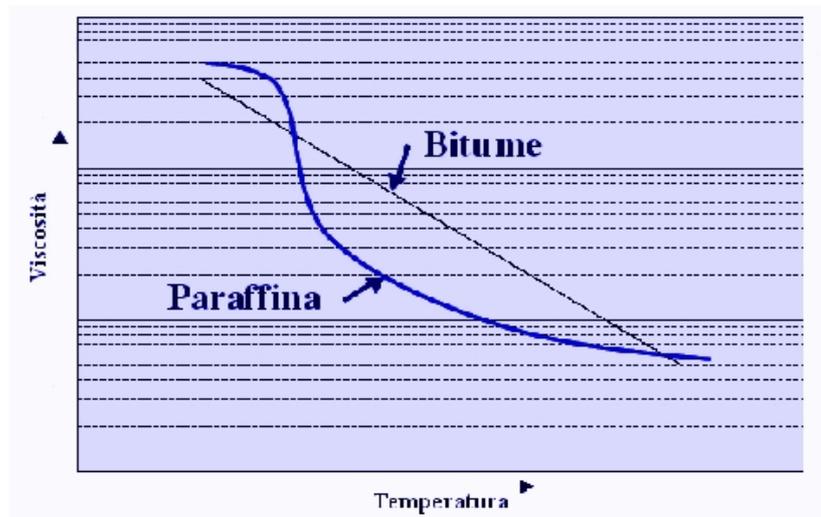


Fig. 4.6 - Viscosità in funzione della temperatura: confronto tra legante bituminoso e paraffina

In accordo con i risultati ottenuti da [12], una altra importante sperimentazione [5] ha studiato gli effetti prodotti da percentuali variabili di Sasobit®, da 0,5% a 4,5% rispetto al peso del legante bituminoso. Da questa ricerca si evince che la riduzione della viscosità nel legante bituminoso è molto evidente per temperature prossime ai 100°C e la viscosità rimane inferiore a quella del legante tal quale anche per valori di temperature pari a 140°C, tipiche della fase di messa in opera delle miscele di conglomerato bituminoso. Al disotto dei valori di temperature per i quali si apprezza l'effetto fluidificante dell'additivazione, la presenza di Sasobit® contribuisce ad aumentare la rigidità del legante grazie al fenomeno della cristallizzazione delle cere, quando esse si trovano a temperature inferiori al loro punto di fusione [5] [12]. Questo aspetto è valutato all'interno della ricerca condotta da alcuni studiosi [23], i quali utilizzando il reometro rotazionale a taglio (Dynamic Shear Rheometer – DSR) alle temperature intermedie di esercizio, ovvero nel range compreso tra 16° - 60°C, sottolineano che la componente elastica del modulo complesso G^* del legante bituminoso, nota come “storage modulus” G' , risulta essere superiore nei leganti additivati con Sasobit® di circa il 16%, sia che alla base della modifica ci sia un legante tal quale che un legante modificato con polimeri. Un medesimo incremento si registra nella componente viscosa del modulo complesso, nota con il nome di “loss modulus” G'' . L'incremento in questo caso, in accordo con [23] è di circa il 14%. Tutti i risultati sono ottenuti additivando nella quantità del 3% Sasobit® a leganti bituminosi tal quale e modificati. Una ulteriore conferma in letteratura è offerta da un'altra ricerca di alcuni studiosi i quali nel loro lavoro [21] hanno utilizzato le due tipologie più comuni di legante bituminoso: PG 64-22 e PG 70-28, additivandoli rispettivamente con le seguenti quantità di Sasobit®: 2%, 3%, 4% riducendo le temperature di miscelazione da

163°C a 147°C (ovvero di c.a.16°C) per il PG 64-22, e i quantitativi di 2%, 3% e 4% per il legante PG 70-28, ottenendo le rispettive diminuzioni di temperatura: 10°C, 12°C, 13°C. Inoltre gli autori osservano un aumento delle prestazioni dei leganti bituminosi additivati con diverse percentuali di Sasobit®. In particolare si ottengono i seguenti miglioramenti riportati in tabella:

Bitume di partenza	Additivo	Bitume risultate
PG 64-22	3% Sasobit®	PG 68-22
PG 70-28	4% Sasobit®	PG 80-28

Tab. 4.1 - Risultati dell’additivazione di Sasobit a 2 tipologie di leganti bituminosi [21]

Su i leganti bituminosi additivati e non, gli autori hanno eseguito test reologici atti a valutare l’effettiva riduzione della viscosità del bitume contenente Sasobit® a diverse temperature di esercizio. I risultati ottenuti tramite l’utilizzo del Viscosimetro Rotazionale, sono di seguito esposti sottoforma di output grafico:

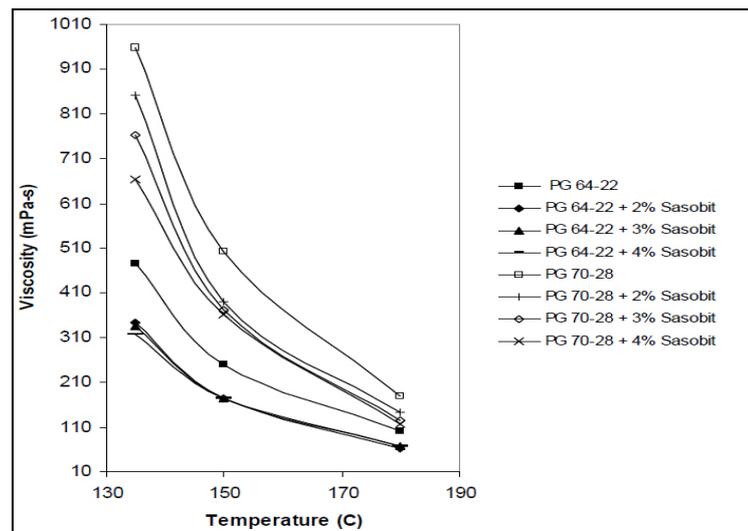


Fig. 4.7 - Risultato del test del Viscosimetro rotazionale [15]

E’ stata valutata inoltre la viscosità dinamica, attraverso test del Dynamic Shear Rheometer sui leganti fluidificati con Sasobit® e non, in condizioni tal quali e invecchiate dopo il trattamento SHRP del Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT). Ogni prova è stata eseguito in accordo con la norma AASTHO T 315-02 per ben tre volte al fine di avere la certezza della riproducibilità nei risultati, a tre differenti temperature di esercizio. Ovvero per il legante PG 64-22 sono state adoperate le seguenti temperature: 60°C, 64°C e 70°C. Per il legante PG 70-28 le seguenti: 60°C, 70°C e 80°C. I risultati dei test dimostrano che il termine $G^*/\sin(\delta)$ cresce con la presenza crescente di Sasobit®. Ciò si traduce in un aumento della stabilità della resistenza alle

deformazioni delle miscele di conglomerato bituminose “tiepide” contenenti Sasobit®, sottoposte temperature ambientali elevate, e ad elevati livelli di traffico e sollecitazioni. Gli effetti prodotti dopo il test di invecchiamento hanno evidenziato invece un andamento opposto del parametro $G^*/\sin(\delta)$, il quale decresce al crescere del quantitativo di Sasobit®.

Questo risulta essere l’aspetto più interessante delle tecniche di additivazione con cere Fischer – Tropsh per la produzione di miscele di conglomerato bituminoso “tipide”, in quanto è possibile ridurre le temperature di produzione e di messa in opera dei conglomerati bituminosi senza comprometterne la lavorabilità, la addensabilità e quindi le proprietà di resistenza meccanica, assunto che la viscosità del legante bituminoso è ridotta grazie alla presenza di tali additivi organici.

Il tenore di paraffina varia da un minimo del 3% in peso del bitume fino ad un massimo del 4%, valore che si consiglia di non superare per evitare problemi di suscettibilità in presenza di elevate temperature. L’utilizzo di paraffine nella formulazione di conglomerati bituminosi potrebbe sembrare a prima vista del tutto illogico, visto che nelle normative esistono limitazioni al loro contenuto nel bitume (in genere non superiore al 2%). In realtà si tratta di sostanze diverse, visto che le paraffine naturali presenti nel bitume hanno un numero di atomi di carbonio inferiore a 45 e presentano una temperatura di fusione compresa tra 45 °C e 70 °C, mentre le paraffine Fischer-Tropsch contengono idrocarburi con catene più lunghe, fino a 100 atomi di carbonio. Grazie ai processi di ricristallizzazione si può elevare fino ai 90 – 100 °C il punto di fusione delle paraffine Fischer-Tropsch.

Appurato l’effetto fluidificante che Sasobit® ha sui leganti bituminosi, è stato possibile individuare un ulteriore contributo che l’additivo offre, alla miscela di conglomerato bituminosa WMA, prodotta con la sua aggiunta. Per quanto riguarda l’addensabilità tali miscele di conglomerato bituminoso sembrano presentare, una volta addensate in laboratorio attraverso sia l’utilizzo della pressa a taglio girevole, che attraverso il compattatore vibrante, una percentuale di vuoti residui (%v) inferiori rispetto alle corrispondenti miscele di controllo a parità di temperature di costipazione [12]. Sasobit migliora la compattabilità delle miscele sia utilizzando la pressa girevole che il compattatore vibrante. Le statistiche indicano una riduzione media dei vuoti fino allo 0,87%. I miglioramenti sono stati notati fino alla temperatura di 88 °C per le miscele prodotte con Sasobit®, e fino a 110 °C per la miscela prodotte con Sasoflex®.

Questa tendenza è confermata anche da altri studiosi [23] i quali a seguito della loro indagine sperimentale, affermano che le miscele contenenti Sasobit® offrono una minore resistenza all’addensamento, e quindi necessitano di un minor impiego di energia per ottenere la percentuale di vuoti residua prevista, attraverso l’utilizzo della pressa a taglio girevole (92% Gmm). Analizzando gli eventuali effetti prodotti dalla presenza dell’additivo Sasobit sulle prestazioni meccaniche in esercizio, ovvero sulla resistenza alla fatica e alle deformazioni

permanenti nelle miscele di conglomerato bituminoso WMA, alcuni studiosi [12] hanno individuato un miglioramento della resistenza all’ormaiamento delle dette miscele. I provini realizzati all’interno della ricerca sono stati prodotti tramite l’utilizzo del compattatore vibrante per poterli meglio testare attraverso l’Asphalt Pavement Analyzer (APA), al fine di valutarne il modulo resiliente e la resistenza all’ormaiamento. Dai primi risultati ottenuti l’aggiunta di Sasobit® non influisce sul modulo resiliente di una miscela se questa viene comparata a miscele contenenti bitume con lo stesso *performance grade* (PG).

Dai risultati ottenuti tramite l’utilizzo del APA si può affermare che l’aggiunta di Sasobit® in genere riduce il fenomeno dell’ormaiamento di una miscela. La profondità delle ormaie aumenta al decrescere delle temperature di miscelazione e compattazione, il che dovrebbe essere dovuto ad un minore invecchiamento del bitume. Dal Test dell’Asphalt Pavement Analyzer (APA) infatti, per il legante PG64-22 risulta una certa tendenza a ridurre la profondità delle ormaie a 8000 cicli, per quantità crescenti di Sasobit® (per quantità di 2% 3% e 4%, ormaie rispettivamente pari a 4,7mm 4,0mm 3,5mm) e a prescindere dal quantitativo di cera paraffinica aggiunta al legante, anche la condizione con il quantitativo minimo (2%) rispetto alla miscela di controllo, fa registrare una profondità delle ormaie inferiori di 1,1 mm (4,7 per il 2% di Sasobit®, contro il 5,8 mm per la miscela di controllo).

E’ possibile trarre simili considerazioni dall’analisi di altre sperimentazioni [26] [21], nelle quali a seguito dei test sulla resistenza alla deformazione permanente all’ormaiamento, nelle miscele contenenti il 3% di Sasobit si registra in media una diminuzione della profondità delle ormaie di circa il 65% rispetto alle miscele di controllo tal quali. Per quantitativi di additivo paraffinico di 10 volte inferiori (0,3%) la riduzione della profondità delle ormaie è prossimo al 45% misurato sempre in relazione alla profondità delle ormaie prodotte nelle miscele di conglomerato bituminoso di controllo tal quali. Secondo la ricerca precedentemente citata [12], nella fase di miscelazione in cantiere si potrebbe verificare il problema della con completa essiccazione degli inerti. Se l’umidità contenuta negli aggregati non evapora completamente durante la miscelazione a causa delle basse temperature di miscelazione, l’acqua potrebbe rimanere a contatto con la superficie degli aggregati, il che potrebbe portare ad un incremento della suscettibilità ai danni dovuti all’umidità.

Per simulare gli attuali processi di miscelazione di un tipico impianto di produzione, sono stati utilizzati un miscelatore ed una fiamma al propano per riscaldare gli aggregati e miscelare i provini da sottoporre alla prova TSR (Tensile Strength Ratio).

Dapprima gli aggregati sono stati combinati al bitume, e prima che la miscela fosse scaldata è stato aggiunto un 3% d’acqua oltre il valore di assorbimento di ogni aggregato. L’aggiunta di questo 3% d’acqua è stata scelta perché stimata come una tipica quantità di una riserva di umidità. Per esempio, gli aggregati granitici hanno un valore di assorbimento del 1,1%, perciò è

stato aggiunto un totale 4,1% d’acqua sul peso degli aggregati al materiale asciugato in stufa prima che fosse aggiunto il bitume. L’aggiunta degli aggregati nel secchio miscelatore avviene in due passi perché si è riscontrato che quando tutti gli aggregati vengono aggiunti contemporaneamente (nel momento in cui l’aggregato viene portato alla temperatura di miscelazione prevista, che è 275 °F), tutto il materiale fine si sposta verso il fondo del secchio. Perciò, quando il bitume è aggiunto all’aggregato, il materiale fine non è completamente rivestito. Questo fenomeno risulta alleviato se si aggiungono la componente fine e la componente grossa separatamente. Da ogni miscelatore sono stati prodotti tre provini. Durante il processo di miscelazione la temperatura diminuiva, perciò ogni provino è stato sistemato in stufa fino a quando non era raggiunta la temperatura di compattazione 120°C questo processo ha la durata di circa 10-15 minuti. Dai risultati ottenuti dagli studiosi nella loro ricerca [12] a seguito delle prove di trazione indiretta, si può affermare che la resistenza a trazione indiretta delle miscele contenenti Sasobit® risulta inferiore, in alcuni casi, rispetto alle miscele di controllo. Si pensa che la riduzione della resistenza a trazione è collegata alla proprietà anti invecchiamento del Sasobit®. Altre prove di laboratorio (APA e HWTM) indicano una buona resistenza all’ormaiamento per le miscele contenenti Sasobit®. Inoltre, studi su stese sperimentali effettuati in Europa, dimostrano che alle miscele contenenti Sasobit® non serve un particolare periodo di trattamento prima dell’apertura al traffico veicolare. Il problema della suscettività all’umidità residua, può essere presente nelle miscele WMA, e consiste nella scarsa adesione tra inerti e legante bituminoso a causa della presenza di umidità all’interno della miscela stessa. Quest’effetto crea dei problemi di adesione facilmente interpretabili come una diminuzione di resistenza alla trazione indiretta. Questo aspetto, relativamente alla metodologia di produzione wma che prevede l’impiego della cera paraffinica Sasobit, è stato affrontato per la prima volta in letteratura, nella ricerca condotta dall’ente statunitense NCAT [12]. Gli autori per simulare la presenza di umidità residua presente negli aggregati prima della miscelazione in impianto con il legante bituminoso, adottano un metodo di miscelazione in laboratorio del tutto simile a quello di impianto, impiegando un contenitore metallico rotante che contiene gli inerti e una fiamma ossidrica che ha il compito di essicarli completamente. Prima che venisse aggiunto il bitume alla miscela di aggregati, gli autori inseriscono all’interno degli inerti 3 percentuali diverse di umidità, attraverso un dosatore spray di acqua. Il quantitativo scelto di acqua è di 3 punti percentuali superiore al limite di adsorbibilità tipico dell’inerte considerato. I provini così ottenuti sono stati testati tramite la prova di trazione indiretta. I risultati ottenuti non consentono un’analisi univoca in quanto i valori di resistenza alla trazione indiretta risultano essere figli delle particolari combinazioni tra tipologia di aggregati, legante bituminoso e presenza o meno di additivo fluidificante. Si può osservare altresì una tendenza alla diminuzione della resistenza alla trazione indiretta, dovuta probabilmente all’effetto anti invecchiamento offerto da Sasobit e

precedentemente commentato. Tali considerazioni sono confermate dai risultati ottenuti da un altro team di ricerca, il quale nella sua pubblicazione [23] a fronte dei risultati della prova di trazione indiretta, effettuata in condizioni sature e asciutte, ottenuti dalle miscele contenenti Sasobit e non, affermano che la presenza dell’additivo fluidificante risulta neutrale rispetto alla resistenza alla trazione indiretta. In accordo con quanto è emerso dalla ricerca NCAT [12] nelle miscele WMA realizzate a bassi valori di temperature, si registra un calo della resistenza alla trazione indiretta. E’ possibile inoltre rinvenire in letteratura, degli impieghi alternativi dell’additivo Sasobit®, in particolar modo associato all’utilizzo di materiale fresato da pavimentazioni stradali (RAP – Reclaimed Asphalt Pavement), in modo da preservare l’ambiente grazie ai tipici benefici di una miscela Warm Mix Asphalt, ed aggiungendo un ulteriore contributo alla salvaguardia delle risorse ambientali, utilizzando materiale proveniente da riciclo.

Infatti il crescente reimpiego di materiale fresato proveniente da pavimentazioni stradali ha posto il problema della presenza in quantità sempre maggiori di legante bituminoso invecchiato all’interno della miscela riciclata, riducendo la lavorabilità e quindi l’addensabilità del cgb ricilato. Per migliorarne la lavorabilità, vengono affiancate alle operazioni di riciclo, l’utilizzo delle tecniche Warm Mix Asphalt. Dall’analisi bibliografica dei lavori prodotti da diversi studiosi [34] [40] [41] [45] si evince che la presenza di Sasobit® nelle miscele contenenti quantità variabili di RAP, contribuisce notevolmente a ridurre la viscosità, migliorandone la lavorabilità ed addensabilità. Ciò è dovuto molto probabilmente alla capacità dell’additivo paraffinico di migliorare il Performance Grade di un legante bituminoso, anche se esso risulta essere già invecchiato. Dallo studio condotto da alcuni ricercatori [34] si riscontra la possibilità di realizzare miscele di conglomerato bituminoso con il 75% di RAP, prodotte a temperature inferiori a quelli convenzionali, aggiungendo alla miscela l’1,5% Sasobit® rispetto al peso totale del legante bituminoso, ed ottenendo una miscela con dei vuoti residui del tutto simile alle miscele realizzate con materiali vergini. Tale aspetto è sottolineato anche da altre ricerche [40] [41] nelle quali gli autori, rispettivamente utilizzando l’1,5% di Sasobit® e il 30% di RAP, e il 3% di Sasobit® e il 25% di RAP, ottengono le miscele riciclate che offrono maggiore attitudine all’addensamento. Nel primo studio è stata inoltre valutata la resistenza della miscela al traffico veicolare, predisponendo una stesa sperimentale in una strada di cantiere destinata esclusivamente al traffico pesante, misurando a distanza di un anno dalla stesa, un’ottima resistenza alla fessurazione per fatica e all’ormaiamento. Nel secondo studio, invece, attraverso l’utilizzo dei un test atto a valutare sperimentalmente la lavorabilità delle miscele di conglomerato bituminoso (Asphalt Workability Device – AWD), si evince che l’indice di lavorabilità proprio del test, risulta essere sempre superiore per la miscela contenente il 25% di RAP e il 3% di Sasobit® rispetto a quella contenente l’1,5%, per tutte le temperature di test comprendenti il range tra 82° - 140°C circa. Mentre per le miscele ottenute utilizzando il 10% di RAP, l’andamento dell’indice di

lavorabilità (Workability Index – WI), si inverte a favore delle miscele contenenti l'1,5% di Sasobit®. Questo effetto induce ad affermare probabilmente che il quantitativo ottimale di additivo paraffinico da aggiungere alle miscele contenenti materiale fresato, è proporzionale proprio al quantitativo di RAP. In un'altra ricerca basata sempre sullo studio di miscele riciclate prodotte con tecniche WMA, gli autori [45] si pongono l'obiettivo di realizzare una miscela ottenuta senza l'aggiunta di materiale vergine, e quindi contenente il 100% di RAP. Inoltre per raggiungere questo obiettivo stabiliscono una temperatura di miscelazione del materiale fresato, tipica delle tecniche Warm Mix Asphalt, ovvero 125°C. Confrontando la miscela di controllo (100% RAP, senza additivi WMA), con altre 3 miscele contenenti 3 percentuali di Sasobit® (1,5% - 2,0% - 5,0%), attraverso l'utilizzo del test AWD, utilizzato anche nella memoria [41], stabiliscono che è possibile ottenere miscele con il 100% di RAP con una percentuale di vuoti residui prossimi alle miscele contenenti materiali vergini, aggiungendo il 5% di Sasobit®. Altresì un valore molto simile di addensamento si ottiene con il 2% di additivo paraffinico, per cui a fronte di una differenza di circa 0,8% in meno rispetto alla miscela contenente il 5% di Sasobit®, risulta essere economicamente più vantaggioso l'utilizzo del 2% ottenendo un risultato del tutto analogo in termini di grado di addensamento.

Dal punto di vista delle emissioni di sostanze nocive, un recentissimo studio [59] pubblicato dall'ente statunitense NCAT nel mese Settembre 2009, ha evidenziato come, durante la produzione di miscele di conglomerato bituminoso, con l'aggiunta di Sasobit®, si registri una sostanziale diminuzione di emissioni nocive nell'ambiente, rispetto ad una produzione HMA tradizionale. Questa sostanziale riduzione, stimata per la CO₂ nel -42% c.a. e nella CO nel -63,2%, è da attribuire alla riduzione delle temperature di miscelazione e produzione, e quindi alla riduzione dei consumi di carburante.

A seguito dell'analisi bibliografica condotta sulla tecnica dell'additivazione di cere paraffiniche FT, per l'ottenimento di miscele di conglomerato bituminoso “tiepide”, si propone in tab. 4.2 una sintesi di tutti gli effetti prodotti dall'additivo:

SASOBIT®			
EFFETTO	CARATTERISTICA	ANALISI SU	RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO
↓	Viscosità	Legante bituminoso	[12] – [5] – [23] – [21]
↑	Storage Modulus G'	Legante bituminoso	[23] – [21]
↑	Loss Modulus G''	Legante bituminoso	[23] – [21]
↓	% Vuoti residui	Miscela CGB	[12] – [23] -
↓	Temperatura di compattazione	Miscela CGB	[5] – [12] – [23] – [21]
↑	Resistenza ormaio	Miscela CGB	[12] – [21] – [26]
↓	Emissioni di fumi	Miscela CGB	[5] – [12] – [23] – [21] – [58] – [59]
↓	Viscosità	Miscela CGB w/ RAP	[34] – [40] – [41] – [45]
↑	Grado addenamento	Miscela CGB w/RAP	[40] – [41]

Legenda: CGB = ConGlomerato Bituminoso
 ↑ : aumenta rispetto alla miscela corrispondente tal quale;
 ↓ : diminuisce rispetto alla miscela corrispondente tal quale;
 = : ininfluente rispetto alla miscela corrispondente tal quale;

Tab. 4.2 – Quadro sinottico degli effetti prodotti dall’additivo Sasobit® sulla miscela di cgb

4.2.1.2 Asphaltan-B®

Simile alla cera paraffinica Fischer Tropsh Sasobit®, un altro additivo che consente di ottenere una miscela di conglomerato bituminoso a bassa energia, prende il nome di Asphaltan-B®. Si tratta di una particolare paraffina a basso peso molecolare che impiegata nelle miscele di conglomerato bituminoso consente di ridurre la viscosità e quindi renderle lavorabili a temperature inferiori a quelle tradizionali delle miscele HMA. Anch’esso fa parte della famiglia degli additivi “asphalt flow improvers”, che tradotti dall’inglese assumono il nome di fluidificanti del bitume. Il produttore infatti ne raccomanda la miscelazione direttamente con il legante bituminoso in un quantitativo compreso tra il 2 – 4% in peso rispetto al bitume stesso, ma può essere aggiunta anche a miscelazione completata. Così come Sasobit® essa è in grado di ridurre la temperatura di miscelazione del conglomerato bituminoso, avendo un punto di fusione di 99°C al disopra del quale risulta fluida, e al disotto presenta la fase cristallina irrigidente della miscela. Il produttore non definisce di quanto può essere abbassata la temperatura di miscelazione rispetto alle miscele tradizionali a caldo HMA, ma consente di aumentare il grado di addensamento e la resistenza alla deformazioni permanenti, nonché di ridurre il fenomeno della suscettività

all’umidità. Pochi studi sono stati condotti in merito a tale additivo, forse per via del fatto che esso non trova spazio all’interno del mercato stradale statunitense nel quale è l’additivo Sasobit® a farla da padrone. Secondo alcuni studiosi [47] la specificità fisico chimica del prodotto sembra essere destinata per l’impiego nella realizzazione di strati di pavimentazioni stradali particolarmente chiusi.

4.2.2 Tecniche basate sulla formazione di schiuma di bitume

La seconda famiglia delle tecniche per la realizzazione di miscele di conglomerato bituminoso a bassa energia, si basano non sulla modifica della reologia del legante, ma sulla possibilità di rendere tutta la miscela di conglomerato bituminoso più lavorabile, a parità di temperatura rispetto alle miscele tradizionali a caldo, favorendo la schiumatura e l’espansione volumetrica del legante bituminoso durante la miscelazione. Le diverse tecniche di seguito analizzate, si differenziano sostanzialmente per il differente modo di produrre schiuma di bitume, oltre che per gli effetti prodotti nella miscela WMA

4.2.2.1 WAM-Foam®

Verso la fine del 20° secolo al fine di limitare il quantitativo di emissioni inquinanti nell’atmosfera, nel campo stradale venne avviata per la prima volta una ricerca congiunta tra ricercatori francesi e norvegesi, al fine di individuare una metodologia per una produzione eco compatibile di conglomerati bituminosi per uso stradale, che non differissero dalle miscele di riferimento a caldo HMA. Nasce grazie a questa joint venture il processo denominato WAM Foam® (traducibile dall’inglese come Miscela di conglomerato bituminose tiepide con schiuma) messo a punto dalla Shell Bitumens e consente di abbassare le temperature di miscelazione e quindi di produzione dei conglomerati bituminosi di circa 50°C rispetto alle miscele classiche a caldo, producendo il benefico effetto di ridurre notevolmente l’emissione di sostanze inquinanti. La tecnica si fonda sull’utilizzo in tempi e modalità differenti di 2 diverse tipologie di leganti bituminosi, uno soft e uno hard (a bassa e alta penetrazione), utilizzando i medesimi impianti di produzione delle miscele di conglomerato bituminoso tradizionali, corredati di uno specifico sistema per la schiumatura del bitume hard. Il metodo consiste nell’utilizzare il 6% di legante bituminoso diviso in 30% come bitume soft e il 70% come bitume hard, in momenti differenti. Gli aggregati devono essere preventivamente riscaldati ad una temperatura di circa 130°C per poi essere mescolati con il legante bituminoso soft a 110°C. La scelta di miscelare gli aggregati ad una più bassa temperatura con legante bituminoso più tenue, proviene dal concetto di equiviscosità, per il quale la temperatura di miscelazione di un legante bituminoso con gli inerti deve avvenire a quella temperatura per la quale la viscosità del legante risulta essere pari circa a 0,2 Pa*s. In un bitume soft, caratterizzato dall’aver un basso valore dell’indice di penetrazione, la temperatura di miscelazione di equiviscosità può essere assunta compatibile con la temperatura di 110°C. la miscelazione così avvenuta risulta del tutto simile a quella ottenibile a temperature più alte per le miscele HMA con bitumi più “duri”, con la differenza che se la miscela warm fin qui ottenuta

risultasse già al completo, mostrerebbe in breve tempo problemi per ciò che riguarda la resistenza e quindi sarebbe fin da subito soggetta alla formazioni di deformazioni permanenti all’apertura al traffico veicolare (ormai).

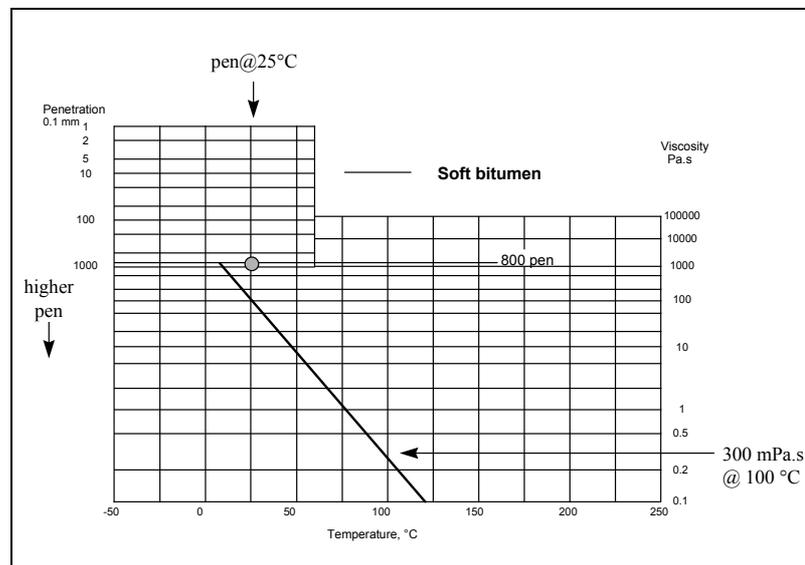


Fig. 4.8 – Diagramma rappresentativo del legame tra temperatura, viscosità e penetrazione di un legante bituminoso [44]

Per migliorare quindi le caratteristiche di resistenza della miscela, il produttore ed ideatore del metodo, ha stabilito che l’aggiunta di un bitume hard risulta essere quanto mai necessaria. Prima dell’aggiunta del bitume hard, che verrà iniettato sottoforma di bitume schiumato, è necessario assicurarsi che il bitume soft abbia completamente rivestito gli inerti in modo tale da proteggere la loro superficie dalla presenza di umidità tipica del bitume schiumato, rischiando di pregiudicare l’adesione bitume inerte. Dallo studio condotto su una stesa sperimentale da alcuni ricercatori norvegesi [3] emerge visivamente che sia subito dopo la stesa, che a distanza di 3 anni dall’apertura al traffico, la pavimentazione realizzata con la metodica WAM Faom® non presenta differenze in termini fessurativi o di deformazioni superficiali rispetto al tratto realizzato con il conglomerato bituminoso di controllo HMA. Dalle prove di rottura a fatica effettuate sulle carote prelevate da alcuni tratti di stesa in diversi periodi temporali (2 settimane, 2 mesi e 6 mesi dalla stesa) risulta evidente che non si è verificato nessun effetto di invecchiamento dopo la messa in opera ed i risultati in termini di resistenza risultano prossimi a quelli della miscela HMA di controllo, come è possibile osservare dal grafico tratto dallo studio in esame:

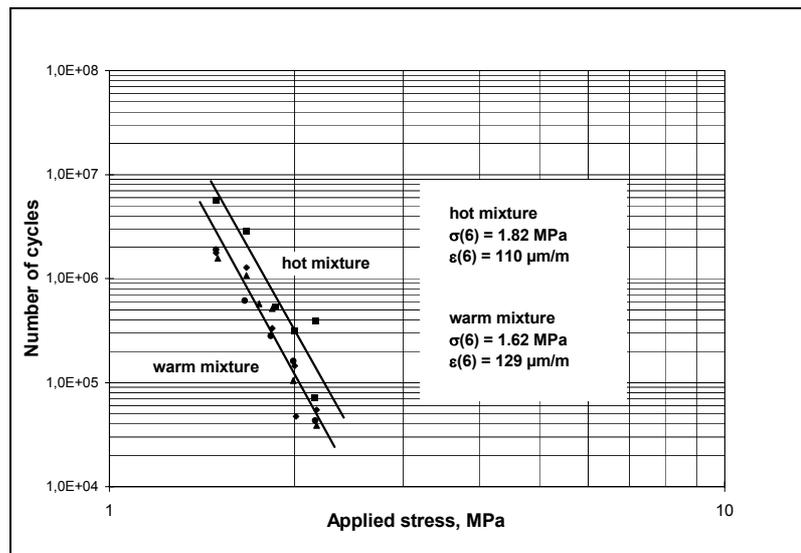


Fig.4.9 – Diagramma delle prove di rottura a fatica (NAT) per i provini HMA e WMA [3]

Negli studi condotti in territori scandinavi [1] si è constatato che a parità di condizioni atmosferiche e di umidità degli inerti, una riduzione delle emissioni di CO₂ insieme all’abbattimento delle emissioni di CO, NO_x e di fumi. Un recente studio condotto da alcuni ricercatori italiani [51] basato sulla stesa di 3 tratti sperimentali di una miscela di conglomerato bituminoso WAM Foam® per la realizzazione di uno strato di binder, per una pavimentazione ad alto modulo, destinata ad una arteria autostradale della Toscana, ha permesso di stabilire le proprietà meccaniche di tale miscela. Dallo studio risulta che sia il valore medio del modulo di rigidità, che la resistenza all’ormaiamento, è del tutto simile ai valori registrati per gli strati realizzati con la miscela di controllo HMA, e che inoltre gli strati di pavimentazione Wam Foam® non presentano problemi alla suscettività all’umidità. Oltre alle prestazioni appena individuate, altre ricerche evidenziano come la stesa del conglomerato bituminoso WMA risulta possibile a temperature ambientali più basse rispetto alle miscele di cgb HMA. Ciò consente la stesa e messa in opera oltre che nei siti in cui i climi sono più freddi, anche nei mesi invernali, se si pensa alle località prossime alle nostre latitudini. Dall’osservazione dei risultati sperimentali individuati in bibliografia, anche l’apertura al traffico risulta essere più rapida rispetto ad un conglomerato bituminoso a caldo [3]. A valle dello studio per l’analisi bibliografica condotta sulla tecnica WAM Foam®, per l’ottenimento di miscele di conglomerato bituminoso “tiepide”, si propone una tabella riassuntiva di tutti gli effetti benefici prodotti dalla metodologia:

WAM Foam®			
EFFETTO	CARATTERISTICA	ANALISI SU	RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO
↑	Lavorabilità	Miscela CGB	[3]
=	% Vuoti residui	Miscela CGB	[1] – [3] – [51]
↓	Temperatura di compattazione	Miscela CGB	[51]
=	Resistenza ormaiamento	Miscela CGB	[3] – [51]
↓	Emissioni di fumi	Produzione miscele CGB	[1] – [51]
=	Suscettività all’umidità	Miscela CGB	[51]
=	Modulo resiliente	Miscela CGB	[51]
=	Resistenza alla Trazione Indiretta	Miscela CGB	[51]
Legenda: ↑ : aumenta rispetto alla miscela corrispondente tal quale; ↓ : diminuisce rispetto alla miscela corrispondente tal quale; = : ininfluenza rispetto alla miscela corrispondente tal quale;			

Tab. 4.3 - Quadro sinottico degli effetti prodotti dal processo Wam-Foam® sulla miscela di cgb

4.2.2.2 LT - Asphalt® (Low Temperature Asphalt®)

Nell’ultimo decennio, i ricercatori in campo stradale sono arrivati alla conclusione secondo cui, nei processi di riciclaggio a freddo dei conglomerati bituminosi, la temperatura degli inerti nel momento in cui vengono miscelati con il bitume schiumato, gioca un ruolo fondamentale nella qualità finale della miscela stessa [1]. Da queste considerazioni si dà vita ad una ricerca tra ricercatori sudafricani e olandesi, nell’intento di realizzare una migliore ottimizzazione del processo di stabilizzazione tramite bitume schiumato, introdotto per la prima volta nel 1957 dal Prof. Csany, traendo vantaggio dalla caratteristica del bitume di ridurre la propria viscosità dopo aver subito il processo di schiumatura tramite l’iniezione di acqua e aria. Il metodo denominato Low temperature Asphalt®, ha lo scopo di ottenere miscele con caratteristiche prossime a quelle HMA, ma passando attraverso un notevole risparmio energetico. Lo studio prende vita verso la fine degli anni ’90, e prevede l’utilizzo di inerti riscaldati a temperature inferiori rispetto a quelle di essiccazione usuali, e l’impiego di bitume schiumato. I primi studi [1] [6] hanno focalizzato la propria attenzione in merito alla scelta della temperatura di riscaldamento degli inerti, tenendo conto delle caratteristiche ambientali del luogo in cui la miscela deve essere messa in opera, in

funzione del grado di addensamento finale ottenibile, di ricoprimento degli inerti e di proprietà meccaniche, considerando temperature di miscelazione superiori a quelle ambientali, ma in ogni caso inferiori ai 100°C. Da questi primi risultati si osserva che il riscaldamento moderato degli inerti prima della miscelazione con il bitume schiumato, a differenze del riciclaggio a freddo che esclude tale riscaldamento, produce degli effetti positivi nella miscela di conglomerato bituminoso. In [1] si evidenzia che la scelta delle temperatura di riscaldamento degli aggregati è fondamentale in termini di risparmio energetico, in quanto, il superamento della temperatura di 100°C (limite di evaporazione dell’acqua), corrisponde ad una dissipazione di energia termica al fine di cedere il calore necessario all’evaporazione dell’acqua, senza trarne benefici in termini di riscaldamento degli inerti. Ciò è comprensibile dall’analisi del diagramma in fig. 4.10 tratto da [1]:

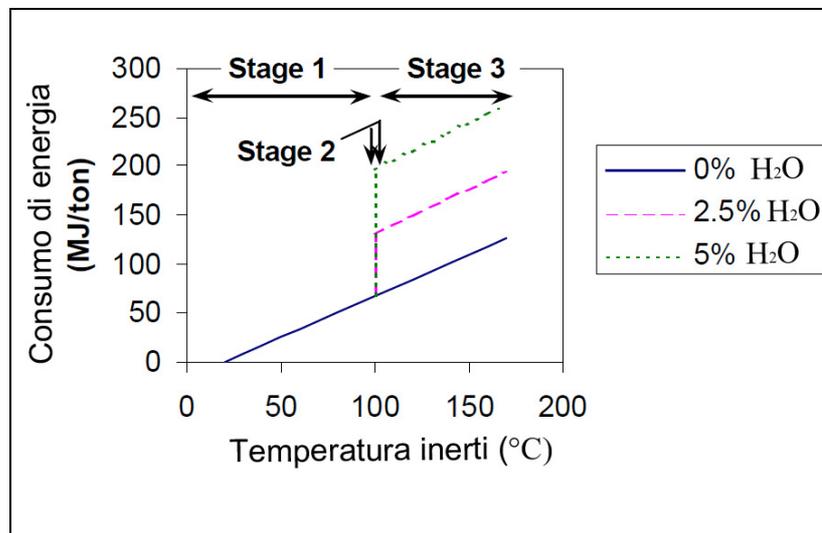


Fig. 4.10 – Diagramma rappresentativo del legame tra il consumo di energia termica e il riscaldamento degli inerti in funzione dell’umidità presente negli stessi [1]

Il surplus di energia da conferire è necessario solamente per l’evaporazione delle diverse percentuali di acqua e non è efficace per il riscaldamento degli inerti. Per tale motivo i ricercatori consigliano di mantenere le temperature di riscaldamento degli aggregati al disotto dei 100°C. Un ulteriore dato che traspare dallo studio riguarda l’efficacia di ricoprimento degli inerti da parte del bitume schiumato, in funzione della temperatura di miscelazione e della dimensione degli inerti. Dal digramma tratto dallo studio [44] emerge che il rivestimento degli inerti, necessario per la realizzazione di una buona miscela di conglomerato bituminoso, cresce al crescere della temperatura degli inerti stessi. Questa affermazione è riassunta nel seguente grafico:

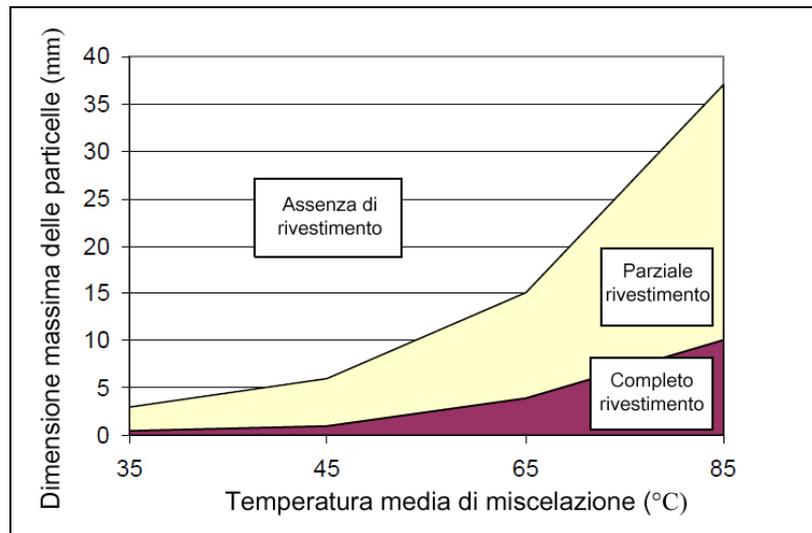


Fig. 4.11 – Diagramma rappresentativo del livello di rivestimento degli inerti da parte del bitume schiumato in funzione della temperatura degli aggregati e della dimensione degli stessi [1]

Confrontando i valori del grado di addensamento delle miscele realizzate nelle varie sperimentazioni è possibile affermare che per facilitare la lavorabilità e quindi l’addensamento delle miscele di conglomerato bituminoso semi-tiepide, è necessario conferire alle stesse un certo quantitativo di umidità. Se ciò avviene è possibile ottenere una riduzione dell’indice dei vuoti prossimo al 30%, mantenendo la temperatura di miscelazione compresa tra i 50 e i 90°C [30]. Dal punto di vista meccanico i risultati di prove di resistenza alla compressione [1] [22] [30] su miscele così prodotte hanno messo in evidenza una maggiore resistenza rispetto alle stesse miscele realizzate a temperatura ambiente, mentre la differenza in termini meccanici (sforzi di compressione e di taglio) con le tradizionali miscele a caldo HMA, risulta essere proporzionata alla differenza di temperatura utilizzata per la miscelazione e costipazione delle miscele stesse [30]. La resistenza a fatica risulta essere equivalente a quella di una miscela HMA. Viste le qualità superiori del metodo di produzione di miscele di conglomerato bituminoso con bitume schiumato con inerti riscaldati, rispetto alla realizzazione a temperatura ambiente, alcuni ricercatori [47] hanno intrapreso una sperimentazione al fine di valutare la possibilità di aggiungere una percentuale di fresato di conglomerato bituminoso all’intero processo, per ottenere una miscela riciclata con prestazioni superiori a quelle ottenibili a freddo. I risultati sperimentali inducono ad affermare che la presenza del fresato all’interno della miscela LTA® conferisce alla stessa una maggiore rigidezza ed una maggiore resistenza a taglio rispetto ad una medesima miscela ottenuta con inerti vergini. Ciò può essere attribuito alla presenza di una quota parte di legante bituminoso invecchiato che presenta valori di rigidità superiori a quelle di

un bitume schiumato.

