

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale

Dottorato di Ricerca in

Scienze e Ingegneria dell'Ambiente, delle Costruzioni e dell'Energia

CICLO

XXXI

**SISTEMI DI RINFORZO FRM: ANALISI SPERIMENTALE DEL
COMPORTAMENTO STRUTTURALE, VALUTAZIONE DELLA DURABILITÀ
E SVILUPPO DI MATRICI INNOVATIVE**

Settore Scientifico Disciplinare: Scienza e Tecnologia dei Materiali (ING-IND/22)

Coordinatore:

Ch.mo Prof. Salvatore Critelli

Firma

Supervisore:

Ch.mo Prof. Sebastiano Candamano

Firma

Supervisore:

Ing. Piero De Fazio

Firma

Supervisore:

Ch.mo Prof. Luciano Ombres

Firma

Dottorando: Dott. Antonio Iorfida

Firma

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 STATO DELL'ARTE	
1.1 Premessa	4
1.2 Sistemi di rinforzo a matrice inorganica FRCM	4
1.3 Comportamento meccanico dei sistemi FRCM	7
1.4 Durabilità	16
1.5 Confinamento di colonne in muratura	19
1.6 Matrici inorganiche innovative	25
CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI	
2.1 Premessa	34
2.2 Materiali	35
2.2.1 Rinforzi	35
2.2.2 Matrici	43
2.2.3 Muratura	55
2.3 Metodi	55
2.3.1 Test di trazione	55
2.3.2 Direct shear bond test	58
2.3.3 Test di degrado termico	61
2.3.4 Test di compressione su colonne confinate	63

CAPITOLO 3 RISULTATI E DISCUSSIONI	
3.1 Premessa	69
3.2 Analisi del comportamento meccanico del sistema di rinforzo B-FRCM	69
3.2.1 Test di trazione	69
3.2.2 Direct shear bond test	75
3.2.3 Modellazione analitica del legame di interfaccia τ -s	84
3.3 Analisi del degrado per effetto di trattamenti termici	90
3.3.1 Degrado del sistema B-FRCM	101
3.3.2 Degrado del sistema S-FRCM	104
3.3.3 Degrado del sistema C-FRCM	106
3.3.4 Confronti	108
3.4 Valutazione dell'efficacia del confinamento di colonne in muratura mediante sistemi di rinforzo FRCM	110
3.4.1 Colonna non confinata	111
3.4.2 Confinamento con sistema S-FRCM	112
3.4.2.1 Carico centrato	112
3.4.2.2 Carico eccentrico	116
3.4.3 Confinamento con sistema B-FRCM	119
3.4.4 Confinamento con sistema PBO-FRCM	122
3.4.5 Confronti	124
3.5 Matrici inorganiche innovative	129
3.5.1 Individuazione del mix design	130
3.5.2 Comportamento meccanico e ritiro	131
3.5.3 Comportamento meccanico di compositi fibrorinforzati	136
CONCLUSIONI	140
BIBLIOGRAFIA	144

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Comportamento telescopico di un fascio di fibre immerso in una matrice cementizia [2]	8
Figura 1.2 – Test setup: a) grip a cuneo, b) grip a forcilla [12]	11
Figura 1.3 – Idealizzazione curve di risposta a trazione a) tessuto di rinforzo, b) comportamento trilineare, c) comportamento bilineare [12]	12
Figura 1.4 – Configurazioni test setup prove di aderenza: a) ‘single lap’, b) ‘double lap’ supporto singolo, c) ‘double lap’ supporto doppio [27]	13
Figura 1.5 – Classificazione modalità di rottura prove di aderenza a taglio [27]	14
Figura 1.6 – Curve di risposta tensione-scorrimento associate alle modalità di rottura [27]	15
Figura 1.7 – Sezione circolare confinata con fasciatura discontinua [47]	20
Figura 1.8 – Rappresentazione schematica dell’effetto della dilatazione in colonne a sezione quadrata e circolare confinate con FRP [48]	21
Figura 1.9 – Confinamento di sezioni rettangolari con fasciatura esterna [47]	22
Figura 1.10 – Classificazione materiali attivati alcalinamente (AAM)	26
Figura 2.1 – Rete in fibra di basalto: a bassa densità B2 (a), ad alta densità B4 (b)	36
Figura 2.2 – B4, prove di trazione: test setup (a), diagrammi tensione-deformazione (b)	37
Figura 2.3 – B2, prove di trazione: test setup (a); diagrammi tensione-deformazione (b)	38
Figura 2.4 – Tessuto in fibra di acciaio	39

Figura 2.5 – Acciaio, prove di trazione: test setup (a), diagrammi tensione-deformazione (b)	40
.....	
Figura 2.6 – Rete in fibra di carbonio	40
Figura 2.7 – Carbonio, prove di trazione: test setup (a); diagrammi tensione-deformazione (b)	41
.....	
Figura 2.8 – Rete in fibra di PBO	42
Figura 2.9 – PBO, prove di trazione: test setup (a); diagrammi tensione-deformazione (b)..	42
Figura 2.10 – Metacaolino: analisi diffrattometrica	46
Figura 2.11 – Metacaolino: micrografia SEM	46
Figura 2.12 – Loppa d’altoforno: distribuzione granulometrica.....	47
Figura 2.13 – Loppa d’altoforno: micrografie SEM a diversi ingrandimenti.....	47
Figura 2.14 – Loppa d’altoforno: analisi diffrattometrica	48
Figura 2.15 – Fly ash: micrografie SEM a diversi ingrandimenti	48
Figura 2.16 – Fly ash: analisi diffrattometrica.....	49
Figura 2.17 – Cenere da biomassa: composizione media in termini di ossidi.....	51
Figura 2.18 – Cenere da biomassa: micrografie SEM a diversi ingrandimenti.....	51
Figura 2.19 – Aggregati: curve granulometriche.....	53
Figura 2.20 – Soluzione attivatrice in agitazione su agitatore meccanico.....	54
Figura 2.21 – Mattone: curve tensione deformazione (a) campione a rottura (b).....	55
Figura 2.22 – Fasi di formatura dei pannelli.....	56
Figura 2.23 – Operazioni di taglio mediante water-jet.....	57
Figura 2.24 – Test di trazione: setup di prova (dimensioni in mm).....	57
Figura 2.25 – Test di taglio diretto: realizzazione supporti in muratura.....	58
Figura 2.26 - Test di taglio diretto: preparazione dei campioni.....	59
Figura 2.27 – Test di taglio diretto: setup di prova (dimensioni in mm).....	59
Figura 2.28 – Test di taglio diretto: setup di prova vista frontale (a) e posteriore (b)....	60
Figura 2.29 – Preparazione dei campioni del sistema di rinforzo in acciaio.....	61
Figura 2.30 – Trattamento termico: preparazione del campione.....	62
Figura 2.31 – Geometria dei campioni (dimensioni in mm): (a) non confinato (b) confinato	63
.....	
Figura 2.32 – Realizzazione colonne.....	64
Figura 2.33 – Confinamento con rinforzo in fibra di basalto.....	65

Figura 2.34 – Preparazione del rinforzo in acciaio	65
Figura 2.35 – Configurazioni di prova: (a) non confinato, (b) 1 layer, (c-d) multilayer	66
Figura 2.36 – 1 layer in S-FRCM (a) overlap continuo (OC), (b) overlap alternato (OA)	66
Figura 2.37 – Configurazioni multilayer in S-FRCM (a) secondo strato, (b) terzo strato	67
Figura 2.38 – Disposizione in pianta LVDT longitudinali	68
Figura 2.39 – Disposizione LVDT laterali	68
Figura 2.40 – Test di compressione: setup di prova	68
Figura 3.1 – Fasi della prova: (a) prima fessurazione, (b,c) fase di fessurazione, (d) termine della fessurazione e (e) rottura.....	70
Figura 3.2 – Rottura dei fasci.....	71
Figura 3.3 – Identificazione delle diverse fasi della risposta [86]	71
Figura 3.4 – B4-FRCM: curve di risposta tensione-deformazione a trazione	72
Figura 3.5 – Fascio di ordito privato dei fasci trasversali (a), immagine SEM all'intersezione tra i fasci di ordito e trama (b).....	74
Figura 3.6 – Immagini SEM a differenti ingrandimenti della sezione trasversale di un fascio immerso in matrice.....	74
Figura 3.7 – Fasi della prova e modalità di rottura campione DS B4 400-43-1	76
Figura 3.8 – B4-FRCM: scorrimento all'estremità caricata $L_b = 400$ mm	76
Figura 3.9 – B4-FRCM: modalità di rottura $L_b = 100$ mm (a), 200 mm (b), 300 (c)	77
Figura 3.10 – B4-FRCM: curve di risposta per lunghezza di aderenza.....	79
Figura 3.11 – B4-FRCM: curve di risposta rappresentative per lunghezza di aderenza	80
Figura 3.12 – B4-FRCM: carico di rottura per lunghezza di aderenza.....	80
Figura 3.13 – B4-FRCM: curve di risposta geometria a 6 fasci $L_b=300$ mm.....	81
Figura 3.14 – Curve di risposta del campione DS B4 300 51 3	82
Figura 3.15 – B2-FRCM: curve di risposta $L_b=300$ mm	83
Figura 3.16 – B2-FRCM: modalità di rottura	83
Figura 3.17 – Curve di risposta del campione DS B2 300 51 4	84
Figura 3.18 – Disposizione estensimetri.....	85
Figura 3.19 – Curve sperimentali deformazione-scorrimento globale	87
Figura 3.20 – Confronto curve ϵ -s analitiche e sperimentali	89

Figura 3.21 – Legame di aderenza τ - s all'interfaccia	90
Figura 3.22 – Matrice GCF: variazione della resistenza a flessione con la temperatura	91
Figura 3.23 – Matrice GCF: variazione della resistenza a compressione con la temperatura	92
Figura 3.24 – Matrice GCF: variazione della perdita in massa con la temperatura	92
Figura 3.25 – Matrice GCF: campioni a seguito del trattamento termico	93
Figura 3.26 – Matrice GCF: analisi diffrattometrica	93
Figura 3.27 – Matrice GCF: analisi termogravimetrica, TG(-) DTG(-)	94
Figura 3.28 – Matrice GCF: analisi termogravimetrica, TG(-) DSC(-)	94
Figura 3.29 – Matrice M25: curve carico-spostamento a flessione	95
Figura 3.30 – Matrice M25: variazione della resistenza a flessione con la temperatura	96
Figura 3.31 – Matrice M25: variazione della resistenza a compressione con la temperatura	96
Figura 3.32 – Matrice M25: variazione della perdita in massa con la temperatura.....	96
Figura 3.33 – Matrice M25: campioni a seguito del trattamento termico	97
Figura 3.34 – Matrice M25: analisi diffrattometrica	98
Figura 3.35 – Matrice M25: analisi termogravimetrica, TG(-) DTG(-)	98
Figura 3.36 – Matrice M25: analisi termogravimetrica, TG(-) DSC(-).....	99
Figura 3.37 – Profili di temperatura a 100 °C (a), 300 °C (b) e 500 °C (c).....	100
Figura 3.38 – B-FRCM: post trattamento a 500 °C (B2) (a), a 300 °C (b) e a 500 °C (c) (B4)	101
Figura 3.39 – B2-FRCM: curve di risposta post trattamento termico	102
Figura 3.40 – B2-FRCM: modalità di rottura a 300°C (a) e a 500°C (b).....	102
Figura 3.41 – B4-FRCM: curve di risposta post trattamento termico	103
Figura 3.42 – B4-FRCM: modalità di rottura a 100 °C (a), 300 °C (b) e a 500 °C (c)	103
Figura 3.43 – S-FRCM: delaminazione all'interfaccia post trattamento a 500 °C.....	104
Figura 3.44 – S-FRCM: curve di risposta post trattamento termico.....	104
Figura 3.45 – S-FRCM: modalità di crisi 20 °C (a), 100 °C (b), 300 °C (c) e 500 °C (d)	105
Figura 3.46 – C-FRCM: campioni post trattamento a 300°C (a) e a 500°C (b).....	106
Figura 3.47 – C-FRCM: curve di risposta post trattamento termico	106

Figura 3.48 – C-FRCM: campione trattato a 100 °C: prima della prova (a), scorrimento telescopico dei fasci a rottura (b)	107
Figura 3.49 – C-FRCM: modalità di rottura telescopica post-trattamento a 500 °C	108
Figura 3.50 – Confronto delle tensioni di picco al variare della temperatura	108
Figura 3.51 – Confronto delle curve di risposta a 300°C	109
Figura 3.52 – Confronto delle curve di risposta a 500 °C	109
Figura 3.53 – Colonna non confinata a rottura	111
Figura 3.54 – CS1LOC: (a) modalità di crisi, (b) particolare del nucleo interno	113
Figura 3.55 – CS1LOA: modalità di crisi	113
Figura 3.56 – CS2L: modalità di crisi	114
Figura 3.57 – CS3L: (a) modalità di crisi, (b) particolare della rottura	114
Figura 3.58 – Curve di risposta confinamento con S-FRCM – carico centrato	115
Figura 3.59 – CS1LOA25: (a) modalità di crisi, (b) particolare della rottura	117
Figura 3.60 – CS1LOA50: (a) modalità di crisi, (b) particolare della rottura	117
Figura 3.61 – Curve di risposta confinamento con S-FRCM – carico eccentrico	118
Figura 3.62 – CB1L: (a) fase della prova, (b) modalità di crisi e (c) rottura dei fasci .	119
Figura 3.63 – CB2L: (a) fase della prova, (b) modalità di crisi e (c) particolare a rottura	120
Figura 3.64 – Curve di risposta confinamento con B-FRCM	121
Figura 3.65 – CP1L: (a) modalità di crisi, (b) particolare della rottura	122
Figura 3.66 – CP2L: (a) modalità di crisi, (b) particolare microlesioni	123
Figura 3.67 – Curve di risposta confinamento con PBO-FRCM	123
Figura 3.68 – Curve di risposta con 1 layer di rinforzo	125
Figura 3.69 – Curve di risposta con 2 layer di rinforzo	127
Figura 3.70 – Curve di risposta con 3 layer di rinforzo	127
Figura 3.71 – Deformazioni assiali di picco e ultime	128
Figura 3.72 – Incrementi di resistenza e capacità deformativa rispetto	128
Figura 3.73 – Indice di duttilità	129
Figura 3.74 – Deformazione da ritiro S5K-S7M2A1	131
Figura 3.75 – Confronto deformazione da ritiro, sistemi: S5K-S7F2A1 e S5.1K-S7F2A1	132

Figura 3.76 – Resistenze a flessione e a compressione, sistemi: S5K-S7F2A1 e S5.1K-S7F2A1	133
Figura 3.77 – Confronto deformazione da ritiro, sistemi: S2K-S7F2A1 e S2.1K-S7F2A1	133
Figura 3.78 – Confronto deformazione da ritiro, sistemi: S5K-S7F2A1, S5.1K-S7F2A1, S2K-S7F2A1 e S2.1K-S7F2A1	134
Figura 3.79 – Resistenze a flessione e a compressione, sistemi: S2K-S7F2A1 e S2.1K-S7F2A1	134
Figura 3.80 – Confronto resistenze meccaniche, sistemi: S2K-S7F2A1 e S5K-S7F2A1	135
Figura 3.81 – Confronto resistenze meccaniche, sistemi: S2.1K-S7F2A1 e S5.1K-S7F2A1	135
Figura 3.82 – Confronto deformazione da ritiro, sistemi: S2K-S7F2A1 e S2K-S7F2A1-C2	136
Figura 3.83 – Resistenze a flessione e a compressione, sistemi: S2K-S7F2A1 e S2K-S7F2A1-C2	136
Figura 3.84 – Test di trazione: quadro fessurativo	137
Figura 3.85 – Test di trazione: curve di risposta.....	137
Figura 3.86 – Test di aderenza a taglio diretto: lesione all’interfaccia rinforzo-matrice (a), modalità di crisi (b)	139
Figura 3.87 – Test di aderenza a taglio diretto: curve di risposta.....	139

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 – Caratteristiche tecniche della rete in fibra di basalto ad alta densità (B4) (Kerakoll).....	37
Tabella 2.2 – Caratteristiche tecniche della rete in fibra di basalto a bassa densità (B2) (Kerakoll).....	38
Tabella 2.3 – Caratteristiche tecniche del rinforzo in acciaio (Kerakoll).....	39
Tabella 2.4 – Caratteristiche tecniche della rete in fibra di carbonio (Ruredil).....	41
Tabella 2.5 – Caratteristiche tecniche della rete in fibra di PBO (Ruredil).....	42
Tabella 2.6 – Prestazioni meccaniche delle matrici dei sistemi di rinforzo.....	43
Tabella 2.7 – Valori medi di resistenza delle matrici	44
Tabella 2.8 – Metacaolino: caratteristiche fisiche	44
Tabella 2.9 – Metacaolino: composizione chimica	45
Tabella 2.10 – Fly ash: composizione campione a	49
Tabella 2.11 – Fly ash: composizione campione b	50
Tabella 2.12 – Fly ash: composizione campione c	50
Tabella 2.13 – Proporzioni soluzioni	51
Tabella 2.14 – pH soluzioni a diversi tempi	52
Tabella 2.15 – Trisilicato di sodio: composizione	52
Tabella 2.16 – Aggregati: analisi chimica e mineralogica.....	53
Tabella 3.1 – B4-FRCM: parametri meccanici a trazione	73
Tabella 3.2 – B4-FRCM: risultati dei test di aderenza a taglio diretto (geometria a 5 fasci)	78

Tabella 3.3 – B4-FRCM: risultati dei test di aderenza a taglio diretto (geometria a 6 fasci)	81
Tabella 3.4 – B2-FRCM: risultati dei test di aderenza a taglio diretto	83
Tabella 3.5 – Risultati modellazione e confronti	89
Tabella 3.6 – Matrice GCF: variazioni di resistenza e in massa.....	95
Tabella 3.7 – Matrice M25: variazioni di resistenza e in massa.....	99
Tabella 3.8 – Confinamento con S-FRCM: parametri meccanici (carico centrato)	116
Tabella 3.9 – Confinamento con S-FRCM: parametri meccanici (carico eccentrico)..	118
Tabella 3.10 – Confinamento con B-FRCM: parametri meccanici	121
Tabella 3.11 – Confinamento con PBO-FRCM: parametri meccanici	124
Tabella 3.12 – Confronto parametri meccanici per 1 layer di rinforzo	126
Tabella 3.13 – Mix design	131
Tabella 3.14 – Rapporti soluzioni attivatrici	131
Tabella 3.15 – Test di trazione: parametri meccanici	138
Tabella 3.16 – Test di aderenza a taglio diretto: risultati.....	139

INTRODUZIONE

Il rinforzo di una struttura si rende necessario in occasione di alcune circostanze, quali:

- il danneggiamento dovuto a un carico eccezionale (sisma, incendio, impatto, ecc.);
- la necessità di aumento dei carichi permanenti o accidentali, per adeguamento normativo o cambio di destinazione d'uso della struttura;
- l'adeguamento o miglioramento sismico;
- il degrado dei materiali, in particolare corrosione delle armature metalliche nelle strutture di calcestruzzo armato;
- gli errori di progettazione o di esecuzione (tipicamente, errata disposizione delle armature o scarsa qualità del conglomerato in strutture di calcestruzzo armato);
- prolungare la vita utile.

Le tecniche tradizionali utilizzate a tal fine consistono nell'incamiciatura in calcestruzzo armato, nell'utilizzo di piastre o lamine in acciaio incollate sulle superfici esterne (beton plaquè).

Le tecniche più innovative prevedono, invece l'utilizzo di compositi fibrorinforzati. Esse offrono indubbi vantaggi legati all'efficacia degli interventi, alla rapidità di esecuzione, al peso e ingombro contenuti.

Recentemente, ai sistemi di rinforzo in FRP (Fiber Reinforced Polymers), si sono affiancati sistemi basati sull'impiego di matrici di tipo inorganico, generalmente a base minerale, cementizia o di calce. Questi sistemi in letteratura sono identificati come FRCM

(Fabric Reinforced Cementitious Matrix) o TRM (Textile Reinforced Mortar) e nel caso di impiego di tessuti in acciaio come SRG (Steel Reinforced Grout).

I motivi che hanno favorito il rapido diffondersi dei sistemi a matrice inorganica, rispetto agli FRP, sono: una maggiore resistenza alle alte temperature, possibilità di applicazione su superfici umide, la permeabilità al vapore, reversibilità e compatibilità con il supporto presentando modalità di rottura sicuramente più duttili. Essi inoltre consentono il rispetto dei criteri di conservazione richiesti nelle applicazioni per il patrimonio culturale. In questo contesto inoltre, la possibilità di utilizzare matrici alternative a quelle disponibili risulta di notevole interesse.