Dalla analisi bibliografica emerge un quadro positivo nei confronti della metodologia analizzata, in particolare alla luce del rapporto prestazioni offerte/ risparmio energetico ottenuto. La necessità di riscaldare gli inerti risulta essere necessaria per ottenere una dispersione costante del bitume schiumato nella miscela, a differenza della produzione con inerti a temperatura ambiente in cui il bitume schiumato si disperde sottoforma di filamenti, con una conseguente ricopertura degli inerti insoddisfacente [30]. Il processo finale di produzione a seguito delle ricerche condotte in merito, suggerisce di effettuare il riscaldamento della frazione medio/grossa degli aggregati ad una temperatura di circa 90°C. A questa temperatura l’umidità presente negli inerti non sarà evaporata e la sua presenza sottoforma di vapore acque consente di ottenere una miscela più lavorabile e quindi più addensabile alle basse temperature. Per quanto riguarda la produzione in impianto gli studi hanno messo in evidenza la possibilità di adoperare impianti tradizionali, apportando leggere modifiche al sistema di riscaldamento degli inerti, di miscelazione e di iniezione del bitume che dovrà essere preventivamente schiumato. Questo metodo, a fronte del risparmio energetico consente di ridurre le emissioni inquinanti tipiche di una produzione HMA di circa il 40%.

Il seguente quadro riassuntivo mette in evidenza i principali effetti della metodologia Low Temperature Asphalt®:

Low Temperature Asphalt®:			
EFFETTO	CARATTERISTICA	COMPONENTE	RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO
↑	Lavorabilità a basse temperature	Miscela CGB	[1] – [30]
↓	% Vuoti residui a basse temperature	Miscela CGB	[30]
↓	Temperatura di compattazione	Miscela CGB	[1]
↓	Resistenza ormaiamento	Miscela CGB	[1] – [22] – [30]
↓	Resistenza compressione e taglio	Miscela CGB	[1] – [22] – [30]
=	Suscettività all’umidità	Miscela CGB	[1]
↓	Emissioni fumi	Produzione miscele CGB	[1]

Legenda:
 ↑ : aumenta rispetto alla miscela corrispondente tal quale;
 ↓ : diminuisce rispetto alla miscela corrispondente tal quale;
 = : ininfluyente rispetto alla miscela corrispondente tal quale;

Tab. 4.4 - Quadro sinottico degli effetti prodotti dal processo LT-Asphalt® sulla miscela di cgb

4.2.2.3 Additivazione con zeoliti sintetiche: Aspha-min® zeolite

Le zeoliti sono allumino-silicati di metalli alcalini ed alcalino-terrosi di aspetto cristallino e microporoso. La loro struttura è estremamente regolare e si presenta costituita da un reticolo ad estensione infinita di atomi di silicio ed alluminio tetracoordinati con atomi di ossigeno.

I reticoli cristallini sintetizzati in forma puramente silicea originano strutture elettricamente neutre, ma la presenza di atomi di alluminio al centro dei tetraedri, conferisce al reticolo una carica netta negativa dovuta alla minore valenza dell’alluminio stesso. Le cavità ed i canali delle zeoliti sono generalmente occupati da molecole d’acqua, intrappolate e non stabilmente legate, pertanto l’acqua zeolitica può essere allontanata facilmente mediante riscaldamento e riassorbita se si pone la zeolite in ambiente umido. Il passaggio dalla fase idrata alla fase anidra non porta mutamenti nel reticolo e ciò conferma che l’acqua zeolitica è distribuita nei canali ma non partecipa all’edificio cristallino. Tale circostanza, tra gli altri, ha portato ad utilizzare la zeolite come additivo nel confezionamento di conglomerati bituminosi prodotti a temperature operative inferiori rispetto alle temperature tradizionali. Infatti le molecole d’acqua presenti nella loro struttura microcristallina, circa il 18÷20% del peso, vengono liberate già in ambienti a temperature di poco superiore a 80°C. L’acqua libera compie un’azione di “schiumatura” (foaming processes) nei confronti del legante bituminoso delle miscele producendo un diminuzione della viscosità complessiva nel materiale. Il primo prodotto commerciale affacciato nel settore produttivo di conglomerati bituminosi per uso stradale, prende il nome di Aspha-min® zeolite, ed è un prodotto brevettato dalla società tedesca Eurovia GmbH.

Diversi sono gli studi rinvenibili in letteratura di settore e che valutano differenti aspetti prestazionali di miscele in conglomerato bituminoso addivate con zeolite sintetica (WMA). Uno dei primi studi è stato condotto dall’Ente di ricerca stradale americano NCAT, i cui ricercatori in [16] presentano un’estesa attività sperimentale condotta su conglomerati bituminosi per strati d’usura con e senza additivo (aggiunto nella misura del 0,3% sul peso degli aggregati). È stata prevista la combinazione di due distinte miscele di aggregati lapidei, differenziate per natura litologia (granitica e calcarea) con due diversi leganti bituminosi identificati attraverso Performance Grade (PG 58-28 e PG 64-22). Quattro distinte temperature di compattazione, 149°C, 129°C, 110°C e 88°C, hanno comportato un totale di n°32 miscele analizzate. Il progetto e l’ottimizzazione delle miscele sono avvenuti attraverso metodo SUPERPAVE con pressa giratoria ($N_{des}=125$). Nel 93% dei casi, a seguito del processo di addensamento giratorio, si è evidenziata una maggiore percentuale dei vuoti per le miscele non addivate rispetto a quelle WMA, tali differenze risultano comprese comunque tra 0,1%÷1,2%.

Lo studio prestazionale delle miscele ha valutato, in particolare, l’influenza dell’additivazione zeolitica su: addensabilità attraverso sistema di compattazione vibratoria; modulo resiliente (ASTM D 4123); attitudine delle miscele all’ormaiamento attraverso l’APA test a 64°C; sensibilità

alla eventuale umidità residua (ASTM D 4867). Tale verifica è stata giustificata dalle minori temperature di miscelazione e compattazione, caratteristiche delle miscele WMA, che potrebbero dar vita alla non completa evaporazione dell’acqua (da zeolite e/o aggregati) nella miscela. Ed infine conseguenza della potenziale presenza d’acqua, potrebbe risultare anche una pseudo-lavorabilità del conglomerato bituminoso a compattazione avvenuta. Ciò ha comportato la verifica dalla variazione di resistenza con il tempo per stimare possibili periodi di stagionatura prima dell’apertura al traffico.

Principali risultati proposti:

Addensabilità – L’aggiunta di zeolite, per tutte le n°32 miscele, migliora l’attitudine alla compattazione, valutata in termini di percentuale dei vuoti, registrando differenze tra miscele non additivate e WMA comprese 0,1%÷1,9%. Tale migliore vocazione alla compattazione è maggiormente pronunciata per le miscele con legante PG 64-22. In tal senso gli Autori suggeriscono l’eventualità di utilizzare l’additivazione con zeolite come possibile espediente per abbassare il dosaggio di legante ma su questo consigliano, altresì, la necessità di una sperimentazione *ad hoc*. **Modulo resiliente** – La maggiore compattezza delle miscele additivate con zeolite si riflette sul modulo resiliente anche se con bassi coefficienti di correlazione tra percentuale dei vuoti e modulo resiliente. Una ANOVA (ANalisi della VARianza) effettuata sui risultati ottenuti non individua, infatti, significativi effetti della zeolite sul modulo resiliente. Effetti significativi (livello di confidenza 0,95) sono invece imputati alla temperatura di compattazione, al PG del legante, e alle coppie di variabili temperatura-natura aggregato e temperatura-PG del legante. E’ possibile individuare le stesse considerazione analizzando uno studio più recente condotto da alcuni ricercatori dell’Università del Michigan [32] i quali hanno condotto una sperimentazione mirata quasi esclusivamente allo studio dei possibili effetti prodotto dall’additivo zeolitico alla sola componente legante bituminoso. Dai risultati ottenuti a seguito di test reologici condotti tramite la prova del viscosimetro rotazionale, è evidente che la presenza di Aspha-min® non produce modifiche alla viscosità del legante, il quale presenta gli stessi valori della prova eseguita sul campione tal quale di controllo, come è possibile osservare dal grafico in fig. 4.12:

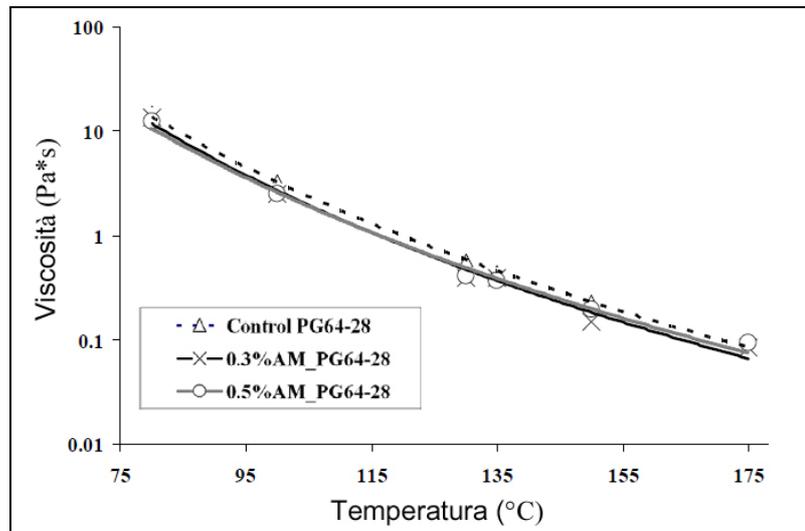


Fig. 4.12 – Diagramma di output dopo test del viscosimetro rotazionale. Confronto tra legante additivato con Aspha-min® zeolite e tal quale [29]

Gli stessi autori a seguito del test del Viscosimetro rotazionale a taglio (DSR) condotto su due diverse tipologie di leganti bituminosi additivati con Aspha-min® zeolite e non, ottengono indicazione in funzione del parametro $G^*/\sin(\delta)$. Secondo gli autori, l'aggiunta dell'additivo neolitico produce in entrambi i leganti (PG 64-28 e 58-34) una diminuzione del parametro proporzionale al quantitativo di zeolite aggiunta. Così come è stato riscontrato da altri ricercatori [21] [15] la capacità di ridurre la temperatura di miscelazione da parte di Aspha-min® zeolite è attribuibile all'effetto di ridurre di uno step il Performance Grade del legante utilizzato nella miscela. Gli stessi autori in [32] asseriscono, a seguito di una prova di Creep condotta su campioni di leganti bituminosi additivati e non con zeolite ed opportunamente predisposti, che la rigidità flessionale di creep di un legante bituminoso additivato con Aspha-min® zeolite risulta essere inferiore rispetto a quella del medesimo bitume tal quale. I risultati ottenuti mostrano in particolare una diminuzione di rigidità flessionale del 8% nel caso del legante additivato con lo 0,3% in peso di zeolite, ed una riduzione di circa il 9% nel caso dell'additivazione con lo 0,5% di additivo. Per tale motivo la miscela di conglomerato bituminoso potrebbe presentare problemi legati alla fessurazioni termica avendo una minore resistenza flessionale.

Lo studio proposto in [21] presenta l'analisi comparativa, in termini reologici, due distinti leganti bituminosi identificati attraverso Performance Grade (PG64-22 e PG70-28) e modificati per additivazione con due distinte tecnologie WMA, una a base di cere paraffiniche e l'altra a base zeolitica. In particolare, si riportano di seguito i principali risultati evidenziati a seguito della modifica del legante con sola zeolite sintetica (tre distinti dosaggi 0,2%, 0,3%, 0,4%). L'applicazione ha evidenziato, tra i principali risultati, alcuni aspetti prestazionali del legante additivato rispetto alla condizione di "puro" attraverso: l'uso di viscosimetro rotazionale per lo

studio della lavorabilità alle alte temperature; l’impiego di reometro a taglio dinamico (DSR) per lo studio dell’attitudine alle deformazioni permanenti (prove di ormaimento estese a miscele di conglomerato bituminoso furono, altresì, eseguite); e il processo di invecchiamento accelerato con RTFOT. Per il legante PG64-22, l’analisi con viscosimetro rotazionale non ha evidenziato nessuna apprezzabile riduzione della viscosità. Di contro, per il legante PG70-28, l’additivazione ha portato ad una apprezzabile, se pur minima, variazione di viscosità traducibile in una riduzione di 3÷4°C della temperatura di miscelazione rispetto ad un valore convenzionale di riferimento pari a 163°C. I risultati ottenuti attraverso reometro a taglio dinamico sono stati espressi in funzione del parametro $G^*/\sin(\delta)$, indicatore della tendenza del legante a fenomeni di *fluage*. Gli Autori registrano, per il legante PG64-22 a 64°C, una non significativa differenza nel confronto con e senza additivo di tale grandezza; mentre nel caso del bitume PG70-28 a 70°C, si evidenzia una leggera diminuzione del parametro $G^*/\sin(\delta)$ compresa tra 2,5%÷17% al crescere del dosaggio di additivo zeolitico. Questo ultimo risultato ha spinto gli Autori ad effettuare prove di ormaimento, con APA test, su miscele di conglomerato bituminoso (legante PG70-28) rivelando la completa assenza di correlazione tra le deformazione massima (Rut Depth) ottenuta e $G^*/\sin(\delta)$, notoriamente invece del tipo monotona decrescente. Ancora sulle prove di ormaimento, con medesimo legante e dosaggio di zeolite pari a 0,3%, una diminuzione di 20°C sulle temperature di miscelazione (163°C) e compattazione (149°C) produce una riduzione della profondità di ormaia del 47% nel confronto con miscele di conglomerato bituminoso non additivate. Infine, per ciò che attiene le prestazioni del legante a seguito di processo di invecchiamento accelerato con RTFOT, con riferimento all’*Aging Factor* (AF = rapporto tra i valori di $G^*/\sin(\delta)$ raccolti pre e post RTFOT), per i due leganti additivati si sono registrati andamenti diversificati se confrontati con i valori relativi al bitume puro. Mentre per il PG 64-22 è presente un decremento di AF che oscilla tra il 2,8% ed il 11% di AF per effetto della zeolite (per dosaggi rispettivamente di 0,4% e 0,2%); per il bitume PG70-28 si è invece registrato un incremento di AF compreso tra il 22%÷25% (per dosaggi in zeolite rispettivamente di 0,4% e 0,3%).

Nella memoria [13] è ottenuto sperimentalmente il modulo dinamico E^* (AASHTO TP62-03) per quattro distinte miscele di conglomerato bituminoso (legante PG 64-22) caratterizzate da due dosaggi di zeolite 0,3% e 0,5%, due temperature di compattazione 100°C e 120°C. Una miscela di controllo senza additivo è invece compattata a 142°C. Nello studio del modulo dinamico tre temperature di prova sono considerate (-5°C; 4°C e 21.1°C) ed sei frequenze di sollecitazione comprese nell’intervallo (0,1Hz÷25Hz). In generale l’additivazione con zeolite, per ogni temperatura di prova, non lascia registrare significanti variazioni su E^* . Ancora, per ogni temperatura di prova e per tutte le frequenze di sollecitazione, la miscela con 0,5% di dosaggio e compattazione 120°C ha fatto registrare, in media, il massimo valore del modulo. I valori di E^* , così ottenuti, sono stati utilizzati quali input per la stima del processo di ormaimento attraverso

modelli previsionali dell’MEPDG (Mechanistic-Empirical Design Guide) evidenziando, alla fine di un arco temporale simulato di 10 anni, una minore profondità di ormaia nel confronto con miscele di controllo non additivate (differenza media pari al 44%).

Per quanto riguarda lo studio del modulo resiliente delle miscele di conglomerato bituminoso M_R , gli autori in [32] giungono alle considerazioni secondo cui, a seguito dei test condotti sulle miscele HMA e WMA, si registrano effetti positivi nel caso del test realizzato alle più alte temperature (37,8°C e 54,4°C), mentre non si registrano variazioni statisticamente apprezzabili per le 2 temperature di prova inferiori (4°C e 21,1°C). Inoltre i provini WMA realizzati con lo 0,3% di Aspha-min® zeolite a 120°C presentano un valore di modulo superiore rispetto alla medesima miscela realizzata a 100°C. Ciò è dovuto al fatto che alle più alte temperature di prova, il legante bituminoso risulta essere più fluido ed elastico rispetto alla condizione delle 2 temperature più basse. Inoltre confrontando le miscele WMA prodotte a 120° e a 100°C, il modulo delle prime risulta essere leggermente superiore probabilmente a causa della miglior efficienza di contatto tra aggregato ed aggregato nel ripartire gli sforzi interni prodotti dal test di prova. Per ciò che concerne lo studio dell’attitudine all’ormaiamento, i ricercatori del NCAT in [16] a seguito di un’ulteriore analisi della varianza (ANOVA) effettuata sui responsi sperimentali non individua significativi effetti della zeolite sul attitudine alle deformazioni permanenti. Risultano, invece avere elevata significatività la temperatura di compattazione, il PG del legante, e la natura litologica dell’aggregato unitamente alle seguenti coppie di variabili: PG del legante-natura aggregato e PG del legante-natura aggregato. Nell’immagine in fig. 4.13 tratta dallo studio statunitense, sono esplicitate tutte le possibili interazioni:

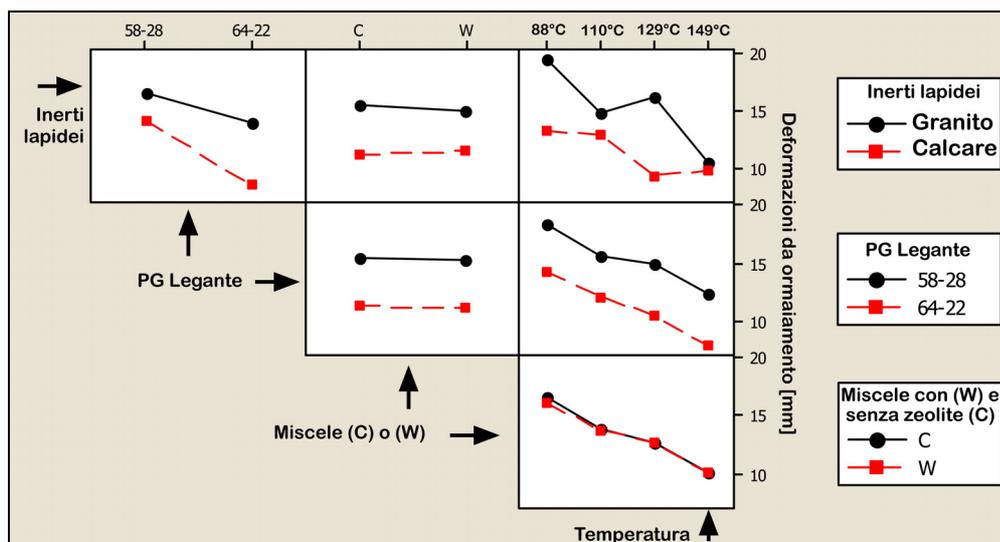


Fig. 4.13 – Quadro sinottico delle relazioni intercorrenti tra le variabili sperimentali e le deformazioni permanenti da prove di ormaimento [16]

Risultati più recenti [32] hanno messo in evidenza una maggiore resistenza alle deformazioni permanenti delle miscele WMA additivate con zeolite rispetto alle miscele tradizionali di controllo. In particolare secondo i risultati ottenuti dai ricercatori a seguito del test dell’Aphalt Pavement Analyzer, le ormaie prodotte sui campioni WMA additivato con lo 0,3% e lo 0,5% di Aspha-min® zeolite a 120°C presentano valori delle ormaie inferiori rispetto a quelle presenti sulle miscele tradizionali a caldo di controllo. Rispettivamente inferiori di circa 2 e 2,5 mm rispetto alle medesime miscele HMA. Secondo tale studio la profondità delle ormaie decresce al crescere della temperatura di costipazione e ciò è molto probabilmente dovuto all’invecchiamento del bitume. Lo studio del comportamento alla sensibilità all’umidità residua è stato condotto da diversi ricercatori. Tra i primi, gli studiosi del NCAT [16] attraverso prova di trazione indiretta e Hamburg wheel-tracking test (prova di ormaiamento) per alcune miscele (Temperatura di compattazione = 121°C) sono giunti all’evidenza secondo cui esistenza una differenza di sensibilità all’umidità residua nel confronto con e senza zeolite. L’uso di calce idrata, in ragione del 1,5% sul peso della miscela, quale additivo anti-stripping, ha mostrato un effetto mitigante di tale attitudine. Un recentissimo studio [43] sottolinea questa evidenza. Secondo gli autori, l’utilizzo di temperature di miscelazione con il processo di foaming, comprese tra i 100°C e i 140°C, non consente la completa evaporazione del residuo di umidità presente negli inerti, e pertanto, causa problemi relativi alla sensibilità all’umidità. In particolare la ricerca è stata condotta utilizzando due quantitativo di umidità diversi (0% e 0,5% in peso rispetto agli inerti asciutti), e tre quantitativi di frazione fine di inerti (limo) contenenti rispettivamente tre diverse percentuali di umidità rispetto al peso degli inerti asciutti (0% - 1% - 2%)., e aggregati di tre origini diverse: due granitici (A e C) e uno composto prevalentemente da scisti (B). In funzione dei test di Trazione Indiretta, utilizzando come parametri la Resistenza a Trazione Indiretta (ITS) ed il Rapporto di Trazione Indiretta (ITR), misurato tramite rapporto tra resistenza di provini asciutto e di un provino saturo, gli autori sono giunti alle seguenti considerazioni. L’indice ITS asciutto delle miscele contenenti frazioni di limo umide, è inferiore rispetto alle altre miscele. Tuttavia questo decremento è attribuibile esclusivamente alla presenza della frazione fine umida di inerti e non alla tecnologia di produzione adottata. Per mitigare l’effetto di sensibilità all’umidità, gli autori suggeriscono l’aggiunta di un additivo anti-stripping (anti-spogliamento degli inerti) Inoltre a parità di condizioni esterne di produzione (temperatura e assenza di umidità) non si registrano differenze nei valori di resistenza tra le miscele contenenti Aspha-min® zeolite e non. In seguito ad una correlazione con i valori di ITS con i possibili valori di deformazione riscontrabili in servizio, si mette in evidenza, secondo il team di ricerca, l’invarianza della presenza dell’additivo zeolitico alla resistenza alle deformazioni permanenti. Per quanto riguarda le prestazioni delle miscele WMA additivate con zeolite, la pubblicazione [24] presenta due differenti applicazioni sperimentali a confronto: una indoor e l’altra outdoor. L’applicazione di laboratorio è stata

condotta su tre differenti miscele di conglomerato bituminoso caratterizzati da tre distinte distribuzioni granulometriche dell’aggregato fino e del filler, medesimo tenore di legante 50/70 (5,2% riferito al peso degli aggregati), e dosaggio commerciale di zeolite (0,3%). Ad ogni miscela è stata accoppiata una omologa miscela di controllo non additivata. La compattazione è avvenuta secondo metodica Marshall. Un range di cinque temperature di compattazione tra 90°C e 130°C, con incrementi di 10°C, è stato utilizzato per le miscele additivate. Mentre tale range è stato innalzato a 110°C e 150°C per la miscela di controllo. Dall’analisi della massa volumica apparente delle miscele addensata nessuna differenza significativa è stata segnalata nel confronto tra miscele con e senza additivo. La sperimentazione si è spostata su un campo prove: una unica miscela studiata, con e senza additivo; tre temperature di compattazione 85°C, 90°C e 95°C. Il confronto è presentato calcolando la differenza di percentuale dei vuoti residui tra miscele additivate e no. Sono costituiti sia provini Marshall costipati in cantiere con 50 colpi a faccia che campioni raccolti per carotaggio. Si evidenzia, in particolare sulle carote, una differenza di percentuale dei vuoti residui, nel confronto tra miscele additivate e no, compresa tra 1,28%÷2,62% al diminuire della temperatura di compattazione. In commercio, a rigor di analisi, esiste un altro additivo di natura zeolitica diffuso a livello internazionale, e denominato Advera® zeolite. Le peculiarità del prodotto risultano del tutto confrontabili con Aspha-min® zeolite e per tale motivo vale la stessa analisi prestazionali appena proposta.

Dal punto di vista delle emissioni di sostanze nocive, un recentissimo studio [59] pubblicato dall’ente statunitense NCAT nel mese Settembre 2009, ha evidenziato come, durante la produzione di miscele di conglomerato bituminoso, con l’aggiunta di zeolite sintetica, si registri una sostanziale diminuzione di emissioni nocive nell’ambiente, rispetto ad una produzione HMA tradizionale. Questa sostanziale riduzione, stimata per la CO₂ nel -20% c.a. e nella CO nel -62%, è da attribuire alla riduzione delle temperature di miscelazione e produzione, e quindi alla riduzione dei consumi di carburante.

Al fine di riassumere i benefici della metodologia che prevede l’aggiunta di zeolite sintetica ad una miscela di conglomerato bituminoso per ridurre la temperatura di miscelazione senza pregiudicarne le performances, viene proposto in tab. 4.5 un quadro di sintesi:

ASPHA-MIN® ZEOLITE			
EFFETTO	CARATTERISTICA	COMPONENTE	RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO
=	Viscosità	Legante bituminoso	[21]
↓	Performance Grade	Legante bituminoso	[32]
↓	% Vuoti residui	Miscela CGB	[16]
↓	Temperatura di compattazione	Miscela CGB	[16] – [32] – [21] – [15]
=	Resistenza ormaiamento	Miscela CGB	[13] – [16]
=	Modulo resiliente	Miscela CGB	[1] – [32]
=	Sensibilità all’umidità residua	Miscela CGB	[1] – [16] – [43]
↓	Emissioni di fumi	Miscela CGB	[59]
Legenda: ↑ : aumenta rispetto alla miscela corrispondente tal quale; ↓ : diminuisce rispetto alla miscela corrispondente tal quale; = : ininfluente rispetto alla miscela corrispondente tal quale;			

Tab. 4.5 - Quadro sinottico degli effetti prodotti dal Aspha-min® zeolite sulla miscela di cgb

4.2.2.4 Evotherm®

E' un processo che utilizza una tecnologia non proprietaria, finalizzata all'ottenimento di miscele di conglomerate bituminoso “tiepide” attraverso l'utilizzo di un pacchetto chimico composto da agenti emulsionanti, additivi per migliorare l'avvolgimento degli inerti e la lavorabilità, e promotori di adesione. Tale sistema sviluppato negli Stati Uniti, prende il nome commerciale di Evotherm®. Esso è commercializzato sotto forma di emulsione bituminosa con un contenuto di legante bituminoso molto alto (pari a circa il 70%). A differenza dei leganti bituminosi tradizionali, Evotherm® viene confezionato a c.a. 80°C. L'acqua contenuta all'interno di Evotherm® è diffusa all'interno della miscela sotto forma di vapore. La miscela WMA risultante, appare visivamente come una miscela tradizionale HMA, a meno dei tipici fumi di queste miscele. Il produttore afferma che il quantitativo necessario per realizzare una miscela WMA, è dello 0,5% rispetto al peso della miscela. Generalmente le emulsioni bituminose vengono impiegate nelle tecnologie a freddo per il confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso riciclate in sito. Tale utilizzo consente di ridurre notevolmente le energie impiegate e i risultati in termini di resistenze meccaniche delle pavimentazioni stradali ottenute dal riciclaggio a freddo, risultano oggi più che soddisfacenti. Il vantaggio della tecnica di riciclaggio a freddo consiste nella possibilità di

miscelare il legante bituminoso contenuto nell'emulsione con gli inerti, garantendo il ricoprimento di questi ultimi senza apporto di energia termica. Essendo una emulsione un sistema bifasico, per il suo ottenimento è necessaria una miscelazione meccanica tra il bitume e l'acqua, dopo aver aggiunto una sostanza in grado di favorire la dispersione del bitume nell'acqua. Generalmente una emulsione bituminosa è composta dal 60% di acqua e dal 40% di bitume, e grazie alla presenza degli agenti emulsionanti, a temperatura ambiente risulta essere liquida. La copertura degli inerti è garantita dalla fase di rottura dell'emulsione che consiste nell'evaporazione dell'acqua in essa contenuta, e nell'adesione tra le goccioline di bitume e gli inerti. Nella tecnica Warm Mix Asphalt, che prevede l'utilizzo di emulsione bituminosa, a differenza della tecnica di riciclaggio a freddo, non necessita di una particolare compatibilità degli inerti per assicurare un adeguato tempo di rottura dell'emulsione, ed inoltre la miscela finale è caratterizzata dall'aver un rapido incremento della propria resistenza. Il suo utilizzo con gli inerti caldi consente di ottenere una schiumatura del bitume presente, grazie all'evaporazione dell'acqua dell'emulsione sotto forma di vapore. Ciò consente di ottenere un aumento di volume del bitume presente nella miscela, consentendo una migliore lavorabilità anche a temperature inferiori rispetto a quelle canoniche di produzione dei conglomerati bituminosi. Secondo il produttore l'utilizzo di Evotherm® consente di ridurre le temperature di miscelazione di un conglomerato bituminoso di circa 40°C il che, secondo alcuni test condotti dallo stesso produttore, produce un risparmio energetico pari al 55%, che tradotto in termini di emissioni di sostanze nocive nell'ambiente corrisponde ad una riduzione del 45% di CO₂ e SO₂, a una riduzione del 60% di NO_x e una riduzione del 41% di materiali organici in genere e residui di benzene.

Il primo test condotto sull'utilizzo di Evotherm® per la produzione di conglomerati bituminosi a bassa energia, è avvenuto in Sud Africa nel 2003. Nel 2005 negli Stati Uniti venne realizzata una stesa sperimentale formata da 660 tonnellate di conglomerato bituminoso WMA, steso su una strada extraurbana in prossimità di Indianapolis nello Stato dell'Indiana [49]. La composizione della miscela prevedeva oltre alla presenza di inerti di natura dolomitica, anche il 15% di fresato proveniente da una pavimentazione stradale (RAP). I risultati sullo stato di addensamento consentono di affermare che la miscela contenete Evotherm®, e stesa ad una temperatura di circa 80°C, presenta, in media, una percentuale di vuoti residui inferiore rispetto alla miscela di controllo di 1,5 punti percentuali. La conferma di quanto misurato in questa che rappresenta una delle prime sperimentazione su questa particolare metodica, proviene da studio condotto negli Stati Uniti d'America, da alcuni studiosi, per l'ente di ricerca NCAT [12]. In questa indagine di laboratorio, a partire da 2 tipologie di leganti bituminosi con Performance Grade differente (PG 64-22 e PG 76-22), e da 2 tipologie di aggregati lapidei (granitici e calcarei), viene valutata la reale efficacia della metodologia. Per la produzione dell'emulsione Evotherm® gli stessi studiosi hanno impiegato entrambi i leganti bituminosi, ottenendo così 2 emulsioni da testare. Hanno

inoltre stabilito 4 temperature (150°C – 130°C – 110°C – 87°C) alle quali confrontare con le miscele di controllo tal quali, tutte le miscele ottenute dalle combinazioni tra differenti tipologie di inerti bitume ed Evotherm®.

A seguito dell'addensamento dei provini tramite l'utilizzo della Pressa a Taglio Giratoria (SCG), i valori dei vuoti residui delle miscele WMA, risultano essere sensibilmente inferiori rispetto a quelli delle miscele di controllo senza la presenza dell'emulsione bituminosa, a parità di temperatura di compattazione. L'aumento del grado di addensamento registrato tramite SCG varia da un minimo del 14% ad un massimo di circa il 31%, considerando tutto il range di variazione di temperatura. Nel dubbio che i valori di addensamento non siano veritieri a causa della non sensibilità della Pressa a taglio Giratoria alla variazione di temperatura, vengono realizzati altrettanti provini tramite l'utilizzo del Costipatore Vibrante, il quale è in grado di produrre provini adatti all'esecuzione del test APA (Asphalt Pavement Analyzer), necessario per valutare la resistenza all'ormaiamento di una miscela di conglomerato bituminoso sottoposta agli effetti deformanti del traffico veicolare. I risultati dell'addensamento confermano quanto ottenuto tramite la pressa SCG, ma nel caso del compattatore vibrante, l'effetto della riduzione dei vuoti risulta essere più marcata nelle miscele che utilizzano gli aggregati di natura granitica. La stessa tendenza alla riduzione della percentuale di vuoti residui, traspare da uno studio [18] condotto su una stesa sperimentale sul circuito di prova del NCAT nello Stato dell' Alabama. Dai risultati ottenuti tramite compattazione delle miscele sperimentali con il costipatore vibrante, risulta che le miscele WMA contenenti Evotherm® costipate a c.a. 88°C presentano uno stato di addensamento paragonabile, se non superiore rispetto a quello delle miscele di controllo prodotte a c.a. 150°C.

I test condotti dai ricercatori americani [12] indicano che la presenza di Evotherm® contribuisce all'aumento di circa il 10% del modulo resiliente rispetto alla miscela di controllo a parità di temperatura e di tipologia di inerti impiegati. Questo aspetto non è confermato dagli studi condotti in [49] in cui gli autori affermano che la presenza di Evotherm® non influenza il modulo resiliente rispetto ad una miscela di controllo realizzata con un legante bituminoso avente lo stesso Performance Grade. E' possibile per affermare che essendo esigua il quantitativo di Evotherm® da additivare ad una miscela di conglomerato bituminoso (contenente il 70% di bitume e il 30% di acqua e agenti emulsionanti) una modifica sostanziale del modulo resiliente, può risultare improbabile.

Per ciò che concerne la capacità di tali miscele warm, di resistere alla fatica e alle deformazioni permanenti, gli stessi ricercatori statunitensi [12] hanno condotto alcuni test per la valutazione della resistenza all'ormaiamento, premesso che tale proprietà è strettamente legata in primo luogo alla tipologia di legante bituminoso (vista la temperatura di prova di circa 65°C), ed in secondo luogo alla temperatura di addensamento della miscela di conglomerato bituminoso. La

presenza di Evotherm®, secondo gli autori, consente di ridurre la profondità delle ormaie prodotte dal passaggio dei mezzi pesanti sulla pavimentazione stradale. Tale diminuzione risulta essere più marcata in corrispondenza della temperatura di compattazione di 130°C. In tale situazione, analizzando i risultati ottenuti dai ricercatori statunitensi, si osserva che la profondità delle ormaie nelle miscele WMA risultano essere inferiori non solo rispetto alle miscele di controllo realizzate alla medesima temperatura, ma anche rispetto alle miscele di controllo ottenute alla temperatura di 150°C. In questo caso l'effetto risulta essere più evidente nelle miscele di cgb contenenti interi di origine calcarea. E' altresì importante sottolineare che la profondità delle ormaie segue un andamento crescente con la diminuzione della temperatura di miscelazione e compattazione delle miscele, a causa probabilmente, del minore invecchiamento del legante dovuto a temperature operative inferiori. Quanto affermato risulta essere confermato anche dallo studio condotto sulla stesa sperimentale di Indianapolis [49] i cui risultati spingono gli autori ad affermare che la presenza di Evotherm® in una miscela di conglomerato bituminoso, consente di ridurre la deformabilità all'ormaiamento sotto l'azione ripetuta di carichi veicolari pesanti. Nello studio condotto sul circuito NCAT [18] a seguito di un passaggio di carichi pari a 513333, la misurazione della profondità delle ormaie mette in evidenza che, in media, la profondità delle ormaie delle stese sperimentali contenenti Evotherm® risulta essere il 18% inferiore rispetto alla profondità delle ormaie misurate sui tratti realizzati con la miscela di controllo. Quindi è possibile affermare che le miscele WMA realizzate con Evotherm® risultano avere una maggiore resistenza all'ormaiamento.