Il rinforzo è rappresentato da reti, generalmente di tipo bidirezionale, in fibra di vetro, carbonio, PBO e tessuti unidirezionali in acciaio.

Negli ultimi anni l'utilizzo di reti in fibra di basalto per la realizzazione di questi compositi è risultato efficiente nell'ambito del rinforzo strutturale ed ecocompatibile. Tali fibre, infatti, sono ottenute per fusione e filatura continua di rocce basaltiche. Inoltre il loro processo di produzione richiede un dispendio energetico minore di quello necessario per la produzione della fibra di vetro e non necessita di additivi. Ciò rende la fibra di basalto meno costosa delle fibre di vetro o di carbonio. Le fibre in basalto offrono una maggiore stabilità chimica e termica alle alte temperature rispetto alle fibre di vetro, pur esibendo proprietà meccaniche analoghe.

Interventi recenti con FRCM hanno interessato edifici danneggiati dal terremoto in Abruzzo ed Emilia.

A dispetto però della loro ampia diffusione, esistono a tutt'oggi informazioni non esaustive sulle problematiche di interfaccia su substrato in muratura, loro caratterizzazione meccanica, durabilità e applicazioni per il confinamento di colonne murarie. Pertanto tali materiali compositi necessitano di accurate indagini scientifiche.

Il presente lavoro è stato finalizzato a fornire un ulteriore contributo per la caratterizzazione dei compositi FRCM e in particolare alla valutazione delle prestazioni che questi possono offrire quando realizzati con rinforzi fibrosi di origine naturale, quali la fibra di basalto.

Nel primo capitolo viene riportata una descrizione generale dei materiali compositi a matrice inorganica, fornendo una panoramica sullo stato dell'arte relativo al comportamento meccanico e alle diverse modalità e approcci di caratterizzazione.

Vengono descritte le problematiche relative alla durabilità di tali compositi in particolare in relazione all'eventuale decadimento delle prestazioni meccaniche in seguito all'esposizione alle alte temperature. Viene inoltre fornita una panoramica sullo stato dell'arte su applicazioni di tali compositi per il confinamento di colonne in muratura. Vengono infine analizzati gli aspetti e le potenzialità offerte dall'impiego di matrici inorganiche innovative appartenenti alla famiglia dei materiali attivati alcalinamente.

Nel secondo capitolo viene fornita una descrizione e caratterizzazione dei materiali impiegati, le procedure di realizzazione dei campioni e i setup di prova per le diverse attività sperimentali.

Nel terzo capitolo sono riportati e discussi i risultati delle campagne sperimentali atte a valutare:

- il comportamento meccanico di sistemi di rinforzo in fibra di basalto a bassa (B2-FRCM) e alta (B4-FRCM) densità;
- il degrado delle prestazioni meccaniche di sistemi di rinforzo in fibra di basalto (B-FRCM) di cui sopra, in fibra di carbonio (C-FRCM) e in fibra di acciaio (S-FRCM) per effetto di trattamenti termici ad alta temperatura;
- l'efficacia del confinamento di colonne in muratura mediante sistemi di rinforzo B4-FRCM, S-FRCM e PBO-FRCM;
- la possibilità di sviluppare una matrice inorganica innovativa appartenente alla famiglia dei leganti attivati alcalinamente e valutarne l'impiego in sistemi fibrorinforzati.

Capitolo 1

STATO DELL'ARTE

1.1 PREMESSA

Nel presente capitolo sarà fornita una descrizione generale dei materiali compositi a matrice inorganica (FRCM) e una panoramica sullo stato dell'arte relativo al comportamento meccanico e alle diverse modalità di caratterizzazione e approcci riscontrati in letteratura. Verranno quindi analizzati in dettaglio le problematiche relative alla determinazione del legame costitutivo a trazione e di aderenza al supporto.

Saranno inoltre descritte le problematiche relative alla durabilità di tali compositi in particolare in relazione all'eventuale decadimento delle prestazioni meccaniche in seguito all'esposizione alle alte temperature.

Verrà altresì fornita una panoramica sull'attività sperimentale per la valutazione dell'efficacia di tali compositi in applicazioni di confinamento di colonne in muratura.

Infine, verranno analizzati gli aspetti e le potenzialità offerte dall'impiego di matrici inorganiche innovative appartenenti alla famiglia dei materiali attivati alcalinamente.

1.2 SISTEMI DI RINFORZO A MATRICE INORGANICA FRCM

Recentemente nell'ambito del rinforzo strutturale, ai sistemi di rinforzo FRP, si sono affiancati sistemi basati sull'impiego di matrici inorganiche, generalmente a base minerale, cementizia o di calce e fibre continue. Tali sistemi, in letteratura sono identificati come FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix). Tuttavia dalla combinazione dei tipi di leganti minerali e dei rinforzi fibrosi si possono ottenere tipologie diverse di sistemi di rinforzo. Di seguito sono riportati i sistemi rilevati in letteratura, che si differenziano per la tipologia del rinforzo fibroso e le tecniche di applicazione [1].

Si distinguono:

- *Textile Reinforced Concrete, TRC*: sviluppato nel 1998 da una collaborazione tra le università di Dresda e Aquisgrana, consiste in una matrice cementizia a grana fine ad alta resistenza, rinforzata da un tessuto in fibre. Solitamente vengono impiegate fibre di vetro, ma in alcuni casi sono state utilizzate anche fibre di carbonio, eventualmente in combinazione con le prime. L'orientazione delle fibre del tessuto può seguire fino a quattro diverse direzioni [2] [3] [4] [5];
- *Textile Reinforced Mortars, TRM*: sviluppato in Grecia, è analogo al sistema TRC. Vengono impiegati tessuti in fibra di carbonio e la matrice è costituita da una malta a grana fine additivata con polimeri [6] [7];
- *Fiber Reinforced Cement, FRC*: sviluppato negli Stati Uniti, si differenzia dai sistemi TRC e TRM per la tecnica di realizzazione e applicazione. Il sistema è costituito da un foglio o tessuto fibroso, tagliato nelle dimensioni desiderate, il quale viene impregnato attraverso l'immersione completa in una boiaccia, che costituisce la matrice. Terminata la fase di impregnazione, il tessuto viene estratto e applicato immediatamente alla superficie dell'elemento da rinforzare [8];
- *Mineral Based Composite, MBC*: è un sistema sviluppato in Svezia presso l'Università di Luleå, si differenzia dai precedenti in quanto il rinforzo è costituito da una rete in CFRP. Il rinforzo viene applicato all'elemento strutturale previa preparazione della superficie e applicazione di uno strato di primer. La rete in CFRP viene posizionata su un primo strato di malta, cui segue la stesura di un secondo strato [9];
- *Fabric Reinforced Cementitious Matrix, FRCM*: composito fibrorinforzato a matrice inorganica il cui rinforzo è costituito da una rete a fasci di fibre non impregnate, o eventualmente rivestite con polimeri, allo scopo di migliorarne le caratteristiche di durabilità e la maneggevolezza. Non si tratta in ogni caso di un tessuto impregnato da resine, come nel caso del sistema MBC.

L'acronimo FRCM, come già accennato, descrive un sistema composito costituito da una matrice inorganica con un rinforzo a rete (tessuto termosaldato a maglia larga) in fibra, carbonio o PBO, o tessuti unidirezionali a media e bassa densità in fibra d'acciaio, con tecnica di impregnazione in situ dry lay up.

La prima è tipicamente una malta a base di leganti inorganici stabilizzata a reazione idraulica con un basso dosaggio di polimeri in percentuale inferiore al 5% sul peso del cemento. Nel caso di rinforzo di murature, in particolare di carattere storico e monumentale, le matrici impiegate sono spesso a base di calce.

La composizione della matrice influisce in maniera significativa sulle caratteristiche di adesione al supporto, migliorate dall'impiego di polimeri organici, i quali oltre a garantire la corretta lavorabilità, tempo di presa e adeguate proprietà meccaniche, incrementano la bagnabilità superficiale del supporto stesso a opera dell'impasto. Le caratteristiche della matrice influiscono anche sulla capacità di adesione al rinforzo fibroso, per cui è necessario verificare la compatibilità chimica dei due componenti. Per alcune tipologie di rinforzo, quali le fibre di PBO ad esempio, l'elevata compatibilità chimica con i composti inorganici derivanti dall'idratazione del cemento permette un trasferimento dei carichi dalla matrice al rinforzo stesso mediante meccanismi anche di tipo chimico oltre che, come in genere avviene, meccanico.

Si riassumono di seguito i vantaggi offerti dalla tecnologia FRCM:

- buona resistenza alle elevate temperature e resistenza al fuoco: manifesta una reazione analoga a quella del supporto, ovvero risulta incombustibile, al contrario delle resine, per le quali superata la temperatura di transizione vetrosa (60°- 80°C) si ha in generale un decadimento delle proprietà meccaniche, se non adeguatamente protette.
- permeabilità al vapore acqueo: comparabile con quella della muratura che permette uno scambio termo-igrometrico con l'esterno e quindi una certa traspirabilità dell'elemento rinforzato, molto importante nelle strutture in muratura e maggiormente negli edifici di interesse storico-artistico;
- elevata resistenza ai cicli di gelo e disgelo;
- applicabilità su supporti umidi: anziché inficiare le caratteristiche del composito, come nei sistemi FRP dove le resine non reticolano in presenza dell'acqua, l'umidità favorisce l'adesione al supporto;
- durabilità anche con elevata umidità ambientale di esercizio: la matrice inorganica non modifica le sue caratteristiche di adesione al supporto; la resina epossidica, al contrario, degrada per esposizione prolungata all'umidità dell'ambiente;

- atossicità: la matrice non è un prodotto nocivo per la salute degli operatori né per l'ambiente, quindi può essere applicata senza l'uso di protezioni speciali e può essere smaltita senza particolari precauzioni;
- semplicità di manipolazione e applicazione: la matrice è un premiscelato, deve essere mescolata solo con acqua e non richiede l'impiego di manodopera altamente specializzata per la messa in opera, rende più facile l'applicazione su superfici scabre e irregolari senza necessità di una preventiva rasatura;
- elevata affidabilità del sistema di rinforzo anche dopo il raggiungimento del carico di rottura: il comportamento duttile post-fessurazione evita il distacco del sistema FRCM dalla struttura rinforzata;
- lavorabilità in un ampio range di temperatura: tra +5 °C e +40 °C non esistono sostanziali differenze nei tempi di lavorabilità, presa e indurimento;
- reversibilità del sistema: il meccanismo di adesione della matrice inorganica consente l'eventuale rimozione del rinforzo.

Sono state eseguite ormai molte applicazioni sul campo le quali si sono rivelate molto interessanti e promettenti, dimostrando che la tecnologia FRCM risulta affidabile. Nonostante ciò studi di ricerca, sia teorici che sperimentali, come molti articoli scientifici degli ultimi anni lo confermano, sono orientati a caratterizzare completamente il sistema FRCM e quantificare la sua efficacia meccanica in relazione a parametri quali il tipo e la disposizione delle fibre, tipo di matrice cementizia, e le condizioni del substrato.

1.3 COMPORTAMENTO MECCANICO DEI SISTEMI FRCM

Il comportamento meccanico di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica, risulta molto complesso a causa della disomogeneità e dell'anisotropia del materiale. Anche i meccanismi di crisi sono molto complessi e ciò rende difficile sia la previsione delle tensioni di crisi, sia l'interpretazione dei risultati sperimentali. In letteratura infatti si evidenzia che le rotture generalmente riscontrate con sistemi FRCM avvengono per scorrimento del tessuto all'interno della matrice, all'interfaccia rinforzo-matrice e all'interfaccia matrice-supporto [10], [11].

Gli FRCM sono caratterizzati da tessuti a rete che possono essere parzialmente impregnati o non con resine. In presenza di rete non rivestita la malta è in grado di impregnare parzialmente le fibre esterne del singolo fascio. La presenza di coating protettivo,

applicato all'esterno del fascio, ne impedisce invece l'impregnazione da parte della malta. In entrambi i casi, comunque, è presente un nucleo di fibre non impregnate.

Risulta pertanto importante investigare il legame di aderenza tra le fibre esterne del fascio e la malta e anche il legame di attrito tra le fibre che costituiscono il nucleo del fascio.

Si possono distinguere quindi due modalità di scorrimenti: tra le fibre e la matrice o nel nucleo di fibre non impregnate. Il primo è generalmente imputabile a una scarsa impregnazione da parte della matrice, delaminazione o incompatibilità chimica e può essere localizzato nelle aree fessurate. Il secondo invece è dovuto al comportamento telescopico del fascio di fibre.

La diversità del meccanismo di scorrimento è dovuto al fatto che le fibre esterne, sia in diretto contatto con la matrice che in contatto indiretto per la presenza di coating protettivo, sono saldamente legate alla matrice, mentre le fibre interne del nucleo non lo sono e dunque possono scorrere più facilmente a causa di un minore attrito tra le fibre [12].

Le modalità di crisi delle fibre nella porzione esterna del fascio avviene per rottura dovuta al superamento della resistenza a trazione, mentre le fibre interne scorrono per effetto della forza di pull out. Il meccanismo è combinato nelle regioni intermedie (Figura 1.1). Il comportamento telescopico che si determina è influenzato pertanto dalla penetrabilità della matrice, la geometria del tessuto di rinforzo, la presenza di eventuali coating e le forze di attrito tra le fibre di ogni fascio.

La perdita di efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo maggiore dissipazione energetica, manifestando un comportamento pseudo-duttile.

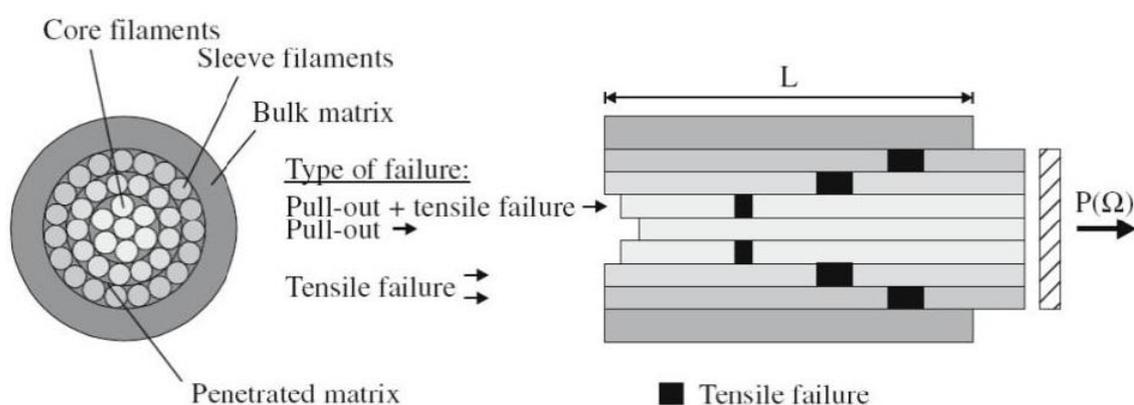


Figura 1.1 – Comportamento telescopico di un fascio di fibre immerso in una matrice cementizia [2]

Studi sperimentali hanno evidenziato che l'impiego di coating polimerici sul tessuto possano aumentare la forza di adesione tra tessuto e matrice [13] determinando quindi un incremento della resistenza ultima del composito fibrorinforzato.

Nonostante l'ampia diffusione di questi materiali, non esistono a oggi criteri condivisi per la qualificazione, e numerosi sono gli studi di ricerca in merito agli aspetti che ne influenzano le caratteristiche meccaniche, come è emerso dallo studio bibliografico. Infatti le problematiche sopra esposte, associate a un gran numero di combinazioni di tessuti di rinforzo e matrici attualmente disponibili, determinano una notevole difficoltà nell'individuare in modo consistente e univoco il legame costitutivo a trazione e di aderenza al supporto, parametri fondamentali per la progettazione e la verifica degli interventi.

Solo recentemente sono state pubblicate negli Stati Uniti delle linee guida per l'accettazione [14], progettazione e realizzazione [15] dei sistemi FRCM. Un contributo rilevante è stato anche fornito dalla commissione tecnica Rilem 232-TDT con delle raccomandazioni relative alla caratterizzazione a trazione di questi compositi [16]. Di recente, diversi gruppi di ricerca sono stati inoltre coinvolti in una campagna sperimentale organizzata dalla commissione tecnica Rilem 250-CSM [17] [18] [19] [20] [21] al fine di indagare il comportamento meccanico a trazione e di aderenza al supporto e proporre delle linee guida [22]. In letteratura è stata proposta inoltre una procedura che combina i risultati ottenuti da tali prove per l'ottenimento dei parametri meccanici [23].

Al fine di valutare sperimentalmente il comportamento meccanico a trazione di materiali compositi a matrice inorganica e trovare una procedura affidabile, efficiente e relativamente semplice da implementare, vari sono gli approcci proposti in letteratura [12] [24] [25]. Le diverse procedure differiscono per: modalità di applicazione del carico, geometria, dimensione e realizzazione dei campioni, setup di prova [23] [26] nonché modalità di acquisizione delle deformazioni. Analogamente differenti approcci vengono proposti per l'esecuzione della prova di aderenza a taglio diretto con setup di tipo "single lap" o "double lap" e relative modalità di acquisizioni degli scorrimenti [27].

La prova di trazione risulta essenziale al fine di ottenere i parametri meccanici necessari per quelle applicazioni strutturali dove la resistenza del tessuto di rinforzo può essere completamente sfruttata (quali ad esempio il confinamento di colonne o pilastri).

La prova di taglio diretto invece è necessaria al fine di indagare l'efficacia del sistema di rinforzo per quelle applicazioni nelle quali il carico è trasferito per taglio (quali il rinforzo di pannelli murari nei riguardi di carichi nel piano e fuori piano, il rinforzo a flessione e taglio di travi in c.a.) [28].

Studi condotti inizialmente sui TRC e successivamente sugli FRCM, evidenziano che il comportamento a trazione viene generalmente idealizzato con un legame tensione-deformazione di tipo trilineare. Il primo tratto rappresenta la fase non fessurata del composito con caratteristiche dipendenti fortemente dalle proprietà meccaniche della matrice. Il secondo tratto invece identifica la fase di formazione delle fessure, la cui estensione e pendenza risultano dipendenti principalmente dal legame tra il tessuto e la matrice, nonché dal volume di fibre interessate per il trasferimento del carico di trazione [29]. Il terzo tratto infine corrisponde alla fase di completa fessurazione fino a rottura del materiale determinata o dal raggiungimento della resistenza a trazione del tessuto o dallo slittamento del tessuto dalla matrice o da una combinazione di entrambi i fenomeni [12]. Quest'ultima fase è influenzata da numerosi fattori tra i quali le condizioni al contorno del setup di prova e le caratteristiche del tessuto, in particolare la percentuale volumetrica di rinforzo, la geometria e la natura dello stesso.

Nel caso si determini un andamento di tipo trilineare, la pendenza dell'ultimo tratto risulta analoga al modulo di elasticità a trazione del solo tessuto di rinforzo. In alcune condizioni si identifica un andamento parallelo al solo tessuto ma a livelli tensionali maggiori. Ciò è attribuibile all'effetto della matrice tesa non fessurata tra lesioni successive (tension-stiffening).

Nel caso invece in cui si rilevi lo scorrimento delle fibre, il comportamento diventa bilineare, con il terzo tratto della curva σ - ε indistinguibile dal secondo.

In applicazioni su elementi inflessi in calcestruzzo armato la resistenza del tessuto di rinforzo non viene mai raggiunta poiché la principale modalità di rottura rilevata del sistema FRCM in opera è dovuta allo scorrimento del tessuto all'interno della matrice o alla delaminazione del rinforzo dal substrato [30] [31].

È stata proposta una distinzione tra due modalità di applicazione del carico [26]: "soft clamping" e "rigid load application".