Un aspetto da valutare quando si utilizzano emulsioni bituminose nei conglomerati, è la possibilità che rimanga intrappolata una frazione di acqua sulla superficie degli inerti avvolti dal film di bitume. Ciò potrebbe provocare lo spogliamento degli inerti stessi e causare problemi di perdita di adesione tra i componenti dello scheletro litico. Al fine quindi di valutare la sensitività alla presenza di umidità negli inerti, capaci di ridurre il potere di adesione tra gli stessi ed il bitume, in [12] vengono eseguite prove di Trazione Indiretta, e prove attraverso l'utilizzo dell'Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD). I valori della resistenza alla Trazione Indiretta risultano essere inferiori nelle miscele WMA. Questo può essere interpretato come l'utilizzo di temperature di miscelazione più basse rispetto a quelle canoniche non consente la completa evaporazione dell'acqua contenuta sulla superficie degli inerti, favorendo quindi la possibilità di presenza di danni dovuti all'umidità residua. Ciò è dovuto alla presenza di umidità sulla superficie degli inerti avvolti dal legante bituminoso, il quale non è in grado di garantire un duraturo rivestimento degli inerti stessi. Questa tendenza è confermata anche dal test del HWTD. Risultano evidenti delle fessurazioni nelle miscele di controllo con entrambe le tipologie di aggregati e nella miscela WMA con aggregati calcarei prodotte tutte a 120°C c.a. Il test inoltre conferma una tendenza ad una più elevata resistenza all'ormaiamento delle miscele WMA. Gli stessi risultati sono stati ottenuti

dallo studio degli altri ricercatori americani [49] i quali affermano che le miscele WMA presentano valori di resistenza alla trazione indiretta notevolmente inferiori rispetto alle miscele di controllo, attribuendo ciò alle basse temperature di miscelazione che non consentono la completa evaporazione dell’acqua e dell’umidità residua. Uno studio condotto esclusivamente per la valutazione della suscettività all’umidità delle miscele WMA contenenti Evotherm® [45] consente di comprendere al meglio il comportamento di tali miscele a bassa energia. La metodologia di prova utilizzata è frutto di un protocollo interno al Dipartimento di Trasporti dell’Università di Auburn negli Stati Uniti, quindi non trova riscontro con norme UNI o AASHTO. I risultati confermano però quanto emerge dall’analisi bibliografica. I test di resistenza alla trazione indiretta diametrale condotti su provini realizzati appositamente per il test interno, condizionati dalla presenza di umidità residua (dal 55% al 80%), confermano che il coefficiente di trazione indiretta percentuale, calcolato in rapporto tra i coefficienti di trazione indiretta dei provini condizionati e non, risulta essere inferiore nelle miscele WMA rispetto a quelle di controllo HMA. La diminuzione di resistenza registrata sui provini realizzati in laboratorio è dell’ordine di circa il 20%, mentre per quelli realizzati in sito (in giorni diversi per i quali sono stati monitorate le caratteristiche meteorologiche di umidità relativa e precipitazioni) la differenza varia da un minimo di 1 punto percentuale ad un massimo di 20 punti percentuali in funzione del giorno di stesa.

Dallo studio bibliografico si evince che è necessario stabilire una temperatura minima di miscelazione e di compattazione, rispettivamente pari a circa 130°C e 110°C, necessarie affinché non siano troppo presenti problemi legati alla resistenza all’ormaiamento delle miscela, e alla suscettività all’umidità.

In un’altra ricerca [17] all’utilizzo della tecnica “tiepida” con l’aggiunta dell’emulsione bituminosa Evotherm® viene affiancato l’uso di fresato proveniente da pavimentazioni stradali (RAP). Il quantitativo utilizzato nelle sperimentazione in cantiere è del 20% di RAP. Il legante bituminoso utilizzato presenta un PG pari a 70-22 ed è il medesimo utilizzato per la produzione di Evotherm®. La temperatura di miscelazione della miscela WMA è di circa 107°C, mentre la miscela di controllo tal quale, contenente anch’essa il 20% di fresato è di circa 152°C. L’autore a seguito di test relativi all’addensamento e alla valutazione della resistenza all’ormaiamento, afferma che i vuoti residui presenti nelle miscele WMA risultano essere leggermente superiori rispetto alla miscela di controllo, ma la differenza non è significativa a livello statistico. Ciò consente di affermare che la lavorabilità della miscela WMA è simile a quella della miscela tal quale di controllo. Al contrario però le prestazioni meccaniche risultano essere notevolmente inferiori. Infatti sia i valori di resistenza a trazione indiretta che della resistenza all’ormaiamento, risultano essere nettamente inferiori nelle miscele warm mix, rispetto a quelle di controllo. E’ però auspicabile, secondo l’autore, a fronte di ulteriori ricerche, un utilizzo della miscela contenente Evotherm® per via della bassa energia necessaria per la realizzazione, e per l’assenza di

emissioni di fumi nell’atmosfera. Dal punto di vista delle emissioni di sostanze nocive, un recentissimo studio [59] pubblicato dall’ente statunitense NCAT nel mese Settembre 2009, ha evidenziato come, durante la produzione di miscele di conglomerato bituminoso, con l’aggiunta di Evotherm®, si registri un aumento di produzione di CO₂ ed una diminuzione di CO, rispetto ad una produzione HMA tradizionale. Questo effetto è provocato, secondo gli autori, per ciò che concerne l’aumento del biossido di carbonio (CO₂), da un aumento di consumo di carburante per consentire la rottura dell’emulsione bituminosa durante la fase di miscelazione. Questo aumento di consumi di carburante è stato stimato nell’ordine del 15,4% rispetto al consumo durante una produzione di medesimo quantitativo di conglomerato bituminoso HMA. Mentre la riduzione di monossido di carbonio (CO) è attribuibile alla riduzione delle temperature operative durante la produzione.

A seguito dell’analisi bibliografica condotta sulla tecnica dell’additivazione della particolare emulsione bituminosa commercializzata con il nome di Evotherm® per l’ottenimento di miscele di conglomerato bituminoso “tiepide”, si propone in tab. 4.6 uno schema riassuntivo di tutti gli effetti benefici prodotti dall’additivo:

EVOTHERM®			
EFFETTO	CARATTERISTICA	COMPONENTE	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI
↓	% Vuoti residui	Miscela CGB	[12] – [18] – [49]
↓	Temperatura di compattazione	Miscela CGB	[12] – [18] – [49]
↑	Resistenza ormaiamento	Miscela CGB	[12] – [18] – [49]
↓	Emissioni di CO	Produzione miscele CGB	[59]
↑	Emissioni di CO ₂	Produzione miscele CGB	[59]
↑	Suscettività all’umidità	Miscela CGB	[12] – [45] – [49]
↓	Resistenza alla Trazione Indiretta	Miscela CGB	[12] – [45] – [49]
Legenda: ↑ : aumenta rispetto alla miscela corrispondente tal quale; ↓ : diminuisce rispetto alla miscela corrispondente tal quale; = : ininfluyente rispetto alla miscela corrispondente tal quale;			

Tab. 4.6 - Quadro sinottico degli effetti prodotti da Evotherm® sulla miscela di cgb

4.2.2.5 Low Energy Asphalt® (LEA)

In Europa, tra i Paesi che pongono la propria attenzione sulle problematiche di risparmio energetico e tutela ambientale, la Francia occupa sicuramente un ruolo di primo piano, soprattutto nel settore di produzione di conglomerati bituminosi per uso stradale. Negli ultimi anni infatti, si è sviluppata, sotto la supervisioni del principale Ente pubblico di infrastruttura viarie, la Eiffage Travaux Publics, un’intensa attività sperimentale atta alla definizione di una metodologia che consentisse la produzione di conglomerati bituminosi a bassa temperatura/energia ($T < 100^{\circ}\text{C}$), con le stesse caratteristiche delle miscele conglomerato bituminoso a caldo HMA. Queste ricerche hanno condotto gli studiosi francesi a mettere a punto una metodica che prevede l’utilizzo di bitume schiumato ed inerti nei quali è presente un certo quantitativo di umidità, per via della loro non completa asciugatura. A seguito degli studi condotti sulle tecniche di riciclaggio a freddo, così come è accaduto per la definizione della metodica LT-Asphalt® citata in precedenza, i ricercatori sono giunti alla conclusione che, la presenza di acqua residua sia in grado di conferire una buona lavorabilità alla miscela soprattutto se la temperatura di stesa è prossima ai 70°C . La metodica, brevettata in Francia dalla società Fairco, prende il nome EBE®, Enrobage à Basse Energia, il cui acronimo inglese LEA® corrisponde a Low Energy Asphalt. Il sistema consente di ottenere miscele di conglomerato bituminoso a bassa energia/temperatura con caratteristiche meccaniche di resistenza e durata, confrontabili a quelle delle miscele tradizionali a caldo HMA sfruttando il riscaldamento della sola frazione grossolana di aggregati lapidei, e mantenendo la temperatura ambientale e un certo grado di umidità nella frazione fine di sabbia. Come per il metodo LT-Asphalt®, precedentemente analizzato, sfruttando le medesime analisi termodinamiche relative all’efficienza energetica per il riscaldamento degli inerti, e le proprietà fisiche del bitume schiumato, il metodo si realizza attraverso una modalità operativa che si discosti il meno possibile da quella impiegata nella tecnica di produzione a caldo. La genesi del progetto prende vita per la prima volta nel 2002, e successivamente nel 2003 fu realizzata e testata in laboratori dell’Ente stradale francese, la prima miscela EBE®. Sulla base della più importante ricerca condotta dai ricercatori della Fairco nel 2006, [17] i principali concetti che hanno sostenuto lo sviluppo di tale metodica sono riassumibili nei seguenti punti:

- in un processo a caldo tradizionale, gran parte di energia termica viene spesa per asciugare gli inerti, al fine di ottenere la completa evaporazione dell’acqua in essi contenuta. Mentre l’energia richiesta per ottenere la perfetta temperatura di rivestimento per inerti già asciutti, è circa 5 volte inferiore all’energia necessaria a far raggiungere alla medesima massa d’acqua, tale temperatura. Superando quindi i 100°C per riscaldare gli inerti, si dà vita ad una inefficienza termica notevole;
- le condizioni di riscaldamento degli aggregati lapidei influenzano notevolmente il consumo di energia;

- la parte fine degli inerti (sabbia e filler) contiene la maggior quantità di umidità, e richiede proporzionalmente al quantitativo, una maggiore quantità di energia di riscaldamento rispetto alla frazione grossolana;
- le possibilità di risparmiare energia si riducono molto se la temperatura di miscelazione è superiore ai 100°C. Da ciò ne consegue che, per ottenere un risparmio energetico occorre mantenere la temperatura di miscelazione al disotto dei 100°C;
- è impossibile eliminare tutto il quantitativo di umidità presente nello scheletro costituito dagli aggregati lapidei, perciò è possibile sfruttare l’umidità presente per ottenere una miscela più lavorabile con il bitume al disotto dei 100°C;
- un quantitativo residuo di umidità risulta essere non solo tollerabile, ma anche necessario per facilitare l’addensamento in sito. Si è osservato infatti che, lo 0,5% di contenuto d’acqua nella miscela favorisce l’addensabilità, senza compromettere le performance meccaniche della pavimentazione;
- basandosi su dei principi termici fondamentale, il metodo EBE® consente di minimizzare il quantitativo richiesto di energia termica per ottenere il completo rivestimento degli inerti. Ciò è favorito dal riscaldamento di una sola frazione di inerti, e dalla combinazione di acqua residua ed energia di miscelazione dei componenti. Il processo inoltre ottimizza le proprietà fisiche del bitume: la fluidità quando viene miscelato con la frazione di inerti riscaldati (parte grossolana), la schiumatura che consente la completa miscelazione con tutti gli inerti, quando viene aggiunta la frazione fine umida, e questa combinazione consente di mantenere inalterata la lavorabilità a temperature che non superano gli 80°C;
- dopo la stesa e il raffreddamento completo della miscela, le performance della pavimentazione WMA ottenuta con il processo EBE® o LEA® (che dir si voglia), risultano del tutto confrontabili a quella di una analoga miscela tradizionale a caldo HMA.

Le fasi per la realizzazione di conglomerati bituminosi a bassa energia, secondo lo studio che ha introdotto per la prima volta il processo [17] sono riassumibili sei seguenti step:

1. Lo scheletro litico composto da tutta la curva granulometrica di progetto, deve essere separata in due distinte frazioni, una contenente gli aggregati grossi e la sabbia grossa, e un altro contenente a sabbia fine ed il filler.
2. Solo la prima frazione, quella più grossolana, deve essere riscaldata ed asciugata, ad una temperatura moderata, generalmente prossima ai 150°C. In tal modo essi immagazzinano energia termica che sarà in seguito ceduta agli elementi freddi della miscela.
3. Il legante bituminoso deve essere riscaldato alla sua temperatura raccomandata dal

produttore (generalmente la temperatura di equiviscosità è compresa tra i 140°C e i 180°C in funzione della natura del bitume). Generalmente è opportuno aggiungere agenti chimici in grado di favorire la schiumatura del bitume e il completo rivestimento della frazione umida degli inerti. Tali additivi favoriscono il contatto tra le particelle di acqua e quelle di bitume ancora tiepido, e regolano l’espansione dello stesso, prevenendo il problema dello stripping, dovuto alla presenza di acqua sulla superficie degli aggregati fini.

4. La prima fase di miscelazione consiste nel miscelare la frazione di inerti asciugata e calda, con tutto il quantitativo di bitume preventivamente riscaldato e fluido. Ciò consente di ottenere un rivestimento completo degli inerti grossolani, rivestiti da uno spesso strato di film di bitume.
5. La successiva fase consiste nell’aggiungere la frazione di sabbia fine e filler, a temperatura ambiente contenente un certo grado di umidità. Questa fase produce una serie di complesse reazioni:
 - a. Espansione attraverso la naturale schiumatura del bitume;
 - b. Incapsulamento dei granuli di sabbia da parte del bitume schiumato;
 - c. Riscaldamento della frazione fredda di inerti, tramite contatto con quella calda;
 - d. Ri-condensazione della quantità di acqua in eccesso, distribuita uniformemente nella miscela;
 - e. Ottenimento di una miscela omogenea;
 - f. Equilibrio finale della miscela di CGB WMA ottenuta, al disotto dei 100°C.

A miscelazione completata, secondo tali studiosi, è possibile inoltre aggiungere ulteriore acqua per favorire maggiormente la lavorabilità e l’addensabilità della miscela ottenuta.

A seguito di una importante campagna sperimentale, costituita da una stesa di conglomerato EBE® in Francia, lo stesso team di ricerca ha evidenziato, sulla base di calcoli analitici complessi basati sul bilancio energetico, il quantitativo di energia che è possibile risparmiare per produrre una tonnellata di miscela WMA rispetto al medesimo quantitativo di miscela HMA. Il risultato rappresentativo dell’energia totale necessaria per la produzione di una miscela HMA, è di 175 MJ, mentre per una WMA ottenuta attraverso la metodologia EBE®, risulta essere pari a 83 MJ. Quindi attraverso tale metodo è possibile ottenere una riduzione percentuale di energia dell’ordine del 53%, traducibile in un notevole risparmio economico, vista la possibilità di utilizzare i medesimi impianti di produzione delle miscele HMA, introducendo la sola modifica per la pesatura separata delle due frazioni distinte di inerti.

Per quanto riguarda la produzione di emissioni inquinanti, il rapporto tra miscela HMA e WMA è di 2,3:1 quindi si registra anche in questo caso una riduzione di CO_{2eq} (anidride carbonica

equivalente) superiore al 50%.

Un altro studio condotto su tale metodica [52] effettua un confronto a livello di grado di addensamento tra una miscela a caldo tradizionale HMA, ed una tiepida WMA, realizzata attraverso la metodologia EBE® per uno strato di pavimentazione in conglomerato bituminoso destinata ad aerodromo. In particolare lo studio evidenzia gli aspetti di lavorabilità delle due diverse miscele. In particolare la miscela HMA addensata tramite pressa a taglio giratoria, a 160°C, in corrispondenza di un numero di giri pari a 60, presenta un valore dei vuoti residui pari al 5,6%, mentre la miscela EBE® costipata a 95°C, dopo 60 rotazioni della pressa a taglio giratoria, presenta una percentuale dei vuoti molto simile pari a 6,3%. Questo risultato, secondo gli autori, indica che per ottenere lo stesso grado di addensamento, la miscela EBE® deve ricevere un livello di energia di addensamento leggermente superiore. I risultati di una prova di ormaiamento invece mostrano il medesimo comportamento delle due miscele, dopo una serie di 10.000 cicli di carico a 60°C.

Lo sviluppo e la facilità di messa in pratica di questo processo produttivo, ha prodotto in Francia una serie di indagini rivolte alla possibilità di impiegare tale sistema di riduzione dell’energia di produzione, anche ai processi di riciclaggio con un alto tasso di materiale fresato riutilizzato [55] [57]. La volontà di affiancare questi due processi nasce dalla consapevolezza che, per ottenere una pavimentazione stradale riciclata, che offra buone performance in termini meccanici e di durata, è necessario utilizzare processi di riciclaggio a caldo in luogo di quelli a freddo che risultano più eco-compatibili. Da ciò ne consegue la volontà di ridurre al minimo l’impatto che una produzione a caldo ha sull’ambiente, ottenendo però un risultato quanto mai prossimo a quello ottenibile con le temperature operative tradizionali. Per tale motivo la scelta di affiancare il procedimento EBE® al riciclaggio delle pavimentazioni stradali, risulta essere una scelta quanto mai condivisibile.

Secondo lo studio condotto dai ricercatori dell’Ente statale Eiffage Travaux Public [55] la possibilità di ottenere miscele di conglomerato bituminoso con il metodo EBE®/LEA® con alto tasso di RAP (>50%), si realizza attraverso l’impiego di impianti mobili o fissi, dotati di tamburi di riscaldamento paralleli. La sperimentazione, dapprima condotta in laboratorio, è stata basata sull’analisi dell’influenza della temperatura iniziale del RAP durante la produzione di una miscela a caldo. Fissate 4 temperature di riscaldamento del fresato bituminoso (160° - 130° - 100° - 20°C) ed un quantitativo costante di RAP pari al 50% della miscela, sono stati effettuati diversi test. La prova di addensamento con l’utilizzo della pressa a taglio giratoria ha messo in evidenza una maggiore attitudine all’addensamento delle miscele in cui il fresato era alla temperatura di 160°C e 130°C, presentando rispettivamente un valore di attitudine all’addensamento pari a 4,3 e 3,4. Le miscele 3 e 4 contenenti RAP a 100°C e 20°C hanno fornito risultati di 2,7 e 2,3. A seguito di tale test è stato condotto attraverso l’apparecchiatura Duriez, il test per valutare la

resistenza a compressione diretta. In tal caso i risultati offerti dalla miscela in cui la temperatura del RAP è di 100°C risultano superiori a quelli in cui la temperatura del fresato è di 130°C, cos’ come per il modulo di rigidità, il quale risulta essere di circa il 4% superiore. A valle dei test di laboratorio, i ricercatori hanno eseguito una serie di test dopo aver realizzato la miscela riciclata utilizzando il metodo EBE® nella sua terza variante. Tale variante consiste nel riscaldare a 100°C c.a. tutti gli inerti, per poi miscelarli con il bitume caldo a 170°C. Questa differenza di temperatura, e la non completa evaporazione dell’acqua contenuta negli inerti, favorisce la naturale espansione del bitume favorendone la schiumatura necessario a migliorare la lavorabilità della miscela, la quale raggiunge l’equilibrio termico ad una temperatura prossima ai 95°C. I test effettuati sulla miscela stesa in sito, indicano che il riciclaggio con il 50% di RAP ottenuto con la tecnica EBE®, presenta caratteristiche prossime a quelle della miscela riciclata a caldo a 160°C. In particolare la resistenza alla compressione diretta, valutata attraverso il test Duriez, risulta essere solo il 6% inferiori nella miscela riciclata con metodo EBE® rispetto a quella riciclata a caldo, mentre la resistenza all’ormaiamento, valutata a seguito del test con 30.000 cicli a 60°C, risulta essere superiore nella miscela tiepida in quanto la profondità delle ormaie (valutata in percentuale rispetto al piano orizzontale della pavimentazione testata) è del 65% inferiore rispetto alla profondità delle ormaie della miscela riciclata a caldo. Si propone in tab. 4.7 uno schema riassuntivo di tutti gli effetti benefici prodotti dall’additivo:

LOW ENERGY ASPHALT®			
EFFETTO	CARATTERISTICA	ANALISI SU	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI
=	% Vuoti residui	Miscela CGB	[52] – [55]
↓	Temperatura di compattazione	Miscela CGB	[52] – [55] – [57]
↑	Resistenza ormaiamento	Miscela GCB	[55]
=	Resistenza alla compressione	Miscela CGB	[55]
↓	Emissione di fumi	Miscela CGB	[17] – [52] [55] – [57]
Legenda: ↑ : aumenta rispetto alla miscela corrispondente tal quale; ↓ : diminuisce rispetto alla miscela corrispondente tal quale; = : ininfluenza rispetto alla miscela corrispondente tal quale;			

Tab. 4.7 - Quadro sinottico degli effetti prodotti dal processo Low Energy Asphalt® sulla miscela di cgb

4.3 I principali benefici delle miscele Warm Mix Asphalt

I benefici principali ottenibili dall’impiego di miscele WMA in luogo delle tradizionali HMA, riconosciuti universalmente in letteratura, sono riassumibili nei seguenti 2 punti:

1. riduzione del consumo di energia nelle fasi produttive.
2. riduzione delle emissioni di sostanze nocive nell’ambiente;

Il primo punto è considerato come uno dei benefici più ovvi nell’impiego delle miscele così dette tiepide. Diversi studi hanno dimostrato che una riduzione del consumo energetico in fase produttiva del 30% può essere ottenuto diminuendo la temperatura di lavorazione del conglomerato bituminoso in impianto. La riduzione della temperatura produce di conseguenza la riduzione dei costi di lavorazione da un lato, ma a tale risparmio è da porre in contraltare indubbiamente l’impiego delle tecniche “warm – mix” i cui costi variano in base alla tipologia di metodica scelta e dalla necessità o meno di attuare modifiche all’impianto di produzione.

Alcuni recenti studi [15] hanno comparato, in termini di risparmio energetico e salvaguardia ambientale sottoforma di stime monetarie, alcune delle tecniche sopra descritte. Nelle tab. 4.8-1 e 4.8-2 se ne riporta uno stralcio dove risultano in evidenza: le percentuali relative alla riduzione di emissioni e di consumo energetico conseguenti dall’adozione di tecniche WMA (tab.4.8-1), unitamente ai costi propri, di impianto e di prodotto, delle tecniche WMA citate (tab.4.8-2).

Tecnologia	Sistema a due componenti	Zeolite	Cera paraffinica	Emulsione schiumata
Dosaggio	-	0,3% rispetto al peso degli inerti	Da 0,8% al 3% rispetto al peso del bitume	-
Riduzione di temperatura (a)	43°C÷63°C	30°C	18°C÷54°C	50°C÷75°C
Modifica all’impianto	Si, per il flussaggio	Si, per dosaggio dell’additivo	Si e no ^(b)	Minima, se necessaria
Riduzione di emissioni	30 ÷ 98%	75 ÷ 90%	Non identificato	40 ÷ 60%
Riduzione del consumo energetico	30 ÷ 40%	30%	20%	50 ÷ 75%
a. In confronto con le miscele HMA prodotte a 160°C; b. Modifiche necessarie solo se la cera paraffinica viene aggiunta nel miscelatore.				

Tab. 4.8-1 – Warm Mix Asphalt, categoria foaming processes: specifiche tecnologiche [8].

Tecnologia	Sistema a due componenti	Zeolite	Cera paraffinica	Emulsione schiumata
Modifica all’impianto	€20.000 ÷ €47.000	€0 ÷ €27.000	€0 ÷ €27.000	Minima
Costi per eventuali “brevetti”	€10.000 il primo anno €3.500/impianto/anno €0,20/ton	Nessuno	Nessuno	Nessuno
Costo del materiale	N/A	€0,88/kg	€1,70/kg	7 ÷ 10% in più rispetto al
Dosaggio consigliato	N/A	0,3% in peso rispetto agli inerti	1,5 ÷ 3% in peso rispetto al bitume	Uso in sito di bitume
Stima costo per 1t di WMA	€0,20	€2,64	€0,95 ÷ €1,73	€2,57 ÷ €2,93

Tab. 4.8- 2 – Warm Mix Asphalt, categoria foaming processes: stime sui costi tecnologici [8].

In tab.4.9, per due potenziali differenti scenari di impianto di produzione di HMA utilizzando gasolio da riscaldamento piuttosto che olio combustibile, sono stimati i costi dell’energia necessaria per produrre 1 tonnellata di HMA. Le stime risultano mutate ancora da [49] ed aggiornate al caso italiano.

Dal confronto dei dati di tab. 4.8-2 e tab. 4.9, pur nei limiti e nelle posizioni considerate per giungere alle stime proposte, è possibile evidenziare come l’uso di tecniche WMA rispetto alle tecniche tradizionali garantisca i maggiori benefici principalmente in termini indiretti. Infatti, mentre i costi intrinseci della tecnologia WMA (cfr. tab. 4.8-2) sono prossimi in media alla stima del risparmio energetico che ne deriva dall’utilizzo di tali tecniche (cfr. tab. 4.9); di contro, ad esempio, la riduzione di 30°C delle temperature operative di produzione permetterebbe un abbattimento delle emissioni inquinanti di circa l’85%. Tra gli ulteriori benefici indiretti possono annoverarsi: la possibilità di effettuare la posa in opera in mesi invernali e/o in paesi con climi rigidi [49]; la possibilità di aumentare le distanze di trasporto delle miscele prodotte dall’impianto di produzione al cantiere.

Localizzazione	Italia	
	Gasolio	Olio combustibile
Tipo di carburante utilizzato		
Quantitativo per produrre 1t di HMA (a)	7,6÷11,4 litri	
Costo carburante (b)	€1,116litro	€0,473litro
Costo carburante per produrre 1t di HMA (c)	€ 8,481÷ €12,722	€ 3,572 ÷ €5,358
Elettricità per produrre 1t di HMA (d)	8 ÷ 14 kWh	
Costo fisso fornitura elettrica MTA3 per 1t di HMA(e)	€0,012	
Corrispettivo di potenza impegnata annua, riferita ad 1t di HMA (f)	€0,213	
Costo consumo industriale elettricità (g)	€0,00431/kWh	
Costo consumo industriale elettricità per 1t di HMA (h)	€0,034 ÷ €0,060	
Costo elettricità per produrre 1t di HMA (i)	€0,259 ÷ €0,285	
Costo totale dell’energia per produrre 1t di HMA (j)	€8,740÷€13,007	€ 3,831÷€5,643
20% di risparmio con uso di WMA (k)	€1,748÷€2,601	€0,766÷€1,129
50% di risparmio con uso WMA (k)	€4,370÷€6,504	€1,916÷€2,822
<p>a. Considerando un quantitativo di umidità presente negli inerti compreso tra 2%÷4%;</p> <p>b. Rilevazione Ministero Italiano Sviluppo Economico, Settembre 2008;</p> <p>c. Prodotto tra il consumo minimo e massimo, ed il costo unitario del carburante (Accise incluse);</p> <p>d. Da [20];</p> <p>e. Calcolo eseguito sulla base del costo fisso di €697,10/anno (tariffa Enel MTA2) per un impianto di medie dimensioni dalla produzione media annua di 60.000t/anno di HMA;</p> <p>f. Calcolo effettuato sulla base del costo di €28,357 kW/anno (tariffa Enel MTA2) per un impianto di medie dimensioni che necessita di una fornitura di energia elettrica di 450 kW nominale e che produce in media 60.000t/anno di HMA;</p> <p>g. Fonte Enel Distribuzione per uso industriale, per impianto media tensione con potenza massima disponibile superiore a 100 kW e inferiore a 500 kW (Fornitura ENEL MTA2);</p> <p>h. Calcolo effettuato moltiplicando il costo di consumo industriale di energia in €/kWh per l’assorbimento energetico minimo e massimo per produrre 1t di HMA espresso in kW;</p> <p>i. Prodotto tra il consumo minimo e massimo, ed il costo unitario di energia elettrica;</p> <p>j. Somma tra il costo totale del carburante ed il costo totale dell’energia elettrica. considerando gasolio da riscaldamento ed olio combustibile;</p> <p>k. Ipotesi di risparmio minimo e massimo sulla base delle indicazioni di tab.1.</p>		

Tab.4.9 – Stima dei costi dell’energia, da combustione ed elettrica, per la produzione di 1t di HMA. In (k) stima della potenziale incidenza sui costi energetici conseguente all’utilizzo di tecnologie WMA.

Il secondo punto relativo ai benefici dell’impiego delle miscele tiepide, interessa la tutela dell’ambiente, e in particolare la riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera. Questo punto è strettamente legato al primo in quanto le alte temperature di lavorazione inducono una evaporazione dei costituenti del bitume tra cui gli asfalteni e gli oli aromatici e saturi. Una riduzione dell’energia termica, in accordo con tutta la letteratura scientifica sul tema, riduce l’emissioni di tali sostanze inquinanti nell’ambiente, nonché gli odori e i fumi. Una ricerca condotta nel 2000 negli Stati Uniti dal Dipartimento di Salute (Department of Health and Human Services) dell’Ente nazionale NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) [48], ha prodotto i risultati relativi ad un’indagine nei confronti degli effetti provocati da una continua esposizione ai fumi di bitume. Lo studio condotto nel 2000 risulta essere un approfondimento delle indagini avviate nel 1977 dal NIOSH il quale individuò i principali effetti dovuti ad una continua esposizioni ai bitumi in fase di produzione e messa in opera. I principali effetti negativi

emersi dallo studio risultano essere l’infiammazione delle membrane congiuntive e dei tratti respiratori. Inoltre si evince che l’eventuale presenza di legante bituminoso sulla pelle, per tempi prolungati, può dar vita a carcinomi. Inoltre l’istituto negli anni di ricerca e sperimentazione dal 1977 al 2000, attribuì all’esposizione ai fumi di legante bituminoso un effetto cancerogeno per l’organismo umano. Tale evidenza è stata ottenuta da studi sull’uomo e sugli animali. Nello studio sono stati inoltre analizzate le componenti volatili emesse dal bitume in fase di riscaldamento a c.a. 150°C sia in impianto che in laboratorio. Dall’analisi dei fumi [48] attraverso l’individuazione dei composti policicli aromatici (in notazione anglosassone PACs – Polycyclic Aromatics Compounds), è emerso che la concentrazione di policicli aromatici più alta si ottiene in laboratorio, a la maggior parte di essa è cancerogena per l’uomo. Inoltre l’istituto di salute statunitense tra le conclusioni del lavoro, sottolinea che la presenza di tali composti cancerogeni è direttamente proporzionale alla temperatura di lavorazione del bitume. Pertanto è immediato concludere che una riduzione delle temperature di lavorazione delle miscele di conglomerato bituminoso, è favorevole alla salute degli operatori del settore, oltre che rispettosa dell’ambiente.

4.4 Bibliografia specifica cap. 4

- [1] J.K. Jenkins et ali – Half-warm foamed bitumen treatment, a new process – 7th International conferences on Asphalt pavement in South Africa, 1999.
- [2] B.G. Koenders et ali - *Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures* - Produksjonsprosess for asfalt med redusert temperatur, 2001
- [3] O.R. Larssen – Warm Mix Asphalt with foam – NVF’s Utvalg, 33, July 2001;
- [4] B.Cervarich – *Cooling down the mix* – Hot Mix Asphalt Technology paper, March/April 2003;
- [5] K. W. Damm - *Asphalt flow improvers – a new technology for reducing mixing temperature of asphalt concrete mixes with high resistance against permanent deformation* – 6th Rilem Symposium, Zurich 2003;
- [6] J.L.M. Voskuilen et ali – *Experiences with half-warm bitumen treatmentprocess in netherlands* - 7th International conferences on Asphalt pavement in South Africa, 2004.
- [7] M. Bonola, L. De Ferraris – *Tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi con processi a bassa temperatura* – Quaderno Comitato tecnico C. 4.3. AIPCR 12/2005;
- [8] D. Newcomb - *An introduction to warm mix asphalt* - Warm Mix Asphalt Association, Report, 2005;
- [9] B. Prowell, R. C. West – *A Case for reducing production and laydown temperatures: Today* – Hot Mix Asphalt Magazine July/August 2005;
- [10] D. Newcomb - *Warm Mix: The Way of the Future?* - Hot Mix Asphalt Magazine July/August 2005;
- [11] Berthel W. et ali – *Warm mix asphalt by adding synthetic zeolite* – Eurovia www.asphamin.com Online since 2005

- [12] Hurley, G. and Prowell, B., - *Evaluation of Sasobit® for Use in Warm Asphalt Mixes* - NCAT Report No. 05- 06, Auburn University, Auburn, AL, June 2005.
- [13] Hurley, G. and Prowell, B., - *Evaluation of Evotherm® for Use in Warm Asphalt Mixes* - NCAT Report No. 06-02, Auburn University, Auburn, AL, June 2006.
- [14] M. Bonola, L. De Ferraris – *Conglomerati bituminosi a bassa energia. Lo stato dell’arte* – Rivista Siteb “Rassegna del bitume” n° 54/06;
- [15] O. Kristjánisdóttir - *Warm mix asphalt for cold weather paving* - Thesys of Master of Science in Civil Engineering University of Washington 2006;
- [16] G.C. Hurley, B.D. Prowell - *Evaluation of Aspha-min Zeolites for use in Warm mix asphalt* – National Center of Asphalt Technology, Auburn University, Report 06-04, June 2006;
- [17] A. Romier et ali – *Low Energy Asphalt (LEA) with the performances of hot mix asphalt* - Transportation Research Board Annual Meeting 2006;
- [18] S. Diefenderfer, K. McGhee, B. Donaldson - *Installation of Warm mix Project in Virginia* - Virginia Transportation Research Council, Report 07-R25, April 2007;
- [19] B. D. Prowel et al. – *Fiel performance of warm mix asphalt at the Ncat Test Track* – Transportation Research Board Annual Meeting, 2007;
- [20] O. Kristjánisdóttir et al. - *Assessing the potential of warm mix asphalt technologies adoption* - Transportation Research Board Annual Meeting 2007 Paper n. 07-2359 ;
- [21] Wasiuddin, S. Selvamohan, M. Zaman, M. Guegan - *A comparative laboratory study of Sasobit® and Aspha-min® in warm mix asphalt* - Transportation Research Board Annual Meeting 2007 Paper n. 07-2047;
- [22] V. Gaudefroy et al. - *Laboratory investigations on the mechanical performances of foamed bitumen mixes using half-warm aggregates* - Transportation Research Board Annual Meeting 2007 Paper n. 07-1373;

- [23] K. Kanitpong, S. Sonthong, K. Nam, W. Martono, H. Bahia - *Laboratory study of warm mix additives* - TRB 2007 Annual Meeting – Paper n. 07-1364;
- [24] Bocci M., Virgili A., Grilli A., Pannunzio V. - *Experimental Analysis of the potentialities and limits of asphalt mixtures by adding zeolite* - S.I.I.V. International Congress, Palermo 2007;
- [25] B. D. Prowell – *Warm mix Asphalt* - The international technology scanning program summary report June 11th 2007;
- [26] J. Worrall, Y. Choi – *Warm Mix Asphalt review* – Autoroads Technical Report, T91-2007;
- [27] Shu Wei Goh, Zhanping You; T. J. Van Dam; - *Laboratory evaluation and pavement design for Warm mix Asphalt* – Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames Iowa, August 2007;
- [28] L. E. Morais de Silveira, A. Correira de Sousa Filho, J. B. Soares, H. Batista de Sant’Ana – *Avalicao das propriedades mecanicas de misturas asfalticas mornas pela insercao de zeolitas utilizando cimento asfaltico de petroleo modificado por polimero* – 4° DPEDRO, Campinas SP 21-24 Oct. 2007;
- [29] G.V. Button et ali – *A Synthesis of warm mix asphalt* – Texas Transportation Institute 2007
- [30] M. F. C. Van Der Ven, K. J. Jenkins, R. Van Der Beemts – *Development of (half) warm foamed bitumen mixes: state of the art* - The International journal of Pavement Engineering Vol. 8 n.2 June 2007, pag. 163-175;
- [31] J. D’angelo et ali – *Warm Mix Asphalt: European Practice* – FHWA Technical report PL-08-007;
- [32] Shu Wei Goh, Zhanping You – *Mechanical properties of warm mix asphalt using Asphamin® zeolite* - Transportation Research Board Annual Meeting 2008;
- [33] G. Harder et ali – *Energy and environmental gains of warm and half-warm mix asphalt: quantitative approach* - Transportation Research Board Annual Meeting 2008;

- [34] R.B. Mallick et ali – *Using warm mix asphalt technology to incorporate high percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) material in asphalt mixture* - Transportation Research Board Annual Meeting 2008;
- [35] J.M. Coutreau, B. Tessier – *Warm mix asphalt paving technologies:a road’s builder perspective* – Annual Conference of the transportation Association of Canada, 2008
- [36] C.G. Hurley, B.D. Prowell - *Field performances of warm mix asphalt* - Transportation Research Board Annual Meeting 2008;
- [37] Giuliani, Merusi – *Studio della reologia alle alte temperature di bitumi modificati con cere Fischer-Tropsh* – Rassegna del bitume 58/08;
- [38] V. Gaudefroy et ali – *Laboratory Enviromental Assessment of half-warm mix asphalt by means of the factorial experiment design approach* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [39] G.A. Gonzàles-Leòn – *Warm mix asphalt with low dosage chemical additives* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [40] W.S. Mogawer – *Incorporating High percentage of recycled Asphalt Pavement (RAP) and Warm Mix Asphalt (WMA) technology into Thin Hot mix asphalt overlays to be utilized as a pavement preservation strategy* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [41] A.J. Austerman et ali – *Evaluating the effect of Warm Mix Asphalt Technology Additive dosage on the workability and durability of Asphalt mixture containing recycled asphalt pavement* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [42] B. Middleton, B. Forfylow – *An evaluation of warm mix asphalt produced with the Double Barrel Green Process* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [43] Feipeng Xiao et ali – *Laboratory investigation of moisture damage in warm mix asphalt containing moist aggregate* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [44] J. Wielinski – *Laboratory and field evaluations of foamed warm mix asphalt projects* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;

- [45] Minjing Tao, R.B. Mallick – *An evaluation of the effects of warm mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [46] A. Kvasnak et ali – *Case study of warm mix asphalt moisture supscetibility in Birmingham* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [47] W.D. Hodo et ali – *Investigation of foamed asphalt (Warm Mix Asphalt) with high reclaimed Asphalt pavement (RAP) content for sustainment and rehabilitation of asphalt pavement* - Transportation Research Board Annual Meeting 2009;
- [48] Hazard review – Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt – U.S. Department of Healt and Human Services, USA December 2000.
<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2001-110/pdfs/2001-110.pdf>
- [49] *Advisory note 17 – Warm mix asphalt – a state of the art review* – Australian Asphalt pavement Association
<http://www.aapa.asn.au/content/aapa/download/AdvisoryNote17.pdf>
- [50] NCAT – *Evaluates Warm Mix Asphalt* – Technology News, vol.17 n. 2, fall 2005, pag 1-8.
- [51] M. Losa et ali – *Experimental characterization of high performance WMA Foam trial sections* – Mairepav VI Internationa Congress, Turin 2009
- [52] J. M. L’Huillier et al. – *Dècollage russi pour l’E.B.T.® à Candillargues* - La Revue générale des routes et des aerodromes (RGRA), n° 855 feb. 2007, pag. 61-63;
- [53] Y. Le Goff et al.. – *Gains ènergétiques et ècologiques des enrobes bitumineux tièdes et semi tièdes: approche quantitative* - La Revue générale des routes et des aerodromes (RGRA), n° 857 mar. 2007, pag. 37-44;
- [54] Y. Brosseaud, D. Sicard – *Etat du dèveloppement des enrobes tièdes en France* - La Revue générale des routes et des aerodromes (RGRA), n° 857 mar. 2007, pag. 45-52;
- [55] F. Olard et al. – *Le recyclage à très fort taux (>50%) des enrobes chauds et des enrobes tièdes pour une construction routuère durable* - La Revue générale des routes et des aerodromes (RGRA), n° 866 apr.-mar. 2008, pag. 56-62;

- [56] J.P. Manchand et al. – *Percfromances et evaluation de l’impact environmental des enrobes bitumineaux tièdes à l’Aspha-min®* - La Revue générale des routes et des aerodromes (RGRA), n° 866 apr.-mar. 2008, pag. 79-85;
- [57] F. Olard et al. – *Formulation spécifique en laboratoire des enrobes à très fort taux de recycles (jasqu’à 70%), à chaud ou en technique E.B.T®* - La Revue générale des routes et des aerodromes (RGRA), n° 872 dic. 2008, pag. 62-67;
- [58] G.C. Hurley et al. – *Ohio field trial of Warm Mix Asphat technologies: construciorn summary – National Centerl of Asphalt Tecnology, Semptember 2009 release;*

Capitolo 5

Obiettivi e progetto della sperimentazione su WMA con additivazione di zeolite sintetica

Tra le tecniche di produzione di WMA esposte al capitolo precedente, quella che utilizza l'additivazione di zeolite sintetica rappresenta sicuramente la metodica che manifesta minore complessità ad essere impiegata all'interno di un tradizionale ciclo produttivo di un conglomerato bituminoso. Tale assunto prende le mosse dal fatto che il processo di additivazione della miscela con zeolite avviene nel mescolatore dell'impianto di produzione con modifiche e/o integrazioni di apparecchiature minime (cfr. tab 4.8-2 par. 4.3)

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di verificare l'effettiva efficacia dell'additivazione di zeolite sintetica all'interno di conglomerati bituminosi per strati di usura, individuando un corretto approccio metodologico al fine circoscrivere le condizioni al contorno che ottimizzano il processo di additivazione delle miscele di conglomerato bituminoso con questo minerale sintetico.

Il punto di partenza della sperimentazione è l'assunto, in base a quanto viene dichiarato dai produttori e distributori di tali additivo, che consentirebbe di ridurre di circa 50°C la temperatura di miscelazione rispetto ai valori canonici di miscelazione.

La sperimentazione è stata progettata sulla base di 4 livelli o fasi consecutive concatenate di indagine, ognuna delle quali acquisisce il dato sperimentale della fase precedente, quale dato di input per sviluppare un nuovo indirizzo investigativo. Scelta una miscela per strato d'usura (distribuzione granulometrica, tenore e tipologia di legante) di seguito sono presentate le diverse fasi:

- **Fase I:** verifica della percentuale ottimale di zeolite da aggiungere alla miscela di conglomerato bituminoso in fase di miscelazione al fine di ottimizzare l'attitudine all'addensamento e le principali proprietà meccaniche (stabilità Marshall, e Trazione Indiretta). In tale fase le variabili all'interno della sperimentazione sono esclusivamente le percentuali di zeolite additivate. Di seguito in tab. 5.1 è riportato lo schema sinottico della fase sperimentale:

ID Miscela	TEMPO MATURAZIONE	TEMPERATURA		DOSAGGIO ZEOLITE	PROVINI			
		MISCELAZIONE	MATURAZIONE		V% = VUOTI TI = Trazione indiretta M = Marshall			
					A	B	C	D
HMAZ0_150	0h	150 ± 5°C	Nessuna	0%	v%	v%	v%	v%
HMAZ0_150_2h	2h	150 ± 5°C	90 ± 5°C	0%	M	TI	M	TI
WMAZ25_110_2h	2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	0,25%	v%	-	v%	-
WMAZ50_110_2h	2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	0,50%	-	-	-	-
WMAZ75_110_2h	2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	0,75%	v%	v%	v%	v%
WMAZ100_110_2h	2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1,00%	M	TI	M	TI

Legenda:
 - Es.: HMAZ0_150_2h = miscela Hot mix Asphalt, senza zeolite, miscelata a 150°C e condizionata per 2h in ambiente termostatico controllato.

Tab. 5.1- Quadro sinottico della Fase I sperimentale

- **Fase II:** verifica dell'esistenza di un eventuale tempo di maturazione tra, la miscelazione e la messa in opera del conglomerato bituminoso, che ottimizzi la lavorabilità dello stesso. In questa fase, individuata la percentuale ottimale di zeolite, si è provveduto a far variare i tempi di permanenza della miscela, prima dell'addensamento, in ambiente termostatico controllato. La temperatura di miscelazione è termine identificativo della miscela, mentre il condizionamento in ambiente termostatico controllato è avvenuto a 20°C al disotto della temperatura di miscelazione. In tab. 5.2 è riportato il quadro sinottico della fase sperimentale.
- **Fase III:** studio e misura della lavorabilità della miscela "tiepida" attraverso la norma UNI EN 12697-10. In questa fase, individuato il tempo ottimale di permanenza in ambiente termostatico controllato, tra miscelazione e addensamento, le variabili considerate risultano essere 4 livelli di energia di addensamento ad impatto, al fine di ottenere curve in cui, il grado di addensamento è funzione dell'energia di costipazione. Tali curve sono necessarie per valutare l'attitudine all'addensamento delle varie miscele attraverso estrapolazione di uno specifico indicatore. In tab. 5.3 è riportato il quadro sinottico della fase sperimentale.

TEMPO MATURAZIONE t = 0	TEMPERATURA		PROVINI					
			v% = VUOTI - TI = TRAZIONE INDIRETTA					
ID MISCELE	MISCELAZIONE	MATURAZIONE	1	2	3	4	5	6
HMA_150	150 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	v%	v%
			TI	-	TI	-	-	TI
HMA_130	130 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	v%	v%
			TI	-	TI	-	-	TI
WMA_130	130 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	v%	v%
			TI	-	TI	-	-	TI
HMA_110	110 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_110	110 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-

TEMPO MATURAZIONE t = 1 h	TEMPERATURA		PROVINI					
			v% = VUOTI - TI = TRAZIONE INDIRETTA					
ID MISCELE	MISCELAZIONE	MATURAZIONE	1	2	3	4	5	6
HMA_150_1h	150 ± 5°C	130 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
HMA_130_1h	130 ± 5°C	110 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_130_1h	130 ± 5°C	110 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
HMA_110_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_110_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-

TEMPO MATURAZIONE t = 2 h	TEMPERATURA		PROVINI					
			v% = VUOTI - TI = TRAZIONE INDIRETTA					
ID MISCELE	MISCELAZIONE	MATURAZIONE	1	2	3	4	5	6
HMA_150_2h	150 ± 5°C	130 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
HMA_130_2h	130 ± 5°C	110 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_130_2h	130 ± 5°C	110 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
HMA_110_2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_110_2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-

Legenda:
 - E.s. : HMA_130_2h miscela di conglomerato bituminoso tradizionale a caldo miscelato a 130° e costipato dopo 2 ore in ambiente termostatico controllato;

Tab. 5.2 – Quadro sinottico della Fase II sperimentale

ENERGIA 25 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI					
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRETTA				
A			B		C	D	E	F	
HMA_150_25	150 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
HMA_110_25	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
WMA_110_25	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
WMA_110_25_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%	-	-

ENERGIA 50 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI					
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRETTA				
A			B		C	D	E	F	
HMA_150_50	150 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
HMA_110_50	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
WMA_110_50	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
WMA_110_50_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%	-	-

ENERGIA 75 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI					
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRETTA				
A			B		C	D	E	F	
HMA_150_75	150 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
HMA_110_75	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
WMA_110_75	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
WMA_110_75_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%	-	-

ENERGIA 100 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI					
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRETTA				
A			B		C	D	E	F	
HMA_150_100	150 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
HMA_110_100	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
WMA_110_100	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
WMA_110_100_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%	-	-

Tab. 5.3– Quadro sinottico della Fase III sperimentale

- **Fase IV:** verifica della lavorabilità della miscela "tiepida" attraverso la norma UNI EN 12697-10 utilizzando un bitume modificato HD. Come per la fase 3 le variabili considerate sono le energie di addensamento. Ciò che varia rispetto alla fase precedente è la presenza del bitume modificato HD in luogo del bitume tradizionale. Di seguito in tab. 5.4 è riportato lo schema sinottico della fase sperimentale:

ENERGIA 25 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI			
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA		
1			2		3	4	
HMA_165_25	165 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
HMA_115_25_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
WMA_115_25_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI

ENERGIA 50 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI			
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA		
1			2		3	4	
HMA_165_50	165 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
HMA_115_50_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
WMA_115_50_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI

ENERGIA 75 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI			
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA		
1			2		3	4	
HMA_165_75	165 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
HMA_115_75_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
WMA_115_75_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI

ENERGIA 100 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI			
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA		
1			2		3	4	
HMA_165_100	165 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
HMA_115_100_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
WMA_115_100_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI

Tab. 5.4 – Quadro sinottico della Fase IV sperimentale

Capitolo 6

La sperimentazione su WMA con additivazione di zeolite sintetica: risultati ottenuti e considerazioni conclusive

6.1 La miscela studiata e le sue componenti

La miscela progettata per la sperimentazione risulta essere una miscela chiusa per strato di pavimentazione stradale superficiale. Gli elementi che costituiscono il conglomerato bituminoso sono stati catalogati ed analizzati al fine di conoscere le reali caratteristiche di ciascun componente della miscela. Tali componenti sono state considerate costanti all'interno di tutte le fasi della sperimentazione e sono riportati nel seguente elenco.

- ✓ Tipologia di inerti e cava di approvvigionamento;
- ✓ Fuso granulometrico e curva di progetto;
- ✓ Tipologia, qualità e fornitore di bitume;
- ✓ Percentuale di bitume.

Di seguito sono descritte le caratteristiche analizzate in laboratorio di ciascuna componente utilizzata nelle diverse miscele sperimentali.

6.1.1 *Gli Inerti*

Gli inerti utilizzati nel confezionamento delle miscele sono di origine di cava, e precisamente provengono dalla cava della Inerti Potame S.a.S sita nel comune di Domanico in provincia di Cosenza. L'origine è stata scelta per la buona qualità dell'inerte calcare presente nella zona. Elemento fondamentale per la sperimentazione è la considerazione che lo scheletro litico delle diverse miscele che verranno realizzate, risulti essere un'invariante. Per rendere sistematicamente coerente tale ipotesi, gli inerti approvvigionati sono stati divisi per ciascuna pezzatura, utilizzando setacci e crivelli previsti dalla norma, al fine di avere la certezza che, un dato passante/trattenuto sia univocamente composto da quella pezzatura. Tutto ciò è necessario

in quanto le miscele verranno progettate pesando al decimo di grammo ciascuna pezzatura. La curva granulometrica di progetto è riportata nelle seguenti tabelle, dove sono indicati i valori di passante e di trattenuto (% in peso) per ogni crivello e/o setaccio UNI.

Crivelli e setacci serie UNI	Fuso - passante %		Progetto (% in peso)	
	Inf	Sup	passante%	trattenuto%
25	100	100	100	0
15	90	100	95	5
10	70	90	80	15
5	40	55	47,5	32,5
2	25	38	31,5	16
0,4	11	20	15,5	16
0,18	8	15	11,5	4
0,075	6	10	8	3,5
			fondello	8

Tab. 6.1 – Fuso granulometrico e curva di progetto

Il quantitativo di bitume utilizzato è stato fissato nel 5% rispetto al peso degli inerti, rispettando così la maggior parte delle principali soglie capitolari. La curva granulometrica è stata centrata all'interno di un fuso di riferimento (Capitolato di riferimento: ANAS2001) così come si può osservare in fig. 6.1. È opportuno sottolineare che la distribuzione granulometrica, fig. 6.1, è rappresentata dalla media esatta di un fuso di riferimento per strato d'usura, costruita per singolo trattenuto a partire da un processo di pre-vagliatura di tutte le pezzature degli aggregati lapidei di natura calcarea approvvigionati. Ciò ha permesso di poter considerare la distribuzione granulometrica un invariante del processo.

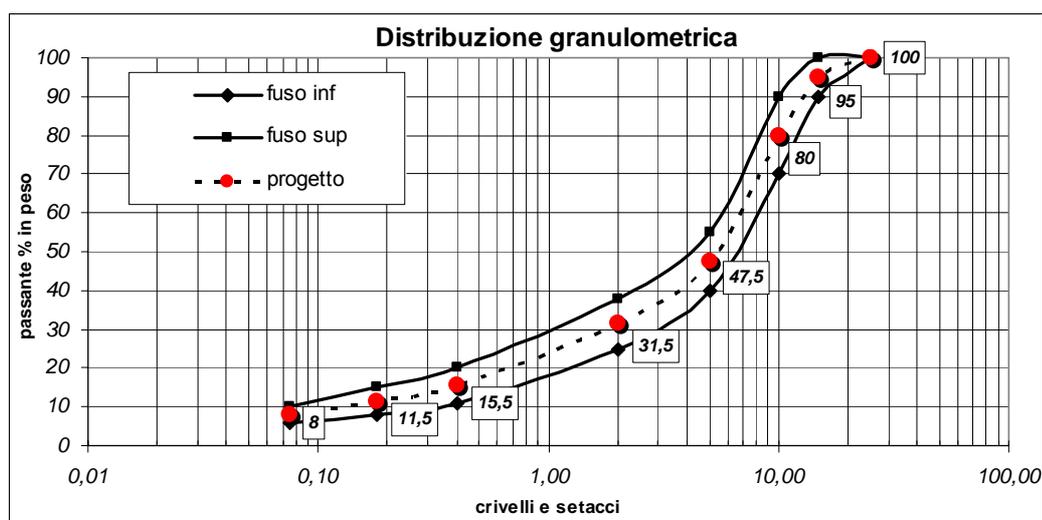


Fig. 6.1– Fuso e curva granulometrica di progetto

6.1.1.1 Prova di frantumazione degli inerti

Gli inerti in esame prima di essere utilizzati per il confezionamento delle miscele sperimentali, sono stati sottoposti a prova di frantumazione, la quale è una prova presente nei principali capitoli degli enti gestori delle strade, e non all'interno delle normative europee.

La prova viene eseguita su una campione di materiale pari almeno a 500 gr di elementi passanti al setaccio Tyler 3/8 e trattenuti al setaccio Tyler n°4. tale materiale è stato preventivamente lavato ed essiccato per eliminare la polvere presente. Tale materiale deve essere steso in maniera uniforme su di un ripiano che è parte fondante del macchinario della prova, per una lunghezza di circa 50 cm e per una larghezza di 14 cm. Su tale strato di inerti viene abbassato e posta una ruota metallica della larghezza in pianta pari a 5 cm, la quale, passando sul campione descrivendo 3 fasce ideali di passaggio, trasmette un carico di 400 kg agli inerti, i quali subiscono la frantumazione. La ruota deve passare su ciascuna delle tre fasce in cui viene idealmente suddiviso lo strato di inerti la cui larghezza è di 14 cm, per 2 volte. Il materiale dopo aver subito il passaggio della ruota deve essere setacciato tramite un setacciatore meccanico che abbia le seguenti caratteristiche per almeno 10 minuti:

1. Altezza del perno del piano di oscillazione dei setacci pari ad 80 cm;
2. Ampiezza della semi oscillazione dalla posizione verticale a quella di urto contro i riscontri laterali pari a 5,5 cm;
3. Numero di colpi al minuto pari a 90.

I setacci da utilizzare in questa fase di setacciatura appartengono alla serie di Tyler e sono i n°: 4, 8, 14, 28, 48, 100. Il coefficiente di frantumazione che si ottiene dalla prova è la somma della percentuale del passante ad ogni singolo setaccio. Per necessità interne al Laboratorio di Ingegneria stradale dell'Università della Calabria, al posto dei setacci della serie Tyler, sono stati adoperati i setacci della serie A.S.T.M., per come è evidenziato in tab. 6.2:

Setaccio A.S.T.M.	Trattenuto [g]	Passante [g]	Passante [%]
4,76	123,5	376,5	75,3
2,36	247,0	129,5	25,9
1,18	66,0	63,5	12,7
0,60	32,5	31,0	6,2
0,30	12,0	19,0	3,8
0,15	7,5	11,5	2,3
fondello	11,5	0,0	0,0
		Coefficiente di frantumazione	126,2

Tab. 6.2 – Risultati prova di frantumazione inerti

6.1.1.2 Indice di forma degli inerti

Un ulteriore test eseguito sugli inerti prima del loro utilizzo all'interno delle miscele, è la determinazione dell'indice di forma.

I risultati del test, applicato a un campione rappresentativo delle pezzature 20-15mm, 15-10mm, 2 10-5mm di inerti sono riportati in tab. 6.3:

Trattenuto al setaccio [mm]	n° grani	M0 [g]	M1[g]	IF
5	120	42,3	13,03	30,8
10	120	236,96	65,3	27,56
15	120	421,53	111,56	26,47
			media	28,28

Tab 6.3 – Risultati della prova dell'Indice di forma

6.1.2 Il bitume

Il bitume utilizzato per il confezionamento delle miscele sperimentali è stato fornito dall'*Agip Bitumi S.p.A. - Perretti Petroli*. Questo bitume possiede un elevato standard qualitativo ed è prodotto in raffineria con i processi industriali più avanzati. I bitumi Agip possiedono elevate caratteristiche di resistenza all'invecchiamento, elasto-plasticità e comportamento alle basse temperature. Per queste proprietà, i bitumi Agip conferiscono ai conglomerati bituminosi ottime caratteristiche meccaniche, consentendo la realizzazione di pavimentazioni flessibili ad elevate prestazioni e durevoli nel tempo. I bitumi stradali Agip rispondono ai requisiti adottati dall'Italia in sede di recepimento della Normativa Europea EN 12591. Le gradazioni disponibili sono quelle più richieste e più diffuse in Italia nella classe dei bitumi semisolidi: 35/50, 50/70, 70/100 e 170/210. Per quanto riguarda questo lavoro di ricerca sperimentale è stato utilizzato un bitume 50/70; le caratteristiche certificate dall'Agip Bitumi S.p.A. sono di seguito riportate in tab. 6.4:

Caratteristiche	Unità di misura	Valore
penetrazione a 25°C	dmm	50 - 70
punto di rammollimento Palla-Anello	°C	46 - 54
punto di rottura Fraas	°C	≤ - 8
viscosità dinamica a 60°C	Paxs	≥ 145
Solubilità in solventi organici	% m	≥ 99
Contenuto in paraffina	% m	≤ 2,2
Punto di infiammabilità (Cleveland)	°C	≥ 250
Peso specifico a 25°C	-	1,00 ÷ 1,10
Duttilità a 25°C	cm	≥ 80
Volatilità a 200°C	% m	≤ 0,5
Penetrazione a 25°C del residuo della prova di volatilità; % rispetto a quello del bitume originario	%	≥ 80
Punto di rottura Fraas del residuo della prova di volatilità	°C	≤ - 6
Resistenza all'invecchiamento RTFOT		
Perdita in massa	% m	≤ - 0,5
Penetrazione residua	%	≥ 50
Incremento di P.A.	°C	≤ 11

Tab. 6.4 – Caratteristiche bitume certificate dall'Agip Petroli S.p.A.

Prima dell'utilizzo di tale bitume nel confezionamento delle miscele, sono state verificate nel laboratorio di Ingegneria Stradale dell'Università della Calabria, le caratteristiche fisiche di penetrazione a 25°C ed il punto di rammollimento tramite prova *palla anello*, in quanto risultano essere le grandezze più significative per quanto riguarda la caratterizzazione "tradizionale" dei bitumi per uso stradale.

I risultati della prova di penetrazione effettuata in laboratorio riportati nella tab. 6.5:

	Penetrazione [dmm]	
	campione 1	campione 2
1	88	78
2	89	79
3	90	79
4	87	79
media	88,5	78,75
83,63		

Tab. 6.5 – Risultati sperimentali prova di penetrazione

Il valore medio ottenuto, pari a 83,63 dmm, risulta essere notevolmente superiore al valore certificato dalla Società produttrice (50-70 dmm).

Il valore della prova di palla anello invece è in linea con quanto dichiarato dall'Agip Bitumi S.p.A.

Punto di ramollimento[°C]			
		campione 1	campione 2
media	46,7	46,9	
46,80			

Tab. 6.6 – Risultati prova palla-anello

In questo caso il valore medio riscontrato (46,8°C) risulta essere compreso nel range certificato dal produttore (46°C – 54°C).

6.1.3 Aspha-min® zeolite

Le zeoliti (dal greco *zein*, "bollire" e *lithos*, "pietra") sono minerali con una struttura cristallina regolare e microporosa caratterizzati da una enorme quantità di volumi vuoti interni ai cristalli. La parola zeolite (*pietra che bolle*) fu coniata dallo studioso svedese Axel Fredrik Cronstedt che osservò il liberarsi di vapore acqueo (dovuto all'acqua intrappolata nelle cavità) scaldando uno di questi minerali.

Questi minerali presentano una intelaiatura strutturale a base di alluminosilicato con cationi intrappolati all'interno di cavità a "tunnel" o a "gabbia". Una classe cospicua ed importante di zeoliti possiede una struttura a *gabbia sodalite*, consistente in un ottaedro tronco ottenuto asportando con il taglio tutti i vertici. Dato che le gabbie possiedono simmetria cristallina, le zeoliti rappresentano una classe di setacci molecolari con selettività maggiore rispetto, ad esempio, alla silice o al carbone attivo, che possiedono vuoti irregolari. Altra peculiarità consiste nello scambio ionico, processo chimico-fisico consistente nello scambio del catione contenuto all'interno della struttura cristallina con ioni presenti in soluzione e che possiedono dimensioni e proprietà elettrostatiche compatibili con la struttura entro la quale vanno ad inserirsi. Ad esempio, zeoliti naturali contenenti cationi Na⁺ o K⁺ sono in grado di scambiare specie ioniche quali Ca²⁺ e Mg²⁺. In fig. 6.2 è rappresentata la struttura microcristallina tipica delle zeoliti:

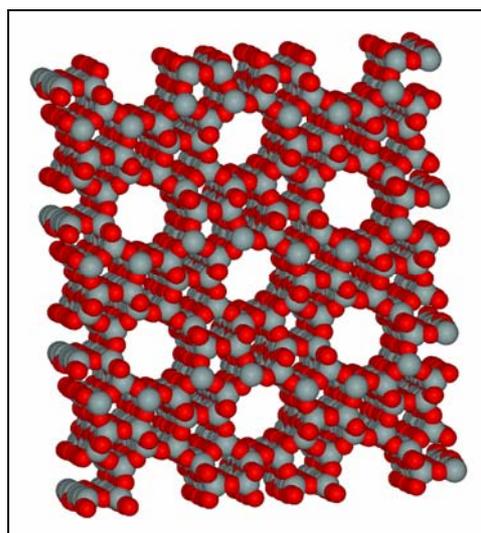


Fig. 6.2 – *La struttura microcristallina delle zeoliti*

Esistono numerosissime zeoliti, sia naturali che di sintesi, molte delle quali hanno proprietà utili nell'industria: sono ad esempio utilizzate nell'industria petrolchimica come catalizzatori eterogenei, nei detersivi in sostituzione dei polifosfati, in agricoltura, in edilizia e nell'addolcimento delle acque. Un utilizzo importante in sintesi inorganica permette di ottenere complessi facendo reagire cationi metallici, intrappolati all'interno della struttura zeolitica, con opportuni reagenti complessanti; il composto di coordinazione ottenuto resta intrappolato all'interno della gabbia, essendo troppo grande per potervi uscire. Le zeoliti sintetiche vengono frequentemente sintetizzate lavorando ad alte pressioni con l'ausilio di autoclavi. Ad esempio, è possibile effettuarne una sintesi scaldando in autoclave a 100-200 °C una soluzione di idrossido di tetrapropilammonio, che fa da template, con silice colloidale e alluminamicroporosa. Le permutiti sono una classe di zeoliti sintetiche ottenute fondendo miscele di quarzo, caolino e carbonato di sodio; molte di loro hanno proprietà meccaniche e di scambio ionico migliori rispetto alle zeoliti naturali.

La dimensione dei pori è importante in quanto ad essi è legata l'azione catalitica: le molecole entrano in questi pori selettivamente e subiscono ad esempio le reazioni di cracking e di isomerizzazione. Inoltre il tipo di catione presente all'interno della struttura zeolitica influenza la cinetica di scambio ionico.

La zeolite sintetica commercializzata dalla Bitem sotto il nome Aspha-min® ed utilizzata per la sperimentazione è arrivata al laboratorio stoccata all'interno di un bidone di 25 kg sigillato in modo tale da isolare il suo contenuto dall'ambiente esterno. Esso si presenta sotto forma di microgranuli dal peso specifico di circa 500 kg/m³ e presenta la proprietà di cedere il 21% di acqua, che è il quantitativo che essa contiene, quando entra in contatto con una fonte di calore compresa tra gli 80°C ed i 180°C. Aspha-min®, da quanto dichiarato dal fornitore, additivata alla miscela di conglomerato bituminoso, a temperature di poco superiori ai

100°C, avvia il rilascio dell'acqua contenuta, immettendo nel mix una sorta di vapore acqueo; si attiva così, attraverso la formazione di micro-bolle, un processo di schiumatura controllata e graduale del bitume che agevola il ricoprimento degli inerti e la lavorabilità della miscela. Questo processo, continuo e prolungato nel tempo favorisce la lavorabilità al conglomerato, fino a temperature di 85 – 90°C per i conglomerati realizzati con bitume tradizionale, e 100 – 105°C per quelli con bitume modificato. Il tenore di additivazione di Aspha-min® è indicato in misura dello 0,28% sul peso degli aggregati, e permette il confezionamento di un conglomerato bituminoso a temperature comprese tra i 105 °C (conglomerato tradizionale) ed i 115 °C (fonoassorbenti e Splitt Mastix Asphalt «SMA»), garantendo le stesse prestazioni e funzionalità dei conglomerati di qualsiasi tipo: con bitume normale o modificato, e con le medesime quantità di materiale riciclato eventualmente utilizzate. La forma granulata di Aspha-min® ne consente un agevole stoccaggio e l'inserimento diretto all'interno del mescolatore. Aspha-min è poi facilmente dosabile, senza necessità di modifiche strutturali agli impianti produttivi, impiegando ad esempio i sistemi di dosatura delle fibre di vetro utilizzate per conglomerati drenanti o SMA, oppure quelli per la dosatura del filler/calce.

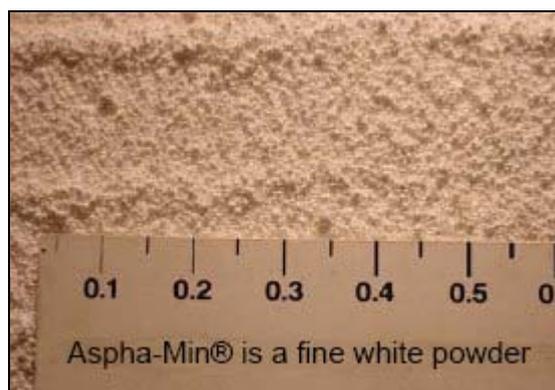


Fig. 6.3 – Aspetto dell'Aspha-min® zeolite in forma pulverulenta

Anche questo elemento prima di essere impiegato nella produzione sperimentale dei provini di conglomerato bituminoso, è stato testato al fine di verificare la sua proprietà di cedere il 21% di acqua contenuta al suo interno, in presenza di fonti di calore.

A tal scopo è stata ideata la seguente prova:

sono stati preparati due campioni di Aspha-min® zeolite dal peso di 20,00 g ciascuno, e sono stati posti in stufa alla temperatura costante di 145°C ± 5°C, e si è monitorata la perdita di peso di detti provini ad intervalli di tempo prestabiliti. La prova è stata considerata conclusa una volta raggiunto e mantenuto un peso costante dei campioni. In tab. 6.7 sono riportate le misurazioni della perdita di peso effettuate ad intervalli regolari:

	Perdita di peso [g]		
	campione 1	campione 2	
peso iniziale [g]	20,00	20,00	
dopo 30'	18,94	18,91	
dopo 60'	18,45	18,46	
dopo 90'	18,14	18,18	
dopo 120'	17,90	17,93	
dopo 240'	17,13	17,44	
dopo 270'	17,10	17,35	
dopo 320'	17,10	17,26	
dopo 22h	17,00	16,95	
dopo 25h	16,96	16,95	
dopo 30h	16,96	16,95	media
perdita in peso [g]	3,04	3,05	3,05
perdita %	15,20	15,30	15,25

Tab. 6.7 – Monitoraggio della perdita di peso dell'Aspha-min® zeolite

Grazie a tale prova è stato possibile verificare che la zeolite utilizzata in questa sperimentazione è in grado di rilasciare solo circa il 15% di acqua, contro il 21% dichiarato dalla società produttrice.

In fig., 6.4 viene rappresentato in forma grafica l'andamento della perdita di peso della zeolite sintetica Aspha-min®.

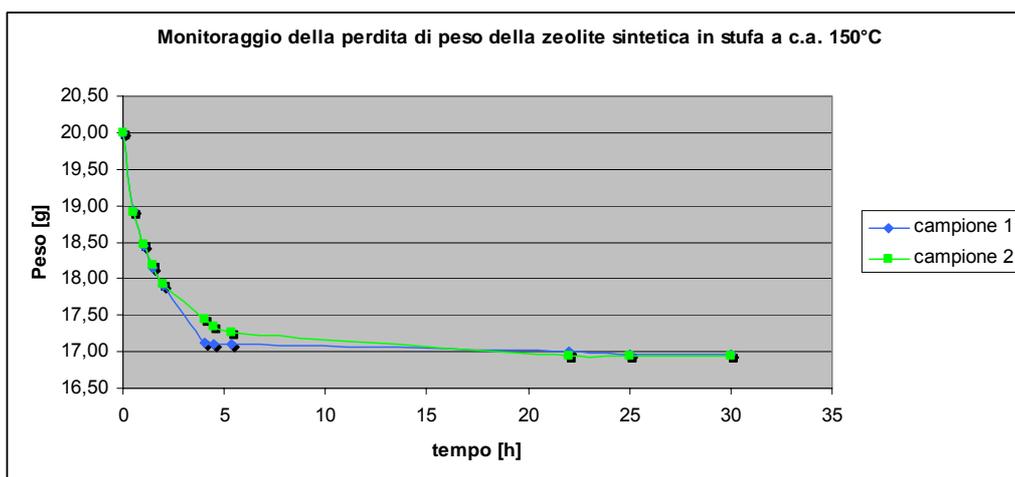


Fig. 6.4 – Perdita di peso della zeolite Aspha-min® nel tempo

6.2 – FASE I: individuazione della quantità ottimale di zeolite sintetica

6.2.1 Generalità

La prima fase della sperimentazione si è posta due quesiti fondamentali:

- Verificare il dosaggio ottimale di zeolite (0,3% in peso rispetto agli inerti) che minimizza la percentuale dei vuoti residui della miscela compattata e conseguentemente massimizza le resistenze meccaniche;
- Individuare e quantificare la potenziale necessità di un intervallo di tempo, tra la fase di miscelazione-additivazione e la costipazione in una miscela warm, ipotizzando che durante tale intervallo la zeolite assolva al compito di "micro-schiomare" la miscela rendendola di fatto lavorabile.

Per rispondere a tali domande è stata progettata una prima fase sperimentale, nella quale, gli elementi costituenti la miscela, ovvero gli inerti e la relativa curva granulometrica, il tipo di bitume impiegato ed il suo tenore, sono considerati invariati per tutte miscele ed ai paragrafi precedenti dichiarati.

Il tenore ottimale di zeolite è stato verificato considerando diversi dosaggi da additivare alla miscela (0,25% - 0,50% - 0,75% - 1,00%) con le temperature di miscelazione e costipamento indicati in tab.6.8.

Ad ogni miscela, per dato dosaggio, sono stati fatti corrispondere n°4 provini per i quali sono state previste determinazioni volumetriche e prove di Trazione Indiretta e rottura Marshall;

Si riporta in tab. 6.8 lo schema sperimentale seguito in laboratorio:

ID Miscela	TEMPO MATURAZIONE	TEMPERATURA		DOSAGGIO ZEOLITE	TEST sui PROVINI			
		MISCELAZIONE	MATURAZIONE		V% = VUOTI TI = Trazione indiretta M = Marshall			
					A	B	C	D
HMAZ0_150	0h	150 ± 5°C	Nessuna	0%	v%	v%	v%	v%
					M	TI	M	TI
HMAZ0_150_2h	2h	150 ± 5°C	90 ± 5°C	0%	v%	-	v%	-
					-	-	-	-
WMAZ25_110_2h	2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	0,25%	v%	v%	v%	v%
					M	TI	M	TI
WMAZ50_110_2h	2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	0,50%	v%	v%	v%	v%
					M	TI	M	TI
WMAZ75_110_2h	2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	0,75%	v%	v%	v%	v%
					M	TI	M	TI
WMAZ100_110_2h	2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1,00%	v%	v%	v%	v%
					M	TI	M	TI

Legenda:
 - Es.: HMAZ0_150_2h = miscela Hot mix Asphalt, senza zeolite, miscelata a 150°C e condizionata per 2h in ambiente termostatico controllato.

Tab. 6.8 – Quadro sinottico della Fase I sperimentale

L'individuazione e la quantificazione di un potenziale intervallo di tempo tra miscelazione e compattazione della miscela al fine di esaltare l'effetto di "micro-schiumatura" conseguente alla additivazione con Aspha-min® zeolite, favorendo quindi la fluidità della miscela e di conseguenza la sua lavorabilità a temperature inferiori delle usuali, riflettendo su quanto avviene nelle fasi di confezionamento in cantiere del conglomerato bituminoso, e sul tempo che intercorre tra lo stoccaggio dello stesso materiale, e la sua posa in opera in cantiere, si è imposto che tra la fase di miscelazione e quella di compattazione in laboratorio, venisse atteso un periodo di "riposo" del materiale, all'interno della stufa posta alla temperatura costante e controllata di $90^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per un tempo pari a 2 ore, per simulare in qualche modo il tempo che il conglomerato bituminoso trascorre in un cassone riscaldato di un camion trasportatore.

Per controllare le caratteristiche di addensamento del conglomerato WMA, confezionato secondo tale metodica, sono state considerate due miscele di controllo:

- una miscela tal quale confezionata a $150^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e costipata subito dopo la miscelazione, secondo metodica Marshall standard (75 colpi per faccia);
- una seconda miscela tal quale miscelata a $150^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, ma costipata dopo essere stata condizionata all'interno della stufa alla temperatura di $90^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per un tempo pari a 2 ore.

6.2.2 Proprietà volumetriche

Il confezionamento dei provini è avvenuto secondo la metodica Marshall. Dopo l'essiccamento fino a peso costante degli inerti, necessario al confezionamento di 4 provini si è provveduto alla miscelazione degli stessi all'interno di un padellone metallico posto al di sopra di un contenitore metallico all'interno del quale è stata preventivamente riposta della sabbia, al fine di distribuire uniformemente alla superficie del padellone contenente la miscela da confezionare, l'azione riscaldante della fiamma di un fornello a gas, che in alternativa sarebbe stata concentrata solo in alcuni punti del padellone, rendendo difficilmente gestibile la miscelazione.

Il processo di miscelazione è gestito esclusivamente a mano, attraverso l'uso di un cucchiaio, dall'operatore tecnico.

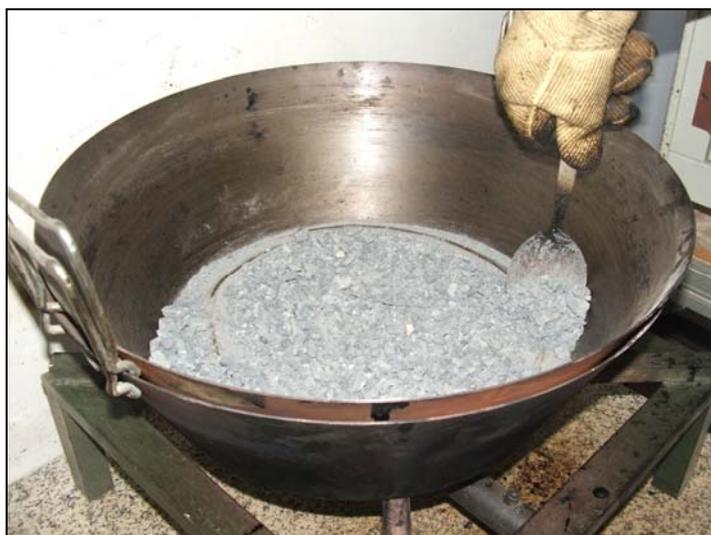


Fig. 6.5 – *Un momento della miscelazione degli inerti*

Dopo aver mescolato e verificato, attraverso l'uso di termometri digitali, le temperature imposte in fase di progettazione della sperimentazione, è stata aggiunto il bitume preventivamente reso fluido all'interno della stufa, ed è stato sottoposto il tutto a mescolazione prolungata. Una volta che il bitume ha ricoperto tutte le superfici degli aggregati, è stato aggiunto il filler ed è stato mescolato il tutto fino a che il filler non avesse completamente "digerito" il bitume.

Verificate le temperature sono stati compattati i provini utilizzando un compattatore Marshall (75 colpi di maglio per faccia).



Fig. 6.6 – *Un momento dell'aggiunta del bitume*

Per quanto riguarda invece le miscele Warm mix contenenti Aspha-min® zeolite, esso è stato aggiunto prima della costipazione, dopo aver atteso la totale assorbimento del filler da parte della pellicola di bitume che avvolge gli aggregati nella miscela. E' da sottolineare che nel

momento dell'aggiunta della zeolite sintetica, al contatto con il conglomerato bituminoso, si è osservato un lieve rilascio di vapore acqueo.



Fig. 6.7 – Un momento dell'aggiunta della zeolite alla fine della miscelazione del bitume

6.2.3 Risultati ottenuti in termini volumetrici

Per quanto riguarda il dettaglio dei risultati relativi a ciascun provino di questa fase sperimentale, si rimanda alla consultazione dell'Appendice A-1 relativo alla Fase I di sperimentazione.

Di seguito sono altresì riportati i risultati medi del grado di addensamento delle diverse miscele al variare del dosaggio in zeolite, cfr. tab 6.9.