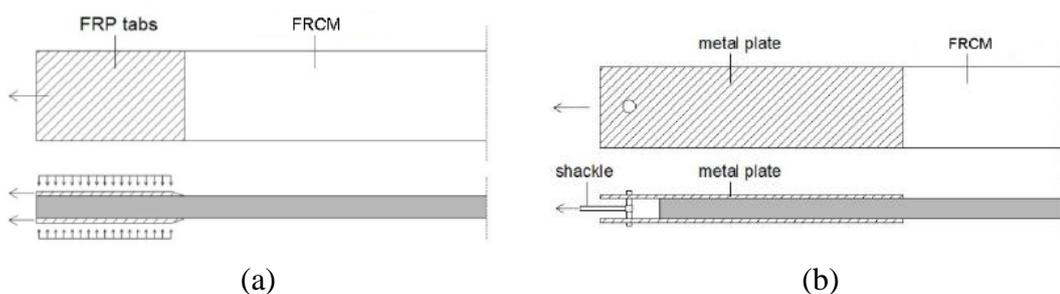


Figura 1.2 – Test setup: a) grip a cuneo, b) grip a forcella [12]

Nel “soft clamping” (Figura 1.2a) il carico viene trasmesso per attrito applicando alle estremità del campione tensioni di compressione normali al piano del campione stesso. Secondo tale modalità le due estremità del campione vengono vincolate direttamente al telaio di prova per mezzo di una pressione laterale, “grip a cuneo”, simulando un supporto di tipo incastro. In questo caso opportuni tab in FRP vengono collocati sulle estremità del campione per consentire una omogenea distribuzione degli sforzi ed evitare danni locali alla matrice [11] [24] [23]. In alcuni studi, in particolare, il vincolo inferiore consente eventuali rotazioni torsionali del campione [11]. In un altro studio [32] il rinforzo alle estremità del campione è fornito da ulteriori strati di tessuto collocati all’interno della matrice per promuovere la rottura del campione nella parte centrale.

I test con aggancio a cuneo hanno evidenziato un andamento della curva di risposta di tipo tri-lineare che approssima, a rottura, il comportamento della fibra, dimostrazione di come l’aggrappo eserciti una forza di vincolo anche alla rete di rinforzo impedendo alla stessa di scorrere (Figura 1.3b).

Nel “rigid load application” (Figura 1.2b) invece il meccanismo di trasferimento del carico tra il campione e l’aggrappo avviene per tensioni di aderenza e taglio.

I criteri di accettazione recentemente proposti dall’ICC-ES (AC434) [14] raccomandano tale applicazione del carico realizzando un “grip a forcella”. Il sistema indicato si compone di due piastre incollate a ogni estremità del campione, connesse tra loro da un perno attraverso opportuni fori realizzati al di fuori della lunghezza del campione, e collocato all’interno del telaio di prova attraverso un giunto a forcella. Questa configurazione offre più gradi di libertà, simulando un supporto di tipo a doppia cerniera. Test con aggancio a forcella [33] [34], in accordo con AC434 [14], mostrano un comportamento di tipo bi-lineare, caratterizzato da modalità di rottura governate dallo

scorrimento delle fibre. Tale comportamento risulta approssimare quello delle applicazioni reali dove lo scorrimento relativo delle fibre non può essere impedito (Figura 1.3c).

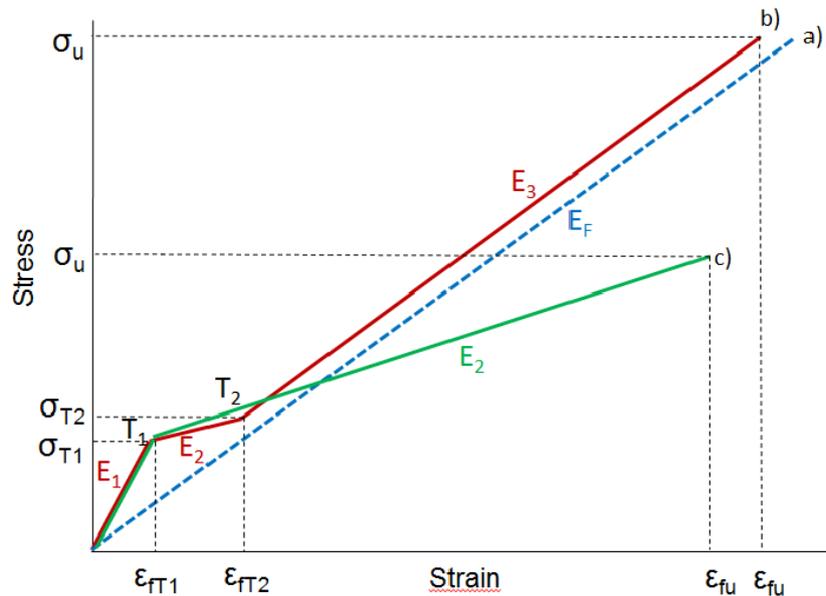


Figura 1.3 – Idealizzazione curve di risposta a trazione a) tessuto di rinforzo, b) comportamento trilineare, c) comportamento bilineare [12]

Per quanto riguarda la geometria del campione, la forma prismatica risulta essere preferibile, semplice da implementare e realizzare in luogo di forme sagomate, con sezione maggiorata in corrispondenza dell'aggrappo, o del tipo a osso di cane. Queste infatti richiederebbero casseri costosi ed appositamente realizzati nonché particolare cura durante il confezionamento dei campioni.

La forma prismatica è ottenuta generalmente da pannelli di dimensioni maggiori, inoltre è più idonea per garantire la geometria, a maglia rettangolare del tessuto di rinforzo.

Per quanto concerne l'acquisizione delle deformazioni, in letteratura differenti strumentazioni risultano essere state adoperate. Gli estensimetri locali risultano inadeguati, nel caso del comportamento multifessurativo esibito da questi materiali. Gli estensimetri di tipo laser o a clip risultano affidabili anche nel rilevare disallineamenti del campione dovuti a inflessioni fuori piano [12], talvolta influenzati dalla formazione di lesioni fuori base di lettura [24]. Si annoverano ancora i trasduttori di spostamento

induttivi e infine la correlazione digitale delle immagini. Quest'ultima in particolare è in grado di fornire una panoramica completa dell'evoluzione del quadro fessurativo [35], tuttavia sensibile alla perdita di messa a fuoco dovuta ad eventuali curvature del campione [33].

Per quanto riguarda l'aderenza al supporto l'efficacia del rinforzo è determinata dalle modalità di rottura esibite. Infatti, a differenza degli FRP in cui il distacco avviene per delaminazione coesiva all'interno del substrato [36], i compositi FRCM mostrano diverse modalità di rottura che possono coinvolgere l'interfaccia rinforzo-matrice o l'interfaccia matrice-substrato.

Numerosi studi sono stati dedicati a quest'argomento con lo scopo di valutare l'effetto della morfologia del tessuto, dell'eventuale rivestimento con coating o preimpregnazione delle fibre, delle caratteristiche meccaniche della matrice e delle proprietà del substrato (resistenza e rigidità, nonché scabrezza delle superfici) sull'aderenza e le modalità di rottura, al fine di identificare metodologie di prova adeguate.

Prove di distacco dal supporto vengono eseguite su campioni di rinforzo applicato su un substrato (muratura, pietrame, calcestruzzo, ecc.) seguendo una configurazione di tipo 'single lap' o 'double lap'.

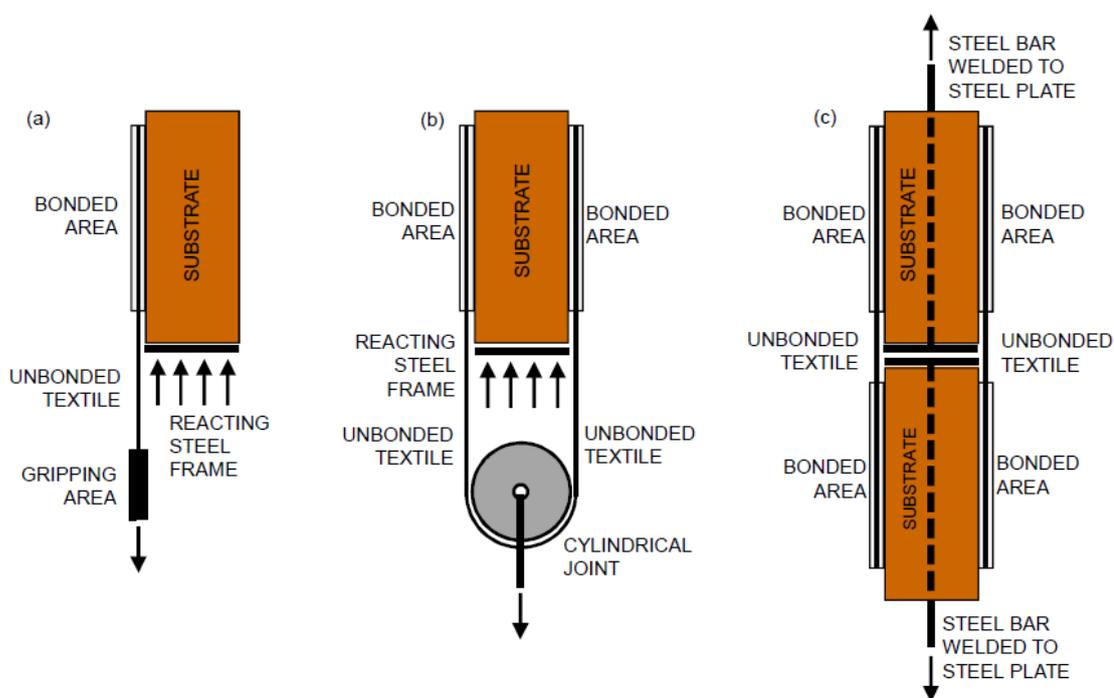


Figura 1.4 – Configurazioni test setup prove di aderenza: a) 'single lap', b) 'double lap' supporto singolo, c) 'double lap' supporto doppio [27]

Nel primo caso il rinforzo è applicato su una faccia del substrato (Figura 1.4a) il quale viene vincolato durante la prova mediante un telaio di contrasto. Il carico è applicato a una porzione del tessuto di rinforzo che viene lasciato libero oltre la lunghezza di aderenza. Tale configurazione risulta semplice da implementare rispetto alla modalità ‘double lap’ in quanto garantisce una identificazione univoca del carico. Tuttavia, è necessario prestare particolare attenzione all’allineamento del campione per assicurare tensioni di taglio puro lungo il composito e prevenire tensioni normali parassite.

Nella configurazione ‘double lap’ il rinforzo viene applicato su due facce del medesimo supporto, come indicato in Figura 1.4b, e il tessuto viene messo in trazione mediante un cilindro. In alternativa è inoltre possibile utilizzare una configurazione che prevede l’applicazione del tessuto di rinforzo sulle facce di due supporti adiacenti (Figura 1.4c) [37]. In questo caso il carico è trasmesso al rinforzo mediante due piastre di acciaio collegate da barre fissate all’interno dei supporti e vincolate alla macchina di prova. Con questa configurazione risulta difficile misurare gli scorrimenti all’estremità caricata del composito, la simmetria non assicura eguale distribuzione del carico sulle due facce.

La prova fornisce il carico e lo spostamento relativo (scorrimento) tra il rinforzo e il substrato all’estremo caricato dell’area di aderenza. Lo scorrimento viene generalmente ottenuto mediante trasduttori di spostamento o integrando le deformazioni acquisite lungo l’area di aderenza mediante estensimetri.

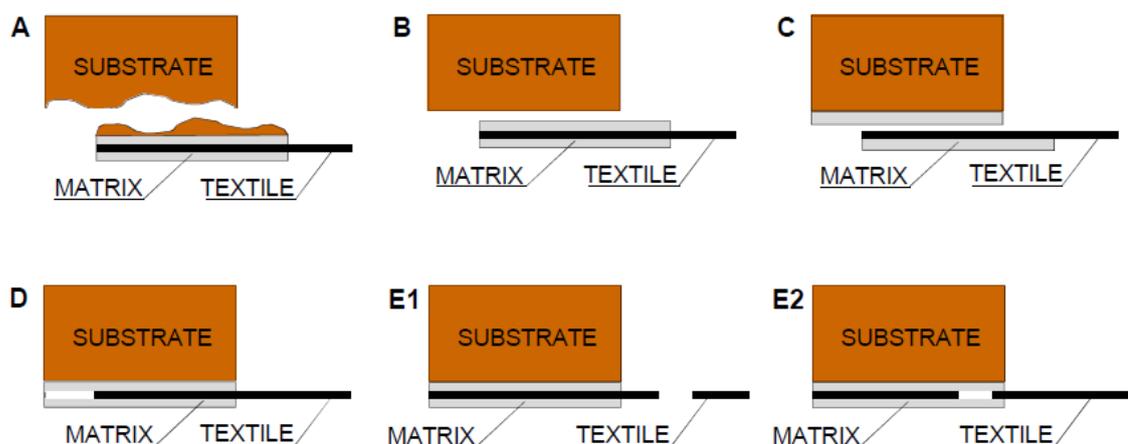


Figura 1.5 – Classificazione modalità di rottura prove di aderenza a taglio [27]

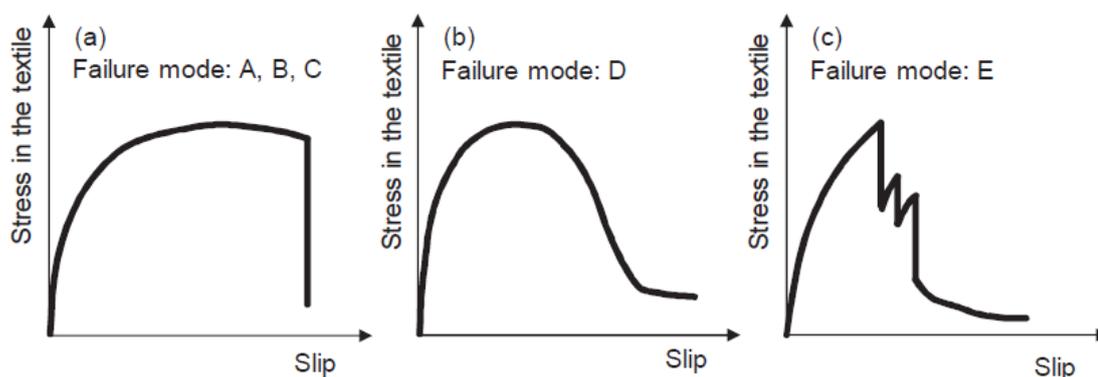


Figura 1.6 – Curve di risposta tensione-scorrimento associate alle modalità di rottura [27]

In funzione delle proprietà del substrato, della resistenza a taglio della matrice, della resistenza a trazione del tessuto e dell'aderenza/interlocking tra tessuto e matrice, possono verificarsi diverse modalità di rottura, quali: delaminazione con rottura coesiva nel substrato Figura 1.5A, delaminazione all'interfaccia rinforzo-substrato o all'interfaccia tessuto-matrice Figura 1.5B e C, scorrimento del tessuto all'interno della matrice Figura 1.5D e infine la rottura del tessuto Figura 1.5E [27].

La prima modalità di rottura, che in genere si manifesta negli FRP, può verificarsi con l'impiego di una matrice con elevate prestazioni su un supporto con scadenti caratteristiche meccaniche. L'uso di una matrice rigida può anche causare concentrazioni locali di tensioni e favorire questo tipo di distacco che, una volta attivato, tende a propagarsi improvvisamente sull'intera superficie di aderenza [19]. Il distacco all'interfaccia matrice-substrato può inoltre avvenire su superfici relativamente lisce. È stato infatti osservato su substrati di mattoni di argilla [28]. L'irregolarità dei supporti in muratura generalmente inibisce questo tipo di rottura, ma potrebbe comunque essere causato da una errata messa in opera del sistema. È quindi opportuno garantire sia una preparazione adeguata del substrato (rimozione della polvere, bagnatura, miglioramento della rugosità della superficie, consolidamento, se consentito quando si tratta di beni culturali) e condizioni di stagionatura adeguate (umidità sufficiente) [10]. Il distacco all'interfaccia rinforzo-matrice può verificarsi con tessuti densi, inibendo una corretta penetrazione della matrice attraverso i vuoti [28]. Una sufficiente apertura delle maglie della rete e matrici con un intervallo granulometrico contenuto dovrebbero essere utilizzate per evitare o ritardare questa rottura. Le modalità di rottura A, B e C (Figura

1.5) determinano generalmente una curva di tensione-scorrimento con un ramo pseudo orizzontale seguito da una rottura fragile per distacco (Figura 1.6a).

Il comportamento riportato in (Figura 1.6b) mostra una variazione graduale del carico post-picco associata alla progressiva perdita di attrito per scorrimento del tessuto all'interno della matrice, riscontrato in sistemi in carbonio [18] e PBO [17].

Infine, i sistemi costituiti da rinforzo a maglie larghe e con minori caratteristiche meccaniche (ad es. basalto [20] o vetro [21]) possono esibire modalità di rottura per cedimento del tessuto. Il corretto dimensionamento del rinforzo dovrebbe precludere questo tipo di rottura. La curva di risposta tensione-scorrimento presenta variazioni di carico repentine alla rottura dei fasci se si verifica fuori dall'area di aderenza, o una riduzione improvvisa e un'ulteriore diminuzione di carico se si verifica una rottura telescopica all'interno della matrice, seguito dal pull out del tessuto stesso (Figura 1.6c).

1.4 DURABILITÀ

Gli studi sulla durabilità dei materiali compositi in campo edile ricoprono oggi un ruolo particolarmente importante. A dispetto dell'ampia diffusione determinata dalle ottime prestazioni meccaniche dimostrate, gli aspetti legati all'eventuale decadimento delle prestazioni nel tempo non risultano ancora approfonditi.

I sistemi di rinforzo FRCM, come accennato, presentano numerosi vantaggi rispetto ai sistemi di rinforzo a matrice organica FRP. Tra questi, si annoverano le potenzialità offerte nei riguardi dell'esposizione ai cicli gelo-disgelo, la non combustibilità e la non infiammabilità.

Le proprietà offerte dall'impiego di matrici inorganiche, rende infatti i sistemi FRCM meno suscettibili alle variazioni della temperatura, soprattutto in condizioni particolarmente severe, risultando maggiormente convenienti rispetto ai sistemi FRP [38].

L'aderenza tra il rinforzo e la matrice inorganica è un aspetto fondamentale nei compositi FRCM ed è fortemente influenzato dalla capacità della matrice inorganica di impregnare completamente i fasci di fibre. È inoltre influenzato dal legame che si instaura all'interno del singolo fascio tra i filamenti esterni, inglobati dalla matrice, e quelli interni; tra le fibre esterne del fascio e la matrice nel caso di rinforzi non impregnati e tra coating di rivestimento e matrice nel caso di rinforzi apprettati.

La durabilità dei sistemi compositi FRCM dipende dalle proprietà di interfaccia e dalle caratteristiche di ciascuno dei componenti. La matrice, il rinforzo, la natura e morfologia dello stesso, l'interfaccia rinforzo-matrice nonché l'interfaccia matrice-supporto rappresentano i diversi elementi che occorre valutare in relazione all'esposizione e alle condizioni di esercizio di tali compositi in opera.

I sistemi FRCM dovrebbero superare alcuni dei problemi che si riscontrano tipicamente nell'impiego di sistemi FRP per le migliori prestazioni offerte dalla matrice inorganica alle alte temperature. Tuttavia è stato condotto un numero limitato di studi, sia analitici che sperimentali, per valutare il comportamento meccanico alle elevate temperature nonché le prestazioni residue a seguito dell'esposizione in particolare nell'impiego su supporto in muratura.

Uno studio sperimentale sull'effetto dell'alta temperatura sulle prestazioni meccaniche di elementi in calcestruzzo confinati è stato condotto da Trapko [39]. Il confinamento è stato realizzato mediante sistema di rinforzo in FRP con fibre di carbonio (CFRP) e un sistema di rinforzo FRCM con fibre di PBO (PBO-FRCM). Lo studio ha riguardato la valutazione della resistenza residua a compressione, a seguito di trattamenti termici condotti a temperature comprese tra i 40 °C e gli 80 °C. Nel caso di rinforzo in FRP valori della temperatura maggiori di 40 °C determinano una riduzione del 20% della capacità di carico. La deformazione a compressione dei campioni testati a 80 °C è risultata approssimativamente la metà dei campioni testati a 40 °C e 60 °C. È stata osservata una riduzione della capacità di carico tra il 5 e 10% per gli elementi confinati con FRCM dopo un aumento della temperatura da 40 °C a 80 °C. Inoltre, è stata osservata una diminuzione della deformazione a compressione di circa l'11% all'aumentare della temperatura da 40 °C a 60 °C e 80 °C.

Le prestazioni dei sistemi FRCM ad alta temperatura possono variare quando i tessuti sono pre-impregnati con resine polimeriche. Studi sperimentali hanno dimostrato che l'uso di un rivestimento polimerico applicato su tessuto in carbonio può aumentare significativamente le prestazioni meccaniche dei sistemi FRCM sia a trazione che di aderenza per taglio su supporti in muratura o calcestruzzo [13]. Tuttavia, quando il rinforzo è rivestito con un polimero, le prestazioni in termini di aderenza tra le fibre e la matrice sono fortemente influenzate dalla temperatura [40].

Recenti studi di Silva e al. [41] sono stati effettuati in merito all'effetto della temperatura sull'interfaccia tra un filato in fibra di carbonio e una matrice cementizia. Lo studio è stato condotto tramite test di pull-out a seguito dell'esposizione alle temperature comprese tra 100 °C e 600 °C. I risultati hanno mostrato che a seguito dell'esposizione fino a 150 °C, i campioni con filati rivestiti da polimeri hanno esibito un significativo aumento della forza di estrazione dalla matrice. Ciò dovuto a un meccanismo di interlocking del polimero tra i filamenti e la matrice determinato a seguito del trattamento e successivo raffreddamento. In merito ai fasci non impregnati è stato riscontrato che fino a 200 °C, non si rilevano significative variazioni sul carico di pull-out.

Un'indagine sperimentale è stata condotta da Michels et al [42] in merito alla diminuzione della resistenza a trazione dei filati di fibra di carbonio apprettati, a seguito dell'esposizione ad alte temperature fino a 1000 °C. L'indagine sperimentale è stata condotta a temperatura ambiente sui campioni a seguito del trattamento termico a temperatura costante di 300 °C, 500 °C, 700 °C e 1000 °C in un forno tubolare per 30 minuti. È stato osservato che un'esposizione a 300 °C per 30 minuti non ha comportato variazioni delle proprietà meccaniche del rinforzo analizzato. Tuttavia, un ulteriore aumento della temperatura ha determinato riduzioni significative delle prestazioni del materiale a 500 °C e nessuna resistenza residua a 700 °C. Sono stati inoltre effettuati dei test su una lastra di cemento armato rinforzata con uno strato di calcestruzzo proiettato comprendente una rete come rinforzo a trazione. Sotto un carico di esercizio costante, la lastra è stata esposta al fuoco con un aumento di temperatura secondo una curva standard europea (ETK) per due ore. La lastra è stata in grado di sopportare il carico applicato sotto l'esposizione al fuoco, durante il quale il rinforzo ha raggiunto una temperatura di circa 440 °C.

In Colombo et al. [43] vengono riportati i risultati di una campagna sperimentale condotta su un composito a matrice cementizia fibrorinforzato con due layer di rete in fibra di vetro AR. Lo studio ha consentito di valutare la resistenza residua del materiale a valle di trattamenti termici eseguiti alle temperature di 200 °C, 400 °C e 600°C. I risultati mostrano che l'esposizione a 200 °C non determina un effetto significativo sulla resistenza a trazione. L'esposizione a temperature superiori invece (400 °C e 600 °C) determina una variazione del comportamento meccanico esibendo una rottura di tipo fragile.

Un recente studio condotto da Ombres [44] ha riguardato l'analisi del legame di aderenza su substrato in calcestruzzo di un sistema FRCM con rinforzo in fibra di PBO a seguito di trattamenti termici alle temperature di 50 °C e 100 °C. I test di aderenza per taglio diretto sono stati effettuati variando inoltre la lunghezza di aderenza e il numero di strati di rinforzo. I campioni sono stati trattati termicamente per un intervallo di tempo pari a 8 ore a temperatura costante. Dai risultati ottenuti sono state riscontrate significative variazioni del carico di rottura e della rigidità del sistema di rinforzo per i campioni trattati a 100 °C.

Recenti studi sono stati condotti da Donnini e al. [45] al fine di valutare il comportamento meccanico di sistemi FRCM sotto l'esposizione di alte temperature. I sistemi testati sono stati realizzati utilizzando come rinforzo una rete in fibra di carbonio allo stato secco (non apprettata) e una altamente impregnata con una resina organica. Il programma sperimentale ha riguardato prove di trazione uniassiale e "double-shear bond test" su substrato in muratura a temperature comprese tra 20 °C e 120 °C. I risultati sperimentali hanno mostrato una diminuzione nelle proprietà meccaniche del composito quando testate in temperatura (causate dal deterioramento del rivestimento di resina sull'interfaccia fibra-matrice) mentre le prestazioni residue dopo l'esposizione a temperature elevate rimangono invariate. Non sono state invece riscontrate variazioni del comportamento fino a 120 °C per il sistema FRCM rinforzato con rete non impregnata.

È stata inoltre eseguita di recente da Maroudas e Papanicolau [46] una campagna sperimentale per la valutazione delle proprietà meccaniche residue per un sistema TRM con rinforzo a rete non apprettato in fibra di vetro AR. I test di aderenza per taglio diretto sul supporto in muratura sono stati condotti a seguito dell'esposizione alle temperature di 100 °C, 200 °C e 300 °C. I valori di carico ottenuti risultano rispettivamente pari al 65%, 60% e 50% del carico esibito a temperatura ambiente. È stata riscontrata inoltre una variazione della modalità di rottura alle diverse temperature: una rottura per scorrimento delle fibre all'interno della matrice e rottura delle fibre o distacco dal supporto del composito alle più alte temperature.

1.5 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA

Il confinamento di elementi strutturali di muratura, sottoposti a prevalente sollecitazione di sforzo assiale, si attua attraverso la predisposizione di un sistema di elementi resistenti

a trazione che, contrastando la dilatazione trasversale dell'elemento strutturale, conferiscono alla muratura un benefico stato di compressione triassiale. Tali interventi sono praticati sia per la riparazione di elementi danneggiati o deteriorati, sia per il rinforzo di elementi integri in vista di un adeguamento statico o sismico della struttura di appartenenza [47].

Il confinamento può essere realizzato con tessuti (FRP/FRCM), lamine e barre (altrimenti dette tiranti) di FRP.

Le barre sono disposte all'interno della colonna per realizzare cuciture armate opportunamente diffuse. Queste vengono realizzate alloggiando barre di FRP in fori praticati secondo due direzioni ortogonali della sezione trasversale. L'insieme delle barre disposte alla stessa quota secondo ognuna di tali direzioni forma uno "strato".

Le cuciture sono in grado di contrastare le dilatazioni trasversali che nascono nell'elemento strutturale in conseguenza della compressione assiale. Le barre di cucitura sono rese solidali alla muratura mediante saturazione del foro con materiale adesivo o per mezzo di sistemi di contrasto alle estremità.

I tessuti sono applicati sulla superficie dell'elemento come fasciatura esterna continua o discontinua con le fibre disposte trasversalmente all'asse della colonna.

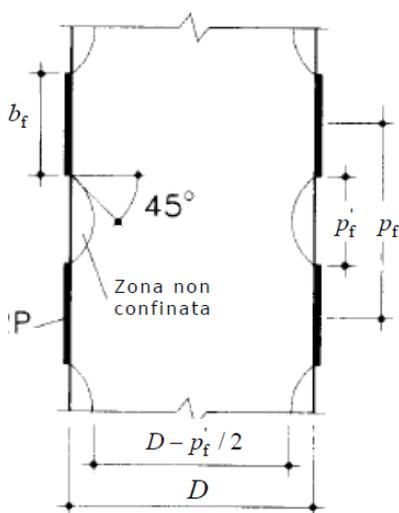


Figura 1.7 – Sezione circolare confinata con fasciatura discontinua [47]

L'aumento della resistenza a compressione e della deformazione ultima dipendono strettamente dalla rigidità del sistema di rinforzo e dalla geometria della sezione trasversale dell'elemento. Solo un'aliquota della pressione di confinamento esercitata

dalla fasciatura contribuisce all'incremento della portanza dell'elemento. Tale aliquota dipende dalla forma della sezione e dalle modalità con cui viene realizzato il confinamento (continuo o discontinuo). Nel caso di fasciatura discontinua (Figura 1.7), infatti, le strisce disposte con un certo interasse posseggono una minore efficacia in termini di confinamento, per effetto della diffusione delle tensioni tra due strisce consecutive. Si generano pertanto delle zone che non beneficiano dell'effetto di confinamento.

Relativamente alla geometria della sezione, l'intervento risulta particolarmente efficace su elementi a sezione circolare soggetti a compressione centrata o con piccola eccentricità. In questo caso, infatti, il rinforzo induce sulla superficie di contatto una pressione laterale di confinamento uniforme che si oppone alla espansione radiale dell'elemento. Nelle sezioni di forma quadrata o rettangolare il confinamento produce incrementi marginali della resistenza a compressione (Figura 1.8).

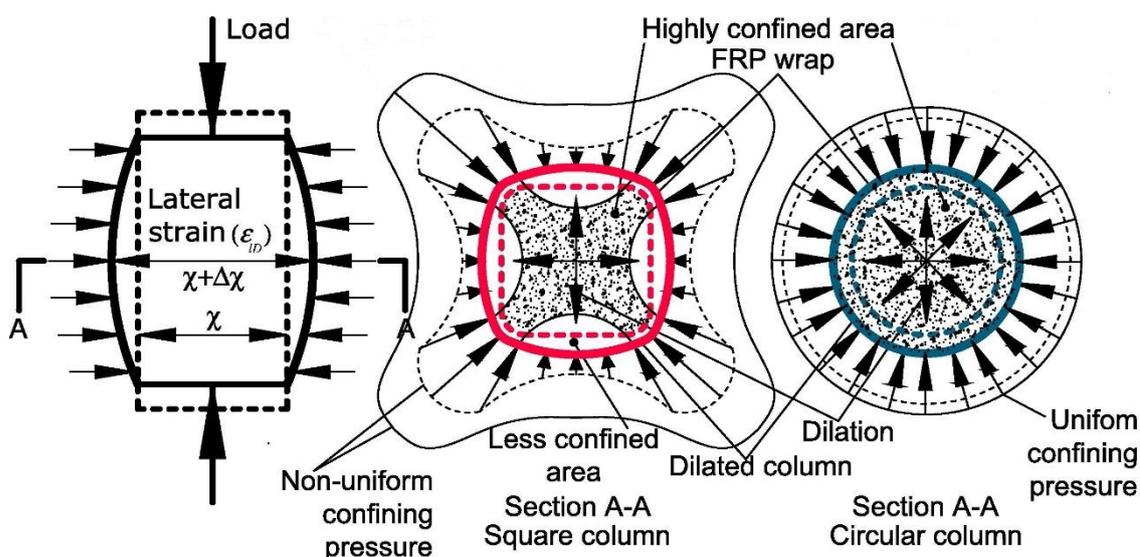


Figura 1.8 – Rappresentazione schematica dell'effetto della dilatazione in colonne a sezione quadrata e circolare confinate con FRP [48]

Infatti, l'area confinata è solo un'aliquota di quella effettiva come conseguenza della nascita di un effetto arco che dipende strettamente dal raggio di arrotondamento degli spigoli (Figura 1.9). Per setti verticali aventi rapporto tra i due lati maggiore di 2, l'effetto del confinamento è sostanzialmente nullo, così come per elementi aventi una delle due dimensioni maggiore di 90 cm. Nel caso di elementi pressoinflessi soggetti a sforzo

normale con grande eccentricità il confinamento produce un modesto incremento della resistenza dell'elemento, tuttavia ne aumenta la duttilità [49].

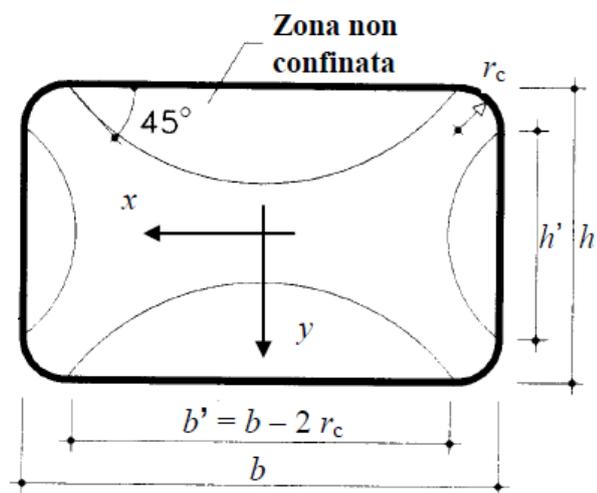


Figura 1.9 – Confinamento di sezioni rettangolari con fasciatura esterna [47]

Diversi studi si riscontrano in letteratura sull'impiego di FRP nel confinamento di colonne in muratura, tra i quali si ricorda quello di Krevaikas e Triantafillou [50] i quali hanno valutato, tra i primi, il comportamento di 42 colonne in muratura confinate con FRP e l'aumento di resistenza esibito fornendo alcune formulazioni per la progettazione. Analogamente, in Corradi et al. [51] sono state effettuate prove a compressione su colonne in muratura confinate con FRP, fornendo inoltre un modello per il calcolo della pressione di confinamento, dei coefficienti di efficienza e dell'aumento di resistenza. In Aiello et al. [52] sono state testate colonne in muratura costruite con blocchi di argilla o calcare confinate con FRP o barre interne. Sulla base dei risultati ottenuti, è stata proposta una calibrazione di alcune formule di progettazione per ottenere l'incremento di resistenza dovuto al confinamento, le quali sono state inoltre incluse nelle Istruzioni CNR-DT 200 R1/2013 [47] per l'uso degli FRP nell'ingegneria civile.

In Di Ludovico et al. [53] sono stati presentati i risultati di un'indagine sperimentale sul comportamento a compressione di colonne in tufo o in muratura confinate con FRP in fibra di carbonio o vetro proponendo nuove formulazioni per determinare la resistenza ultima di colonne confinate.

In Borri et al. [54] vengono presentati i risultati di prove di compressione uniassiale su colonne in mattoni pieni a sezione quadrata e ottagonale al fine di studiare l'efficacia del

confinamento attraverso l'utilizzo di nastri unidirezionali in acciaio SRP in configurazione continua e discontinua.

In Faella et al. [55] [56] sono state testate 54 colonne in muratura di pietra naturale e mattoni a carico di compressione uniassiale al fine di valutare gli effetti di tre diversi tipi di sistemi compositi adottati per il confinamento. Sono state osservate diverse modalità di rottura con valori del rapporto tra la resistenza della colonna confinata e quella non confinata compreso tra 1.22 e 3.94. È stata quindi proposta una formulazione generale di progetto calibrata sulla base di un ampio database sperimentale, quest'ultimo ottenuto dall'unione dei risultati dei test presentati dagli autori con altri dati disponibili in letteratura.

In Micelli et al. [57] è stato valutato il comportamento meccanico di colonne circolari in muratura confinate con sistemi FRP in fibra di vetro e basalto e in Micelli et al. [58] è stato effettuato uno studio su colonne in muratura a grandezza naturale rinforzate con diversi sistemi compositi. Sono stati utilizzati diversi schemi di prova per effettuare prove di compressione su colonne prismatiche a sezione quadrata.

In questo campo, anche i sistemi di rinforzo a matrice inorganica si sono rivelati potenzialmente idonei per il rafforzamento delle strutture in muratura [59], soprattutto quando risulta necessario intervenire per preservare il patrimonio culturale. Inoltre, l'utilizzo di una fibra naturale, come il basalto, per via delle proprietà meccaniche esibite risulta particolarmente promettente nel rinforzo di colonne in muratura.

In Di Ludovico et al. [60] sono stati effettuati dei test a compressione su provini cilindrici in calcestruzzo confinati con BRM effettuando un confronto con campioni confinati con GFRP. I risultati hanno mostrato come con il sistema BRM si siano ottenuti un considerevole aumento sia della resistenza che della duttilità, inducendo modalità di rottura meno fragili di quelle ottenute con confinamento in GFRP.

Il numero di sperimentazioni inerenti la tecnologia di rinforzo FRCM su strutture in muratura risulta ancora esiguo. Uno studio introduttivo sull'impiego della fibra di basalto è stato condotto da Yilmaz et al. [61]. Sono state testate colonne in muratura di mattoni rinforzate con sola malta o con due strati di rete in fibra di basalto mediante tecnologia FRCM. I risultati hanno mostrato che i campioni di riferimento e i campioni confinati con sola malta hanno mostrato un comportamento simile, mentre il sistema BFRCM ha fornito un leggero incremento di resistenza a compressione incrementando

considerevolmente la dissipazione di energia delle colonne in muratura. Uno studio analogo è stato condotto da Mezrea et al. [62] nel quale è stata valutata inoltre l'influenza della diversa sezione trasversale (quadrata o rettangolare) sul comportamento meccanico. Il sistema di rinforzo ha mostrato un comportamento più efficace sulle colonne a sezione quadrata.

Uno studio preliminare sul comportamento a compressione di colonne in muratura confinate con sistema FRCM e rinforzo a rete in fibra di carbonio è stato effettuato da Ombres [63]. Sono stati valutati gli effetti del numero degli strati di rinforzo e dell'eccentricità di carico. Sono stati riscontrati incrementi di resistenza sia per carico centrato che eccentrico, nonché incrementi sia dello spostamento assiale che laterale all'aumentare del grado di confinamento.

In uno studio recente, condotto da Fossetti e Minafò [64], è stata effettuata un'analisi comparativa tra le prestazioni offerte da diverse tecnologie per il confinamento di colonne in muratura di mattoni. Nello specifico è stato valutato il confinamento mediante tecnologia FRP con tessuto unidirezionale in fibra di carbonio, tecnologia FRCM con rete in fibra di basalto e cerchiatura mediante fili in acciaio collocati in corrispondenza dei letti di malta. È stato valutato inoltre l'effetto sul comportamento meccanico della resistenza della malta di allettamento. Dai risultati ottenuti si è riscontrato che tutti i sistemi adottati si sono dimostrati particolarmente efficaci sui campioni realizzati con malta di allettamento dalle minori prestazioni meccaniche. Il sistema in FRP ha fornito il più elevato incremento di resistenza esibendo tuttavia una modalità di rottura di tipo fragile. Il sistema in FRCM ha fornito buoni incrementi della resistenza su campioni con la malta di allettamento scadente, trascurabili invece nel caso di campioni con malta dalle migliori qualità. Sono stati inoltre riscontrati incrementi della resistenza e della duttilità nell'impiego di cerchiatura con fili in acciaio.

In Maddaloni et al. [65] è stata valutata l'efficacia del confinamento di colonne in muratura a grandezza naturale, a sezione quadrata, realizzate con blocchi di calcare e malta idraulica. Il confinamento è stato realizzato con tecnologia FRCM con reti in fibra di vetro e fibra di basalto, valutando ulteriormente l'impiego di barre interne in GFRP nel caso di confinamento con rete in fibra di vetro. Nell'impiego di barre interne non è stato osservato un incremento delle proprietà meccaniche. In tutti i casi, il confronto delle curve di sforzo-deformazione assiale ha dimostrato l'efficacia della tecnica di confinamento

FRCM sia in termini sia di resistenza che di duttilità (un aumento di circa 4 volte dello spostamento assiale).

Recenti studi sono stati condotti inoltre da Sneed et al. [66] su colonne confinate con tessuti unidirezionali costituiti da microtrefoli in acciaio. È stato valutato l'effetto della diversa densità del tessuto e del raggio di curvatura degli spigoli sul comportamento meccanico. I risultati hanno evidenziato un incremento della resistenza a compressione all'aumentare del raggio di curvatura degli spigoli, senza riscontrare significativi incrementi all'aumentare della densità del tessuto.

L'effetto del raggio di curvatura degli spigoli è stato inoltre valutato da Santandrea et al. [67] su colonne confinate con rete in fibra di basalto. I risultati hanno evidenziato in generale un lieve incremento di resistenza con modalità di rottura comunque associate alla rottura delle fibre in prossimità degli spigoli indipendentemente dal raggio di curvatura.

Un recente studio è stato inoltre condotto da Cascardi et al. [68] sulla valutazione dell'influenza della resistenza della matrice sull'efficacia del confinamento mediante FRCM con rete in fibra di vetro. I risultati hanno evidenziato un incremento della resistenza della colonna confinata all'aumentare della resistenza della matrice. È stato inoltre effettuato un confronto tra i risultati ottenuti e quelli derivanti dall'applicazione di un modello analitico.

1.6 MATRICI INORGANICHE INNOVATIVE

In un'epoca di sviluppo sostenibile, nell'ambito dell'industria delle costruzioni tale aspetto può essere perseguito attraverso la riduzione del consumo di energia, di emissioni inquinanti e di risorse naturali non rinnovabili. Differenti strategie possono essere adottate, tra le quali: l'uso di combustibili e materie prime alternativi per la riduzione dell'emissione di CO₂ nella produzione del cemento Portland (OPC); la sostituzione dello stesso con materiali cementizi supplementari a basso tenore di carbonio (SCMs); lo sviluppo di leganti alternativi a basso tenore di carbonio (materiali attivati alcalinamente, geopolimeri e cementi solfoalluminosi) e la riduzione del consumo di risorse naturali attraverso la gestione e riutilizzo di materiali di scarto [69].