Valori medi delle miscele		
	Addensamento (g/cm ³)	%vuoti
WMAZ25_110_2h	2,445	6,013
WMAZ50_110_2h	2,443	6,083
WMAZ75_110_2h	2,419	7,032
WMAZ100_110_2h	2,400	7,745
HMAZ0_150	2,518	3,326
HMAZ0_150_2h	2,427	6,712

Tab. 6.9 – Valori medi di addensamento e di % dei vuoti delle miscele considerate

6.2.4 Analisi dei risultati

Sono di seguito, riportati sottoforma grafica, nelle fig. 6.8 e 6.9, i valori medi di addensamento delle varie miscele, espresso in termini di percentuale dei vuoti residui e in grado di addensamento,

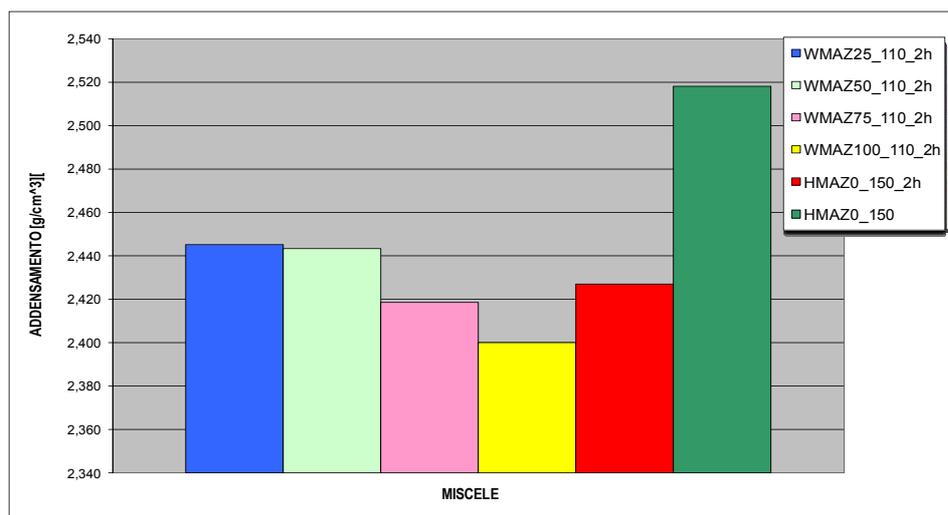


Fig. 6.8 – Grafico rappresentante lo stato di addensamento delle miscele in esame al variare del dosaggio in bitume

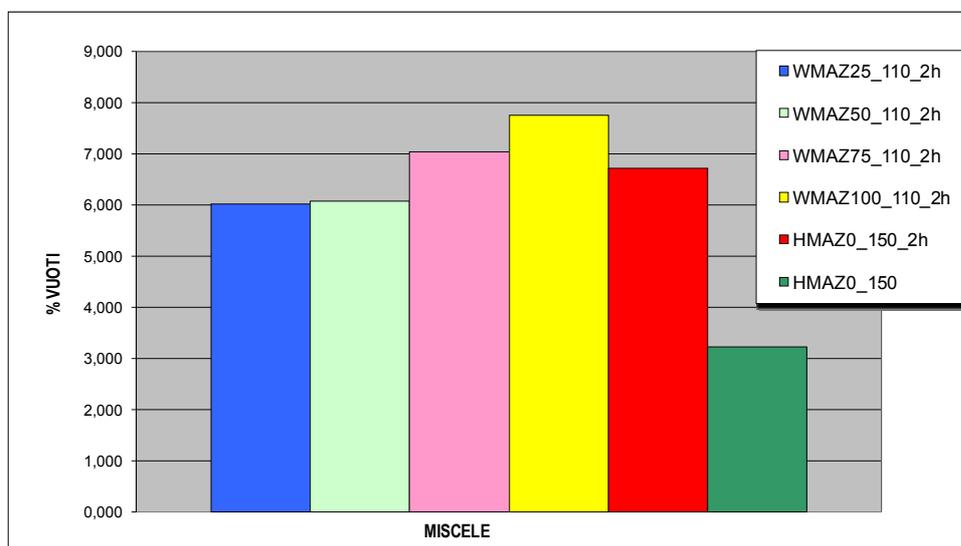


Fig. 6.9 – Grafico rappresentante la percentuale di vuoti delle miscele in esame

Come è possibile osservare da entrambi i grafici, la quantità di zeolite che rende minimi, rispetto alle altre percentuali di zeolite, i vuoti residui è quella dello 0,25% approssimabile alla quantità suggerita dal produttore che è lo 0,3% in peso rispetto agli inerti.

E' interessante notare inoltre che l'aver condizionato in stufa il materiale prima del costipamento, ha in qualche modo favorito la "attivazione" dell'additivo zeolitico, favorendo la lavorabilità e l'addensamento.

Confrontando i risultati della miscela WMA_Z25_110_2h con lo 0,25% di zeolite, con la miscela di controllo HMAZ0_150_2h, si evince che la miscela WMA è stata in grado di addensarsi di più, rispettando le aspettative iniziali. Infatti, secondo quanto i produttori asseriscono, una miscela additivata con zeolite, rispetto ad una miscela tal quale tradizionale, mantiene per più tempo le proprietà di addensabilità, consentendo quindi di poter essere stesa in siti ad un raggio di distanza superiore rispetto al sito di stoccaggio della miscela.

6.2.5 Caratterizzazione meccanica: prova Marshall e Trazione Indiretta

Dopo l'analisi delle caratteristiche volumetriche delle varie miscele, si è provveduto ad eseguire le prove di caratterizzazione meccanica.

I provini indicati con le lettere A e C per ciascuna delle 4 miscele, sono stati destinati alla determinazione della Stabilità tramite schiacciamento Marshall, mentre i provini restanti B e D sono stati portati a rottura tramite prova di Trazione Indiretta.

Di seguito in tab. 6.10 sono riportati i valori medi ottenuti a seguito delle prove di resistenza meccaniche Marshall. Per la consultazione dei risultati sperimentali di ciascun provino si rimanda alle appendice A-2.

6.2.5.1 Risultati prova Marshall e considerazioni

Valori medi delle miscele		
	Stabilità [kN]	Rigidezza [kN/mm ²]
WMAZ25_110_2h	7,057	2,752
WMAZ50_110_2h	7,050	2,461
WMAZ75_110_2h	6,065	2,343
WMAZ100_110_2h	5,944	2,700
HMAZ0_150	10,806	4,883

Tab. 6.10 – Valori medi di Stabilità e Rigidezza Marshall delle miscele considerate

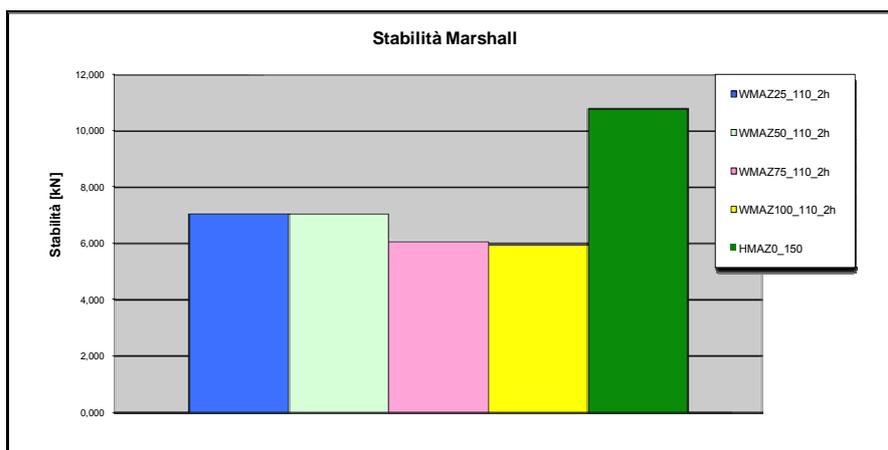


Fig. 6.10 – Confronto grafico delle varie miscele sulla base della Stabilità Marshall

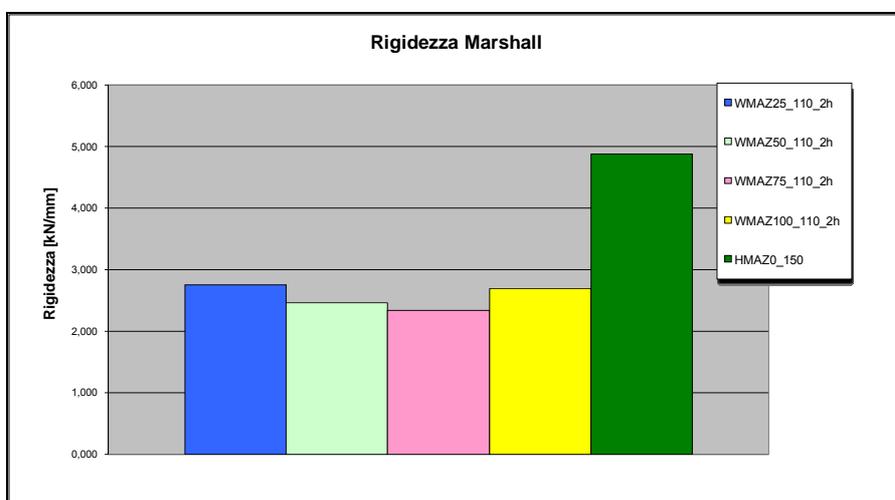


Fig. 6.11 – Confronto grafico delle varie miscele sulla base della Rigidezza Marshall

Come si nota dai precedenti grafici in fig. 6.10 e 6.11, la miscela che presenta le migliori prestazioni in termini di resistenza allo schiacciamento secondo procedura Marshall, è la miscela con lo 0,25% di Aspha-min® zeolite WMA_Z25_110_2h, la quale risulta essere la migliore anche dal punto di vista di addensamento volumetrico. Dal punto di vista della stabilità, risulta essere confrontabile con la miscela contenente lo 0.50% di Aspha-min® zeolite (WMA_Z50_110_2h), e decisamente migliore rispetto alle miscele che ne contengono lo 0,75% e 1,00%.

6.2.5.2 Risultati prova di Trazione Indiretta e considerazioni

La prova di trazione indiretta è stata eseguita secondo norma, dopo il condizionamento a 25°C per circa 24 ore. I provini sottoposti al test sono stati quelli contrassegnati con le lettere B e D. Di seguito sono riportati i valori della prova meccanica sottoforma numerica e grafica.

Per la consultazione dei risultati sperimentali di ciascun provino si rimanda alle appendice A-3.

Valori medi delle miscele		
	RTI [kN]	CTI [kN/mm ²]
WMAZ25_110_2h	7,057	2,752
WMAZ50_110_2h	7,050	2,461
WMAZ75_110_2h	6,065	2,343
WMAZ100_110_2h	5,944	2,700
HMAZ0_150	10,806	4,883

Tab. 6.11 – Valori della prova di Trazione Indiretta

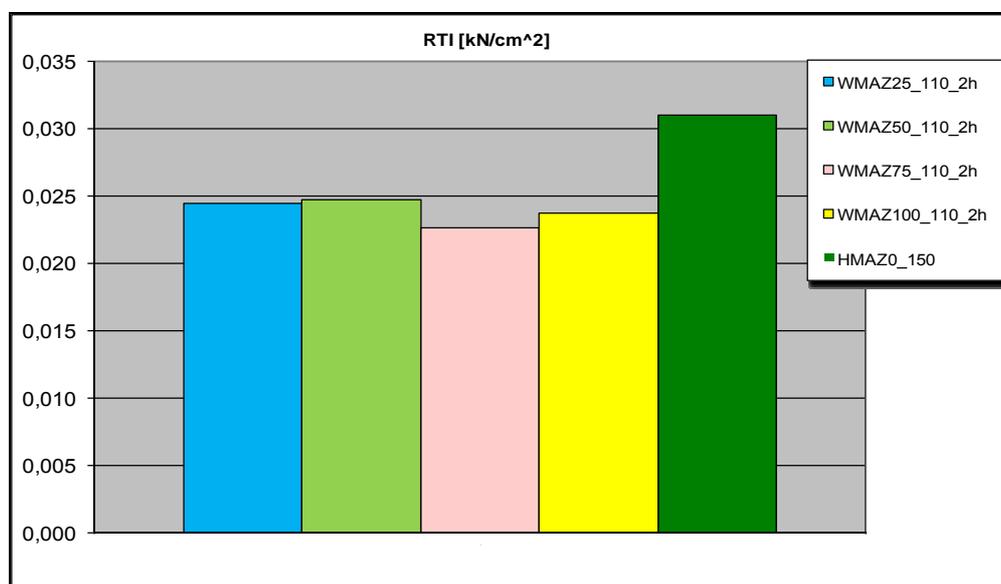


Fig. 6.12 – Confronto grafico delle varie miscele sulla base della resistenza a trazione indiretta

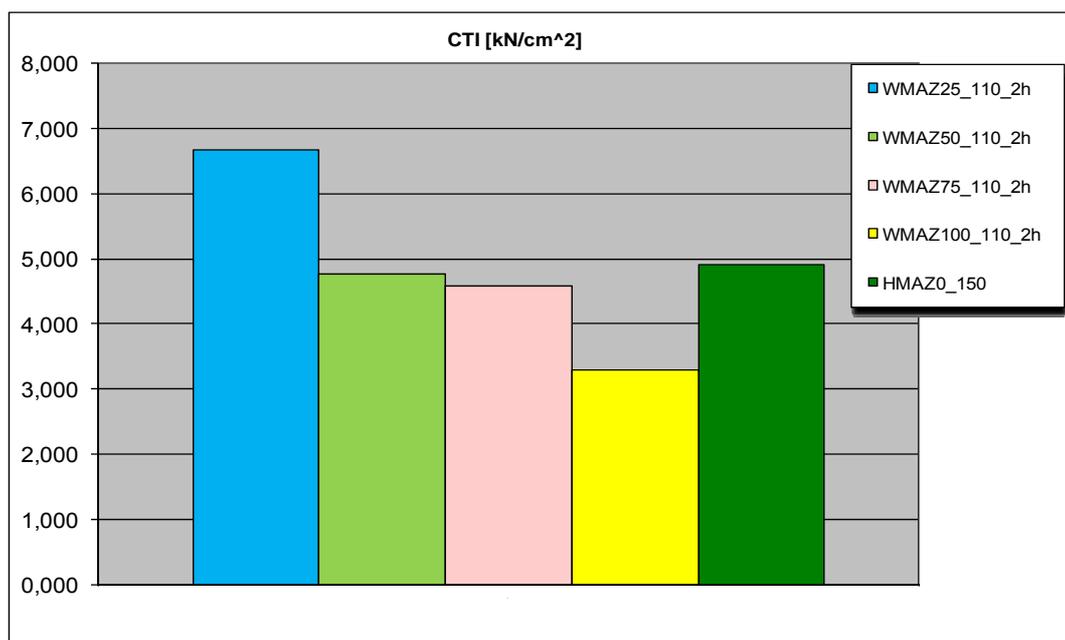


Fig. 6.13 – Confronto grafico delle varie miscele sulla base del coeff. di trazione indiretta

Anche la prova di trazione indiretta ha confermato che il quantitativo ottimale da aggiungere ad una miscela di conglomerato bituminoso, è quello fornito dal produttore, ovvero dello 0,3% rispetto al peso degli inerti. Ciò al fine di ottimizzare i vuoti presenti nella miscela e nel fornirle, di conseguenza, le migliori prestazioni meccaniche.

6.3 – FASE II: individuazione di un “potenziale” tempo di maturazione della miscela additivata con zeolite sintetica

Dopo aver individuato e confermato che la percentuale ottimale di zeolite è quella suggerita dal produttore, e che occorre, con buona probabilità, lasciare che la miscela additivata con Asphamin® zeolite “maturi” prima della compattazione, e in questa fase si è provveduto a stabilire quale è il tempo ottimale di “riposo” affinché la miscela costipata presenti il minor numero di vuoti residui possibile.

Anche in questa fase gli elementi costitutivi della miscela quali inerti e relativa curva granulometrica, bitume e quantitativo, sono rimasti invariati rispetto alle precedenti due fasi.

In questa parte della sperimentazione si è provveduto a realizzare 5 miscele di conglomerato bituminoso, e ad individuare in fase di progettazione 3 tempi in cui il materiale dovesse essere condizionato in stufa, e 3 diverse temperature di condizionamento.

I tempi di condizionamento:

- a. 0' in stufa, equivalente allo stato di costipazione Marshall (75 colpi per faccia) immediata successivamente alla miscelazione;
- b. 60' in stufa prima della costipazione Marshall standard (75 colpi per faccia);
- c. 120' in stufa prima della costipazione Marshall standard (75 colpi per faccia);

Le temperature di condizionamento

- a. $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per le miscele WMA miscelate a 130°C e additivata con lo 0,3% di zeolite;
- b. $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per le miscele tal quali di controllo miscelate a 130°C ;
- c. $130^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per le miscele tal quali di controllo miscelate a 150°C ;
- d. $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per le miscele WMA miscelate a 110°C e additivata con lo 0,3% di zeolite;
- e. $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per le miscele tal quali di controllo miscelate a 110°C ;

Le miscele

- a. *HMA_150* = miscela tal quale miscelata a $150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e posta in stufa a 130°C ;
- b. *HMA_130* = miscela tal quale miscelata a $130^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e posta in stufa a 110°C ;
- c. *HMA_110* = miscela tal quale miscelata a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e posta in stufa a 90°C ;
- d. *WMA_130* = miscela additivata con lo 0,3% di zeolite miscelata a $130^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e posta in stufa a 110°C ;
- e. *WMA_110* = miscela additivata con lo 0,3% di zeolite miscelata a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e posta in stufa a 90°C ;

Si riporta in tab. 6.12 lo schema sperimentale seguito in laboratorio:

TEMPO MATURAZIONE t = 0	TEMPERATURA		TEST sui PROVINI					
			v% = VUOTI – TI = TRAZIONE INDIRETTA					
ID MISCELE	MISCELAZIONE	MATURAZIONE	1	2	3	4	5	6
HMA_150	150 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	v%	v%
			TI	-	TI	-	-	TI
HMA_130	130 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	v%	v%
			TI	-	TI	-	-	TI
WMA_130	130 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	v%	v%
			TI	-	TI	-	-	TI
HMA_110	110 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_110	110 ± 5°C	Nessuna	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-

TEMPO MATURAZIONE t = 1 h	TEMPERATURA		TEST sui PROVINI					
			v% = VUOTI – TI = TRAZIONE INDIRETTA					
ID MISCELE	MISCELAZIONE	MATURAZIONE	1	2	3	4	5	6
HMA_150_1h	150 ± 5°C	130 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
HMA_130_1h	130 ± 5°C	110 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_130_1h	130 ± 5°C	110 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
HMA_110_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_110_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-

TEMPO MATURAZIONE t = 2 h	TEMPERATURA		TEST sui PROVINI					
			v% = VUOTI – TI = TRAZIONE INDIRETTA					
ID MISCELE	MISCELAZIONE	MATURAZIONE	1	2	3	4	5	6
HMA_150_2h	150 ± 5°C	130 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
HMA_130_2h	130 ± 5°C	110 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_130_2h	130 ± 5°C	110 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
HMA_110_2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-
WMA_110_2h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	v%	v%	v%	v%	-	-
			TI	TI	TI	TI	-	-

Legenda:
 - E.s. : HMA_130_2h miscela di conglomerato bituminoso tradizionale a caldo miscelato a 130° e costipato dopo 2 ore in ambiente termostatico controllato;

Tab. 6.12 – Quadro sinottico della Fase II sperimentale

6.3.1 Proprietà volumetriche

La miscelazione è stata effettuata in maniera manuale aggiungendo, nel caso delle miscele WMA, il quantitativo ottimale di zeolite individuato nella fase precedente subito dopo l'aggiunta

del filler. In seguito alla miscelazione si è provveduto alla pesatura del quantitativo di conglomerato bituminoso necessario per realizzare ogni singolo provino, circa 1250 g, ed è stato predisposto per ciascun provino un contenitore atto al contenimento dei singoli provini in stufa, tutto ciò al fine di non influenzare le temperature, mantenute statiche termicamente, tra la costipazione di un campione ed il successivo. Di seguito si riportano i valori delle singole altezze, pesi, valori di addensamento e percentuale dei vuoti residui di ogni singolo provino.

6.3.1.1 Risultati ottenuti in termini volumetrici

Mediando i valori delle percentuali dei vuoti residui di tutti i provini appartenenti a ciascuna miscela, è stato possibile ottenere il seguente quadro riassuntivo, rappresentativo dello stato di addensamento delle varie miscele, nelle diverse condizioni al contorno imposte:

%vuoti	WMA_150	WMA_130	HMA_130	WMA_110	HMA_110
t = 0	3,31	5,22	4,90	7,62	8,21
t = 1h	5,36	5,19	6,09	4,01	9,74
t = 2h	5,66	6,33	6,31	8,66	8,74

Tab. 6.13 – Quadro riassuntivo dello stato di addensamento delle diverse miscele nelle diverse condizioni ambientali imposte

Per la visione dei risultati di ciascun singolo provino realizzato in questa fase sperimentale, si rimanda alla consultazione dell'Appendice B-1, allegato al presente lavoro di tesi.

6.3.1.2 Analisi dei risultati ottenuti in termini volumetrici

Confrontando i valori ottenuti per la miscele HMA_150, WMA_130 e HMA_130 , utilizzando una rappresentazione grafica ad istogramma, si ottiene il quadro riassuntivo riportato in fig. 6.14, dal quale è possibile effettuare alcune interessanti considerazioni utili ai fini della successiva fase di sperimentazione.

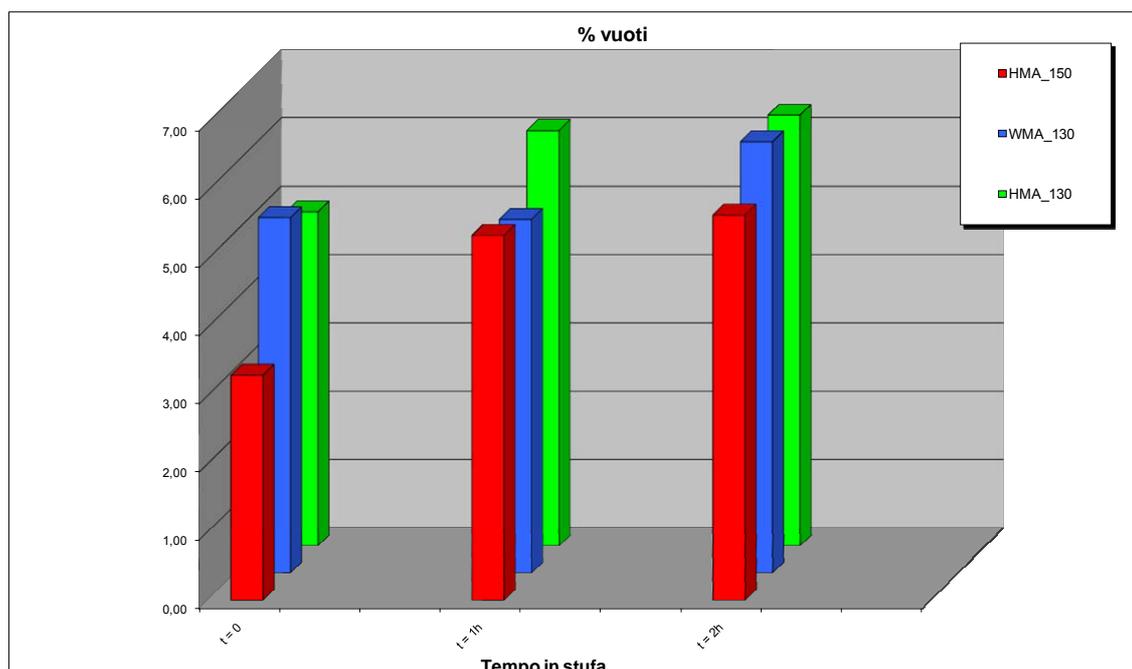


Fig. 6.14 – Quadro sinottico dello stato di addensamento delle diverse miscele nelle diverse condizioni ambientali imposte

Analizzando il diagramma precedente in fig. 6.14, è possibile affermare quanto segue:

- In condizione di costipamento immediato ($t=0h$), la condizione di massimo addensamento si ottiene con la miscela di controllo HMA_150, mentre tra le miscele WMA_130 e HMA_130, dove l'unica differenza compositiva è la presenza della zeolite, non sono stati registrati significativi cambiamenti nel grado di addensamento;
- Dopo 1 ora di permanenza in stufa, ad una temperatura di 20°C inferiore a quella di miscelazione di ciascuna miscela, è possibile confrontare la percentuale dei vuoti della miscela WMA_130, con la miscela di controllo HMA_150. Questo risultato evidenzia come la percentuale dei vuoti nella miscela di controllo HMA_150 sia aumentato di un Δ di c.a. 2 punti percentuali, mentre per la miscela additivata con zeolite, il Δ è rimasto invariato rispetto alla condizione di costipazione immediata a seguito della miscelazione. La medesima miscela, priva di additivo zeolitico HMA_130, presente il più alto valore di percentuale di vuoti, facendo registrare un incremento Δ rispetto alla condizione di costipazione immediata, anche in questo caso di c.a. 2 punti percentuali. Ciò dimostrerebbe come, per la miscela WMA additivata con zeolite, la permanenza in ambiente termico controllato prima della costipazione, produca un effetto migliorativo in termini di lavorabilità, che nelle altre miscele non è stato riscontrato;
- Dopo 2 ore in stufa l'effetto fluidificante offerto dall'additivo zeolitico sembrerebbe svanire, in quanto i valori dei vuoti residui per le miscele HMA_130 e WMA_130,

risultano pressoché identici. Infatti la miscela HMA_130 ha attestato il proprio valore dei vuoti al valore registrato nella prima ora di permanenza in stufa, mentre la miscela WMA_130 con zeolite, ha mostrato un incremento Δ di c.a. 1 punto percentuale dei propri vuoti residui dovuto probabilmente ad un eccessivo tempo di permanenza in stufa, oltre il quale l'effetto fluidificante dell'additivo viene meno.

Per valutare l'efficacia della zeolite all'interno delle miscele di conglomerato bituminoso, sono state realizzate altre 2 miscele, una additivata e l'altra no, ad una temperatura inferiore rispetto alle precedenti di 20°C. Il quadro di confronto è riportato in fig. 6.15

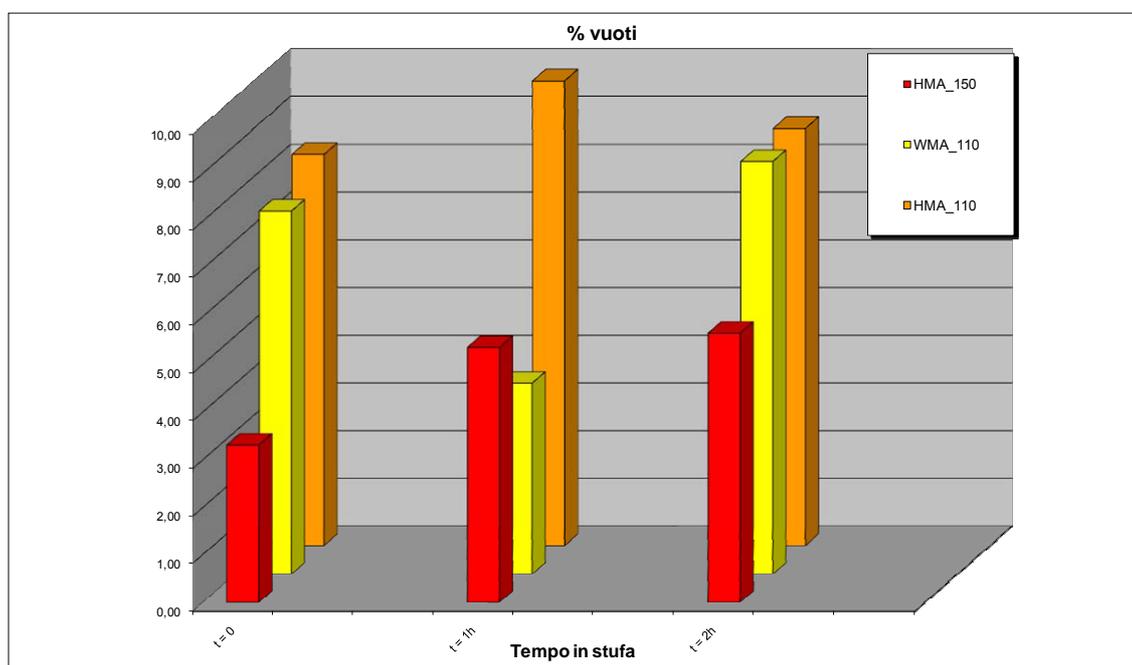


Fig. 6.15 – Quadro sinottico dello stato di addensamento delle diverse miscele nelle diverse condizioni ambientali imposte

- Nella condizione di costipazione immediata, la miscela di controllo HMA_150 presenta il più basso indice dei vuoti, come analizzato in precedenza, sinonimo di un maggiore grado di addensamento rispetto alle 2 miscele, WMA_110 e HMA_110. Ciò è dovuto senz'altro alla maggiore temperatura di miscelazione che rende il legante bituminoso più fluido e quindi più lavorabile. Anche in questo caso, la presenza della zeolite, confrontando le miscele HMA_110 e WMA_110, sembra essere ininfluente in quanto entrambe le miscele presentano circa, la stessa percentuale dei vuoti;
- Dopo 1 ora di permanenza in stufa ad una temperatura di 20°C inferiore rispetto alle temperature di miscelazione adottate, il quadro appare del tutto variato. La miscela

HMA_130 fa registrare un incremento Δ dell'indice dei vuoti di c.a. 1,5 punti percentuali, mentre la miscela warm mix asphalt WMA_110 presenta un decremento Δ di ben 3,5 punti percentuali. Questa evidenza dimostrerebbe che nell'intorno dell'ora di permanenza in un ambiente termico controllato, la zeolite abbia la capacità di "maturare" liberando all'interno della miscela di conglomerato bituminoso, tutta l'acqua presente all'interno della sua struttura microcristallina, favorendo la schiumatura del bitume, aumentandone considerevolmente la lavorabilità;

- Dopo 2 ore di permanenza in stufa l'effetto benefico apportato dalla zeolite sembrerebbe essere svanito in quanto la percentuale dei vuoti della miscela WMA_110 è prossima alla percentuale dei vuoti della medesima miscela priva solo della zeolite, ovvero la miscela HMA_110.

Analizzando complessivamente tutte le miscele realizzate e tutte le condizioni al contorno imposte, si può affermare che per valutare l'efficacia della zeolite nel favorire l'addensamento della miscela di conglomerato bituminoso, è necessario attendere un tempo pari ad 1 ora, affinché con buona probabilità, tutta l'acqua contenuta nella struttura microcristallina della zeolite venga rilasciata e crei una schiuma fluidificante con il bitume. Nella pratica di cantiere questo tempo può essere indicato come il tempo che intercorre tra lo stoccaggio del conglomerato e la messa in opera della miscela. Per maggiore completezza nella fig. 6.16 è riportato il quadro grafico di insieme:

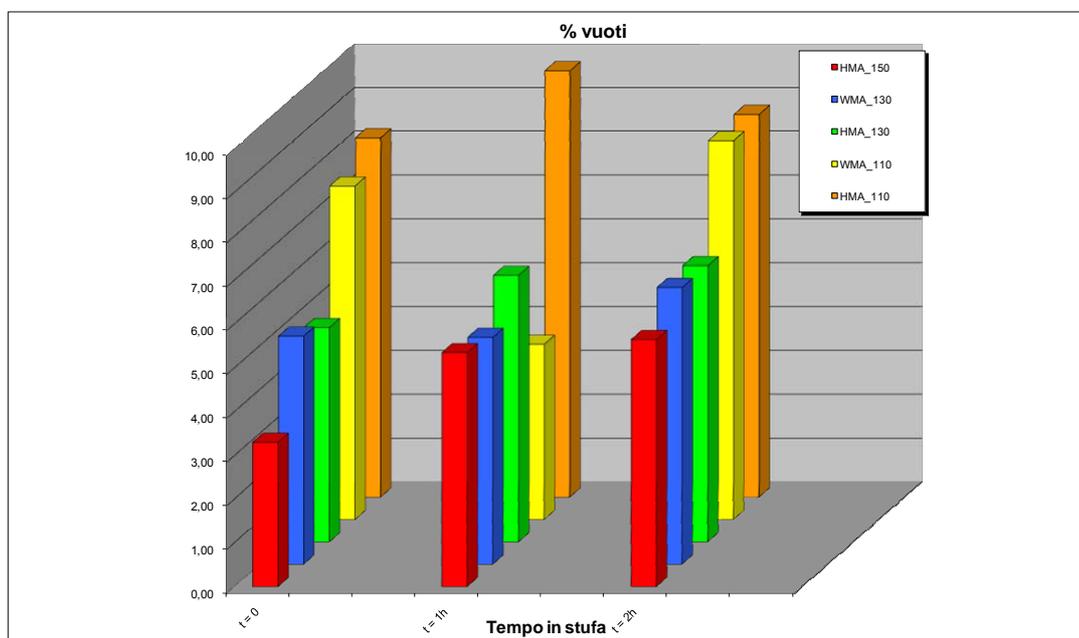


Fig. 6.16 – Quadro sinottico dello stato di addensamento delle diverse miscele nelle diverse condizioni ambientali imposte

6.3.2 Resistenza meccanica: prova di Trazione Indiretta

Gli stessi provini sono stati inseguito analizzati dal punto di vista meccanico, attraverso l'esecuzione della prova di Trazione Indiretta a 25°C secondo norma CNR B.U. 134/1991. In accordo con tale norma, sono stati calcolati i seguenti termini:

Resistenza a Trazione indiretta: $RTI = \frac{2 \cdot F_v}{\pi \cdot D \cdot h}$ espressa in kN/cm² e dove F_v indica il

carico verticale; D il diametro in cm del provino sottoposto alla prova il cui valore costante e pari a 10,16 cm e h indica l'altezza media del provino espressa in centimetri;

Coefficiente di Trazione Indiretta: $CTI = \frac{\pi \cdot D \cdot RTI}{2 \cdot \varepsilon_v}$ espressa in kN/cm² e dove D

rappresenta il diametro in cm del provino sottoposto alla prova il cui valore costante e pari a 10,16 cm; RTI la resistenza a trazione indiretta; ε_v la deformazione verticale a trazione indiretta espressa in cm. I risultati saranno di seguito confrontati nella stessa maniera con la quale sono stati analizzati per ci che riguarda la percentuale dei vuoti, partendo dalle miscele di controllo tal quali per temperature di miscelazione decrescenti, fino alle miscele tiepide secondo temperature decrescenti.

6.3.2.1 Risultati ottenuti in termini meccanici

Mediando i valori dei coefficienti ottenuti per ciascun provino appartenente a ciascuna miscela della sperimentazione, è stato ottenuto il seguente quadro riassuntivo, dal quale sono stati desunti gli istogrammi nelle fig. 6.17 e 6.18, utili per un'analisi di confronto grafico, per ciò che concerne le resistenze meccaniche offerte dalle miscele nelle diverse condizioni al contorno.

Miscela	Tempo in Stufa [minuti]	RTI [kN/cm ²]	CTI [kN/cm ²]
WMA_110	0	0,022	4,40
WMA_110_1h	60	0,038	4,20
WMA_110_2h	120	0,023	5,10
HMA_110	0	0,019	3,50
HMA_110_1h	60	0,019	3,30
HMA_110_2h	120	0,021	4,50
WMA_130	0	0,024	5,70
WMA_130_1h	60	0,027	4,50
WMA_130_2h	120	0,028	3,70
HMA_130	0	0,019	3,40
HMA_130_1h	60	0,027	3,60
HMA_130_2h	120	0,019	5,10
HMA_150	0	0,031	4,00
HMA_150_1h	60	0,033	3,70
HMA_150_2h	120	0,034	5,00

Tab. 6.14 – Quadro riassuntivo dei risultati ottenuti dalle varie miscele

Per la visione dei risultati di ciascun singolo provino realizzato in questa fase sperimentale, si rimanda alla consultazione dell'Appendice B-2, allegato al presente lavoro di tesi.

6.3.2.2 Analisi dei risultati ottenuti in termini meccanici

Confrontando i valori ottenuti, utilizzando una rappresentazione grafica ad istogramma, si ottiene quadro riassuntivo riportato nelle figg. 6.17 e 6.18, dal quale è possibile trarre alcune interessanti considerazioni utili ai fini della successiva fase di sperimentazione.

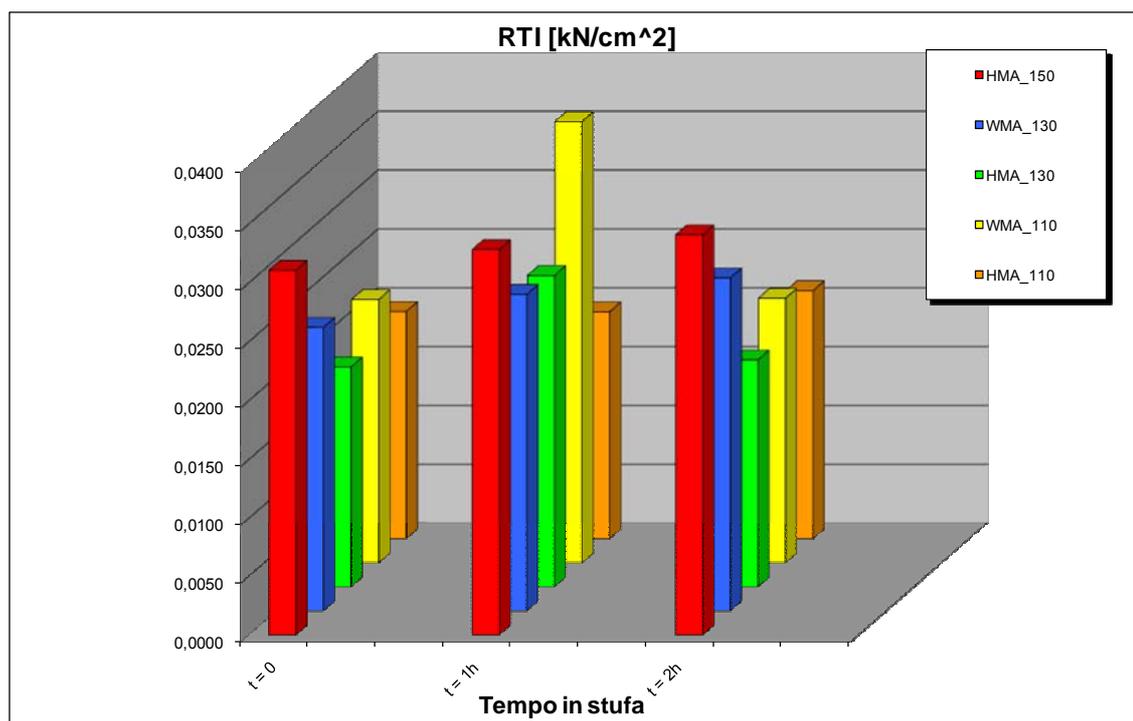


Fig. 6.17 – Confronto tra i valori di Resistenza a Trazione Indiretta RTI

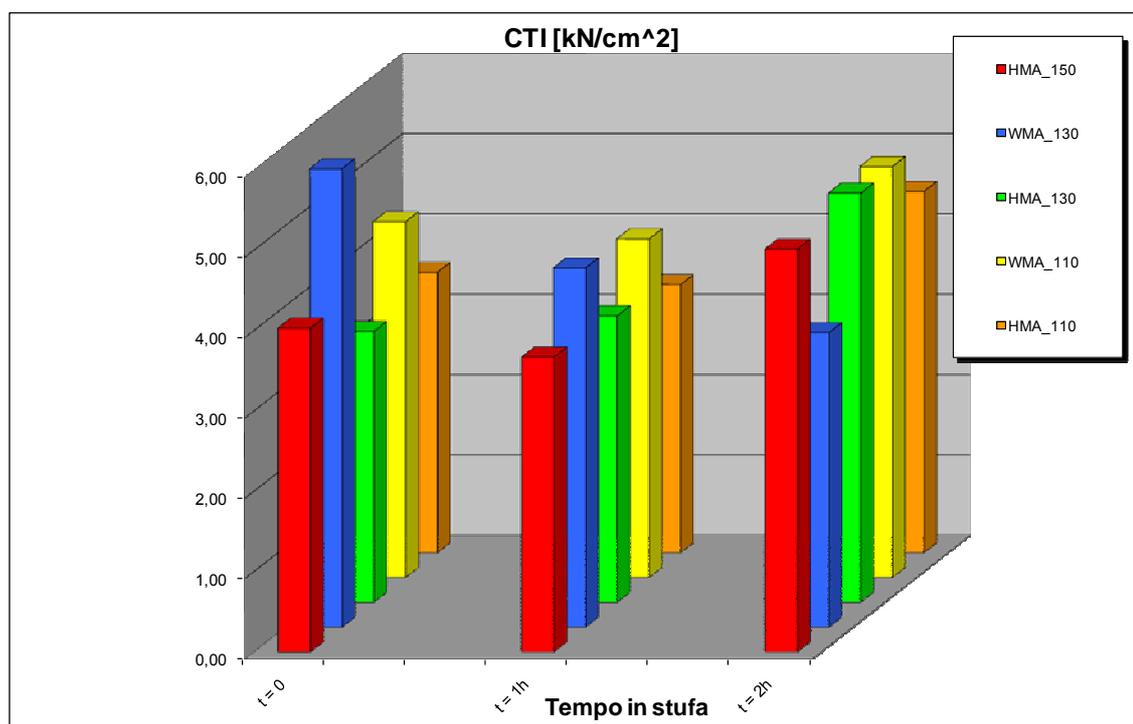


Fig. 6.18 – Confronto tra i valori del Coefficiente di trazione Indiretta CTI

Dall'osservazione dei risultati ottenuti e diagrammati, è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- Nella fase di costipazione immediata, la miscela che presenta il più alto valore di resistenza a trazione indiretta è la miscela HMA_150, seguita dalle miscele WMA_130 e WMA_110;
- I valori dei parametri RTI per la costipazione immediata per le due miscele WMA_130 e WMA_110, sono del tutto confrontabili. Sarebbe infatti che una costipazione a 110°C sia in grado di ottenere una miscela lavorabile del tutto analoga ad una miscela a 130°C;
- Dopo un'ora di condizionamento in ambiente termostatico controllato, ad una temperatura di 20°C inferiore alla temperatura di miscelazione di ciascuna miscela, si può osservare che la miscela WMA_110 presenta il più alto valore di resistenza alla trazione indiretta. Per la miscela WMA_130 invece non si evidenziano differenze rispetto alla corrispondente miscela tal quale HMA_130;
- Dopo 2 ore di condizionamento in ambiente termostatico controllato, l'effetto dell'aumento di resistenza a trazione indiretta nella miscela WMA_110 viene meno, e si registra altresì un incremento della resistenza a trazione indiretta in tutte e tre le miscele di controllo realizzate (HMA_150, HMA_130, HMA_110). Ciò in analogia con i risultati ottenuti nell'analisi delle proprietà volumetriche, consente di poter affermare che il tempo massimo affinché l'effetto schiumante di Aspha-min® zeolite sia massimo, è di 1 ora;
- Per quanto riguarda il coefficiente CTI, le miscele WMA contenenti Aspha-min® zeolite, presentano i più alti valori a partire dalla fase di costipazione immediata, in particolare la miscela denominata WMA_130;
- Dopo 1 ora di permanenza in ambiente termostatico controllato, le miscele WMA_130 e WMA_110 presentano il medesimo e più alto valore di CTI. Se la miscela WMA_110 ha mantenuto costante il proprio valore di CTI, la miscela WMA_130 ha registrato una diminuzione di tale parametro;
- Dopo 2 ore di condizionamento, si registra un incremento del valore di CTI nelle miscele di controllo, ma anche nella miscela WMA_110 costipata dopo 2 ore in stufa a 90°C.