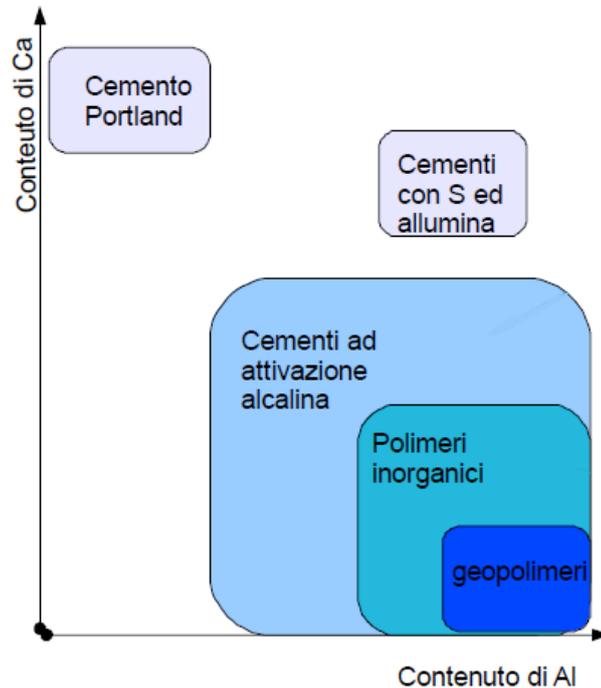


Figura 1.10 – Classificazione materiali attivati alcalinamente (AAM)

La classificazione riportata in Figura 1.10 colloca nel riquadro più grande i cementi ad attivazione alcalina caratterizzati da un alto contenuto in calcio. Nel sottoinsieme che segue si configurano dei materiali a più alto contenuto in alluminio e silicio, definiti “polimeri inorganici”, che si differenziano dai primi per la microstruttura disordinata e dai cementi Portland per una maggiore reticolazione delle catene silicatiche. Infine, viene mostrata nel riquadro più piccolo, una classe di materiali, definita “geopolimeri”, la quale si posiziona nella zona a più alto contenuto in allumina, minore contenuto in calcio e altissimo contenuto in silicio. Il cemento Portland, a differenza dei cementi alcalini, si caratterizza per un più alto contenuto in calcio e un basso contenuto in allumina. La colorazione dei diversi riquadri è proporzionale al contenuto alcalino dei materiali.

Cementi solfoalluminosi

La produzione dei cementi solfoalluminosi (CSA) su scala industriale ha luogo in Cina intorno alla metà degli anni '70, utilizzando come materie prime calcare, bauxite e gesso trattate termicamente a 1300-1350 °C. Questi materiali vengono impiegati come leganti

speciali per la riduzione dei tempi di presa, la compensazione del ritiro e lo sviluppo resistenze elevate alle brevi stagionature.

La fase principale del CSA è il solfato tetracalcico trialluminato o ye'elimita ($C_4A_3\bar{S}$), in proporzioni che variano dal 20% al 70%. Sono inoltre presenti la belite (C_2S) e altre fasi secondarie quali C_4AF , C_3A , $C_{12}A_7$ e C_6AF_2 .

Rispetto al cemento Portland risulta essere un legante sostenibile in quanto necessita di un minore tenore di calcare a causa del ridotto contenuto di CaO nella ye'elimita [70] [71] e maggiori quantitativi di gesso o anidrite ($CaSO_4$). La CO_2 prodotta durante il processo di produzione risulta pertanto notevolmente inferiore rispetto alla produzione dell'OPC. Le temperature di calcinazione sono inoltre inferiori di circa 100-150°C, il che comporta un consumo di combustibili fossili minore di circa il 15%. Una ulteriore riduzione di energia richiesta è determinata dalla porosità del clinker di CSA che rende più semplice il processo di macinazione.

Comunque l'utilizzo del CSA in completa sostituzione dell'OPC comporta numerose difficoltà, mentre risulta di notevole interesse l'impiego in parziale sostituzione dell'OPC combinando i vantaggi offerti dai due leganti.

Nelle prime ore del processo di idratazione e in presenza di gesso si forma ettringite ($C_6A_3\bar{S}_3H_{32}$). Solo successivamente, a causa della sua bassa reattività, avviene l'idratazione della belite. Poiché i prodotti di idratazione della ye'elimita contengono AH_3 amorfo, la reazione della belite produce stratlingite (C_2ASH_8) piuttosto che C-S-H. La maggior parte della ye'elimita e del gesso reagiscono nei primi 7 giorni, mentre la maggior parte della belite può rimanere non idratata anche a 90 giorni. Nel caso di cementi di miscela i prodotti di idratazione dipendono fortemente dal rapporto OPC/CSA. Per bassi rapporti, l'idratazione dell'OPC è ritardata fino a parecchi giorni successivi al getto. In questa fase, l'alite (C_3S) contenuta nell'OPC può reagire con l' AH_3 per formare stratlingite e portlandite (CH). Per alti rapporti, l'alite può formare C-S-H e portlandite; questa assieme al gesso può quindi modificare la reazione di idratazione della ye'elimita per formare $3C_6A_3\bar{S}_3H_{32}$. Il breve tempo di presa del CSA è dovuto alla rapida e ampia formazione di ettringite nelle prime ore. Il contenuto di anidrite può influenzare anche la resistenza a compressione nelle prime fasi della stagionatura; aumentare il contenuto di anidrite comporta infatti maggiori quantità di ye'elimita che reagisce nelle prime fasi formando quindi ulteriori prodotti di idratazione.

L'espansione di calcestruzzi a base di CSA può essere influenzata da diversi fattori, tra i quali la ye'elimita gioca un ruolo fondamentale. Se il contenuto in proporzione risulta maggiore del 50%, alle lunghe stagionature possono verificarsi l'espansione, la fessurazione e conseguente perdita di resistenza. Il contenuto ideale di ye'elimita deve mantenersi quindi tra il 30% e il 40%.

La durabilità di malte e calcestruzzi confezionati con CSA risulta un argomento non ancora sufficientemente approfondito in letteratura. In particolare è stato dimostrato come calcestruzzi a base di CSA esibiscano una eccellente resistenza all'attacco solfatico, riscontrando tuttavia un maggiore diffusione dei cloruri rispetto all'OPC.

Inoltre risulta evidente come la profondità di carbonatazione, analogamente all'impiego dell'OPC, sia direttamente proporzionale al rapporto acqua/leganti.

Materiali attivati alcalinamente

I materiali attivati alcalinamente (AAM), rappresentano una classe di materiali inorganici, sviluppati a partire dal 1940. Sono ottenuti per reazione tra una soluzione alcalina e precursori solidi di origine prevalentemente calcio-allumino-silicatica amorfa o vetrosa. La prima è utilizzata per aumentare il pH della miscela di reazione accelerando il processo di dissoluzione delle polveri, mentre la composizione di queste ultime determina i processi chimico-fisici che conducono all'indurimento [72] [73]. La microstruttura, la lavorabilità, la resistenza e la durabilità dei materiali attivati alcalinamente possono essere opportunamente calibrate da una idonea combinazione di attivatori e precursori. La progettazione della miscela prevede l'utilizzo di materiali naturali, metacaolino (MK) e pozzolane (P) e sottoprodotti industriali quali loppa d'altoforno (GGBFS), ceneri volanti (FA) e fanghi di scarto provenienti dalla lavorazione della carta. Gli AAM possono essere classificati in accordo alla natura dei precursori (sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) in due categorie principali: ad alto e a basso contenuto di calcio. Quando vengono impiegati fonti allumino-silicatiche (MK, FA), viene generato un sistema $(\text{Na,K})_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Questo può essere considerato un sottoinsieme degli AAM identificati come geopolimeri, caratterizzati da una particolare struttura pseudo-zeolitica [74]. Quando viene utilizzata la loppa come precursore, viene prodotto un sistema $(\text{Na,K})_2\text{O-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Questo è attivato in ambienti moderatamente alcalini, e l'indurimento è determinato dalla formazione di un gel C-A-S-H. È inoltre possibile una combinazione

dei due sistemi precedentemente descritti, dove l'indurimento è dovuto alla formazione combinata di gel C-A-S-H e (N,C)-A-S-H. La polvere reattiva utilizzata per ottenere un legante ad alto contenuto in calcio è la scoria d'altoforno ottenuta dal processo di lavorazione della ghisa. La loppa d'altoforno ha una composizione simile a quella della gehlenite e akermanite: (31-38%) SiO₂, (38-44%) CaO, (9-13%) Al₂O₃, (7-12%) MgO, e S, Fe₂O₃, MnO e K₂O con percentuali inferiori all'1%. I parametri che influenzano la reattività della GGBFS sono il contenuto in peso di amorfo (85-95%), il grado di depolimerizzazione (DP, da 1.3 a 1.5) e la superficie specifica (400-600 m²/kg).

Lo sviluppo della struttura degli AAM basati sulla loppa d'altoforno è un processo di reazione altamente eterogeneo, principalmente governato da quattro meccanismi: dissoluzione delle particelle del precursore, nucleazione e sviluppo delle fasi solide iniziali, interazioni e legame meccanico tra le fasi formate, reazione continua attraverso equilibri chimici dinamici, e diffusione di specie reattive attraverso i prodotti di reazione formati a tempi avanzati di indurimento [75]. Nelle fasi iniziali la soluzione alcalina reagisce con le specie disciolte generando il C-A-S-H esterno. In fasi successive, il gel C-A-S-H interno è prodotto da continue reazioni delle porzioni non disciolte attraverso meccanismi di diffusione.

I cationi e gli anioni dell'attivatore svolgono un ruolo specifico nel processo di attivazione. Quando si usano gli idrossidi lo ione OH⁻ agisce da catalizzatore ed è responsabile dell'aumento del pH consentendo la dissoluzione del precursore e la formazione di composti idrati stabili. Quando si utilizza il silicato di sodio il gel è caratterizzato da un basso rapporto Ca/Si ed una struttura meno ordinata. In entrambi i casi il gel risulta molto simile al gel che si produce durante l'idratazione del cemento Portland con rapporti Ca/Si decisamente più bassi (0.9-1.2).

Se le materie prime contengono elevate quantità di MgO, viene prodotta idrotalcite, mentre in presenza di contenuto di MgO minore del 5% e con un alto contenuto di Al₂O₃ è possibile trovare zeoliti tra i prodotti di reazione.

Geopolimeri a base di metacaolino e cenere volante

L'uso come precursore del metacaolino rappresenta la materia prima principale per la preparazione dei geopolimeri, cui segue l'impiego delle ceneri provenienti da centrali elettriche a carbone.

Il metacaolino (MK) è un materiale pozzolanico naturale ottenuto dalla calcinazione del caolino a 500-900°C ed è costituito da particelle lamellari con superficie specifica compresa tra 9 e 20 m²/gr. Sebbene la reattività del metacaolino sia superiore rispetto alle ceneri volanti, a causa della sua elevata superficie specifica necessita di maggiori quantitativi di acqua per realizzare impasti lavorabili; sono pertanto necessari tempi prolungati di consolidamento e temperature nell'intorno di 60-80°C.

Nella produzione di geopolimeri i rapporti SiO₂/Al₂O₃, Na₂/Al₂O₃ e Na₂O/H₂O influenzano lo sviluppo delle resistenze meccaniche. In particolare la resistenza a compressione e il modulo elastico risultano dipendenti dal tipo di alcali (Na o K) e dal rapporto Si/Al. In ogni caso, a parità di resistenza a compressione, è stato riscontrato un modulo elastico più basso nelle malte geopolimeriche rispetto alle cementizie determinato dalla presenza di un numero elevato di pori di piccole dimensioni che promuovono la formazione di microlesioni [76]. I geopolimeri a base di potassio determinano maggiori resistenze di quelli a base di sodio, e un incremento del rapporto SiO₂/Al₂O₃ determina un ulteriore incremento delle resistenze. Davidovits [77] indica come rapporti ottimali di Na₂/Al₂O₃ e SiO₂/Al₂O₃ siano rispettivamente pari a 1 e 4, mentre altri ricercatori suggeriscono un rapporto ottimale SiO₂/Al₂O₃ compreso nell'intervallo 3-3.8. L'aumento di Si/Al comporta instabilità chimica all'aria con la formazione di efflorescenze sulla superficie dei manufatti attribuita al quantitativo residuo di cationi liberi degli alcali. Generalmente incrementare il rapporto Na₂O/H₂O comporta una maggiore capacità di dissoluzione e lo sviluppo delle resistenze meccaniche. Inoltre, i geopolimeri prodotti solo con metacaolino esibiscono valori elevati del ritiro a causa degli elevati quantitativi di acqua richiesti.

Attualmente la ricerca si sta indirizzando sullo studio di geopolimeri a base di metacaolino per la produzione di malte non strutturali con aggregati alleggeriti per l'isolamento termico e per l'adsorbimento di composti organici volatili (VOCs). Un'altra tendenza è quella di produrre geopolimeri come materiale refrattario, mediante l'aggiunta di agenti schiumogeni quali l'H₂O₂ o polveri di alluminio. La parziale sostituzione del metacaolino con la cenere volante ha comportato un effetto positivo sia sulla resistenza termica che sulla resistenza a compressione determinato dalla minore richiesta d'acqua e quindi dalla minore evaporazione dell'acqua libera. Le schiume ottenute esibiscono valori della conducibilità termica nettamente inferiori (0.15-0.4 W/mK) rispetto a

il geopolimero solido (0.6 W/mK). La conducibilità termica aumenta all'aumentare del rapporto Si/Al, determinata dalla minore porosità e dalla distribuzione dei pori più piccoli. Incrementando inoltre il rapporto K/Al aumenta la capacità di espandersi (volume finale/volume iniziale). I geopolimeri ottenuti dall'attivazione a base di potassio comunque degradano più facilmente rispetto a quelli attivati a base sodio, sia schiumati che tal quali.

È stato inoltre investigata la produzione "one part" di geopolimeri, aggiungendo solo acqua alle polveri, evitando pertanto l'impiego di soluzioni caustiche, con attivatori in polvere quali NaOH, KOH, silicato di sodio, carbonato di sodio o utilizzando sottoprodotti industriali ricchi in alcali quale la cenere da biomassa ricca in potassio.

La cenere volante (FA) è un sottoprodotto industriale derivato da centrali elettriche a carbone con una composizione altamente variabile, dipendente dalla fonte di carbone e dalle condizioni di combustione. La distribuzione delle dimensioni delle particelle, la composizione chimica e le fasi cristalline/vetrose del precursore sono fattori chiave che controllano la reattività e la solubilità del precursore in soluzioni alcaline. Si è constatato che la microstruttura del geopolimero è fortemente influenzata dalla finezza delle particelle, dalla composizione della fase amorfa e dal contenuto di ossidi (in particolare Fe_2O_3 e CaO).

Ottenere una conoscenza esaustiva dei precursori risulta pertanto di particolare importanza al fine di progettare geopolimeri destinati al settore commerciale.

Studi preliminari, infatti, hanno dimostrato come tale prodotto risulti utilizzabile in applicazioni di rinforzo di strutture in calcestruzzo armato [78].

Materiali alcali attivati in applicazioni di riabilitazione e conservazione

La tematica della riabilitazione e dell'adeguamento sismico di costruzioni esistenti in muratura e calcestruzzo armato è divenuta, negli ultimi anni, di particolare interesse a causa del vasto patrimonio architettonico. Questo argomento risulta particolarmente complesso soprattutto a causa della compatibilità tra le strutture esistenti e le malte da ripristino a base di cemento Portland. Infatti l'impiego di miscele a base di cemento sulle strutture in muratura può comportare effetti dannosi dovuti alla presenza di ioni sodio e potassio, i quali possono favorire le reazioni alcali-aggregato, o in presenza di ambienti

umidi e pietre naturali ricche di zolfo può determinare la formazione di ettringite secondaria e thaumasite con fenomeni di fessurazione, espansione e distacchi.

Un altro parametro fondamentale per le malte da ripristino è la compatibilità meccanica [79]. Infatti se il modulo di elasticità del materiale di ripristino è differente da quello del substrato, si possono creare fessurazioni e distacchi. Non è infine possibile trascurare la compatibilità estetica tra gli elementi originali e quelli oggetto di interventi.

Attualmente, la calce idraulica naturale (NHL) rappresenta l'unico legante che può essere utilizzato in questi contesti per l'elevata compatibilità con i substrati. Tuttavia, a causa della bassa resistenza meccanica, le malte a base di NHL, molto spesso non soddisfano i requisiti elasto-meccanici richiesti e sono utilizzate in miscele con il cemento Portland. L'uso di materiali alcali attivati, pertanto, quali la GGBFS, potrebbe essere valida alternativa alle miscele di cemento.

Un aspetto principale, in questo contesto, risulta la possibilità di calibrare opportunamente la resistenza e la rigidità attraverso il rapporto attivatori/precursori [80]; questi due parametri aumentano all'aumentare del dosaggio di attivatori nella miscela.

Nello specifico malte a base di GGBS debolmente attivate possono essere utilizzate come intonaci e malte per muratura, mentre in presenza di alti rapporti attivatori/precursori, possono essere impiegate per adeguamento sismico o per ripristino di strutture in cemento armato.

Per quanto riguarda il modulo elastico, alcuni studi hanno dimostrato come matrici prodotte per attivazione alcalina della GGBFS esibiscano valori più bassi rispetto a matrici di riferimento con cemento Portland [72], a parità di classe di resistenza, a causa dell'elevato ritiro delle malte AAM che promuove la formazione di microlesioni. In particolare bassi valori del rapporto attivatori/precursori, determinano un valore del modulo di elasticità nell'intervallo 10-15 GPa, mentre elevati dosaggi degli attivatori comportano un incremento della rigidità della matrice e conseguentemente un incremento del modulo elastico fino a 20 GPa. In presenza di substrati che limitano la contrazione dimensionale della malta da ripristino, tale proprietà, determina lo sviluppo di basse tensioni interne di trazione e conseguentemente un minore rischio di fessurazione.

In generale, le malte e i calcestruzzi AAM, presentano valori del ritiro notevolmente più elevati rispetto ai conglomerati confezionati con leganti tradizionali. Ciò è determinato dalla grande quantità d'acqua, non coinvolta nel processo di reazione che, evaporando, determina una contrazione dimensionale e una marcata porosità nella matrice. Le paste degli AAM a base di GGBS presentano inoltre un maggiore intervallo della dimensioni dei pori nella regione dei mesopori rispetto alle paste di OPC. Il raggio dei pori dove si forma il menisco appare essere un parametro chiave per il ritiro. Oltre che dal contenuto d'acqua, questo risulta essere influenzato anche dal tipo e dalla quantità di attivatori alcalini. La riduzione del ritiro può essere ottenuta ottimizzando il mix design con l'aggiunta di glicole etilenico e agenti espansivi quali l'ossido di calcio, oppure limitando l'evaporazione dell'acqua con l'aggiunta di metilcellulosa o etere di amido.

Un altro problema nell'impiego degli AAM è rappresentato dai fenomeni di efflorescenza determinati dall'eccesso di ossido di sodio non reagito a causa di uno squilibrio nel mix verso gli attivatori a base di sodio. Il parametro che influenza la quantità di efflorescenze è il rapporto molare Na/Al. Quando è elevato si determina un maggiore grado di lisciviazione alcalina, indicando una maggiore tendenza all'efflorescenza.

Dall'analisi dei punti di forza e di debolezza degli AAM, risulta che tali materiali possono rappresentare una potenziale alternativa alle tradizionali miscele a base di cemento Portland o calce idraulica naturale per il ripristino di strutture esistenti.

Capitolo 2

MATERIALI E METODI

2.1 PREMESSA

Il programma sperimentale ha riguardato prove a trazione e di aderenza a taglio diretto di tipo “single lap” eseguite su supporto murario, al fine di valutare il comportamento meccanico a trazione, i meccanismi di trasferimento del carico, l’interazione rinforzo-matrice e le modalità di rottura, per sistemi di rinforzo in fibra di basalto. Nello specifico nelle prove di aderenza è stata valutata l’influenza di alcuni parametri sulla risposta del materiale quali, differenti lunghezze di incollaggio su supporto nonché l’impiego di diverse densità della rete di rinforzo.

È stata, inoltre, svolta una campagna di indagine sul degrado a seguito di trattamenti termici ad alta temperatura anche attraverso un’analisi comparativa tra diversi sistemi di rinforzo. Lo studio è stato condotto mediante prove di aderenza a taglio diretto su substrato in muratura al fine di valutare l’effetto della temperatura sulla risposta carico-scorrimento, sulla variazione dei carichi di picco e sulle modalità di rottura. Nello specifico è stato investigato il comportamento dei sistemi di rinforzo in fibra di basalto (a bassa e ad alta densità), in fibra di acciaio e in fibra di carbonio.

È stata altresì condotta una campagna sperimentale finalizzata alla valutazione del comportamento di colonne in muratura, di sezione quadrata, confinate mediante sistemi FRCM e soggette a carico di compressione monotono. L’efficacia del confinamento è valutata in termini di: influenza di diverse tipologie di rinforzi, variazioni di resistenza al variare del numero degli strati di rinforzo, influenza della disposizione degli strati in sovrapposizione, effetto di carichi eccentrici, modalità di rottura e duttilità.

Si è proceduto, inoltre, alla definizione, preparazione e caratterizzazione di una matrice inorganica innovativa progettata al fine di contenere un elevato quantitativo di sottoprodotti e scarti industriali. In particolare, è stato valutato l'impiego di loppa d'altoforno e ceneri ottenute dal processo di combustione di biomassa forestale in centrali termoelettriche, assicurando così efficienza ecologica ed economica nonché proprietà meccaniche paragonabili o superiori ai prodotti attualmente in commercio. Sono state valutate pertanto le proprietà allo stato fresco, quali la lavorabilità, le proprietà meccaniche e il ritiro. Sono state valutate infine le prestazioni di un composito fibrorinforzato con la matrice ottenuta e rinforzo a rete in fibra di basalto.

Di seguito verrà fornita una descrizione e caratterizzazione dei materiali impiegati, le procedure di realizzazione dei campioni e i setup di prova per le diverse attività sperimentali.

2.2 MATERIALI

2.2.1 RINFORZI

Il programma sperimentale ha previsto l'impiego di diverse tipologie di reti di rinforzo. Nello specifico, sono stati utilizzati rinforzi in fibra di basalto, acciaio, carbonio e PBO. La caratterizzazione meccanica è stata effettuata eseguendo prove di trazione su campioni di rinforzo di dimensioni pari a 500 mm di lunghezza e 50 mm di larghezza, facendo utile riferimento alla norma ASTM D3039/D3039M [81]. I campioni sono stati preparati incollando alle estremità tab in alluminio della lunghezza di 70 mm e larghezza pari a quella del campione mediante adesivo epossidico bicomponente. Ciò al fine di garantire una uniforme distribuzione delle tensioni e l'assenza di scorrimenti delle aree di aggrappo. I tab, inoltre, sono stati opportunamente smussati per prevenire la prematura rottura dovuta a possibili concentrazioni di tensione.

Le deformazioni sono state acquisite mediante un estensometro con base di lettura pari a 50 mm, con lettura della deformazione massima fino a +50% e -5%. L'accuratezza sulla misura delle deformazioni è $\pm 0.5\%$ della lettura sul tratto utile. L'estensometro è stato posto nella mezzeria del campione. I test sono stati condotti con macchina di prova Instron 5582.

Le tensioni sono state valutate in riferimento all'area trasversale del rinforzo, A_f , determinata come prodotto dello spessore equivalente del tessuto, t_{eq} , in direzione

dell'ordito (coincidente con la direzione di carico) e la larghezza dello stesso b_{eff} . Questa è stata determinata come prodotto del numero di fasci n_y e il loro interasse b_y . Si assume quindi che le fibre siano sparse lungo la larghezza. Nel caso del rinforzo in fibra di acciaio, poiché costituito dall'accostamento di microtrefoli, A_f è determinata come il prodotto dell'area del singolo trefolo A_t e il numero degli stessi, n_t , contenuti nella larghezza del campione di prova.

$$\sigma = \frac{F}{A_f} \text{ con } \begin{cases} A_f = t_{eq} \times b_{eff} \text{ e } b_{eff} = n_y \times b_y & (\text{basalto, carbonio, PBO}) \\ A_f = A_t \times n_t & (\text{acciaio}) \end{cases} \quad 2.1$$

BASALTO

Sono stati utilizzati due rinforzi a rete in fibra di basalto, ad alta (400 g/m^2) e a bassa densità (200 g/m^2), identificati rispettivamente con l'acronimo B4 e B2.

Le reti sono di tipo biassiale bilanciate, con speciale trattamento protettivo alcali-resistente con resina all'acqua priva di solventi, e microfilati di acciaio Inox AISI 304 termofissati fra di loro al fine di garantire un tessuto stabile e di ugual grammatura in entrambe le direzioni.

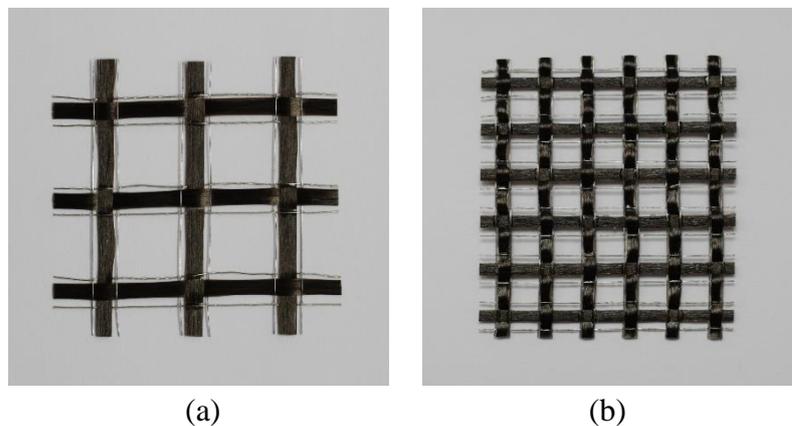


Figura 2.1 – Rete in fibra di basalto: a bassa densità B2 (a), ad alta densità B4 (b)

Di seguito si riportano i dati tecnici forniti dal produttore (Kerakoll) e i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione.

I test effettuati sulla rete ad alta densità, riportati in Figura 2.2, hanno consentito di determinare i parametri meccanici. In particolare, i valori medi ottenuti per il modulo

elastico E_f , la tensione σ_{fu} e la deformazione ultima ε_{fu} a rottura sono pari, rispettivamente, a 70 GPa (CoV=7.49%), 935 MPa (CoV=2.83%) e 1.43% (CoV=10.66%).

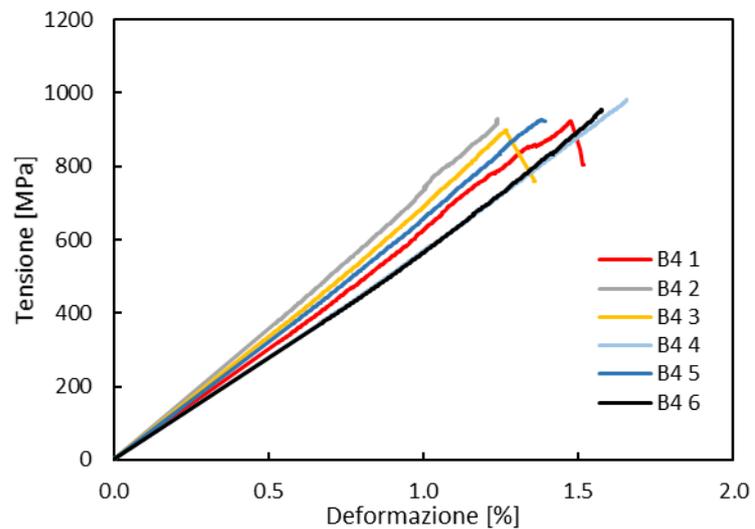
Tabella 2.1 – Caratteristiche tecniche della rete in fibra di basalto ad alta densità (B4) (Kerakoll)

Dati tecnici dei materiali costituenti la rete		
Basalto:		
- tensione caratteristica a trazione	σ_{filo}	≥ 3000 MPa
- modulo elastico	E_{filo}	≥ 87 GPa
Acciaio Inox AISI 304:		
- tensione caratteristica a trazione	σ_{filo}	> 750 MPa
- modulo elastico	E_{filo}	> 200 GPa
Dati tecnici caratteristici della rete (0° – 90°)		
- spessore equivalente della rete	t_r	$\approx 0,064$ mm
- carico a trazione per unità di larghezza	F_{rete}	≥ 110 kN/m
- deformazione a rottura della rete	ε_f	$> 1,90\%$
- resistenza a trazione	σ_f	≥ 1700 MPa
- modulo elastico	E_f	> 70 GPa

Dati tecnici della rete	
Natura del materiale	basalto e acciaio Inox AISI 304
Massa totale (comprensivo di termosaldatura e rivestimento protettivo)	≈ 400 g/m ²
Larghezza rotolo	≈ 1 m
Lunghezza rotolo	≈ 25 m
Larghezza maglia	$\approx 8 \times 8$ mm



(a)



(b)

Figura 2.2 – B4, prove di trazione: test setup (a), diagrammi tensione-deformazione (b)

Tabella 2.2 – Caratteristiche tecniche della rete in fibra di basalto a bassa densità (B2) (Kerakoll)

Dati tecnici dei materiali costituenti la rete		
Basalto:		
- tensione caratteristica a trazione	σ_{filo}	$\geq 3000 \text{ MPa}$
- modulo elastico	E_{filo}	$\geq 87 \text{ GPa}$
Acciaio Inox AISI 304:		
- tensione caratteristica a trazione	σ_{filo}	$> 750 \text{ MPa}$
- modulo elastico	E_{filo}	$> 200 \text{ GPa}$
Dati tecnici caratteristici della rete ($0^\circ - 90^\circ$)		
- spessore equivalente della rete	t_f	$\approx 0,032 \text{ mm}$
- carico a trazione per unità di larghezza	F_{rete}	$\geq 55 \text{ kN/m}$
- deformazione a rottura della rete	ϵ_f	$> 1,90\%$
- resistenza a trazione	σ_f	$\geq 1700 \text{ MPa}$
- modulo elastico	E_f	$> 70 \text{ GPa}$

Dati tecnici della rete	
Natura del materiale	basalto e acciaio Inox AISI 304
Massa totale (comprensivo di termosaldatura e rivestimento protettivo)	$\approx 200 \text{ g/m}^2$
Larghezza rotolo	$\approx 1 \text{ m}$
Lunghezza rotolo	$\approx 25 \text{ m}$
Larghezza maglia	$\approx 17 \times 17 \text{ mm}$

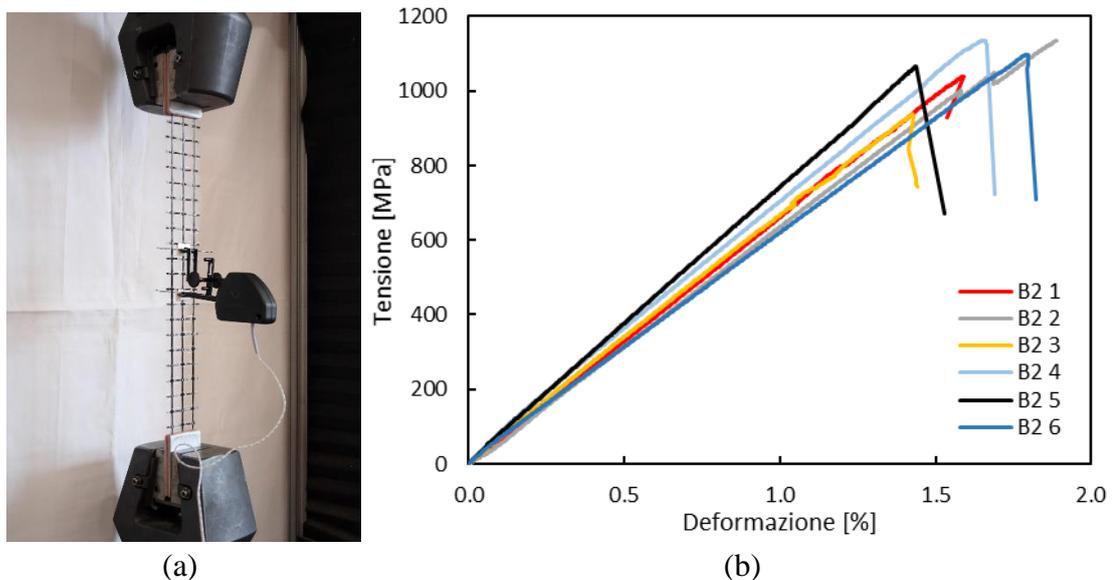


Figura 2.3 – B2, prove di trazione: test setup (a); diagrammi tensione-deformazione (b)

I risultati ottenuti dalle prove sulla rete a bassa densità sono riportati in Figura 2.3. I valori medi ottenuti per il modulo elastico E_f , la tensione σ_{fu} e la deformazione ultima ϵ_{fu} a rottura sono pari, rispettivamente, a 67 GPa (CoV=5.67%), 1069 MPa (CoV=6.37%) e 1.63% (CoV=10.50%).

ACCIAIO

Il rinforzo in fibra di acciaio è un tessuto unidirezionale formato da micro-trefoli di acciaio ad altissima resistenza galvanizzati, fissati su una rete in fibra di vetro. Ogni trefolo è costituito da 3 filamenti rettilinei e 2 in avvolgimento, con elevato angolo di torsione. Di seguito si riportano i dati tecnici forniti dal produttore (Kerakoll) e i risultati delle prove di caratterizzazione a trazione effettuate.

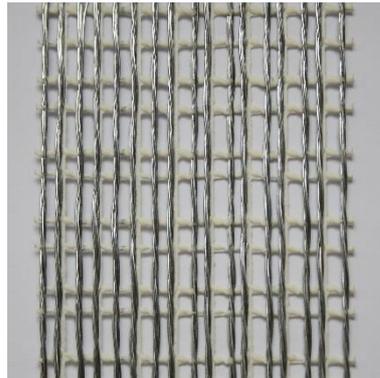


Figura 2.4 – Tessuto in fibra di acciaio

Tabella 2.3 – Caratteristiche tecniche del rinforzo in acciaio (Kerakoll)

Filo		
- tensione caratteristica a trazione	σ_{filo}	> 2900 MPa
- modulo elastico	E_{filo}	> 205 GPa
- area	A_{filo}	0,1076 mm ²
Trefolo 3x2 ottenuto unendo fra loro 5 filamenti, di cui 3 rettilinei e 2 in avvolgimento con elevato angolo di torsione		
- area effettiva di un trefolo 3x2 (5 fili)	A_{trefolo}	0,538 mm ²
- n° trefoli/cm		3,14 trefoli/cm
- carico di rottura a trazione di un trefolo		> 1500 N
Dati tessuto non impregnato		
Resistenza a trazione del nastro, valore caratteristico	σ_{nastro}	> 3000 MPa
Resistenza a trazione per unità di larghezza	σ_{nastro}	> 4,72 kN/cm
Modulo di elasticità normale del nastro	E_{nastro}	> 190 GPa
Deformazione a rottura del nastro, valore caratteristico	ϵ_{nastro}	> 2%
Densità delle fibre	ρ_{fib}	≈ 7,955 g/cm ³
Spessore equivalente	t_i	≈ 0,169 mm
Massa (comprensivo di termosaldatura)		≈ 1200 g/m ²
Massa del tessuto per unità di area		≈ 1200 g/m ²

I test effettuati, riportati in Figura 2.5, hanno consentito di determinare i parametri meccanici della rete. Il modulo elastico E_f , la tensione σ_{fu} e la deformazione ultima ϵ_{fu} a rottura sono pari, rispettivamente, a 200 GPa (CoV=4.13%), 2920 MPa (CoV=4.24%) e 1.75% (CoV=8.35%).

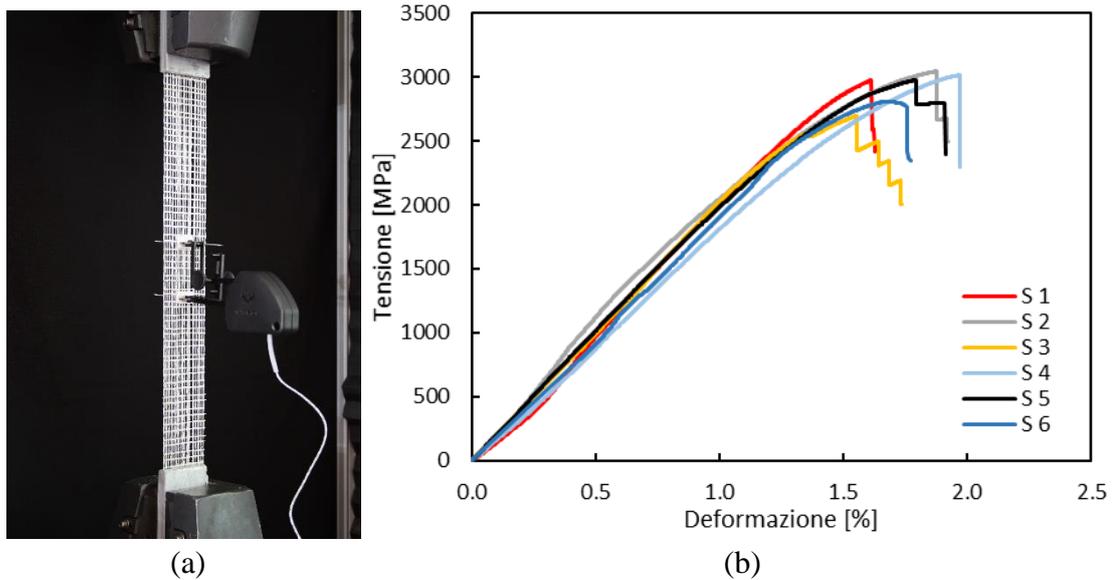


Figura 2.5 – Acciaio, prove di trazione: test setup (a), diagrammi tensione-deformazione (b)

CARBONIO

Il rinforzo in fibra di carbonio è costituito da una rete bidirezionale realizzata con fasci non apprettati e termofissati con maglia di dimensioni di 10 mm x 10 mm. Di seguito si riportano i dati tecnici forniti dal produttore (Ruredil) e i risultati della caratterizzazione effettuata.

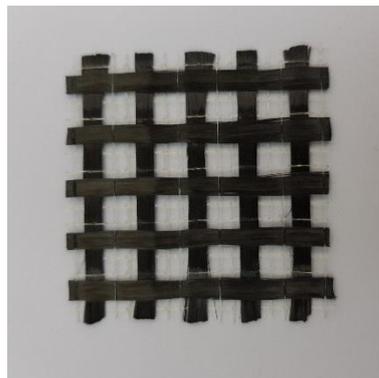


Figura 2.6 – Rete in fibra di carbonio

I test effettuati, riportati in Figura 2.7, hanno consentito di determinare i parametri meccanici della rete. I valori medi ottenuti per il modulo elastico E_f , la tensione σ_{fu} e la deformazione ultima ϵ_{fu} a rottura sono pari, rispettivamente, a 241 GPa (CoV=3.20%), 2032 MPa (CoV=7.13%) e 0.88% (CoV=4.56%).

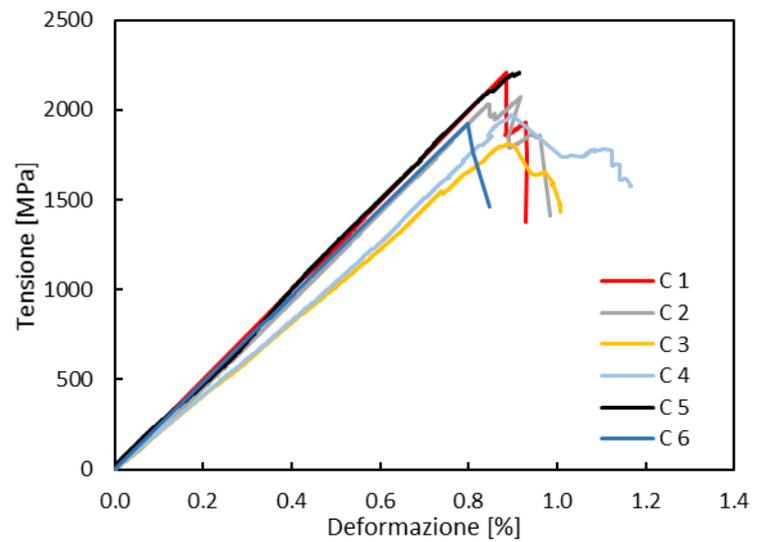
Tabella 2.4 – Caratteristiche tecniche della rete in fibra di carbonio (Ruredil)

CARATTERISTICHE DELLA FIBRA DI CARBONIO	
Carico di rottura a trazione	4.800 MPa
Modulo elastico	240 GPa
Densità fibra	1,82 g/cm ³
Allungamento a rottura	1,8 %

CARATTERISTICHE DELLA RETE RUREDIL X MESH C10	
Peso di fibra di carbonio nella rete	168 g/m ²
Spessore per il calcolo della sezione di carbonio a 0° e 90°	0,047 mm



(a)



(b)

Figura 2.7 – Carbonio, prove di trazione: test setup (a); diagrammi tensione-deformazione (b)

PBO

Il rinforzo in fibra di PBO (Poliparafenilenbenzobisoxazolo) è costituito da una rete bidirezionale non bilanciata non apprettata, con una maglia di dimensioni 10 x 20 mm. Di seguito si riportano i dati tecnici forniti dal produttore (Ruredil) e i risultati delle prove di caratterizzazione a trazione.