6.3.3 Considerazioni conclusive Fase II

Questa fase sperimentale ha prodotto risultati interessanti sia in termini volumetrici che meccanici. Si è potuto constatare infatti che una costipazione immediata delle miscele WMA non produce gli effetti fluidicanti desiderati, probabilmente perché la zeolite non riesce ad espellere

tutto il quantitativo di acqua che è contenuto all'interno della sua struttura microcristallina. I risultati del grado di addensamento, dimostrano come vi sia un netto miglioramento dell'attitudine all'addensamento della miscela WMA_130, se essa viene condizionata per un tempo pari ad un'ora, in un ambiente termico ad una temperatura di 20°C inferiore a quella di miscelazione. Il risultato più evidente si è registrato nella miscela WMA_110 miscelata a 110°C e costipata dopo 1 ora in stufa a 90°C. Questo tempo di condizionamento, che offre inoltre interessanti risultati anche dal punto di vista meccanico, può essere inteso come un tempo limite in cui il conglomerato bituminoso tiepido può essere trasportato dal luogo di stoccaggio al cantiere in cui deve essere messo in opera, senza che ciò possa pregiudicare la sua qualità finale.

La successiva fase sperimentale sarà indirizzata alla valutazione dell'attitudine all'addensamento, utilizzando come strumento la norma UNI EN 12697-10 che consente di ottenerne curve di addensamento utilizzando apparecchiature di costipazione ad impulsi, e non necessita di attrezzatura specifica come la pressa a taglio giratoria. Come nuovo input in questa nuova fase, si terrà conto del risultato ottenuto nella fase II, ovvero del tempo di condizionamento ideale della miscela WMA_110.

6.4 – Fase III: le curve di addensamento UNI EN 12697-10

Individuate la quantità ottimale di zeolite da additivare alla miscela di conglomerato bituminoso, affinché questa presenti, a temperature di lavorazione inferiori rispetto a quelle canoniche, le medesime caratteristiche di lavorabilità e quindi di resistenze meccaniche in esercizio, e il tempo necessario alla zeolite per cedere tutto il quantitativo di acqua presente nella sua struttura micro cristallina, all'intera miscela di conglomerato bituminoso e creare un sistema in grado di rendere il conglomerato bituminoso "tiepido" lavorabile, si è provveduto a valutare tale lavorabilità.

Lo strumento di indagine scelto per valutare l'attitudine alla lavorabilità delle miscele di conglomerato bituminoso in esame, è la Norma UNI EN 12697-10.

Lo strumento offerto dalla normativa è stato introdotto ed analizzato all'interno del 3° capitolo della presente tesi di dottorato

Per questa fase sperimentale sono stati scelti, in accordo con la sopracitata norma, 4 livelli di energia di costipazione impulsiva (Marshall) crescenti:

- 25 colpi di maglio per faccia;
- 50 colpi di maglio per faccia;
- 75 colpi di maglio per faccia;
- 100 colpi di maglio per faccia.

Per ciascun livello di energia sono state costipate le seguenti miscele di conglomerato bituminoso, considerando come sempre invarianti al sistema il quantitativo e il tipo di legante bituminoso, la qualità e quantità di inerti costituenti lo scheletro solido delle miscele:

- *HMA_150* = Miscela di controllo miscelata a 150°C e costipazione immediata;
- *HMA_110* = Miscela di controllo miscelata a 110°C e costipazione immediata;
- *WMA_110* = Miscela Warm Mix asphalt con zeolite miscelata a 110°C e costipazione immediata;
- *WMA_110_1h* = Miscela Warm Mix asphalt con zeolite miscelata a 110°C e costipazione dopo 1 ora in stufa a 90°C.

Per ciascuna miscela e per ogni livello di energia sono stati realizzati 6 provini, tranne che per la miscela *WMA_110_1h* per la quale sono stati realizzati 4 provini per livello di energia. In totale per questa fase sono stati realizzati 88 provini.

Si riporta in tab. 6.15 lo schema sperimentale seguito in laboratorio:

ENERGIA 25 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI					
	MISCELAZIONE	MATURAZIONE		v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA					
				A	B	C	D	E	F
HMA_150_25	150 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
HMA_110_25	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
WMA_110_25	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
WMA_110_25_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%	-	-
				TI	TI	TI	TI	-	-

ENERGIA 50 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI					
	MISCELAZIONE	MATURAZIONE		v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA					
				A	B	C	D	E	F
HMA_150_50	150 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
HMA_110_50	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
WMA_110_50	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
WMA_110_50_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%	-	-
				TI	TI	TI	TI	-	-

ENERGIA 75 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI					
	MISCELAZIONE	MATURAZIONE		v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA					
				A	B	C	D	E	F
HMA_150_75	150 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
HMA_110_75	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
WMA_110_75	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
WMA_110_75_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%	-	-
				TI	TI	TI	TI	-	-

ENERGIA 100 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI					
	MISCELAZIONE	MATURAZIONE		v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA					
				A	B	C	D	E	F
HMA_150_100	150 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
HMA_110_100	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
WMA_110_100	110 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%	v%	v%
				-	TI	-	TI	-	TI
WMA_110_100_1h	110 ± 5°C	90 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%	-	-
				TI	TI	TI	TI	-	-

Tab. 6.15 – Quadro sinottico della Fase III sperimentale

6.4.1 Proprietà volumetriche

Tutti i provini una volta addensati ed estratti dalle fustelle Marshall, sono stati sottoposti ad analisi per stabilire lo stato di addensamento e l'indice dei vuoti residui. Successivamente sono stati sottoposti a prove di resistenza meccanica, in particolare alla prova di Trazione indiretta, dalla quale sono stati ricavati i coefficienti calcolati anche nella precedente fase sperimentale, ovvero la resistenza a trazione indiretta RTI, e il coefficienti di trazione indiretta CTI.

6.4.1.1 Risultati ottenuti in termini volumetrici

Nella tab. 6.16 sono riportati tutti i valori di addensamento e percentuale dei vuoti, con le relative deviazioni standard dei dati rispetto ai valori medi, di tutta questa fase sperimentale.

			HMA_150	HMA_110	WMA_110	WMA_110_1h
E ₁ (25 colpi*)	γ [g/cm ³]	<i>media</i>	2,385	2,321	2,317	2,308
		<i>dev. std.</i>	0,0061	0,0133	0,0200	0,0117
	% vuoti	<i>media</i>	8,309	10,774	10,943	11,38
		<i>dev. std.</i>	0,2339	0,5141	0,7716	0,4494
E ₂ (50 colpi*)	γ [g/cm ³]	<i>media</i>	2,476	2,424	2,418	2,437
		<i>dev. std.</i>	0,0118	0,0169	0,0154	0,0124
	% vuoti	<i>media</i>	4,811	6,809	7,049	6,42
		<i>dev. std.</i>	0,3658	0,6518	0,5930	0,4746
E ₃ (75 colpi*)	γ [g/cm ³]	<i>media</i>	2,515	2,474	2,465	2,499
		<i>dev. std.</i>	0,0095	0,0255	0,0292	0,0085
	% vuoti	<i>media</i>	3,311	4,903	5,218	4,01
		<i>dev. std.</i>	0,3658	0,9800	1,1238	0,3273
E ₄ (100 colpi*)	γ [g/cm ³]	<i>media</i>	2,548	2,495	2,502	2,516
		<i>dev. std.</i>	0,0190	0,0093	0,0124	0,0099
	% vuoti	<i>media</i>	2,068	4,096	3,841	3,37
		<i>dev. std.</i>	0,7317	0,3602	0,4752	0,3810

Tab. 6.16 – Valori delle medie e delle deviazioni standard dello stato di addensamento e della % dei vuoti residui delle miscele interessate alla sperimentazione.

Per la consultazione dei risultati di ciascun singolo provino realizzato in questa fase sperimentale, si rimanda alla consultazione dell'Appendice C-1, allegato al presente lavoro di tesi.

L'equazione che governa lo studio dell'addensabilità delle miscele è espressa nei seguenti termini:

$$\rho = \rho_{inf} - (\rho_{inf} - \rho_{zero})^{\exp(-E/C)}$$

Dove:

- P grado di addensamento del provino;
- ρ_{inf} addensamento teorico infinito corrispondente ad una condizione ideale in cui i vuoti residui sono nulli;
- ρ_{zero} addensamento iniziale (da calcolare attraverso applicazione del metodo dei minimi quadrati);
- C resistenza alla compattazione (termine di misura dell'attitudine all'addensamento);
- E energia applicata al provino.

Applicando le disposizioni della norma UNI-EN 12697-10, e attraverso l'utilizzo del metodo dei minimi quadrati, minimizzando il quadrato della differenza tra i dati "teorici" e i dati sperimentali, è stato possibile determinare i seguenti parametri di stima della lavorabilità delle miscele:

- C termine che indica la resistenza alla compattazione, espressa in numero di colpi;
- ρ_{zero} potenziale di compattazione relativo.

Ottenendo questi termini è stato possibile determinare secondo la norma, il parametro di "potenziale di compattazione relativo" R, attraverso l'uso della seguente formula:

$$R = \frac{(\rho_{inf} - \rho_{zero})}{\rho_{inf}}$$

In base ai valori del peso dell'unità di volume degli inerti, e della quantità di legante bituminoso percentuale presente nella miscela, è stato ottenuto il seguente valore di addensamento teorico a vuoti residui nulli:

$$\rho_{inf} = 2,604 \text{ gr/cm}^3$$

I risultati ottenuti per le 4 miscele confrontate in questa fase sperimentale sono riportati in tab. 6.17:

	HMA_150	HMA_110	WMA_110	HMA_110_1h
γ_{∞} [g/cm ³]	2,608	2,608	2,608	2,608
γ_0 [g/cm ³]	2,248	2,206	2,207	2,139
C (n° di colpi)	51,4	68,8	73,6	53,4
R	0,138	0,154	0,154	0,180

Tab. 6.17 – Sintesi dei parametri di addensamento delle miscele di studio secondo la norma UNI-EN 12697-10.

6.4.1.2 Analisi dei risultati volumetrici

Il diagramma in fig. 6.19 rappresenta la variazione dello stato di addensamento delle varie miscele, al variare dell'energia compattante:

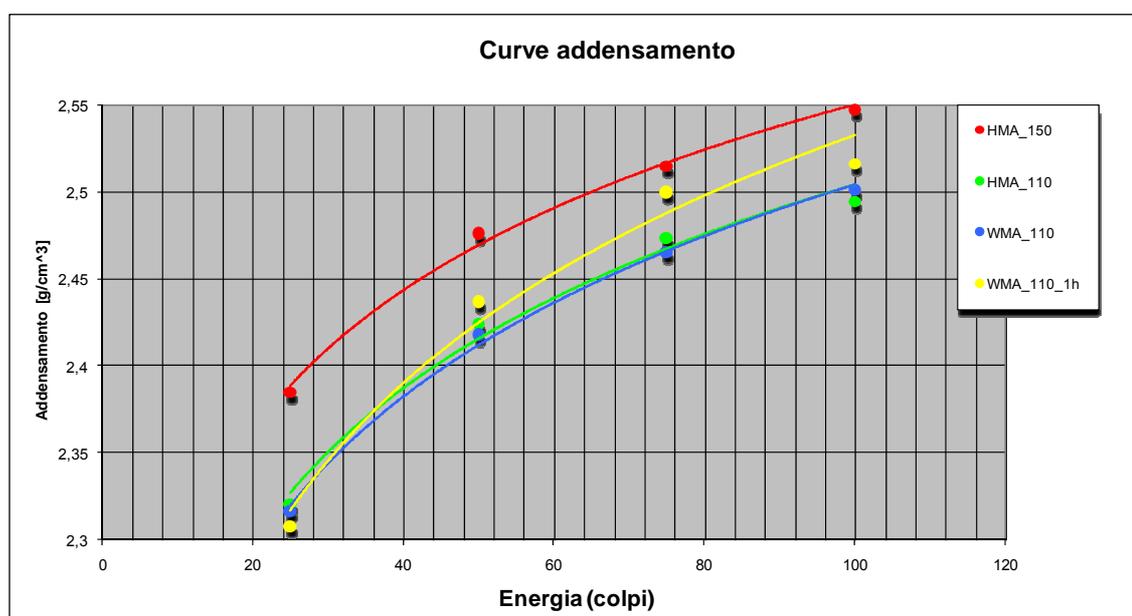


Fig. 6.19 – Curve di addensamento

Alla luce dei risultati ottenuti, tenuto conto delle condizioni al contorno dichiarate e che hanno governato il progetto e la realizzazione di questa fase sperimentale, è possibile operare alcune considerazioni:

- la miscela HMA_150 presenta il più basso valore di resistenza alla compattabilità, $C=51,4$, rispetto a tutte le miscele investigate;
- il confronto tra le miscele HMA_110 e WMA_110, evidenzia una minima differenza percentuale tra le due resistenze ed a favore della miscela non additivata ($\Delta \approx 7\%$);

- nel confronto tra le miscele HMA_110 e WMA_110, e la miscela di HMA_150 è possibile evidenziare un incremento percentuale della resistenze all'addensamento rispettivamente del 43% e del 34% rispetto alla stessa miscela di controllo;
- infine, la miscela WMA_110_1h presenta un valore di resistenza alla compattabilità, $C=53,4$, molto prossimo a quello della miscela di controllo ($\Delta \approx 4\%$). Ciò probabilmente a conferma del fatto che la condizione di minore viscosità della miscela, in virtù della minore temperatura di compattazione, unitamente al tempo di condizionamento termico prima della fase di addensamento, potrebbero esaltare il processo di microschiatura del legante consentendo una maggiore addensabilità della miscela.

6.4.2 Resistenza meccanica: prova di Trazione Indiretta

Dopo aver valutato la diversa lavorabilità delle miscele, e individuando nella miscela additivata con zeolite sintetica condizionata 1 ora in ambiente termostatico a 90°C, quella più lavorabile, si è provveduto a valutare la resistenza alla trazione indiretta delle stesse miscele.

6.4.2.1 Risultati ottenuti in termini meccanici

Mediando i valori ottenuti per ciascun provino afferente ad ognuna delle 4 miscele, sono stati ottenuti i seguenti valori medi dei parametri di resistenza a trazione indiretta (RTI), in fig. 6.20 sono mostrati anche sottoforma grafica.

Energia (colpi)	RTI [kN/cm ²]			
	HMA_150	HMA_110	WMA_110	HMA_110_1h
25	0,024	0,010	0,013	0,023
50	0,034	0,015	0,020	0,033
75	0,031	0,019	0,024	0,038
100	0,042	0,025	0,024	0,044

Tab. 5.22 – Risultati prova di trazione indiretta – la resistenza a trazione indiretta –

Per la consultazione dei risultati di ciascun singolo provino realizzato in questa fase sperimentale, si rimanda alla consultazione dell'Appendice C-2, allegato al presente lavoro di tesi.

6.4.2.2 Analisi dei risultati meccanici

Rappresentando sottoforma grafica l'andamento dei valori dell'indicatore prestazionale RTI, in funzione dell'energia addensante, si ottiene il diagramma in fig. 6.20

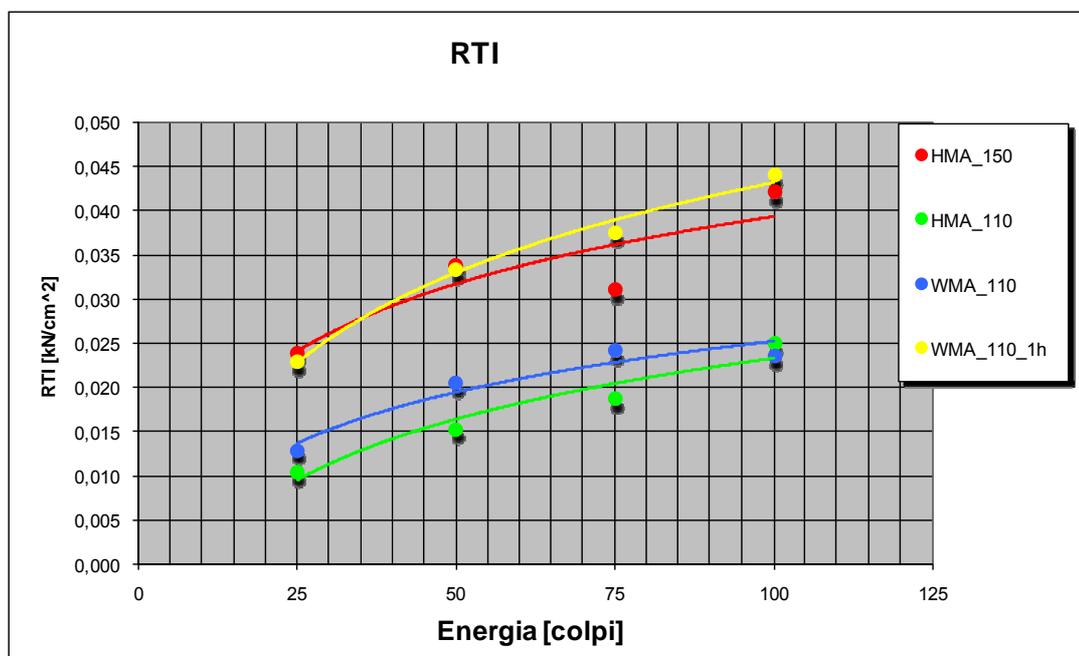


Fig. 6.20 – Risultati prova di trazione indiretta – la resistenza a trazione indiretta –

I risultati prodotti dalla prova di trazione indiretta, mettono in evidenza i seguenti aspetti:

- la miscela WMA_110_1h presenta una tendenza alla resistenza alla trazione indiretta superiore a tutte le altre miscele considerate;
- l'andamento del coefficiente RTI al variare dell'energia di addensamento per la miscela WMA_110_1h risulta essere superiore anche alla miscela tal quale HMA_150. Questo risultato indica che la costipazione con Aspha-min® zeolite avvenuta dopo 1 ora in stufa a 90°C ha consentito di avere un buon legame tra inerti e bitume, favorito dall'effetto di schiumatura dell'additivo zeolitico;
- la miscela HMA_110 presenta una curva del parametro RTI con valori inferiori a tutte le altre miscele considerate. La stessa miscela realizzata con la metodologia WMA (WMA_110), presenta una resistenza alla trazione indiretta superiore, favorita probabilmente dalla maggiore lavorabilità della stessa.

6.4.3 Considerazioni conclusive Fase III

Questa fase sperimentale ha dimostrato sia dal punto di vista dell'attitudine all'addensamento, valutata attraverso la UNI EN 12697-10, e sia dal punto di vista meccanico che la miscela WMA 2, ottenuta attraverso la metodica Warm Mix Asphalt di additivazione con zeolite sintetica dopo 1 ora di condizionamento in stufa a temperatura di 20°C inferiore alla temperatura di miscelazione, risulta essere la miscela più performante.

Utilizzando lo strumento per la valutazione dell'attitudine all'addensamento attraverso la norma UNI EN 12697-10 si è dimostrato che la scelta di condizionare per un tempo pari ad 1 ora, la miscela WMA_110_1h miscelata a 110°C e lasciata in stufa a 90°C, risulta essere la metodologia migliore per evidenziare l'effetto fluidificante di Aspha-min® zeolite.

Tale miscela infatti presenta un valore di resistenza alla compattazione del tutto paragonabile alla miscela di controllo denominata HMA_150, e dal punto di vista meccanico presenta prestazioni in termini di resistenza alla trazione indiretta, superiori rispetto a tutte le miscele analizzate, per qualsiasi livello di energia di costipazione.

Questo aspetto risulta essere di fondamentale importanza in quanto, producendo una miscela di 40°C c.a. al disotto della canonica temperatura di miscelazione di 150°C (utilizzando un bitume 50/70) e lasciandola "maturare" per un tempo non superiore ad 1 ora in un ambiente in cui la temperatura controllata non scenda al disotto di 20°C rispetto alla temperatura di miscelazione, si ottiene una miscela con le medesime caratteristiche di una miscela di conglomerato bituminoso tal quale, con i vantaggi di un notevole risparmio energetico, ma soprattutto con il vantaggio della totale assenza di fumi nocivi all'ambiente e alla salute di chi opera nel comparto produttivo delle pavimentazioni stradali.

A valle dei risultati ottenuti, nella successiva ed ultima fase sperimentale, a partire dai risultati fin qui raggiunti, si è provveduto a sostituire la tipologia di legante bituminoso, utilizzando un bitume modificato "hard", e variando di conseguenza le temperature di lavorazione, in funzione della diversa equiviscosità del legante.

6.5 – Fase IV: le curve di addensamento UNI EN 12697-10 per miscele con bitume modificato HD

In analogia con quanto svolto nella fase III, in questa nuova fase sperimentale si è provveduto a modificare, tra le grandezze finora considerate costanti ed invarianti, la tipologia di legante bituminoso, mantenendo invariate le grandezze quali: i livelli di energia di addensamento, la curva granulometrica e la percentuale di zeolite da additivare.

In particolare il legante bituminoso adottato fa parte della famiglia dei bitumi modificati con polimeri, e le sue caratteristiche fisico-chimiche sono elencate in tab. 6.18:

Caratteristiche	Unità di misura	Valore
penetrazione a 25°C	dmm	50 - 70
punto di rammollimento Palla-Anello	°C	70 - 85
punto di rottura Fraas	°C	≤ - 16
viscosità dinamica a 160°C	Paxs	0,4 – 0,8
Punto di infiammabilità	°C	≥ 250
Peso specifico a 25°C	-	1,00 ÷ 1,10
Recupero elastico a 25°C	cm	≥ 80
Volatilità a 200°C	% m	≤ 0,5
Coesione a 10°C	J/cm ²	≥ 3
Stabilità allo stoccaggio	°C	≤ 3
Resistenza all'invecchiamento RTFOT		
Perdita in massa	% m	≤ 0,5
Penetrazione residua	%	≥ 60
Incremento di P.A.	°C	≤ 10

Tab. 6.18 – Caratteristiche bitume certificate dall'Agip Petroli S.p.A.

I 4 livelli di energia di costipazione impulsiva (Marshall) scelti sono i medesimi di quelli utilizzati nella fase sperimentale precedente e sono quelli suggeriti dalla Norma:

- 25 colpi di maglio per faccia;
- 50 colpi di maglio per faccia;
- 75 colpi di maglio per faccia;
- 100 colpi di maglio per faccia.

Per ciascun livello di energia sono state costipate le seguenti miscele di conglomerato bituminoso, considerando come invarianti per tutte le miscele: il quantitativo e il tipo di legante bituminoso, la qualità e quantità di inerti costituenti lo scheletro solido delle miscele:

- *HMA_165* = Miscela di controllo miscelata a 165°C e costipazione immediata;
- *HMA_115_1h* = Miscela di controllo miscelata a 115°C e costipata dopo 1 ora in stufa a 105°C
- *WMA_115_1h* = Miscela Warm Mix asphalt con zeolite miscelata a 115°C e costipata dopo 1 ora in stufa a 105°C

La scelta della temperatura di condizionamento è scaturita in analogia con quanto imposto nella fase precedente. Si è assunta una diminuzione di temperatura costante per le 2 fasi sperimentali di 60°C. Infatti nella Fase III, la temperatura della miscela HMA di controllo è di 150°, mentre la temperatura di condizionamento in stufa è di 60°C inferiore, ovvero di 90°C. In analogia, tenendo conto della maggiore viscosità del legante bituminoso modificato HD, e del suo più alto valore di temperatura di equiviscosità, si è optato per scegliere come temperatura di miscelazione della miscela di controllo HMA, la temperatura di 165°C, mentre la temperatura di condizionamento per le miscele WMA è stata fissata 60°C al disotto di quest'ultima, quindi a 105°C

Si riporta di seguito in tab. 6.19 lo schema sperimentale seguito in laboratorio:

ENERGIA 25 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI			
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA		
1			2		3	4	
HMA_165_25	165 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
HMA_115_25_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
WMA_115_25_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI

ENERGIA 50 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI			
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA		
1			2		3	4	
HMA_165_50	165 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
HMA_115_50_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
WMA_115_50_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI

ENERGIA 75 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI			
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA		
1			2		3	4	
HMA_165_75	165 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
HMA_115_75_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
WMA_115_75_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI

ENERGIA 100 COLPI	TEMPERATURA		TEMPO MATURAZIONE	PROVINI			
	ID MISCELE	MISCELAZIONE		MATURAZIONE	v % = VUOTI TI = TRAZIONE INDIRECTA		
1			2		3	4	
HMA_165_100	165 ± 5°C	Nessuna	Nessuno	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
HMA_115_100_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI
WMA_115_100_1h	115 ± 5°C	105 ± 5°C	1 h	v%	v%	v%	v%
				TI	TI	TI	TI

Tab. 6.19 – Quadro sinottico della Fase IV sperimentale

6.5.1 Proprietà volumetriche

Per ciascuna miscela e per ogni livello di energia sono stati realizzati 4 provini. In totale per questa fase sono stati realizzati 48 provini. Tutti i provini una volta addensati ed estratti dalle fustelle Marshall, sono stati sottoposti ad analisi per stabilire lo stato di addensamento e l'indice

dei vuoti residui. Successivamente sono stati sottoposti a prove di resistenza meccanica, in particolare alla prova di Trazione indiretta, dalla quale sono stati ricavati i coefficienti calcolati anche nella precedente fase sperimentale, ovvero la resistenza a trazione indiretta RTI, e il coefficienti di trazione indiretta CTI. Di seguito sono mostrati i valori delle grandezze legate allo stato di addensamento delle varie miscele.

6.5.1.1 Risultati ottenuti in termini volumetrici

In tab. 6.20 sono riportati tutti i valori di addensamento e percentuale dei vuoti, con le relative deviazioni standard dei dati rispetto ai valori medi, di tutta questa fase sperimentale:

			HMA_165	HMA_115_1h	WMA_115_1h
E ₁ (25 colpi*)	γ [g/cm ³]	media	2,287	2,224	2,238
		dev. std.	0,0343	0,0024	0,0102
	% vuoti	media	12,188	14,623	14,058
		dev. std.	1,3156	0,0927	0,3911
E ₂ (50 colpi*)	γ [g/cm ³]	media	2,393	2,325	2,358
		dev. std.	0,0192	0,0067	0,0095
	% vuoti	media	8,109	10,732	9,459
		dev. std.	0,7386	0,2584	0,3665
E ₃ (75 colpi*)	γ [g/cm ³]	media	2,414	2,371	2,363
		dev. std.	0,0121	0,0153	0,0202
	% vuoti	media	7,322	8,973	9,257
		dev. std.	0,4634	0,5878	0,7768
E ₄ (100 colpi*)	γ [g/cm ³]	media	2,474	2,406	2,395
		dev. std.	0,0244	0,0078	0,0043
	% vuoti	media	5,020	7,635	8,050
		dev. std.	0,9384	0,2990	0,1660

Tab. 6.20 – Valori delle medie e delle deviazioni standard dello stato di addensamento e della % dei vuoti residui delle miscele interessate alla Fase IV della sperimentazione.

Per la consultazione dei risultati di ciascun singolo provino realizzato in questa fase sperimentale, si rimanda alla consultazione dell'Appendice D-1, allegato al presente lavoro di tesi.

L'equazione che governa lo studio dell'addensabilità delle miscele è espressa nei seguenti termini:

$$\rho = \rho_{\text{inf}} - (\rho_{\text{inf}} - \rho_{\text{zero}})^{\exp(-E/C)}$$

Dove:

- P grado di addensamento del provino;
- ρ_{inf} addensamento teorico infinito corrispondente ad una condizione ideale in cui i vuoti residui sono nulli;
- ρ_{zero} addensamento iniziale (da calcolare attraverso applicazione del metodo dei minimi quadrati);
- C resistenza alla compattazione (termine di misura dell'attitudine all'addensamento);
- E energia applicata al provino.

Applicando le disposizioni della norma UNI-EN 12697-10, e attraverso l'utilizzo del metodo dei minimi quadrati, minimizzando il quadrato della differenza tra i dati "teorici" e i dati sperimentali, è stato possibile determinare i seguenti parametri di stima della lavorabilità delle miscele:

- C termine che indica la resistenza alla compattazione, espressa in numero di colpi;
- ρ_{zero} potenziale di compattazione relativo.

Ottenendo questi termini è stato possibile determinare secondo la norma, il parametro di "potenziale di compattazione relativo" R, attraverso l'uso della seguente formula:

$$R = \frac{(\rho_{inf} - \rho_{zero})}{\rho_{inf}}$$

In base ai valori del peso dell'unità di volume degli inerti, e della quantità di legante bituminoso percentuale presente nella miscela, è stato ottenuto il seguente valore di addensamento teorico a vuoti residui nulli:

$$\rho_{inf} = 2,604 \text{ gr/cm}^3$$

I risultati ottenuti per le 4 miscele confrontate in questa fase sperimentale sono riportati in tab. 6.21:

	HMA_165	HMA_115_1h	WMA_115_1h
γ_{∞} [g/cm ³]	2,608	2,608	2,608
γ_0 [g/cm ³]	2,248	2,206	2,207
C (n° di colpi)	87,8	110,2	130,7
R	0,158	0,179	0,161

Tab. 6.21 – Sintesi dei parametri di addensamento delle miscele di studio secondo la norma UNI-EN 12697-10.

6.5.1.2 Analisi dei risultati volumetrici

Dall'analisi dei risultati ottenuti, sembrerebbe che l'utilizzo della tecnologia WMA con l'aggiunta di Aspha-min® zeolite, in una miscela di conglomerato bituminoso contenente bitume modificato, non produca gli aspetti desiderati in termini di lavorabilità. La resistenza alla compattazione C, risulta infatti essere la più alta nella miscela WMA_115_1h, e di contro la più bassa nella miscela HMA_165 miscelata e costipata alla più alta temperatura operativa tra quelle prese in esame. Il diagramma in fig. 6.21 rappresenta la variazione dello stato di addensamento delle varie miscele, al variare dell'energia compattante:

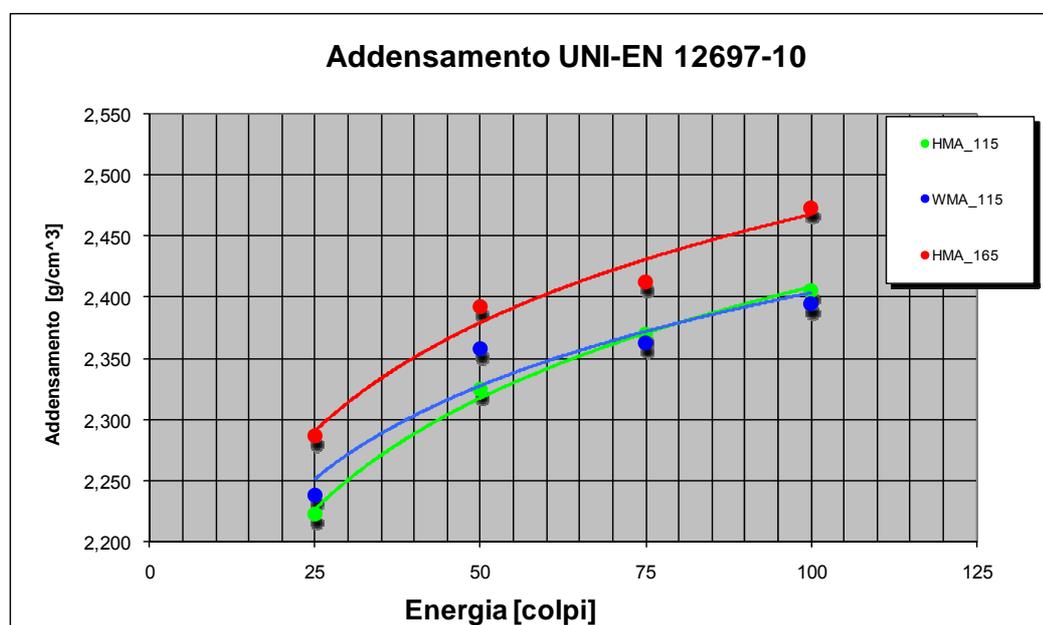


Fig. 6.21 – Curve di addensamento secondo norma UNI-EN 12697-10

6.5.2 Resistenza meccanica: prova di Trazione Indiretta

Dopo aver valutato la diversa lavorabilità delle miscele, e individuando nella miscela additivata hot mix aspra di controllo (HMA_165), quella più lavorabile, si è provveduto a valutare la resistenza alla trazione indiretta delle stesse miscele.

6.5.2.1 Risultati ottenuti in termini meccanici

Mediando i valori ottenuti per ciascun provino afferente ad ognuna delle 3 miscele, sono stati ottenuti i seguenti valori medi dei parametri di resistenza a trazione indiretta (RTI) e del coefficiente di trazione indiretta (CTI).

Energia (colpi)	RTI [kN/cm ²]		
	HMA_165	HMA_115_1h	WMA_115_1h
25	0,032	0,022	0,025
50	0,044	0,029	0,033
75	0,044	0,038	0,037
100	0,050	0,034	0,036

Tab. 6.22 – Risultati prova di trazione indiretta – la resistenza a trazione indiretta –

Energia (colpi)	CTI [kN/cm ²]		
	HMA_165	HMA_115_1h	WMA_115_1h
25	2,111	1,391	1,798
50	5,528	2,862	3,184
75	5,892	3,590	3,102
100	8,364	4,583	3,994

Tab.6.23 – Risultati prova di trazione indiretta – il coefficiente di trazione indiretta –

Per la consultazione dei risultati di ciascun singolo provino realizzato in questa fase sperimentale, si rimanda alla consultazione dell'Appendice C, allegato al presente lavoro di tesi.

6.5.2.2 Analisi dei risultati meccanici

Anche dal punto di vista della resistenza meccanica a seguito della prova di trazione indiretta, l'effetto fluidificante atteso dall'additivo zeolitico, risulta essere poco apprezzabile. Infatti la miscela che presenta le migliori performance meccaniche risulta essere la miscela tal quale tradizionale HMA_165. La miscela WMA_115_1h presenta una tendenza in entrambi gli andamenti dei coefficienti della prova di trazione indiretta, leggermente superiori a quelli offerti dalla miscela HMA_115_1h, realizzata nelle medesime condizioni a meno della presenza

dell'additivo zeolitico.

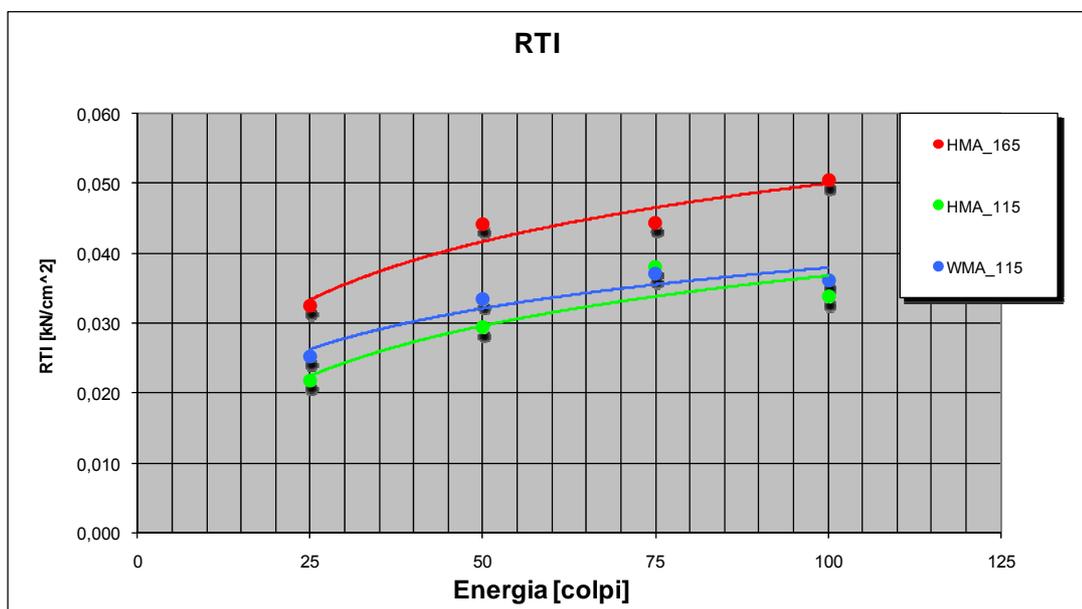


Fig. 6.22 – Risultati prova di trazione indiretta – la resistenza a trazione indiretta –

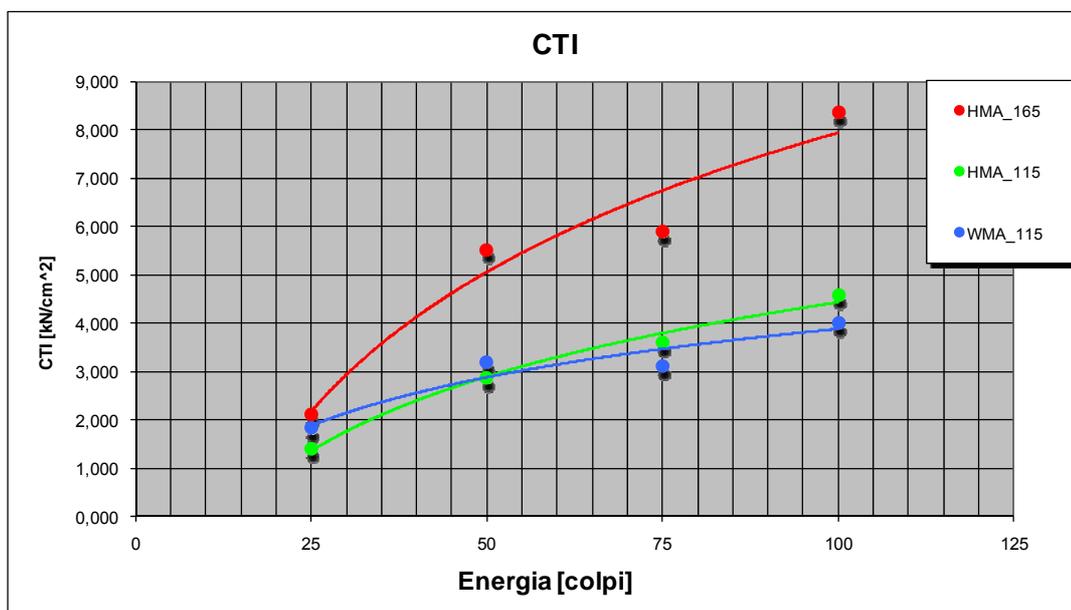


Fig. 6.23 – Risultati prova di trazione indiretta – il coefficiente di trazione indiretta –

Un ulteriore controllo è stato effettuato realizzando la miscela warm mix asphalt, utilizzando il valore di temperatura utilizzato nella fase III, ovvero la costipazione dopo 1 ora di condizionamento in stufa a 90°C. I risultati dello stato di addensamento e della prova di trazione indiretta sono riportati nelle tab. 6.24, 6.25, 6.26 e 6.27:

HMA_90_1h		
Altezze	1	2
h1 [mm]	66,45	65,59
h2 [mm]	65,94	66,17
h3 [mm]	66,12	65,94
h4 [mm]	66,84	66,21
h media [mm]	66,34	65,98
peso [gr]	1235,38	1220,28
Addensamento [g/cm ³]	2,30	2,28
% vuoti	11,76	12,36
Addensamento medio	12,06	

Tab. 6.24 – Miscela 100°C Tal Quale,
1 h stufa 90°C

WMA_90_1h		
Altezze	1	2
h1 [mm]	67,37	64,29
h2 [mm]	67,98	64,67
h3 [mm]	67,59	64,11
h4 [mm]	67,84	65,01
h media [mm]	67,70	64,52
peso [gr]	1253,30	1180,20
Addensamento [g/cm ³]	2,28	2,26
% vuoti	12,27	13,32
Addensamento medio	12,80	

Tab. 6.25 – Miscela 100°C WMA,
1 h stufa 90°C

	HMA_90_1h	
	1	2
Carico verticale [kN]	3,581	3,698
Deformazione verticale [mm]	1,672	1,960
Trazione [mm]	0,711	0,654
RTI [kN/cm²]	0,034	0,035
CTI [kN/cm²]	3,229	2,860
h media [mm]	66,34	65,98
peso [g]	1235,38	1220,28
RTI medio [kN/cm²]	0,034	
CTI medio [kN/cm²]	3,044	

Tab. 6.26 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela HMA warm 1h in stufa 90°C 75 colpi

	WMA 90 1h	
	1	2
Carico verticale [kN]	3,887	3,788
Deformazione verticale [mm]	1,597	2,652
Trazione [mm]	0,691	0,598
RTI [kN/cm ²]	0,036	0,037
CTI [kN/cm ²]	3,595	2,214
h media [mm]	67,70	64,52
peso [g]	1253,30	1180,20
RTI medio [kN/cm ²]	0,036	
CTI medio [kN/cm ²]	2,905	

Tab. 6.27 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela WMA 1h in stufa 90°C 75 colpi

6.5.3 Considerazioni conclusive Fase IV

Come si può osservare dalla fig. 6.24, la verifica di realizzare miscele WMA a seguito di un condizionamento in stufa prima della costipazione, per un tempo pari ad 1 ora alla temperatura di 90°C, non ha prodotto gli effetti benefici che al contrario si sono verificati nella Fase III della sperimentazione, quando era stato impiegato il legante bituminoso ordinario.