I test effettuati, riportati in Figura 2.9, hanno consentito di determinare i parametri meccanici della rete. I valori medi ottenuti per il modulo elastico E_f , la tensione σ_{fu} e la deformazione ultima ε_{fu} a rottura sono pari, rispettivamente, a 215 GPa (CoV=4.42%), 3206 MPa (CoV=8.22%) e 1.78% (CoV=6.30%).



Figura 2.8 – Rete in fibra di PBO

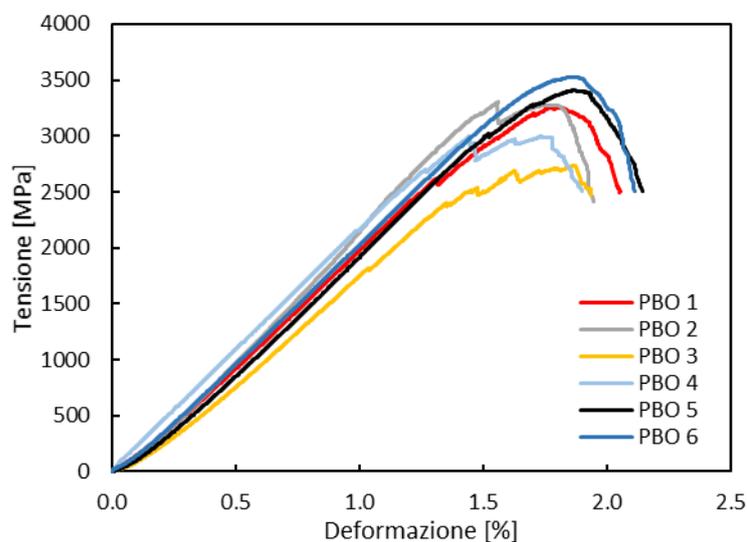
Tabella 2.5 – Caratteristiche tecniche della rete in fibra di PBO (Ruredil)

CARATTERISTICHE DELLA FIBRA IN PBO (POLIPARAFENILENBENZOBISOXAZOLO)	
Resistenza a trazione	5,8 GPa
Modulo elastico	270 GPa
Densità di fibra	1,56 g/cm ³
Allungamento a rottura	2,5 %

CARATTERISTICHE DELLA RETE	
Peso delle fibre di PBO nella rete	88 g/m ²
Spessore equivalente di tessuto secco in direzione dell'ordito	0,0455 mm
Spessore equivalente di tessuto secco in direzione della trama	0,0115 mm



(a)



(b)

Figura 2.9 – PBO, prove di trazione: test setup (a); diagrammi tensione-deformazione (b)

2.2.2 MATRICI

In questa sezione si riporta la caratterizzazione meccanica delle matrici effettuata secondo la norma UNI EN 1015-11 [82]. È stata inoltre effettuata una caratterizzazione chimico-fisica delle materie prime utilizzate nella preparazione e caratterizzazione di una matrice inorganica innovativa, appartenente alla famiglia dei leganti attivati alcalinamente, mediante: diffrazione ai raggi X (Rigaku modello Miniflex 600), microscopia elettronica a scansione SEM (FEI Company modello Inspect), microanalisi a dispersione di energia (EDX), termogravimetria (Netzsch modello STA 409).

MATRICI SISTEMI DI RINFORZO

Sono state utilizzate 3 matrici per la realizzazione dei sistemi di rinforzo, specifiche per interventi su muratura.

Per il sistema di rinforzo in fibra di basalto e di acciaio la matrice abbinata è una malta in classe di resistenza M15, inorganica, a base di calce idraulica naturale NHL 3.5 e un legante minerale con inerti di sabbia silicea e calcare dolomitico in curva granulometrica 0 – 1.4 mm, indicata successivamente con l'acronimo GCF (Kerakoll).

Per i sistemi di rinforzo in carbonio e in PBO le matrici abbinate sono malte inorganiche stabilizzate di natura pozzolanica, rispettivamente indicate successivamente con l'acronimo M25 e MX (Ruredil).

Tabella 2.6 – Prestazioni meccaniche delle matrici dei sistemi di rinforzo

Caratteristica prestazionale	GCF	M25	MX
Resistenza a compressione (28gg), σ_c [MPa]	> 15	> 20	> 20
Resistenza a trazione per flessione (28gg), σ_f [MPa]	> 5	> 3.5	> 3.5
Adesione su laterizio (28gg) [MPa]	> 1	-	-
Modulo elastico a compressione (28gg), E [GPa]	9	> 7	> 7.5
Intervallo granulometrico	0-1.4 mm	-	-

In Tabella 2.6 sono riportate le caratteristiche meccaniche delle matrici così come fornite dai produttori. Di seguito si riportano altresì i valori medi delle resistenze a flessione e a compressione, a 28 giorni di stagionatura, ottenuti dalle prove condotte su sei campioni per ogni matrice.

Tabella 2.7 – Valori medi di resistenza delle matrici

Matrice	Flessione		Compressione	
	σ_f	CoV	σ_c	CoV
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
GCF	3.73	15.20	15.42	13.62
M25	8.01	20.34	31.06	5.63
MX	5.63	17.93	31.37	6.33

MATRICI DA MATERIALI ATTIVATI ALCALINAMENTE (AAM)

Al fine di interpretare al meglio i risultati prestazionali ottenuti nella definizione del mix design, si è proceduto ad analizzare in modo approfondito le caratteristiche chimico-fisiche delle varie materie prime. Nello specifico sono stati utilizzati come precursori metacaolino, loppa d’altoforno, cenere volante e cenere da biomassa. Gli attivatori impiegati sono stati l’idrossido di potassio e trisilicato di sodio.

METACAOLINO

Il metacaolino è stato fornito dalla Newchem e presenta le caratteristiche fisiche riportate in Tabella 2.8.

Tabella 2.8 – Metacaolino: caratteristiche fisiche

<i>Densità specifica</i>		2,6	g/cm ³
<i>Densità apparente</i>		0,3-0,4	g/cm ³
<i>Dimensione particelle</i>	<i>D10</i>	2	µm
	<i>D50</i>	5	µm
	<i>D90</i>	25	µm
<i>Superficie specifica</i>		26000	cm ² /g

dove:

- D10 indica che il 10% del campione utilizzato ha un diametro uguale o minore a quello riportato;
- D50 indica che il 50% del campione utilizzato ha un diametro uguale o minore a quello riportato;
- D90 indica che il 90% del campione utilizzato ha un diametro uguale o minore a quello riportato.

Date le dimensioni medie delle particelle e la loro distribuzione, il metacaolino presenta un'elevata area superficiale, sarà opportuno individuare i rapporti W/B in grado di garantire una buona lavorabilità allo stato fresco.

La composizione del campione di metacaolino, ottenuta mediante XFR, è riportata nella Tabella 2.9.

Tabella 2.9 – Metacaolino: composizione chimica

Componente	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	
Weight ratio %	53.9	42.02	1.52	LOI
Molar ratio %	68.06	31.22	0.72	1.00%

Sono state inoltre rilevate tracce di TiO₂.

Da i dati ottenuti si evince che il contenuto di SiO₂ e Al₂O₃ è pari al 95.92% e dunque maggiore dell'80%, valore minimo richiesto per l'utilizzo del metacaolino per la produzione di materiali geopolimerici.

L'analisi diffrattometrica del metacaolino (Figura 2.10) evidenzia la presenza di impurezze di quarzo e un'ampia gobba centrata in 2θ a circa 22°, caratteristica dei silico-alluminati amorfi.

L'analisi SEM riportata in Figura 2.11 evidenzia una microstruttura caratterizzata da lamelle impilate.

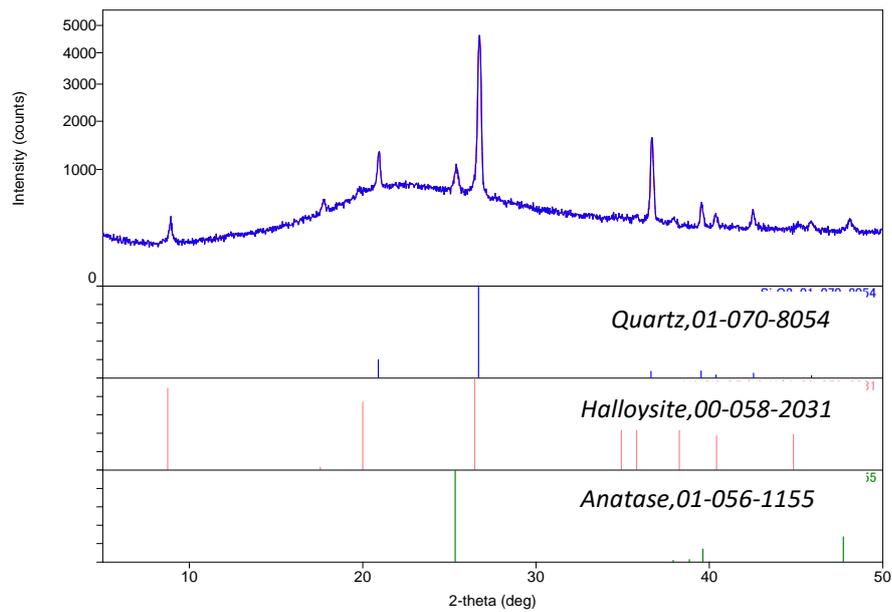


Figura 2.10 – Metacaolino: analisi diffrattometrica

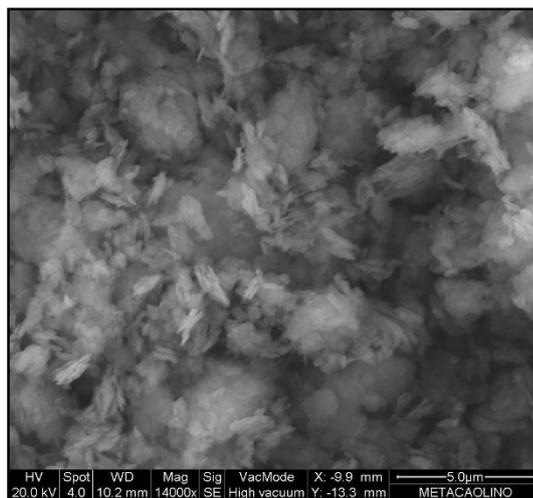


Figura 2.11 – Metacaolino: micrografia SEM

LOPPA D'ALTOFORNO (GGBFS)

La loppa d'altoforno è stata fornita dalla Ecocem France Sas ed è caratterizzata da una distribuzione granulometrica riportata in Figura 2.12 e morfologia irregolare come da analisi SEM (Figura 2.13). Dall'analisi diffrattometrica emerge la natura amorfa della loppa (Figura 2.14).

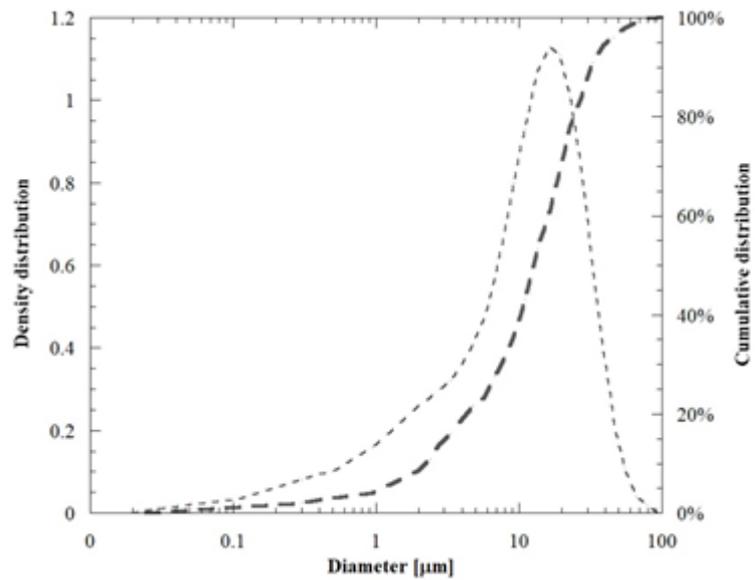


Figura 2.12 – Loppa d’altoforno: distribuzione granulometrica

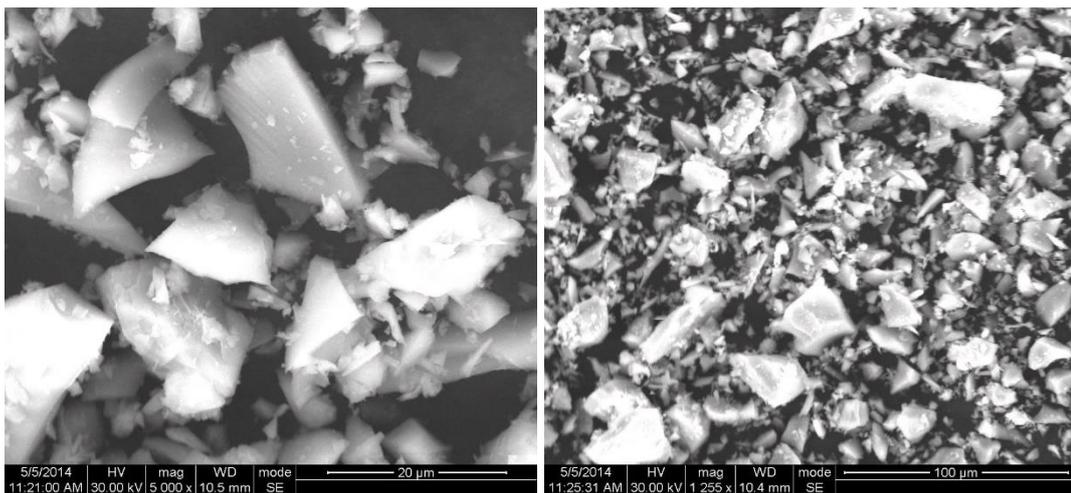


Figura 2.13 – Loppa d’altoforno: micrografie SEM a diversi ingrandimenti

La composizione della loppa utilizzata è riportata di seguito:

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Tot
0.73	6.71	10.37	36.38	1.54	0.6	41.94	0.7	1.02	100

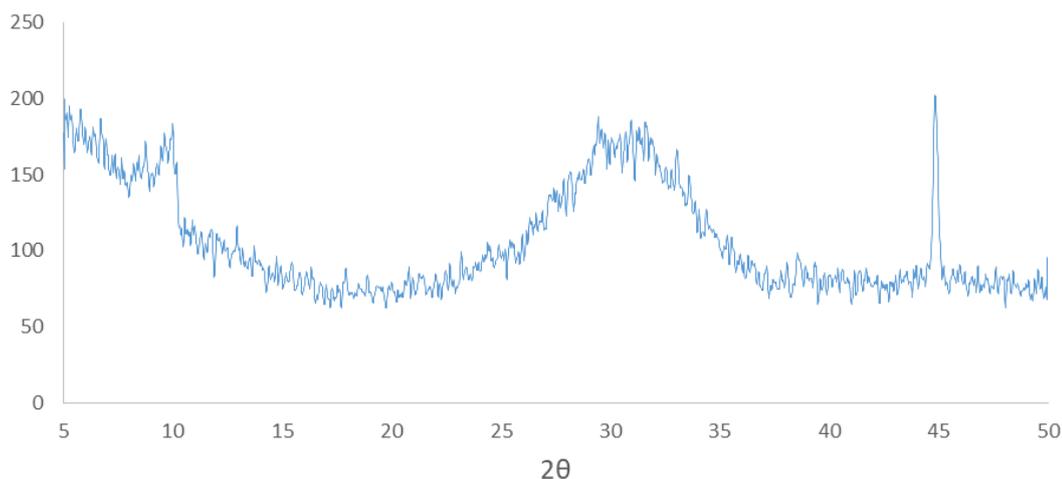


Figura 2.14 – Loppa d’altoforno: analisi diffrattometrica

CENERE VOLANTE (FLY ASH)

La cenere volante è stata fornita dalla Ashtech (India) PVT. LTD, ed è stata caratterizzata mediante analisi SEM, XRD e EDX, al fine di analizzarne la morfologia, le fasi cristalline presenti e la sua composizione.

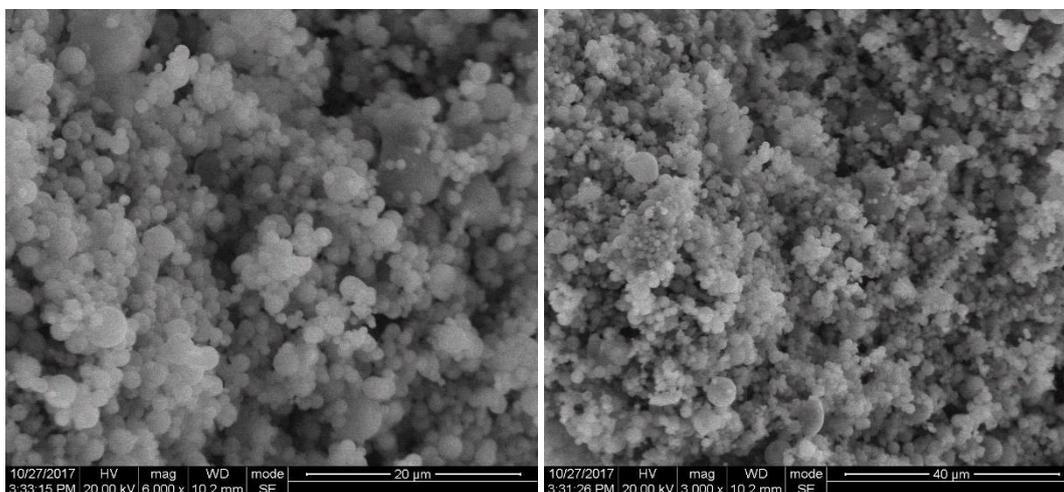


Figura 2.15 – Fly ash: micrografie SEM a diversi ingrandimenti

Dalle micrografie riportate in Figura 2.15 è possibile notare la tipica morfologia sferica delle particelle, che presentano un diametro medio intorno al micron.

L’analisi diffrattometrica XRD, riportata in Figura 2.16, evidenzia la presenza di tracce di quarzo e mullite.

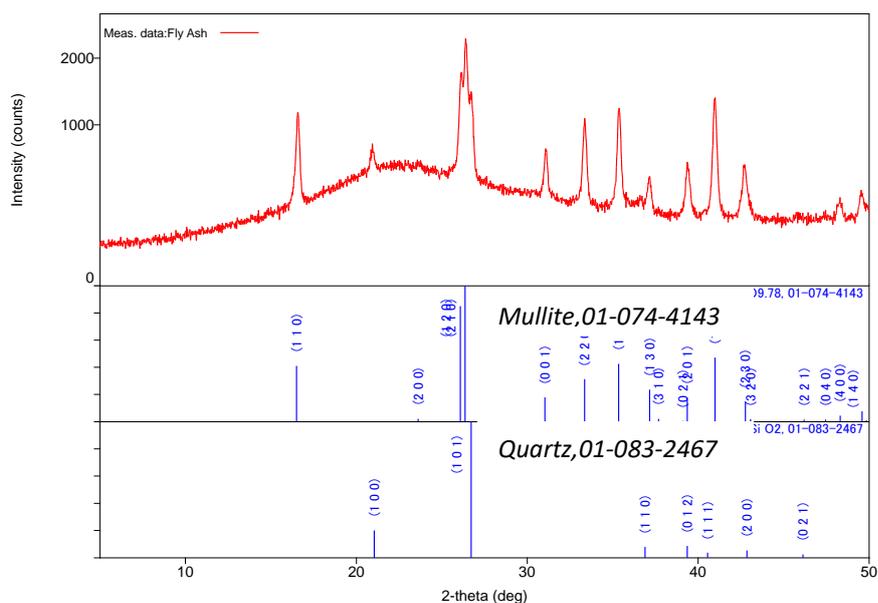


Figura 2.16 – Fly ash: analisi diffrattometrica

Di seguito vengono riportate le tabelle con le composizioni ottenute dall'analisi EDX condotta su tre campioni differenti.