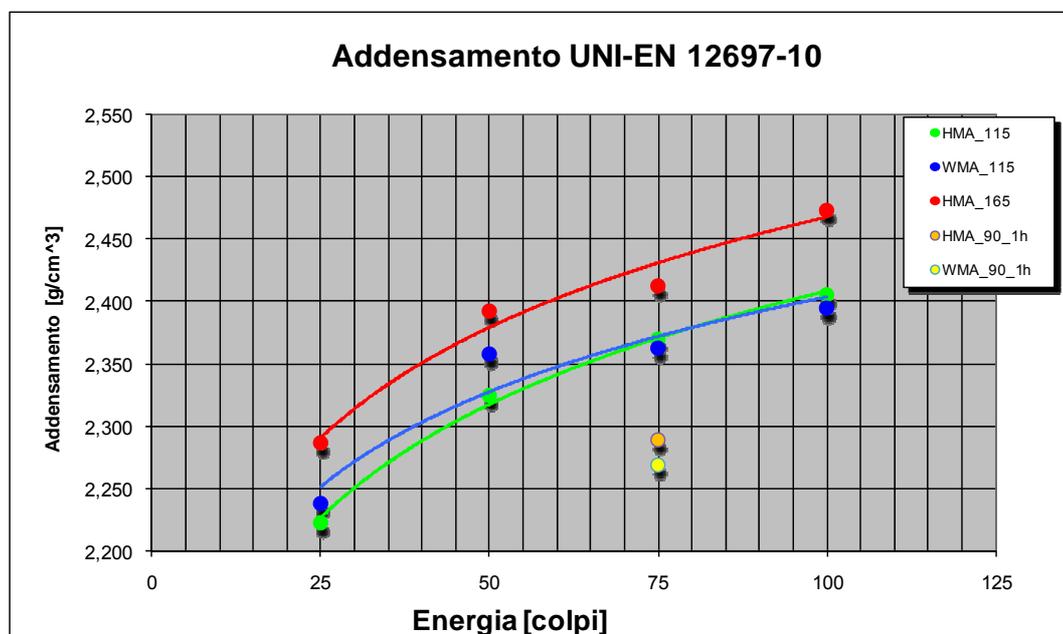


Fig. 6.24 – Confronto tra curve di addensamento e l'addensamento delle ulteriori due miscele di verifica

Ciò dimostra con buona probabilità che l'effetto fluidificante della zeolite, riscontrato nelle miscele ordinarie di conglomerato bituminoso, viene meno in presenza di leganti bituminosi che presentano un punto di equiviscosità maggiore, come posso essere in questo caso i bitumi modificati. Anche dal punto di vista meccanico, considerando i risultati della prova di trazione indiretta come delle importanti verifiche al fine di confermare la qualità dei dati ottenuti per ciò che riguarda lo stato di addensamento, le miscele realizzate in ultima istanza a 90°C dopo 1 ora di permanenza in stufa, hanno confermato l'influenza della presenza della zeolite sintetica.

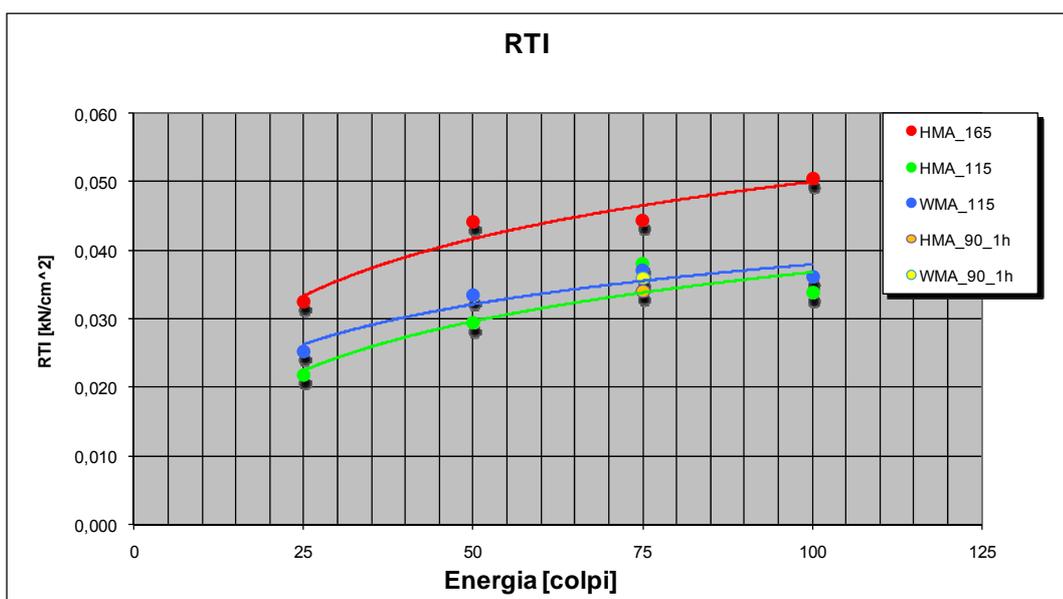


Fig. 6.25 – Quadro di insieme della resistenza a trazione indiretta a seguito della realizzazione delle ulteriori due miscele di verifica

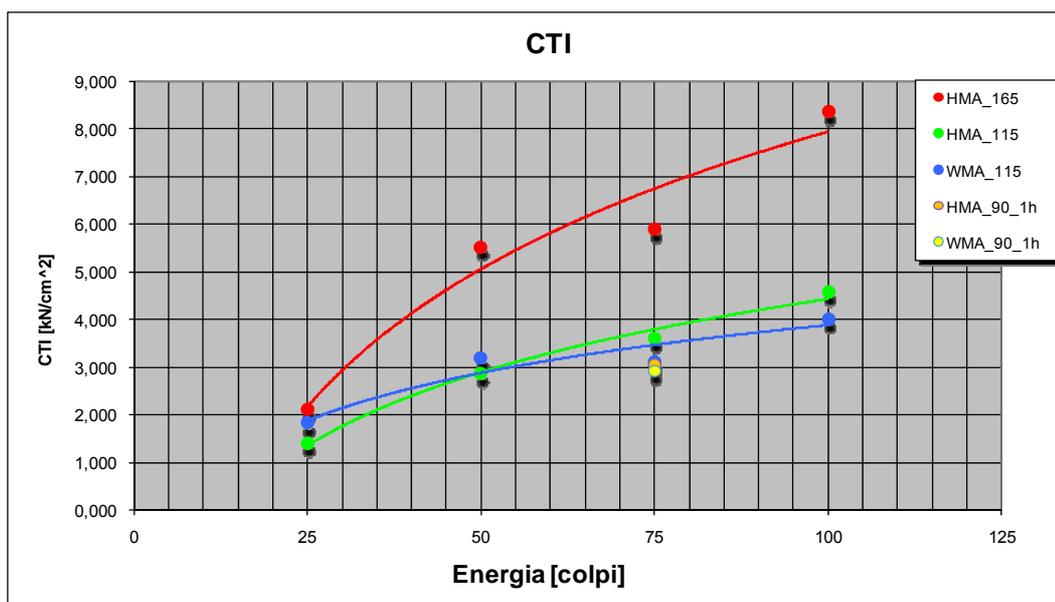


Fig. 6.26 – Quadro di insieme del coefficiente di trazione indiretta a seguito della realizzazione delle ulteriori due miscele di verifica

6.6 Verifiche a consuntivo

Per verificare l'esattezza della ricetta compositiva di progetto, in particolare delle assunzioni in fase progettuale del contenuto di bitume e della corrispondenza della curva utilizzata, alla curva di progetto, si è provveduto ad effettuare lo studio a consuntivo dei rapporti ponderali delle componenti delle miscele con il conseguente recupero del legante bituminoso, e successivamente ad eseguire le analisi granulometriche.

Di seguito in tab. 6.28 e in fig. 6.27 sono mostrati i termini stabiliti in fase di progettazione della sperimentazione:

Crivelli e setacci serie UNI	Fuso - passante %		Progetto (% in peso)	
	Inf	Sup	passante%	trattenuto%
25	100	100	100	0
15	90	100	95	5
10	70	90	80	15
5	40	55	47,5	32,5
2	25	38	31,5	16
0,4	11	20	15,5	16
0,18	8	15	11,5	4
0,075	6	10	8	3,5
			fondello	8

Tab. 6.28 – Fuso granulometrico di progetto

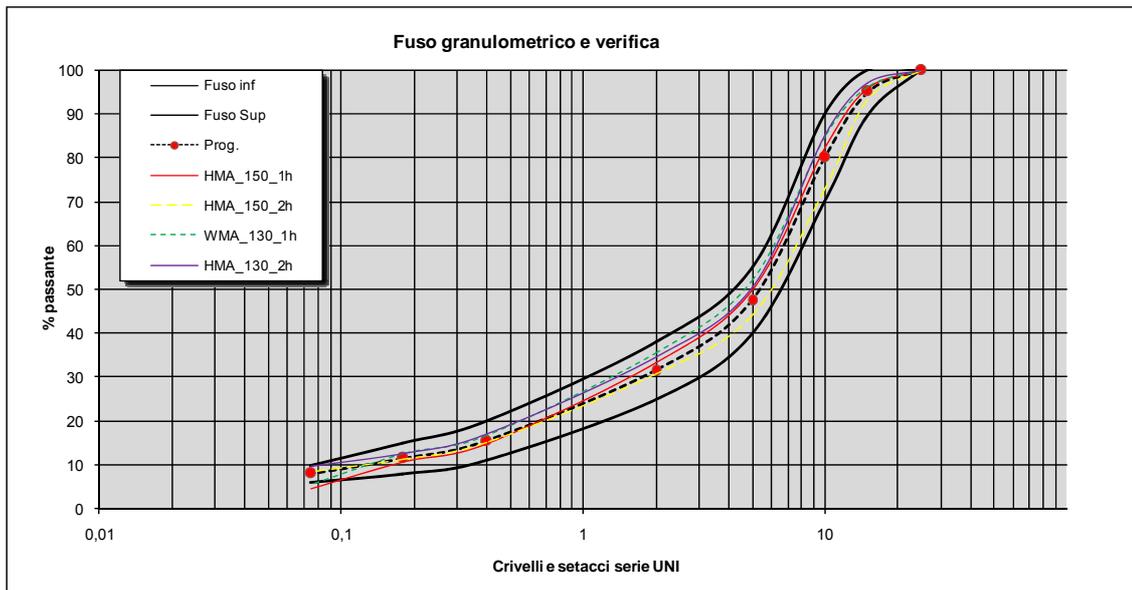


Fig. 6.27 – Il fuso granulometrico di progetto

I risultati di verifica della curva granulometrica utilizzata all'interno della sperimentazione sono riportati nella tab. 6.29:

Crivelli e setacci serie UNI	Passante [%]			
	MISCELA HMA_150_1h	MISCELA HMA_150_2h	MISCELA WMA_130_1h	MISCELA HMA_130_2h
	25	100,0	100,0	100,0
15	95,9	93,2	96,2	97,0
10	82,4	73,1	84,9	85,1
5	50,1	44,4	52,2	50,6
2	33,2	30,7	35,7	34,6
0,4	14,9	15,2	16,6	17,0
0,18	10,8	11,3	12,5	12,7
0,075	4,5	8,3	5,4	9,6
fondello	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 6.29 – Curva granulometrica desunta da 8 campioni verificati

A seguito delle prove di verifica effettuate su diversi campioni, i risultati ottenuti relativi alla percentuale di bitume sono riportati in tab. 6.30:

Quantitativo di bitume di progetto (% rispetto miscela)	Quantitativo di bitume di verifica (% rispetto miscela)
5	5,07

Tab. 6.30 – *Verifica della percentuale di bitume*

Appendice: risultati sperimentali

Introduzione

Di seguito sono riportati tutti i risultati ottenuti durante la sperimentazione in laboratorio. Sono presenti i risultati relativi alle proprietà volumetriche e alle prestazioni meccaniche ottenute attraverso le indagini sperimentali condotte su ciascun provino realizzato in laboratorio.

Il presente capito è suddiviso in 4 sotto capitoli, afferenti ognuno di essi, ad una delle 4 fasi sperimentali.

Appendice A: risultati sperimentali Fase I

A-1: Risultati caratterizzazione volumetrica Fase I

HMAZ0_150				
	A	C	B	D
h₁ [mm]	61,05	60,76	60,61	60,68
h₂ [mm]	61,05	60,69	60,44	60,65
h₃ [mm]	61,10	60,91	60,67	60,97
h₄ [mm]	61,00	60,87	60,47	61,02
h_{media} [mm]	61,00	60,81	60,55	60,83
Peso [g]	1243,0	1234,7	1242,9	1240,5
Addensamento [g/cm³]	2,515	2,506	2,533	2,517
% vuoti	3,338	3,680	2,624	3,263

Tab. A.1 – Risultati addensamento provini miscela di controllo HMA

HMAZ0_150_2H				
	A	B	-	-
h₁ [mm]	62,40	63,33	-	-
h₂ [mm]	62,45	63,45	-	-
h₃ [mm]	62,58	63,59	-	-
h₄ [mm]	62,72	63,53	-	-
h_{media} [mm]	62,54	63,48	-	-
Peso [g]	1240,0	1238,0	-	-
Addensamento [g/cm³]	2,447	2,407	-	-
% vuoti	5,942	7,481	-	-

Tab. A.2– Risultati addensamento provini miscela di controllo HMA dopo 2h di condizionamento

WMAZ25_110_2h				
	A	C	B	D
h₁ [mm]	62,33	62,70	62,90	62,15
h₂ [mm]	62,20	62,92	63,18	62,26
h₃ [mm]	62,21	62,71	63,06	62,47
h₄ [mm]	62,35	62,64	62,97	62,31
h_{media} [mm]	62,27	62,74	63,03	62,30
Peso [g]	1243,4	1241,4	1245,9	1229,3
Addensamento [g/cm³]	2,464	2,442	2,439	2,435
% vuoti	5,283	6,144	6,230	6,395

Tab. A.3 – Risultati addensamento provini con 0,25% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

WMAZ50_110_2h				
	A	C	B	D
h₁ [mm]	62,14	61,44	62,95	63,31
h₂ [mm]	62,06	61,33	63,00	63,26
h₃ [mm]	61,83	61,70	62,98	63,04
h₄ [mm]	61,87	61,69	62,84	63,04
h_{media} [mm]	61,98	61,54	62,94	63,16
Peso [g]	1234,4	1220,8	1243,6	1243,1
Addensamento [g/cm³]	2,458	2,448	2,438	2,429
% vuoti	5,517	5,898	6,276	6,640

Tab. A.4 – Risultati addensamento provini con 0,50% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

WMAZ75_110_2h				
	A	C	B	D
h₁ [mm]	64,22	62,72	62,86	62,53
h₂ [mm]	64,34	62,72	62,93	62,42
h₃ [mm]	64,36	62,71	63,00	62,52
h₄ [mm]	64,32	62,56	62,96	62,61
h_{media} [mm]	64,31	62,68	62,94	62,52
Peso [g]	1243,9	1235,8	1233,8	1233,6
Addensamento [g/cm³]	2,387	2,443	2,419	2,435
% vuoti	8,247	6,470	7,008	6,402

Tab. A.5 – Risultati addensamento provini con 0,75% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

WMAZ100_110_2h				
	A	C	B	D
h₁ [mm]	63,59	63,40	63,41	64,66
h₂ [mm]	63,81	63,48	63,53	65,38
h₃ [mm]	63,71	63,23	63,75	64,82
h₄ [mm]	63,49	63,07	63,53	64,47
h_{media} [mm]	63,65	63,30	63,56	64,83
Peso [g]	1243,0	1238,5	1237,7	1246,2
Addensamento [g/cm³]	2,410	2,415	2,403	2,372
% vuoti	7,363	7,181	7,620	8,818

Tab. A.6 – Risultati addensamento provini con 1,00% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

A-2: Risultati prova meccanica Marshall Fase I

Serie Provini	HMAZO_150	
N°	A	C
Altezza media [mm]	61,00	60,55
Stabilità [kN]	10,281	11,331
Scorrimento [mm]	2,206	2,219
Rigidezza [kN/mm]	4,6612	5,1058

Tab. A.7 – Risultati prova Marshall provini HMA di controllo

Serie Provini	WMAZ25_110_2h	
N°	A	C
Altezza media [mm]	62,27	62,74
Stabilità [kN]	7,261	6,853
Scorrimento [mm]	2,759	2,386
Rigidezza [kN/mm]	2,631	2,872

Tab. A.8 – Risultati prova Marshall provini con 0,25% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

Serie Provini	WMAZ50_110_2h	
N°	A	C
Altezza media [mm]	61,98	61,54
Stabilità [kN]	6,902	7,198
Scorrimento [mm]	3,056	2,702
Rigidezza [kN/mm]	2,259	2,664

Tab. A.9 – Risultati prova Marshall provini con 0,50% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

Serie Provini	WMAZ75_110_2h	
N°	A	C
Altezza media [mm]	64,31	62,68
Stabilità [kN]	5,476	6,654
Scorrimento [mm]	2,962	2,345
Rigidezza [kN/mm]	1,849	2,838

Tab. A.10 – Risultati prova Marshall provini con 0,75% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

Serie Provini	WMAZ100_110_2h	
N°	A	C
Altezza media [mm]	63,65	63,30
Stabilità [kN]	5,749	6,138
Scorrimento [mm]	2,317	2,103
Rigidezza [kN/mm]	2,481	2,919

Tab. xxx – Risultati prova Marshall provini con 1,00% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

A-3: Risultati prova meccanica Trazione Indiretta Fase I

Serie Provini	HMAZ0_150	
N°	B	D
Altezza media [mm]	60,81	60,83
Peso [g]	1234,7	1240,5
Carico verticale [kN]	2,508	3,512
Deformazione verticale [mm]	1,363	0,849
Deformazione orizzontale [mm]	0,307	0,227
RTI [kN/cm ²]	0,026	0,037
CTI [kN/cm ²]	3,026	6,800

Tab. A.11 – Risultati prova Trazione indiretta provini HMA di controllo

Serie Provini	WMAZ25_110_2h	
N°	B	D
Altezza media [mm]	63,03	62,30
Peso [g]	1229,3	1245,9
Carico verticale [kN]	2,440	2,448
Deformazione verticale [mm]	0,548	0,626
Deformazione orizzontale [mm]	0,341	0,320
RTI [kN/cm ²]	0,024	0,025
CTI [kN/cm ²]	7,064	6,277

Tab. A.12 – Risultati prova Trazione indiretta provini con 0,25% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

Serie Provini	WMAZ50_110_2h	
N°	B	D
Altezza media [mm]	62,94	63,16
Peso [g]	1243,6	1243,1
Carico verticale [kN]	2,597	2,385
Deformazione verticale [mm]	0,876	0,783
Deformazione orizzontale [mm]	0,277	0,375
RTI [kN/cm ²]	0,026	0,024
CTI [kN/cm ²]	4,710	4,822

Tab. A.13 – Risultati prova Trazione indiretta provini con 0,50% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

Serie Provini	WMAZ75_110_2h	
N°	B	B
Altezza media [mm]	62,94	62,94
Peso [g]	1233,8	1233,8
Carico verticale [kN]	2,165	2,165
Deformazione verticale [mm]	0,792	0,792
Deformazione orizzontale [mm]	0,308	0,308
RTI [kN/cm ²]	0,022	0,022
CTI [kN/cm ²]	4,343	4,343

Tab. A.14 – Risultati prova Trazione indiretta provini con 0,75% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

Serie Provini	WMAZ100_110_2h	
N°	B	B
Altezza media [mm]	63,56	63,56
Peso [g]	1237,7	1237,7
Carico verticale [kN]	2,348	2,348
Deformazione verticale [mm]	1,072	1,072
Deformazione orizzontale [mm]	0,274	0,274
RTI [kN/cm ²]	0,023	0,023
CTI [kN/cm ²]	3,446	3,446

Tab. A.15 – Risultati prova Trazione indiretta provini con 1,00% di Aspha-min® zeolite dopo 2h di condizionamento

Appendice B: risultati Fase II

B-1: Risultati caratterizzazione volumetrica Fase II

HMA_150		Provini					
	Altezze	1	2	3	4	5	6
	h1 [mm]	61,05	60,76	60,88	60,96	60,61	60,68
	h2 [mm]	61,05	60,69	60,68	60,960	60,44	60,650
	h3 [mm]	61,10	60,91	60,55	60,900	60,67	60,970
	h4 [mm]	61	60,87	60,68	60,94	60,47	61,02
	h media [mm]	61,00	60,81	60,70	60,94	60,55	60,83
	peso [gr]	1243,00	1234,70	1234,70	1240,30	1242,90	1240,50
	Addensamento [t/m ³]	2,51	2,51	2,51	2,51	2,53	2,52
	% vuoti	3,44	3,79	3,61	3,56	2,73	3,37

Tab. B.1 – Miscela 150°C Tal Quale, costipazione immediata

HMA_150_1h		Provini			
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	61,23	61,24	62,20	62,00
	h2 [mm]	61,52	61,11	62,27	61,75
	h3 [mm]	60,85	61,05	61,75	61,88
	h4 [mm]	60,84	61,19	61,64	62,26
	h media [mm]	61,11	61,15	61,97	61,97
	peso [gr]	1226,48	1224,19	1232,11	1234,44
	Addensamento [t/m ³]	2,48	2,47	2,45	2,46
	% vuoti	4,90	5,13	5,78	5,61

Tab. B.2 – Miscela 150°C Tal Quale, 60' di permanenza in stufa a 130°C

HMA_150_2h		Provini			
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	62,81	61,91	61,89	61,85
	h2 [mm]	62,61	62,16	61,74	61,690
	h3 [mm]	62,50	62,09	61,48	62,310
	h4 [mm]	62,63	61,89	61,72	62,20
	h media [mm]	62,64	62,01	61,71	62,01
	peso [gr]	1243,06	1235,33	1227,40	1239,33
	Addensamento [t/m ³]	2,45	2,46	2,45	2,47
	% vuoti	5,96	5,61	5,75	5,30

Tab. B.3 – Miscela 150°C Tal Quale, 120' di permanenza in stufa a 130°C

HMA_130	Provini						
	Altezze	1	2	3	4	5	6
	h1 [mm]	60,11	59,34	59,45	59,41	59,94	59,58
	h2 [mm]	59,81	59,08	59,46	59,38	60,08	59,51
	h3 [mm]	59,93	59,02	59,52	59,24	59,84	59,51
	h4 [mm]	60,11	59,20	59,44	59,23	59,64	59,60
	h media [mm]	61,00	59,16	59,47	59,32	59,88	59,55
	peso [gr]	1198,5	1192,2	1199,0	1194,6	1197,4	1201,9
	Addensamento [t/m ³]	2,42	2,49	2,49	2,49	2,47	2,49
	% vuoti	6,90	4,51	4,46	4,57	5,24	4,36

Tab. B.4 – Miscela 130°C Tal Quale, costipazione immediata

HMA_130_1h	Provini				
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	62,75	62,40	62,52	62,56
	h2 [mm]	62,94	62,53	62,47	62,65
	h3 [mm]	63,11	62,30	62,35	62,59
	h4 [mm]	62,89	62,12	62,27	62,43
	h media [mm]	62,92	62,34	62,40	62,55
	peso [gr]	1244,80	1232,41	1241,91	1239,71
	Addensamento [t/m ³]	2,44	2,44	2,46	2,45
	% vuoti	6,26	6,32	5,70	6,09

Tab. B.5 – Miscela 130°C Tal Quale, 60' di permanenza in stufa a 110°C

HMA_130_2h	Provini				
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	63,26	62,90	62,25	62,80
	h2 [mm]	63,49	62,72	62,27	62,83
	h3 [mm]	63,06	62,59	62,22	62,62
	h4 [mm]	63,06	62,81	62,17	62,68
	h media [mm]	63,22	62,76	62,23	62,73
	peso [gr]	1241,39	1243,17	1236,30	1240,29
	Addensamento [t/m ³]	2,42	2,44	2,45	2,44
	% vuoti	6,95	6,13	5,86	6,32

Tab. B.6 – Miscela 130°C Tal Quale, 120' di permanenza in stufa a 110°C

HMA_110	Provini				
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	64,48	63,08	65,40	63,30
	h2 [mm]	63,99	63,99	64,75	62,82
	h3 [mm]	63,96	63,58	64,25	63,22
	h4 [mm]	64,65	63,25	64,56	63,55
	h media [mm]	64,27	63,48	64,74	63,22
	peso [gr]	1236,07	1240,40	1244,86	1231,92
	Addensamento [t/m ³]	2,37	2,41	2,37	2,40
	% vuoti	8,87	7,40	8,89	7,67

Tab. B.7 – Miscela 110°C Tal Quale, costipazione immediata

HMA_110_1h	Provini				
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	64,69	65,08	67,06	64,77
	h2 [mm]	64,84	64,74	66,60	65,05
	h3 [mm]	64,48	65,46	66,46	64,46
	h4 [mm]	64,07	65,56	67,01	64,14
	h media [mm]	64,52	65,21	66,78	64,61
	peso [gr]	1228,81	1245,30	1263,55	1235,97
	Addensamento [t/m ³]	2,35	2,36	2,33	2,36
	% vuoti	9,75	9,51	10,35	9,35

Tab. B.8 – Miscela 110°C Tal Quale, 60' di permanenza in stufa a 90°C

HMA_110_2h	Provini				
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	64,23	64,54	60,03	64,72
	h2 [mm]	64,84	63,99	61,35	64,29
	h3 [mm]	64,05	63,60	61,67	63,67
	h4 [mm]	63,81	63,92	60,71	63,75
	h media [mm]	64,23	64,01	60,94	64,11
	peso [gr]	1219,62	1220,48	1190,15	1247,00
	Addensamento [t/m ³]	2,34	2,35	2,41	2,40
	% vuoti	10,03	9,66	7,46	7,83

Tab. B.9 – Miscela 110°C Tal Quale, 120' di permanenza in stufa a 90°C

WMA_130		Provini					
	Altezze	1	2	3	4	5	6
	h1 [mm]	62,97	62,73	62,80	62,41	61,57	61,75
	h2 [mm]	62,81	62,85	62,66	62,320	61,57	61,810
	h3 [mm]	62,62	63,07	62,59	62,170	61,50	61,770
	h4 [mm]	62,83	62,79	62,52	62,32	61,47	61,75
	h media [mm]	61,00	62,86	62,64	62,31	61,53	61,77
	peso [gr]	1242,10	1242,50	1234,50	1248,20	1226,70	1240,20
	Addensamento [t/m ³]	2,51	2,44	2,43	2,47	2,46	2,48
	% vuoti	3,51	6,34	6,62	5,07	5,53	4,86

Tab. B.10 – Miscela 130°C Warm Mix Asphalt, costipazione immediata

WMA_130_1h		Provini			
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	62,19	61,98	62,32	61,49
	h2 [mm]	62,36	62,30	62,16	61,43
	h3 [mm]	62,68	62,51	62,18	61,50
	h4 [mm]	62,44	62,21	62,30	61,67
	h media [mm]	62,42	62,25	62,24	61,52
	peso [gr]	1239,35	1254,30	1242,32	1234,60
	Addensamento [t/m ³]	2,45	2,49	2,46	2,48
	% vuoti	5,91	4,52	5,42	4,91

Tab. B.11 – Miscela 130°C Warm Mix Asphalt, t = 60' di permanenza in stufa a 110°C

WMA_130_2h		Provini			
	Altezze	1	2	3	4
	h1 [mm]	62,65	63,12	62,96	62,50
	h2 [mm]	62,59	63,13	62,60	62,25
	h3 [mm]	62,87	62,94	62,51	61,90
	h4 [mm]	62,85	62,79	62,80	62,10
	h media [mm]	62,74	63,00	62,72	62,19
	peso [gr]	1236,23	1244,26	1237,51	1236,65
	Addensamento [t/m ³]	2,43	2,44	2,44	2,45
	% vuoti	6,63	6,41	6,50	5,77

Tab. B.12 – Miscela 130°C Warm Mix Asphalt, t = 120' di permanenza in stufa a 110°C

WMA_110	Altezze	Provini			
		1	2	3	4
	h1 [mm]	63,88	64,74	63,19	64,09
	h2 [mm]	63,51	64,17	63,76	63,82
	h3 [mm]	63,22	64,41	63,32	64,30
	h4 [mm]	63,40	65,00	62,82	64,55
	h media [mm]	63,50	64,58	63,27	64,19
	peso [gr]	1235,53	1260,29	1243,94	1242,34
	Addensamento [t/m ³]	2,40	2,41	2,43	2,39
	% vuoti	7,81	7,53	6,84	8,29

Tab.B.13 – Miscela 110°C Warm Mix Asphalt, costipazione immediata

WMA_110_1h	Altezze	Provini			
		1	2	3	4
	h1 [mm]	58,86	57,16	57,09	59,34
	h2 [mm]	58,89	56,90	57,32	59,28
	h3 [mm]	58,98	56,48	56,34	58,34
	h4 [mm]	59,05	56,63	56,44	58,78
	h media [mm]	58,95	56,79	56,80	58,94
	peso [gr]	1190,28	1151,69	1155,57	1191,26
	Addensamento [t/m ³]	2,49	2,50	2,51	2,49
	% vuoti	4,32	3,91	3,59	4,22

Tab. B.14 – Miscela 110°C Warm Mix Asphalt , 60' di permanenza in stufa a 90°C

WMA_110_2h	Altezze	Provini			
		1	2	3	4
	h1 [mm]	65,23	63,63	64,64	63,92
	h2 [mm]	64,44	63,53	65,21	64,54
	h3 [mm]	64,59	62,91	64,73	64,28
	h4 [mm]	65,13	63,09	64,31	63,79
	h media [mm]	64,85	63,29	64,72	64,13
	peso [gr]	1240,60	1226,94	1247,82	1238,58
	Addensamento [t/m ³]	2,36	2,39	2,38	2,38
	% vuoti	9,35	8,14	8,64	8,49

Tab. B.15 – Miscela 110°C Warm Mix Asphalt , 120' di permanenza in stufa a 90°C

B-2: Risultati prova meccanica di Trazione Indiretta Fase II

	HMA_150		
	1	3	6
Carico verticale [kN]	2,508	3,037	3,512
Deformazione verticale [mm]	1,363	2,191	0,849
Trazione [mm]	0,307	0,385	0,227
RTI [kN/cm ²]	0,026	0,031	0,036
CTI [kN/cm ²]	3,00	2,30	6,80
h media [mm]	60,8075	60,94	60,83
peso [g]	1234,7	1240,3	1240,5
RTI medio [kN/cm ²]	0,031		
CTI medio [kN/cm ²]	4,00		

Tab. B.16 – Miscela di controllo tal quale 150°C costipazione immediata

	HMA_150_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,878	3,438	3,416	3,172
Deformazione verticale [mm]	2,031	1,610	1,031	1,455
Trazione [mm]	0,610	0,700	0,575	0,393
RTI [kN/cm ²]	0,030	0,035	0,035	0,032
CTI [kN/cm ²]	2,30	3,50	5,30	3,5
h media [mm]	61,11	61,1475	61,965	61,9725
peso [g]	1226,5	1224,2	1232,1	1234,4
RTI medio [kN/cm ²]	0,033			
CTI medio [kN/cm ²]	3,70			

Tab. B.17 – Miscela di controllo tal quale 150°C , costipata dopo 1 ora in stufa a 130°C

	HMA_150_2h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	3,348	3,442	3,214	3,51
Deformazione verticale [mm]	1,618	0,963	1,152	0,875
Trazione [mm]	0,418	0,436	0,673	0,415
RTI [kN/cm ²]	0,034	0,035	0,033	0,035
CTI [kN/cm ²]	3,30	5,80	4,50	6,50
h media [mm]	62,6375	62,0125	61,7075	62,0125
peso [g]	1243,1	1235,3	1227,4	1239,3
RTI medio [kN/cm ²]	0,034			
CTI medio [kN/cm ²]	5,00			

Tab. B.18 – Miscela di controllo tal quale 150°C , costipata dopo 2 ore in stufa a 130°C

	HMA_130		
	1	3	6
Carico verticale [kN]	1,828	1,850	1,658
Deformazione verticale [mm]	0,874	0,689	1,354
Trazione [mm]	0,293	0,349	0,384
RTI [kN/cm ²]	0,019	0,020	0,017
CTI [kN/cm ²]	3,50	4,50	2,10
h media [mm]	59,16	59,315	59,55
peso [g]	1192,2	1194,6	1201,9
RTI medio [kN/cm ²]	0,019		
CTI medio [kN/cm ²]	3,40		

Tab. B.19 – Miscela di controllo tal quale 130°C costipazione immediata

	HMA_130_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,742	2,525	2,684	2,650
Deformazione verticale [mm]	1,395	1,387	0,924	1,235
Trazione [mm]	0,436	0,392	0,415	0,414
RTI [kN/cm ²]	0,027	0,025	0,027	0,027
CTI [kN/cm ²]	3,124	2,920	4,655	3,566
h media [mm]	62,92	62,34	62,40	62,55
peso [g]	1244,8	1232,4	1241,9	1239,7
RTI medio [kN/cm ²]	0,027			
CTI medio [kN/cm ²]	3,60			

Tab. B.20 – Miscela di controllo tal quale 130°C , costipata dopo 1 ora in stufa a 110°C

	HMA_130_2h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,777	2,636	0,428	1,947
Deformazione verticale [mm]	1,378	1,856	0,070	1,101
Trazione [mm]	0,368	0,576	0,018	0,321
RTI [kN/cm ²]	0,028	0,026	0,004	0,019
CTI [kN/cm ²]	3,188	2,263	9,826	5,092
h media [mm]	63,2175	62,755	62,2275	62,733
peso [g]	1241,4	1243,2	1236,3	1240,3
RTI medio [kN/cm ²]	0,019			
CTI medio [kN/cm ²]	5,10			

Tab. B.21 – Miscela di controllo tal quale 130°C , costipata dopo 2 ore in stufa a 110°C

	HMA_110			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	1,924	1,965	1,770	2,249
Deformazione verticale [mm]	0,891	1,298	1,646	0,543
Trazione [mm]	0,427	0,392	0,440	0,335
RTI [kN/cm ²]	0,019	0,019	0,017	0,022
CTI [kN/cm ²]	3,40	2,40	1,70	6,60
h media [mm]	64,27	63,48	64,74	63,22
peso [g]	1236,07	1240,40	1244,86	1231,92
RTI medio [kN/cm ²]	0,019			
CTI medio [kN/cm ²]	3,50			

Tab. B.22 – Miscela di controllo tal quale 110°C costipazione immediata

	HMA_110_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	1,988	2,138	1,927	2,016
Deformazione verticale [mm]	0,902	0,868	0,989	0,965
Trazione [mm]	0,384	0,368	0,312	0,411
RTI [kN/cm ²]	0,019	0,021	0,018	0,020
CTI [kN/cm ²]	3,40	3,80	2,90	3,20
h media [mm]	64,52	65,21	66,78	64,61
peso [g]	1228,81	1245,30	1263,55	1235,97
RTI medio [kN/cm ²]	0,019			
CTI medio [kN/cm ²]	3,30			

Tab. B.23 – Miscela di controllo tal quale 110°C, costipata dopo 1 ora in stufa a 90°C

	HMA_110_2h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	1,934	1,970	2,305	2,335
Deformazione verticale [mm]	0,879	0,539	0,674	1,122
Trazione [mm]	0,363	0,310	0,261	0,205
RTI [kN/cm ²]	0,019	0,019	0,024	0,023
CTI [kN/cm ²]	3,40	5,70	5,60	3,20
h media [mm]	64,23	64,01	60,94	64,11
peso [g]	1219,62	1220,48	1190,15	1247,00
RTI medio [kN/cm ²]	0,021			
CTI medio [kN/cm ²]	4,50			

Tab. B.24 – Miscela di controllo tal quale 110°C, costipata dopo 2 ore in stufa a 90°C

	WMA_130		
	1	3	6
Carico verticale [kN]	2,224	2,457	2,533
Deformazione verticale [mm]	0,688	0,752	0,609
Trazione [mm]	0,236	0,393	0,377
RTI [kN/cm ²]	0,022	0,025	0,026
CTI [kN/cm ²]	5,10	5,20	6,70
h media [mm]	62,86	62,305	61,77
peso [g]	1242,5	1248,2	1240,2
RTI medio [kN/cm ²]	0,024		
CTI medio [kN/cm ²]	5,70		

Tab. B.25 – Miscela warm mix asphalt con zeolite, miscelata a 130°C costipazione immediata

	WMA_130_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,704	2,537	2,884	2,576
Deformazione verticale [mm]	0,734	1,700	0,675	1,536
Trazione [mm]	0,487	0,452	0,414	0,688
RTI [kN/cm ²]	0,027	0,026	0,029	0,026
CTI [kN/cm ²]	5,90	2,40	6,90	2,70
h media [mm]	62,4175	62,25	62,24	61,5225
peso [g]	1239,4	1254,3	1242,3	1234,6
RTI medio [kN/cm ²]	0,027			
CTI medio [kN/cm ²]	4,50			

Tab. B.26 – Miscela warm mix asphalt con zeolite, miscelata a 130°C, costipata dopo 1 ora in stufa a 110°C

	WMA_130_2h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,841	2,999	2,701	2,817
Deformazione verticale [mm]	1,114	1,603	1,048	1,286
Trazione [mm]	0,405	0,585	0,661	0,686
RTI [kN/cm ²]	0,028	0,030	0,027	0,028
CTI [kN/cm ²]	4,10	3,00	4,10	3,50
h media [mm]	62,74	62,995	62,7175	62,1875
peso [g]	1236,2	1244,3	1237,5	1236,7
RTI medio [kN/cm ²]	0,028			
CTI medio [kN/cm ²]	3,70			

Tab. B.27 – Miscela warm mix asphalt con zeolite, miscelata a 130°C, costipata dopo 2 ore in stufa a 110°C

	WMA_110			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,425	2,045	2,434	2,248
Deformazione verticale [mm]	0,687	0,885	0,915	0,801
Trazione [mm]	0,228	0,416	0,265	0,295
RTI [kN/cm ²]	0,024	0,020	0,024	0,022
CTI [kN/cm ²]	5,60	3,60	4,20	4,40
h media [mm]	63,50	64,58	63,27	64,19
peso [g]	1235,5	1260,3	1243,9	1242,3
RTI medio [kN/cm ²]	0,022			
CTI medio [kN/cm ²]	0,044			

Tab. B.28 – Miscela warm mix asphalt con zeolite, miscelata a 110°C
costipazione immediata

	WMA_110_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	3,525	3,387	3,610	3,35
Deformazione verticale [mm]	1,449	1,312	1,212	1,936
Trazione [mm]	0,496	0,399	0,426	0,223
RTI [kN/cm ²]	0,037	0,037	0,040	0,036
CTI [kN/cm ²]	4,10	4,50	5,20	2,90
h media [mm]	58,945	56,7925	56,7975	58,935
peso [g]	1183,77	1164,36	1158,96	1187,26
RTI medio [kN/cm ²]	0,038			
CTI medio [kN/cm ²]	4,20			

Tab. B. 29 – Miscela warm mix asphalt con zeolite, miscelata a 110°C ,
costipata dopo 1 ora in stufa a 90°C

	WMA_110_2h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,414	2,351	2,105	2,383
Deformazione verticale [mm]	0,683	0,827	0,830	0,563
Trazione [mm]	0,326	0,291	0,247	0,256
RTI [kN/cm ²]	0,023	0,023	0,020	0,023
CTI [kN/cm ²]	5,50	4,50	3,90	6,60
h media [mm]	64,85	63,29	64,72	64,13
peso [g]	1240,60	1226,94	1247,82	1238,58
RTI medio [kN/cm ²]	0,023			
CTI medio [kN/cm ²]	5,10			

Tab. B.30 – Miscela warm mix asphalt con zeolite, miscelata a 110°C ,
costipata dopo 2 ore in stufa a 90°C

Appendice C: risultati Fase III

C-1: Risultati caratterizzazione volumetrica

HMA 150_25						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	61,34	61,67	61,54	61,88	61,58	61,38
h2 [mm]	61,65	61,41	61,63	61,74	61,26	61,44
h3 [mm]	61,67	61,63	61,84	61,57	61,12	61,03
h4 [mm]	61,49	61,92	61,86	61,89	61,32	61,00
hmedia [mm]	61,54	61,66	61,72	61,77	61,32	61,21
peso [gr]	1191,7	1190,1	1194,4	1190	1183,2	1187,2
Addensamento [g/cm ³]	2,390	2,382	2,388	2,377	2,381	2,393

Tab. C.1 – Miscela di controllo tal quale miscelata a 150°C costipazione immediata 25 colpi per faccia

HMA 150_50						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	59,11	59,19	59,5	59,78	59,09	60,21
h2 [mm]	58,93	59,54	58,92	59,73	59,33	59,7
h3 [mm]	58,72	59,69	59,18	60,20	59,70	59,81
h4 [mm]	59,14	59,35	59,60	60,39	59,34	60,19
hmedia [mm]	58,98	59,44	59,30	60,03	59,37	59,98
peso [gr]	1193,2	1194,5	1188,2	1200,2	1192,1	1197,1
Addensamento [g/cm ³]	2,497	2,480	2,473	2,468	2,478	2,463

Tab. C.2 – Miscela di controllo tal quale miscelata a 150°C costipazione immediata 50 colpi per faccia

HMA 150_75						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	61,05	60,88	60,61	60,76	60,96	60,68
h2 [mm]	61,05	60,68	60,44	60,69	60,96	60,65
h3 [mm]	61,10	60,55	60,67	60,91	60,90	60,97
h4 [mm]	61,00	60,68	60,47	60,87	60,94	61,02
hmedia [mm]	61,00	60,70	60,55	60,81	60,94	60,83
peso [gr]	1243,0	1234,7	1242,9	1234,7	1240,3	1240,5
Addensamento [g/cm ³]	2,515	2,510	2,533	2,506	2,512	2,517

Tab. C.3 – Miscela di controllo tal quale miscelata a 150°C costipazione immediata 75 colpi per faccia

HMA_150_100						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	60,80	59,51	59,97	59,95	59,37	60,03
h2 [mm]	60,75	59,63	60,03	59,85	59,44	60,11
h3 [mm]	60,95	59,70	60,08	59,89	59,84	60,10
h4 [mm]	60,97	59,81	60,04	60,08	59,62	60,18
hmedia [mm]	60,87	59,66	60,03	59,94	59,57	60,11
peso [gr]	1239,2	1238,6	1239,7	1243,0	1236,7	1238,2
Addensamento [g/cm ³]	2,512	2,562	2,549	2,559	2,562	2,542

Tab. C.4 – Miscela di controllo tal quale miscelata a 150°C costipazione immediata 100 colpi per faccia

HMA_110_25						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	63,43	62,89	63,72	63,62	63,52	64,27
h2 [mm]	63,06	62,92	63,65	63,43	63,42	63,78
h3 [mm]	63,77	62,88	63,67	63,33	63,42	63,76
h4 [mm]	63,75	62,94	63,85	63,51	63,48	64,11
hmedia [mm]	63,50	62,91	63,72	63,47	63,46	63,98
peso [gr]	1196,0	1190,0	1192,8	1200,9	1194,3	1193,1
Addensamento [g/cm ³]	2,324	2,334	2,310	2,335	2,323	2,301

Tab. C.5 – Miscela di controllo tal quale miscelata a 130°C costipazione immediata 25 colpi per faccia

HMA_110_50						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	61,11	60,59	60,36	60,99	61,03	61,23
h2 [mm]	61,02	60,43	60,19	61,13	60,95	61,41
h3 [mm]	60,86	60,87	60,39	61,32	61,09	61,28
h4 [mm]	60,72	60,73	60,44	61,12	61,01	61,45
hmedia [mm]	60,93	60,66	60,35	61,14	61,02	61,34
peso [gr]	1205,1	1191,2	1196,1	1199,0	1186,6	1200,9
Addensamento [g/cm ³]	2,441	2,424	2,446	2,420	2,400	2,416

Tab. C.6 – Miscela di controllo tal quale miscelata a 130°C costipazione immediata 50 colpi per faccia

HMA_110_75						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	60,11	59,45	59,94	59,34	59,41	59,58
h2 [mm]	59,81	59,46	60,08	59,08	59,38	59,51
h3 [mm]	59,93	59,52	59,84	59,02	59,24	59,51
h4 [mm]	60,11	59,44	59,64	59,20	59,23	59,60
hmedia [mm]	61,00	59,47	59,88	59,16	59,32	59,55
peso [gr]	1198,5	1199,0	1197,4	1192,2	1194,6	1201,9
Addensamento [g/cm ³]	2,425	2,488	2,468	2,487	2,485	2,491

Tab. C.7 – Miscela di controllo tal quale miscelata a 130°C costipazione immediata 75 colpi per faccia

HMA_110_100						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	61,28	61,64	61,67	61,59	61,26	61,76
h2 [mm]	61,18	61,61	61,53	61,69	61,03	61,71
h3 [mm]	61,44	61,44	61,45	61,55	61,02	61,84
h4 [mm]	61,30	61,45	61,49	61,51	61,06	61,87
hmedia [mm]	61,30	61,54	61,54	61,59	61,09	61,80
peso [gr]	1242,9	1245,8	1235,2	1245,2	1238,9	1249,0
Addensamento [g/cm ³]	2,502	2,498	2,477	2,495	2,503	2,494

Tab. C.8 – Miscela di controllo tal quale miscelata a 130°C costipazione immediata 100 colpi per faccia

WMA_110_25						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	63,5	63,84	63,3	63,33	63,65	64,24
h2 [mm]	63,75	62,22	63,61	63,22	63,52	64,47
h3 [mm]	63,48	64,06	63,71	63,55	63,3	64,55
h4 [mm]	63,7	63,77	63,7	63,53	63,54	64,27
hmedia [mm]	63,61	63,47	63,58	63,41	63,50	64,38
peso [gr]	1188,6	1202,1	1192,4	1197,6	1198,6	1191,2
Addensamento [g/cm ³]	2,306	2,337	2,314	2,331	2,329	2,283

Tab. C.9 – Miscela warm mix asphalt con zeolite miscelata a 130°C costipazione immediata 25 colpi per faccia

WMA_110_50						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	60,94	60,86	61,56	61,28	61,73	61,82
h2 [mm]	60,96	60,8	61,29	61,21	61,54	61,84
h3 [mm]	60,9	60,68	61,1	61,18	61,51	61,65
h4 [mm]	60,8	60,7	61,22	61,05	61,71	61,68
hmedia [mm]	60,90	60,76	61,29	61,18	61,62	61,75
peso [gr]	1201,8	1197,5	1199,9	1202,1	1199,9	1199,7
Addensamento [g/cm ³]	2,435	2,432	2,416	2,425	2,403	2,398

Tab. C.10 – Miscela warm mix asphalt con zeolite miscelata a 130°C costipazione immediata 50 colpi per faccia

WMA_110_75						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	62,97	62,80	61,57	62,73	62,41	61,75
h2 [mm]	62,81	62,66	61,57	62,85	62,32	61,81
h3 [mm]	62,62	62,59	61,50	63,07	62,17	61,77
h4 [mm]	62,83	62,52	61,47	62,79	62,32	61,75
hmedia [mm]	61,00	62,64	61,53	62,86	62,31	61,77
peso [gr]	1242,1	1234,5	1226,7	1242,5	1248,2	1240,2
Addensamento [g/cm ³]	2,513	2,432	2,460	2,439	2,472	2,478

Tab. C.11 – Miscela warm mix asphalt con zeolite miscelata a 130°C costipazione immediata 75 colpi per faccia

WMA_110_100						
	A	B	C	D	E	F
h1 [mm]	62,40	61,71	60,86	61,90	61,49	62,20
h2 [mm]	62,30	61,83	60,74	61,94	61,37	62,11
h3 [mm]	62,38	61,77	60,80	62,12	61,35	62,22
h4 [mm]	62,41	61,67	60,88	61,99	61,38	62,09
hmedia [mm]	62,37	61,75	60,82	61,99	61,40	62,16
peso [gr]	1257,1	1253,7	1236,0	1253,9	1254,2	1254,9
Addensamento [g/cm ³]	2,487	2,506	2,508	2,496	2,521	2,492

Tab. C.12 – Miscela warm mix asphalt con zeolite miscelata a 130°C costipazione immediata 100 colpi per faccia

	WMA_110_25_1h			
	A	B	C	D
h1 [mm]	62,95	62,68	61,91	63,66
h2 [mm]	63,11	62,49	62,08	63,04
h3 [mm]	63,02	62,69	62,02	62,99
h4 [mm]	62,94	62,92	61,93	63,56
hmedia [mm]	63,01	62,70	61,99	63,31
peso [gr]	1183,77	1164,36	1158,96	1187,26
Addensamento [g/cm ³]	2,319	2,292	2,307	2,314

Tab. C.13 – Miscela warm mix asphalt con zeolite miscelata a 130°C
costipazione immediata 25 colpi per faccia

	WMA_110_50_1h			
	A	B	C	D
h1 [mm]	59,58	58,58	59,32	59,84
h2 [mm]	59,93	58,87	59,34	59,84
h3 [mm]	59,43	59,39	59,62	59,72
h4 [mm]	59,17	59,02	59,46	59,65
hmedia [mm]	59,53	58,97	59,44	59,76
peso [gr]	1172,16	1171,43	1167,58	1182,95
Addensamento [g/cm ³]	2,430	2,452	2,424	2,443

Tab. C.14 – Miscela warm mix asphalt con zeolite miscelata a 130°C
costipazione immediata 50 colpi per faccia

	WMA_110_75_1h			
	A	B	C	D
h1 [mm]	58,86	57,16	57,09	59,34
h2 [mm]	58,89	56,9	57,32	59,28
h3 [mm]	58,98	56,48	56,34	58,34
h4 [mm]	59,05	56,63	56,44	58,78
hmedia [mm]	58,95	56,79	56,80	58,94
peso [gr]	1190,28	1151,69	1155,57	1191,26
Addensamento [g/cm ³]	2,492	2,503	2,511	2,494

Tab. C.15 – Miscela warm mix asphalt con zeolite miscelata a 130°C
costipazione immediata 75 colpi per faccia

	WMA_110_100_1h			
	A	B	C	D
h1 [mm]	56,95	57,58	57,97	59,41
h2 [mm]	56,56	58,09	57,78	59,28
h3 [mm]	56,37	57,99	57,75	59,07
h4 [mm]	56,63	57,54	58,12	59,2
hmedia [mm]	56,63	57,80	57,91	59,24
peso [gr]	1158,7	1182,7	1178,1	1202,9
Addensamento [g/cm ³]	2,525	2,525	2,511	2,506

Tab. C.16 – Miscela warm mix asphalt con zeolite miscelata a 130°C costipazione immediata 100 colpi per faccia

C-2: Risultati prova meccanica di Trazione Indiretta Fase III

	HMA_150_25		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	1,990	2,800	2,264
Deformazione verticale [mm]	1,230	1,319	1,197
Trazione [mm]	0,424	0,366	0,467
RTI [kN/cm ²]	0,020	0,029	0,023
CTI [kN/cm ²]	2,619	3,462	3,090
h media [mm]	61,77	61,32	61,21
peso [g]	1190	1183,2	1187,2
RTI medio [kN/cm ²]	0,024		
CTI medio [kN/cm ²]	3,057		

Tab. C.17– Risultati prova di trazione indiretta Miscela tal quale 150°C 25 colpi

	HMA_150_50		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	2,952	3,385	3,370
Deformazione verticale [mm]	0,757		0,872
Trazione [mm]	0,209	0,324	0,252
RTI [kN/cm ²]	0,031	0,036	0,035
CTI [kN/cm ²]	6,497		6,444
h media [mm]	60,03	59,37	59,98
peso [g]	1200,2	1192,1	1197,1
RTI medio [kN/cm ²]	0,034		
CTI medio [kN/cm ²]	6,470		

Tab. C.18 – Risultati prova di trazione indiretta Miscela tal quale 150°C 50 colpi

	HMA_150_75		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	2,508	3,037	3,512
Deformazione verticale [mm]	1,363	2,191	0,849
Trazione [mm]	0,307	0,385	0,227
RTI [kN/cm ²]	0,026	0,031	0,036
CTI [kN/cm ²]	3,026	2,275	6,800
h media [mm]	60,81	60,94	60,83
peso [g]	1234,7	1240,3	1240,5
RTI medio [kN/cm ²]	0,031		
CTI medio [kN/cm ²]	4,034		

Tab. C.19 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela tal quale 150°C 75 colpi

	HMA_150_100		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	3,281	4,140	4,661
Deformazione verticale [mm]	0,898	0,594	0,684
Trazione [mm]	0,386	0,322	0,319
RTI [kN/cm ²]	0,034	0,044	0,049
CTI [kN/cm ²]	6,095	11,701	11,337
h media [mm]	59,94	59,57	60,11
peso [g]	1243	1236,7	1238,2
RTI medio [kN/cm ²]	0,042		
CTI medio [kN/cm ²]	9,711		

Tab. C.20 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela tal quale 150°C 100 colpi

	HMA_110_25		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	1,068	1,005	1,107
Deformazione verticale [mm]	1,144	1,185	1,378
Trazione [mm]	0,468	0,721	0,660
RTI [kN/cm ²]	0,011	0,010	0,011
CTI [kN/cm ²]	1,471	1,336	1,256
h media [mm]	63,47	63,46	63,98
peso [g]	1200,9	1194,3	1193,1
RTI medio [kN/cm ²]	0,010		
CTI medio [kN/cm ²]	1,354		

Tab. C.21 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela tal quale 130°C 25 colpi

	HMA_110_50		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	1,601	1,427	1,468
Deformazione verticale [mm]	0,868	1,197	1,389
Trazione [mm]	0,497	0,412	0,574
RTI [kN/cm ²]	0,016	0,015	0,015
CTI [kN/cm ²]	3,017	1,954	1,723
h media [mm]	61,14	61,02	61,34
peso [g]	1199	1186,6	1200,9
RTI medio [kN/cm ²]	0,015		
CTI medio [kN/cm ²]	2,231		

Tab. C.22– Risultati prova di trazione indiretta Miscela tal quale
130°C 25 colpi

	HMA_110_75		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	1,828	1,850	1,658
Deformazione verticale [mm]	0,874	0,689	1,354
Trazione [mm]	0,293	0,349	0,384
RTI [kN/cm ²]	0,019	0,020	0,017
CTI [kN/cm ²]	3,535	4,527	2,056
h media [mm]	59,16	59,32	59,55
peso [g]	1192,2	1194,6	1201,9
RTI medio [kN/cm ²]	0,019		
CTI medio [kN/cm ²]	3,373		

Tab. C.23 – Risultati prova di trazione indiretta Miscela tal quale
130°C 25 colpi

	HMA_110_100		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	2,328	2,521	2,517
Deformazione verticale [mm]	1,450	0,662	0,673
Trazione [mm]	0,489	0,375	0,284
RTI [kN/cm ²]	0,024	0,026	0,026
CTI [kN/cm ²]	2,607	6,233	6,052
h media [mm]	61,59	61,09	61,80
peso [g]	1245,2	1238,9	1249
RTI medio [kN/cm ²]	0,025		
CTI medio [kN/cm ²]	4,964		

Tab. C.24 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela tal quale 130°C 25 colpi

	WMA_110_25		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	1,274	1,369	1,302
Deformazione verticale [mm]	0,822	0,992	0,868
Trazione [mm]	0,388	0,547	0,595
RTI [kN/cm ²]	0,013	0,014	0,013
CTI [kN/cm ²]	2,444	2,173	2,330
h media [mm]	63,41	63,50	64,38
peso [g]	1197,6	1198,6	1191,2
RTI medio [kN/cm ²]	0,013		
CTI medio [kN/cm ²]	2,316		

Tab. C.25 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela warm mix zeolite 130°C 25 colpi

	WMA_110_50		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	2,014	2,115	1,902
Deformazione verticale [mm]	0,820	0,963	0,884
Trazione [mm]	0,394	0,405	0,581
RTI [kN/cm ²]	0,021	0,022	0,019
CTI [kN/cm ²]	4,015	3,564	3,484
h media [mm]	61,18	61,62	61,75
peso [g]	1202,1	1199,9	1199,7
RTI medio [kN/cm ²]	0,020		
CTI medio [kN/cm ²]	3,688		

Tab. C.26 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela warm mix zeolite 130°C 50 colpi

	WMA_110_75		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	2,224	2,457	2,533
Deformazione verticale [mm]	0,688	0,752	0,609
Trazione [mm]	0,236	0,393	0,377
RTI [kN/cm ²]	0,022	0,025	0,026
CTI [kN/cm ²]	5,142	5,244	6,733
h media [mm]	62,86	62,31	61,77
peso [g]	1242,5	1248,2	1240,2
RTI medio [kN/cm ²]	0,024		
CTI medio [kN/cm ²]	5,707		

Tab. C.27 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela warm mix zeolite 130°C 75 colpi

	WMA_110_100		
	B	D	F
Carico verticale [kN]	2,174	2,308	2,511
Deformazione verticale [mm]	0,351	1,040	0,426
Trazione [mm]		0,346	0,206
RTI [kN/cm ²]	0,022	0,024	0,025
CTI [kN/cm ²]	9,992	3,615	9,483
h media [mm]	61,99	61,40	62,16
peso [g]	1253,9	1254,2	1254,9
RTI medio [kN/cm ²]	0,024		
CTI medio [kN/cm ²]	7,697		

Tab. C.28 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela warm mix zeolite 130°C 100 colpi

	WMA_110_25_1h			
	A	B	C	D
Carico verticale [kN]	2,370	2,313	2,200	2,313
Deformazione verticale [mm]	1,863	1,660	1,258	2,437
Trazione [mm]	0,572	0,610	0,599	0,772
RTI [kN/cm ²]	0,024	0,023	0,022	0,023
CTI [kN/cm ²]	2,019	2,222	2,821	1,499
h media [mm]	63,005	62,695	61,985	63,3125
peso [g]	1190,3	1151,7	1155,6	1191,3
RTI medio [kN/cm ²]	0,023			
CTI medio [kN/cm ²]	2,141			

Tab. C.29 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela warm mix zeolite 90°C 1 ora stufa 25 colpi

	WMA_110_50_1h			
	A	B	C	D
Carico verticale [kN]	3,077	3,256	3,200	3,125
Deformazione verticale [mm]	1,227	1,490	1,832	1,439
Trazione [mm]	0,439	0,378	0,305	0,373
RTI [kN/cm ²]	0,032	0,035	0,034	0,033
CTI [kN/cm ²]	4,213	3,706	2,939	3,634
h media [mm]	59,5275	58,965	59,435	59,7625
peso [g]	1172,2	1171,4	1167,6	1183,0
RTI medio [kN/cm ²]	0,033			
CTI medio [kN/cm ²]	3,623			

Tab. C.30– Risultati prova di trazione indiretta
Miscela warm mix zeolite 90°C 1 ora stufa 50 colpi

	WMA_110_75_1h			
	A	B	C	D
Carico verticale [kN]	3,525	3,387	3,610	3,35
Deformazione verticale [mm]	1,449	1,312	1,212	1,936
Trazione [mm]	0,496	0,399	0,426	0,223
RTI [kN/cm ²]	0,037	0,037	0,040	0,036
CTI [kN/cm ²]	4,127	4,546	5,244	2,936
h media [mm]	58,945	56,7925	56,7975	58,935
peso [g]	1183,77	1164,36	1158,96	1187,26
RTI medio [kN/cm ²]	0,038			
CTI medio [kN/cm ²]	4,213			

Tab. C.31 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela warm mix zeolite 90°C 1 ora stufa 75 colpi

	WMA_110_100_1h			
	E	F	G	H
Carico verticale [kN]	4,102	4,232	4,202	3,738
Deformazione verticale [mm]	0,909	1,273	0,546	0,82
Trazione [mm]	0,478	0,389	0,329	0,382
RTI [kN/cm ²]	0,045	0,046	0,045	0,040
CTI [kN/cm ²]	7,969	5,752	13,291	7,695
h media [mm]	56,6275	57,8	57,905	59,24
peso [g]	1158,7	1182,7	1178,1	1202,9
RTI medio [kN/cm ²]	0,044			
CTI medio [kN/cm ²]	8,677			

Tab. C.32 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela warm mix zeolite 90°C 1 ora stufa 100 colpi

Appendice D: risultati Fase IV

D-1: Risultati caratterizzazione volumetrica Fase IV

HMA_165_25				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	66,37	64,95	62,32	66,86
h2 [mm]	67,20	64,30	62,00	68,11
h3 [mm]	67,57	63,80	62,49	67,15
h4 [mm]	66,73	64,09	63,01	66,52
h media [mm]	66,97	64,29	62,46	67,16
peso [gr]	1247,97	1203,81	1168,58	1212,54
Addensamento [t/m ³]	2,30	2,31	2,31	2,23
% vuoti	11,70	11,27	11,34	14,45
Temperature [°C]	163	161	163	164
% Vuoti medio	12,19			
Add. Med. [g/cm ³]	2,29			

Tab. D.1– Miscela 165°C Tal Quale, costipazione immediata

HMA_165_50				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	65,04	62,08	61,83	62,12
h2 [mm]	65,53	62,63	62,56	61,58
h3 [mm]	64,97	63,02	62,53	61,89
h4 [mm]	64,44	62,36	61,86	62,43
h media [mm]	65,00	62,52	62,20	62,01
peso [gr]	1243,55	1213,97	1211,83	1211,38
Addensamento [t/m ³]	2,36	2,40	2,40	2,41
% vuoti	9,34	8,00	7,67	7,43
Temperature [°C]	162	160	164	165
% Vuoti medio	8,11			
Add. Med. [g/cm ³]	2,39			

Tab. D.2 – Miscela 165°C Tal Quale, costipazione immediata

HMA 165_75				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	62,98	62,11	61,31	63,81
h2 [mm]	62,55	61,44	61,09	62,71
h3 [mm]	63,22	61,40	61,89	62,70
h4 [mm]	63,61	62,48	62,14	63,49
h media [mm]	63,09	61,86	61,61	63,18
peso [gr]	1224,19	1215,48	1209,67	1234,87
Addensamento [t/m ³]	2,39	2,42	2,42	2,41
% vuoti	8,06	6,89	6,96	7,38
Temperature [°C]	158	159	159	160
% Vuoti medio	7,32			
Add. Med. [g/cm ³]	2,41			

Tab. D.3 – Miscela 165°C Tal Quale, costipazione immediata

HMA_165_100				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	62,53	61,78	59,92	61,77
h2 [mm]	62,92	61,45	60,11	61,12
h3 [mm]	63,45	60,92	60,92	60,72
h4 [mm]	63,03	60,38	60,38	61,44
h media [mm]	62,98	61,13	60,33	61,26
peso [gr]	1254,95	1209,91	1216,37	1243,61
Addensamento [t/m ³]	2,46	2,44	2,49	2,51
% vuoti	5,58	6,22	4,47	3,81
Temperature [°C]	161	159	163	157
% Vuoti medio	5,02			
Add. Med. [g/cm ³]	2,47			

Tab. D.4 – Miscela 165°C Tal Quale, costipazione immediata

HMA_115_25_1h				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	62,33	60,51	61,01	61,28
h2 [mm]	62,16	61,30	59,98	61,15
h3 [mm]	62,98	60,44	59,79	61,07
h4 [mm]	63,23	59,98	60,69	61,30
h media [mm]	62,68	60,56	60,37	61,20
peso [gr]	1130,54	1089,52	1088,08	1102,71
Addensamento [t/m ³]	2,23	2,22	2,22	2,22
% vuoti	14,53	14,75	14,59	14,62
Temperature [°C]	102	103	105	103
% Vuoti medio	14,623			
Addensamento [t/m ³]	2,224			

Tab. D.5 – Miscela 115°C Tal Quale, 1 h stufa 105°C

HMA_115_50_1h				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	58,90	56,88	62,84	59,54
h2 [mm]	57,88	55,95	63,42	59,08
h3 [mm]	57,85	56,08	63,13	59,02
h4 [mm]	58,33	57,06	62,62	59,34
h media [mm]	58,24	56,49	63,00	59,25
peso [gr]	1100,18	1065,62	1182,15	1115,98
Addensamento [t/m ³]	2,33	2,33	2,32	2,32
% vuoti	10,49	10,62	11,09	10,73
Temperature [°C]	102	103	105	103
% Vuoti medio	10,732			
Addensamento [t/m ³]	2,325			

Tab. D.6 – Miscela 115°C Tal Quale, 1 h stufa 105°C

HMA_115_75_1h				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	62,07	61,42	61,71	61,73
h2 [mm]	62,62	60,24	62,77	61,88
h3 [mm]	63,64	60,81	63,40	62,62
h4 [mm]	62,78	61,90	62,42	62,37
h media [mm]	62,78	61,09	62,58	62,15
peso [gr]	1201,50	1167,30	1213,00	1193,93
Addensamento [t/m ³]	2,36	2,36	2,39	2,37
% vuoti	9,31	9,46	8,15	8,97
Temperature [°C]	102	103	105	103
% Vuoti medio	8,973			
Addensamento [t/m ³]	2,371			

Tab. D.7 – Miscela 115°C Tal Quale, 1 h stufa 105°C

HMA_115_100_1h				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	63,87	60,52	61,50	61,96
h2 [mm]	63,10	59,63	62,05	61,59
h3 [mm]	62,74	59,77	62,71	61,74
h4 [mm]	63,26	61,00	61,82	62,03
h media [mm]	63,24	60,23	62,02	61,83
peso [gr]	1234,10	1177,94	1203,63	1205,22
Addensamento [t/m ³]	2,41	2,41	2,39	2,41
% vuoti	7,53	7,33	8,04	7,63
Temperature [°C]	103	104	103	103
% Vuoti medio	7,635			
Addensamento [t/m ³]	2,406			

Tab. D.8 – Miscela 115°C Tal Quale, 1 h stufa 105°C

WMA_115_25_1h				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	59,68	61,48	59,31	60,16
h2 [mm]	60,20	60,72	59,88	60,27
h3 [mm]	59,37	61,10	60,87	60,45
h4 [mm]	58,61	61,86	60,02	60,16
h media [mm]	59,47	61,29	60,02	60,26
peso [gr]	1084,02	1105,01	1089,54	1092,86
Addensamento [t/m ³]	2,25	2,22	2,24	2,24
% vuoti	13,62	14,57	13,98	14,06
Temperature [°C]	100	102	102	103
% Vuoti medio	14,058			
Addensamento [t/m ³]	2,238			

Tab. D.9 – Miscela 115°C WMA, 1 h stufa 105°C

HMA_115_50_1h				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	57,34	58,45	57,07	57,62
h2 [mm]	56,87	59,11	56,21	57,40
h3 [mm]	57,33	59,40	56,16	57,63
h4 [mm]	58,14	58,47	57,13	57,91
h media [mm]	57,42	58,86	56,64	57,64
peso [gr]	1090,91	1128,37	1084,87	1101,38
Addensamento [t/m ³]	2,34	2,37	2,36	2,36
% vuoti	9,98	9,16	9,24	9,46
Temperature [°C]	100	102	102	103
% Vuoti medio	9,459			
Addensamento [t/m ³]	2,358			

Tab. D.10 – Miscela 115°C Tal Quale, 1 h stufa 105°C

HMA_115_75_1h				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	63,00	64,84	63,46	63,77
h2 [mm]	62,77	64,36	64,11	63,75
h3 [mm]	61,85	63,41	64,80	63,35
h4 [mm]	62,02	63,71	64,26	63,33
h media [mm]	62,41	64,08	64,16	63,55
peso [gr]	1208,80	1224,50	1217,30	1216,87
Addensamento [t/m ³]	2,39	2,36	2,34	2,36
% vuoti	8,22	9,45	10,09	9,26
Temperature [°C]	100	102	102	103
% Vuoti medio	9,257			
Addensamento [t/m ³]	2,363			

Tab. D.11 – Miscela 115°C Tal Quale, 1 h stufa 105°C

HMA 115 100 1h				
Altezze	1	2	3	4
h1 [mm]	63,79	59,99	60,54	61,44
h2 [mm]	63,64	60,48	59,75	61,29
h3 [mm]	63,27	60,77	60,19	61,41
h4 [mm]	63,50	60,62	60,77	61,63
h media [mm]	63,55	60,47	60,31	61,44
peso [gr]	1230,37	1175,82	1170,57	1192,25
Addensamento [t/m ³]	2,39	2,40	2,40	2,39
% vuoti	8,26	7,85	8,03	8,05
Temperature [°C]	103	103	104	103
% Vuoti medio	8,050			
Addensamento [t/m ³]	2,395			

Tab. D.12 – Miscela 115°C Tal Quale, 1 h stufa 105°C

D-2: Risultati prova meccanica di Trazione Indiretta Fase III

	HMA 165 25			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	3,377	3,560	3,376	3,183
Deformazione verticale [mm]	2,463	2,474	2,174	2,832
Trazione [mm]	0,969	0,875	0,915	0,982
RTI [kN/cm ²]	0,032	0,035	0,034	0,030
CTI [kN/cm ²]	2,047	2,238	2,486	1,674
h media [mm]	66,9675	64,285	62,455	67,16
peso [g]	1248,0	1203,8	1168,6	1212,5
RTI medio [kN/cm ²]	0,032			
CTI medio [kN/cm ²]	2,111			

Tab. D.13 – Risultati prova di trazione indiretta Miscela Control HMA 165°C 25 colpi

	HMA 165 50			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	4,285	4,334	4,686	4,42
Deformazione verticale [mm]	1,058	1,499	1,501	1,143
Trazione [mm]	0,563	0,712	0,624	0,628
RTI [kN/cm ²]	0,041	0,043	0,047	0,045
CTI [kN/cm ²]	6,231	4,624	5,020	6,237
h media [mm]	64,995	62,5225	62,195	62,005
peso [g]	1243,6	1214,0	1211,8	1211,4
RTI medio [kN/cm ²]	0,044			
CTI medio [kN/cm ²]	5,528			

Tab.D.14 – Risultati prova di trazione indiretta Miscela Control HMA 165°C 50 colpi

	HMA_165_75			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	4,124	4,380	4,365	4,788
Deformazione verticale [mm]	1,579	1,477	1,342	0,81
Trazione [mm]	0,486	0,563	0,419	0,597
RTI [kN/cm ²]	0,041	0,044	0,044	0,048
CTI [kN/cm ²]	4,140	4,794	5,280	9,356
h media [mm]	63,09	61,8575	61,6075	63,1775
peso [g]	1224,19	1215,48	1209,67	1234,87
RTI medio [kN/cm ²]	0,044			
CTI medio [kN/cm ²]	5,892			

Tab. D.15 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela Control HMA 165°C 75 colpi

	HMA_165_100			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	4,383	4,541	5,223	5,594
Deformazione verticale [mm]	2,122	0,991	0,737	0,835
Trazione [mm]	0,677	0,425	0,583	0,395
RTI [kN/cm ²]	0,044	0,047	0,054	0,057
CTI [kN/cm ²]	3,279	7,496	11,746	10,936
h media [mm]	62,98	61,13	60,33	61,26
peso [g]	1254,95	1209,91	1216,37	1243,61
RTI medio [kN/cm ²]	0,050			
CTI medio [kN/cm ²]	8,364			

Tab. D.16 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela Control HMA 165°C 100 colpi

	HMA_115_25_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,177	2,107	2,099	2,128
Deformazione verticale [mm]	2,101	2,824	2,664	2,530
Trazione [mm]	1,101	1,229	1,114	1,148
RTI [kN/cm ²]	0,022	0,022	0,022	0,022
CTI [kN/cm ²]	1,653	1,232	1,305	1,374
h media [mm]	62,675	60,5575	60,3675	61,20
peso [g]	1130,5	1089,5	1088,1	1102,71
RTI medio [kN/cm ²]	0,022			
CTI medio [kN/cm ²]	1,391			

Tab. D.17 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela Control Warm 105°C 25 colpi

	HMA_115_50_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,821	2,589	2,909	2,773
Deformazione verticale [mm]	2,010	1,484	1,478	1,657
Trazione [mm]	0,828	1,377	0,850	1,018
RTI [kN/cm ²]	0,030	0,029	0,029	0,029
CTI [kN/cm ²]	2,410	3,088	3,124	2,824
h media [mm]	58,24	56,4925	63,0025	59,25
peso [g]	1100,2	1065,6	1182,2	1115,98
RTI medio [kN/cm ²]	0,029			
CTI medio [kN/cm ²]	2,862			

Tab. D.18 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela Control Warm 105°C 50 colpi

	HMA_115_75_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	3,664	3,593	4,040	3,766
Deformazione verticale [mm]	1,646	1,612	1,806	1,688
Trazione [mm]	0,728	0,724	0,732	0,728
RTI [kN/cm ²]	0,037	0,037	0,040	0,038
CTI [kN/cm ²]	3,546	3,648	3,575	3,590
h media [mm]	62,7775	61,0925	62,575	62,15
peso [g]	1201,5	1167,3	1213	1193,93
RTI medio [kN/cm ²]	0,038			
CTI medio [kN/cm ²]	3,590			

Tab. D.19 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela Control Warm 105°C 75 colpi

	HMA_115_100_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	3,622	3,229	3,133	3,328
Deformazione verticale [mm]	1,604	1,112	0,919	1,212
Trazione [mm]	0,626	0,665	0,604	0,632
RTI [kN/cm ²]	0,036	0,034	0,032	0,034
CTI [kN/cm ²]	3,571	4,821	5,497	4,442
h media [mm]	63,24	60,23	62,02	61,83
peso [g]	1234,1	1177,94	1203,63	1205,22
RTI medio [kN/cm ²]	0,034			
CTI medio [kN/cm ²]	4,583			

Tab. D.20 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela Control Warm 105°C 100 colpi

	WMA 115 25 1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,428	2,566	2,307	2,434
Deformazione verticale [mm]	2,301	1,954	2,565	2,273
Trazione [mm]	1,121	1,210	0,912	1,081
RTI [kN/cm ²]	0,026	0,026	0,024	0,025
CTI [kN/cm ²]	1,774	2,143	1,499	1,777
h media [mm]	59,465	61,29	60,02	60,26
peso [g]	1084,0	1105,0	1089,5	1092,86
RTI medio [kN/cm ²]	0,025			
CTI medio [kN/cm ²]	1,798			

Tab. D.21 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela WMA 105°C 25 colpi

	WMA_115_50_1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	2,989	3,084	3,137	3,070
Deformazione verticale [mm]	1,638	1,637	1,745	1,673
Trazione [mm]	0,544	0,785	0,682	0,670
RTI [kN/cm ²]	0,033	0,033	0,035	0,033
CTI [kN/cm ²]	3,178	3,201	3,174	3,183
h media [mm]	57,42	58,8575	56,6425	57,64
peso [g]	1090,9	1128,4	1084,9	1101,38
RTI medio [kN/cm ²]	0,033			
CTI medio [kN/cm ²]	3,184			

Tab. D.22 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela WMA 105°C 50 colpi

	WMA 115 75 1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	3,893	3,795	3,587	3,758
Deformazione verticale [mm]	1,594	2,666	1,697	1,986
Trazione [mm]	0,686	0,568	0,732	0,662
RTI [kN/cm ²]	0,039	0,037	0,035	0,037
CTI [kN/cm ²]	3,913	2,221	3,295	2,978
h media [mm]	62,41	64,08	64,1575	63,55
peso [g]	1208,8	1224,5	1217,3	1216,87
RTI medio [kN/cm ²]	0,037			
CTI medio [kN/cm ²]	3,102			

Tab. D.23 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela WMA 105°C 75 colpi

	WMA 115 100 1h			
	1	2	3	4
Carico verticale [kN]	3,992	3,401	3,255	3,549
Deformazione verticale [mm]	1,207	1,511	1,718	1,479
Trazione [mm]	0,956	0,620	0,576	0,717
RTI [kN/cm²]	0,039	0,035	0,034	0,036
CTI [kN/cm²]	5,204	3,723	3,141	3,907
h media [mm]	63,55	60,47	60,31	61,44
peso [g]	1230,37	1175,82	1170,57	1192,25
RTI medio [kN/cm²]	0,036			
CTI medio [kN/cm²]	3,994			

Tab. D.24 – Risultati prova di trazione indiretta
Miscela WMA 105°C 100 colpi