Tabella 2.10 – Fly ash: composizione campione a

Elemento	N. Atomico	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Ossigeno	8	18773	58,82	53,63	68,27	7,62	12,96
Silicio	14	28790	23,38	21,32	15,46	1,04	4,45
Alluminio	13	22734	20,07	18,30	13,81	1,00	5,00
Ferro	26	1172	2,35	2,14	0,78	0,12	5,25
Disprosio	66	640	1,97	1,80	0,23	0,12	6,34
Titanio	22	852	1,16	1,06	0,45	0,08	6,88
Potassio	19	977	0,90	0,82	0,43	0,07	7,56
Calcio	20	513	0,54	0,50	0,25	0,06	10,35
Magnesio	12	255	0,27	0,25	0,21	0,05	19,32
Zolfo	16	157	0,15	0,14	0,09	0,04	26,02
Fosforo	15	48	0,05	0,05	0,03	0,03	63,99
Sodio	11	0	0	0	0	0	4,43

Tabella 2.11 – Fly ash: composizione campione b

Elemento	N. Atomico	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Ossigeno	8	29979	49,21	51,88	66,89	6,083	12,36
Silicio	14	47563	20,23	21,33	15,67	0,896	4,43
Alluminio	13	39570	18,13	19,11	14,61	0,901	4,97
Disprosio	66	1445	2,04	2,15	0,27	0,106	5,17
Ferro	26	2226	2,03	2,14	0,79	0,097	4,79
Titanio	22	1635	1,24	1,30	0,56	0,074	5,96
Potassio	19	1728	0,89	0,94	0,50	0,062	6,95
Calcio	20	1057	0,62	0,66	0,34	0,054	8,58
Magnesio	12	436	0,24	0,25	0,21	0,046	19,20
Zolfo	16	303	0,16	0,16	0,11	0,037	23,71
Fosforo	15	116	0,07	0,07	0,05	0,033	48,84
Sodio	11	0	0,00	0,00	0,00	0,000	4,43

Tabella 2.12 – Fly ash: composizione campione c

Elemento	N. Atomico	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Ossigeno	8	11490	47,50	49,19	64,54	6,55	13,78
Silicio	14	20537	21,48	22,25	16,63	0,96	4,49
Alluminio	13	17515	19,46	20,15	15,67	0,98	5,03
Disprosio	26	1132	2,39	2,47	0,93	0,13	5,27
Ferro	66	660	2,14	2,21	0,29	0,13	6,19
Titanio	22	745	1,24	1,28	0,56	0,09	6,96
Potassio	19	808	1,00	1,04	0,56	0,08	7,57
Calcio	20	667	0,92	0,95	0,50	0,07	8,00
Magnesio	15	115	0,16	0,17	0,11	0,04	26,76
Zolfo	16	118	0,15	0,16	0,10	0,04	27,68
Fosforo	12	100	0,13	0,14	0,12	0,04	32,70
Sodio	11	0	0	0	0	0	4,43

CENERE DA BIOMASSA

La cenere da biomassa, avente D10 di 11.72 μm , D50 di 30.16 μm e D90 di 61.47 μm , è stata fornita da un impianto locale. La sua composizione chimica è stata ottenuta mediante analisi EDX e riportata in Figura 2.17. La morfologia è stata esaminata mediante microscopia elettronica a scansione. L'analisi XRD (non riportata) rivela la presenza sia di fasi amorfe che cristalline, essendo la fase cristallina predominante il quarzo. Le micrografie a differenti ingrandimenti, riportate in Figura 2.18, mostrano che la cenere è una miscela di particelle di varie dimensioni e morfologie, sia sferiche che irregolari. La

cenere da biomassa mostra una natura alcalina come risulta da Tabella 2.13 e Tabella 2.14.

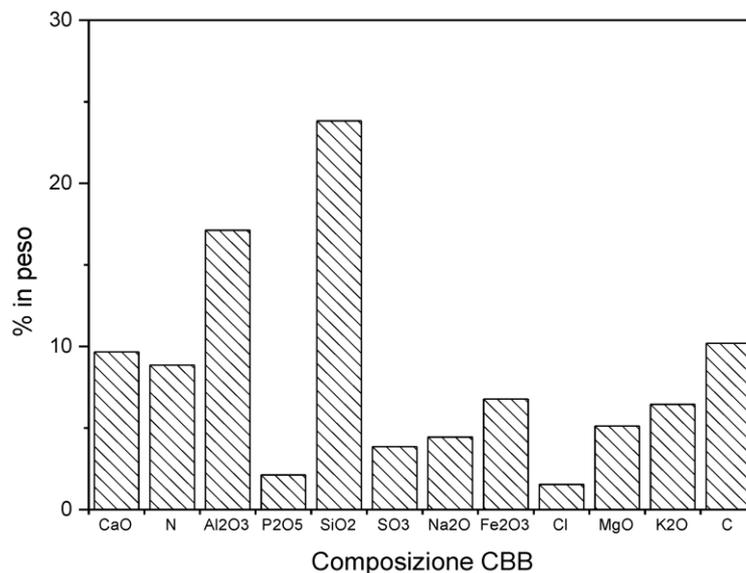


Figura 2.17 – Cenere da biomassa: composizione media in termini di ossidi

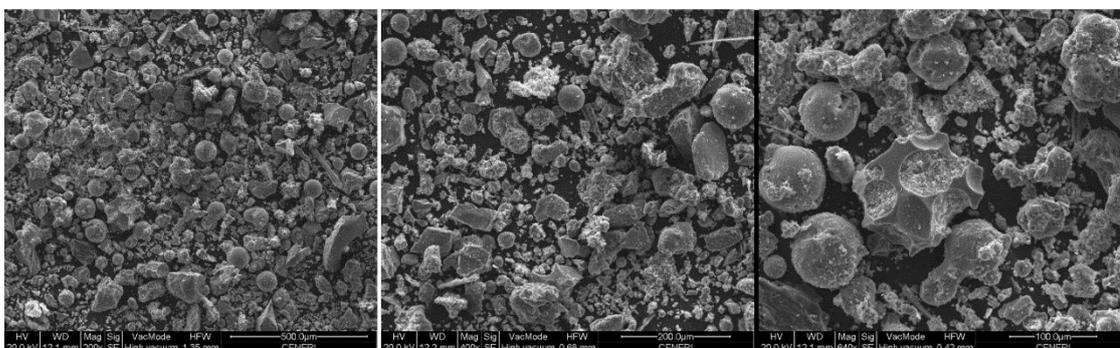


Figura 2.18 – Cenere da biomassa: micrografie SEM a diversi ingrandimenti

Tabella 2.13 – Proporzioni soluzioni

Time (min)	H ₂ O Dis (g)	FBA (g)	Metakaolin (g)
Solution 1	50	5	0
Solution 2	50	0	5

Tabella 2.14 – pH soluzioni a diversi tempi

Time (min)	pH Solution 1	pH Solution 2
1	12.54	6.315
5	12.82	6.375
10	12.85	6.387

SILICATO DI SODIO

Il trisilicato di sodio ($\text{Na}_2\text{O}_7\text{Si}_3$) utilizzato è stato fornito dalla ditta Sigma Aldrich S.p.a.

Si presenta sotto forma di una polvere di colore bianco e inodore.

In Tabella 2.15 se ne riporta la composizione.

Tabella 2.15 – Trisilicato di sodio: composizione

Trisilicato di sodio	Na_2O	SiO_2	Loss on ignition, 800°C
Composizione in peso (%)	≥ 18 %	≥ 60 %	≤ 20%

IDROSSIDO DI POTASSIO

L'idrossido di potassio (KOH) è stato fornito dalla ditta Titolchimica S.p.a. Si presenta come un solido incolore e inodore, sotto forma di pellet, puro all'85%.

SABBIA

L'aggregato utilizzato per la preparazione dei campioni è una sabbia silicea fornita dalla Vaga S.r.l. Sono state utilizzate due frazioni granulometriche, 0.1 mm – 0.45 mm e 0.5 mm – 1.0 mm in proporzione 50:50 in massa e le cui curve granulometriche sono riportate in Figura 2.19. L'analisi chimica e mineralogica è altresì riportata in Tabella 2.16.

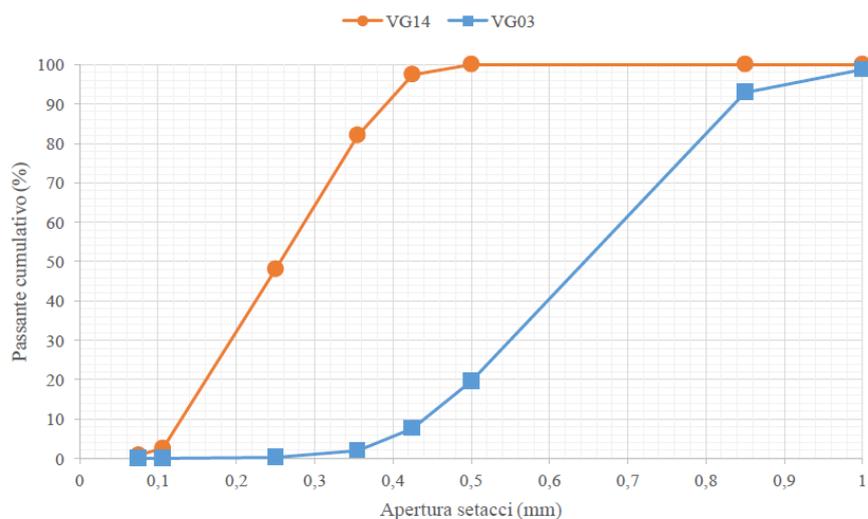


Figura 2.19 – Aggregati: curve granulometriche

Tabella 2.16 – Aggregati: analisi chimica e mineralogica

Dati tecnici			
Nome commerciale	VG14		
Tipo di sabbia	Sabbia silicea essiccata mm 0,1-0,45		
Umidità	< 0,5%		
Analisi chimica			
Silice (SiO_2)	83,30%	Magnesio (MgO)	1,50%
Ferro (Fe_2O_3)	2,10%	Sodio (Na_2O)	2,00%
Alluminio (Al_2O_3)	6,60%	Potassio (K_2O)	2,10%
Calcio (CaO)	1,20%	Perdita al fuoco	1,10%
Analisi mineralogica			
Quarzo	61,80%		
Rocce granitoidi	16,50%		
Feldspati	12,70%		
Altri minerali (tracce)	9,00%		

Dati tecnici			
Nome commerciale	VG03		
Tipo di sabbia	Sabbia silicea essiccata mm 0,5-1		
Umidità	< 0,5%		
Analisi chimica			
Silice (SiO_2)	83,30%	Magnesio (MgO)	1,50%
Ferro (Fe_2O_3)	2,10%	Sodio (Na_2O)	2,00%
Alluminio (Al_2O_3)	6,60%	Potassio (K_2O)	2,10%
Calcio (CaO)	1,20%	Perdita al fuoco	1,10%
Analisi mineralogica			
Quarzo	61,80%		
Rocce granitoidi	16,50%		
Feldspati	12,70%		
Altri minerali (tracce)	9,00%		

PREPARAZIONE DELLE MISCELE

La soluzione attivatrice è stata preparata miscelando dapprima il silicato in polvere nell'acqua, mediante agitatore meccanico, al fine di facilitarne la dissoluzione. Trascorso un tempo pari a 2 ore si aggiunge l'idrossido di potassio. La soluzione (KOH-Silicato-Acqua) viene così posta in agitazione per un'intera notte.

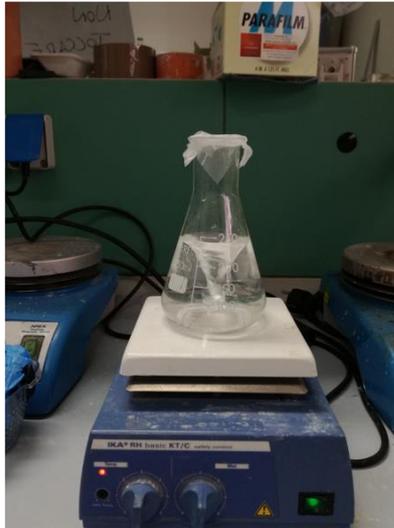


Figura 2.20 – Soluzione attivatrice in agitazione su agitatore meccanico

Le polveri sono state dapprima miscelate a secco, al fine di rimuovere l'eventuale formazione di grumi. Si è proceduto quindi a versare la soluzione nelle polveri reattive in agitazione costante mediante un miscelatore meccanico per malte. Dopo 10 min si è proceduto all'aggiunta dell'aggregato.

La lavorabilità della malta è stata misurata attraverso lo spandimento di un campione di prova posizionato su una tavola a scosse secondo UNI EN 1015-3 [83].

Le resistenze a flessione e a compressione sono state determinate su campioni prismatici di dimensioni 40 mm x 40 mm x 160 mm a 2, 7, 28 giorni di stagionatura secondo la norma UNI EN 1015-11 [82]. I valori sono stati ottenuti dalla media di tre campioni testati.

La misurazione del ritiro è stata effettuata secondo la UNI EN 12617-4 [84] mantenendo i campioni in condizioni di temperatura e umidità controllata pari a 20 °C e 55% U.R.

2.2.3 MURATURA

Il programma sperimentale ha riguardato prove di aderenza a taglio diretto di tipo ‘single-lap’ su substrato in muratura e prove di compressione su colonne in muratura confinate mediante sistemi FRCM.

Per la realizzazione dei supporti e delle colonne sono stati utilizzati mattoni pieni d’argilla di dimensioni standard pari a 55 mm x 120 mm x 250 mm. Il laterizio è stato caratterizzato mediante prove a compressione condotte su 4 campioni di dimensioni 50 mm x 50 mm x 50 mm secondo la norma UNI EN 772-1 [85]. Il valore medio della resistenza a compressione è di 42 MPa (CoV 5.26%). In Figura 2.21 si riportano le curve tensione-deformazione e un campione a rottura.

La malta di allettamento utilizzata, per la realizzazione dei supporti, è a base di calce idraulica NHL 3.5 e inerti di sabbia silicea e calcare dolomitico in curva granulometrica 0 – 2.5 mm, classe di resistenza M5. I valori medi di resistenza a flessione e a compressione a 28 giorni di stagionatura, ottenuti su sei campioni secondo la norma UNI EN 1015-11 [82], sono rispettivamente pari a 2.48 MPa (CoV 5.68%) e 7.02 MPa (CoV 4.27%).

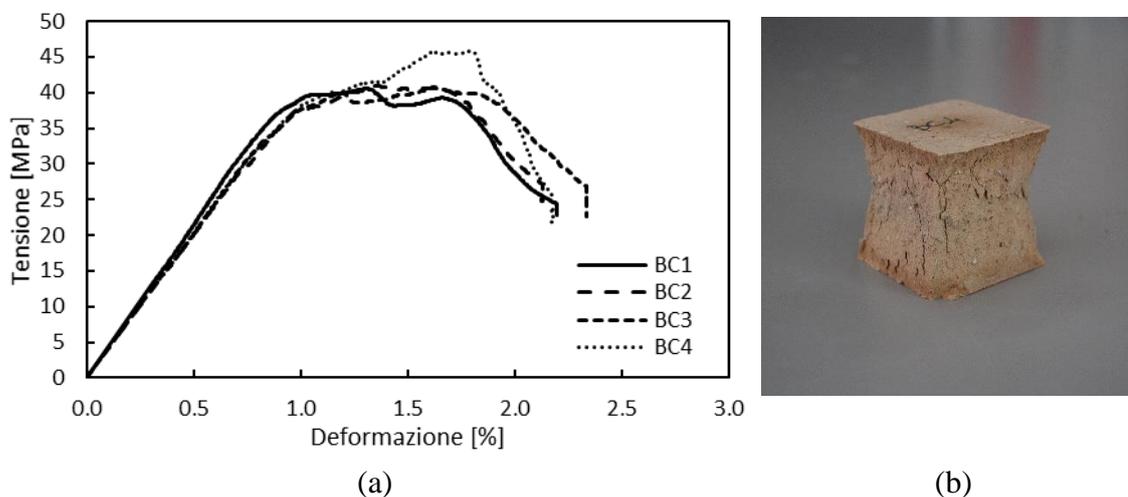


Figura 2.21 – Mattone: curve tensione deformazione (a) campione a rottura (b)

2.3 METODI

2.3.1 TEST DI TRAZIONE

I test di trazione sono stati condotti su campioni di dimensioni nominali pari a 500 mm x 43 mm x 10 mm ottenuti da pannelli di dimensioni 350 mm x 560 mm. A tal fine è stato

utilizzato un cassero in acciaio con sponde removibili per garantire una omogenea stesura degli strati di matrice da 5 mm. I pannelli sono stati realizzati applicando un singolo strato di tessuto di rinforzo, tagliato secondo le dimensioni del pannello stesso procedendo come illustrato in Figura 2.22.

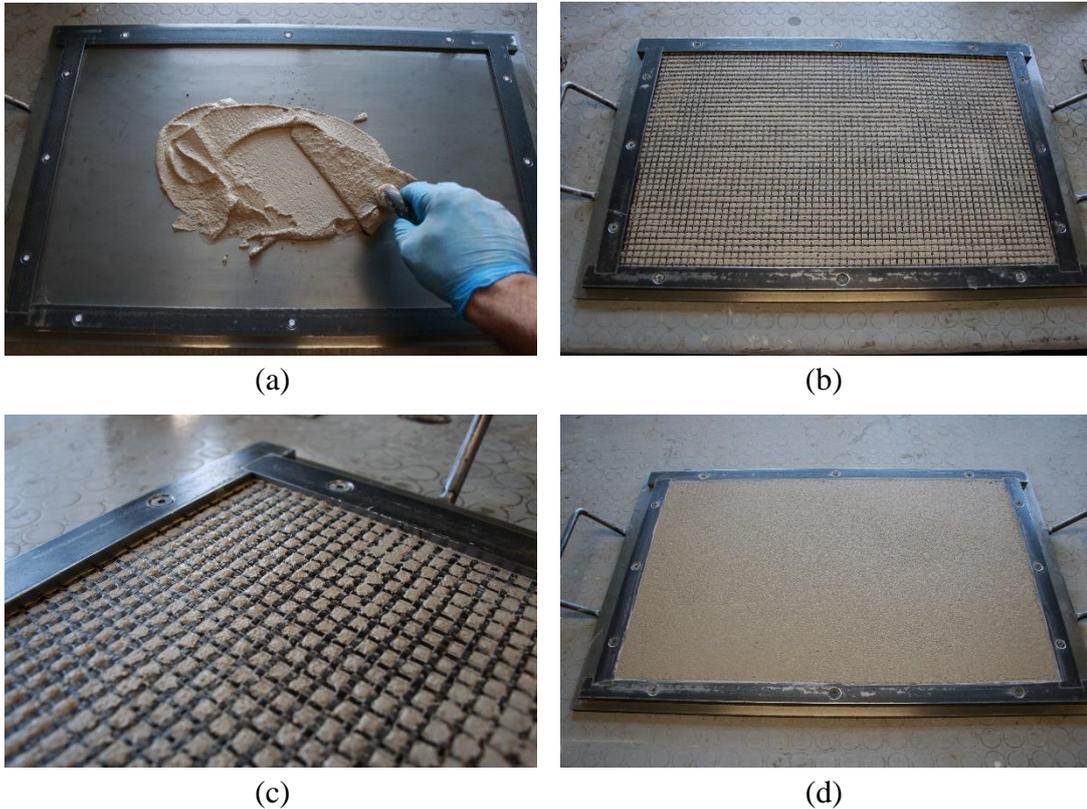


Figura 2.22 – Fasi di formatura dei pannelli

La stagionatura è stata effettuata a 20 °C e 95% R.H. per 28 giorni.

I campioni sono stati ottenuti mediante taglio water-jet, la cui precisione e il controllo totalmente automatizzato della procedura, hanno consentito di ottenere le dimensioni volute dei campioni senza particolari variazioni di sezione (Figura 2.23).

Durante le operazioni di taglio parte del pannello lungo il perimetro viene rimossa al fine di escludere eventuali effetti di bordo dovuti a scarsa impregnazione del rinforzo. I campioni vengono estratti per successivi tagli longitudinali. Ciò al fine di ottenere campioni con numero prefissato di fasci disposti simmetricamente sulla sezione trasversale del campione.



Figura 2.23 – Operazioni di taglio mediante water-jet

La prova di trazione è stata condotta mediante “grip a cuneo” che prevede l’applicazione del carico mediante pressione laterale agli estremi del campione simulando un supporto di tipo incastro. A tal fine è stato previsto l’utilizzo di tab in alluminio di spessore 3 mm e lunghezza 100 mm, per consentire una omogenea distribuzione delle tensioni normali al piano del campione in corrispondenza delle estremità di aggrappo per l’applicazione del carico di trazione. La lunghezza di aggrappo è pari a 80 mm. I test sono stati condotti in controllo di spostamento, con una velocità di prova pari a 0.25 mm/min secondo quanto riscontrato in letteratura [12] [86]. L’acquisizione delle deformazioni è stata effettuata globalmente mediante coppia di trasduttori di spostamento (LVDT a e b), disposti longitudinalmente lungo lo spessore di 10 mm per ottenere gli spostamenti dell’intero tratto utile (Figura 2.24). I test sono stati condotti con macchina di prova Zwick/Roell Z250.

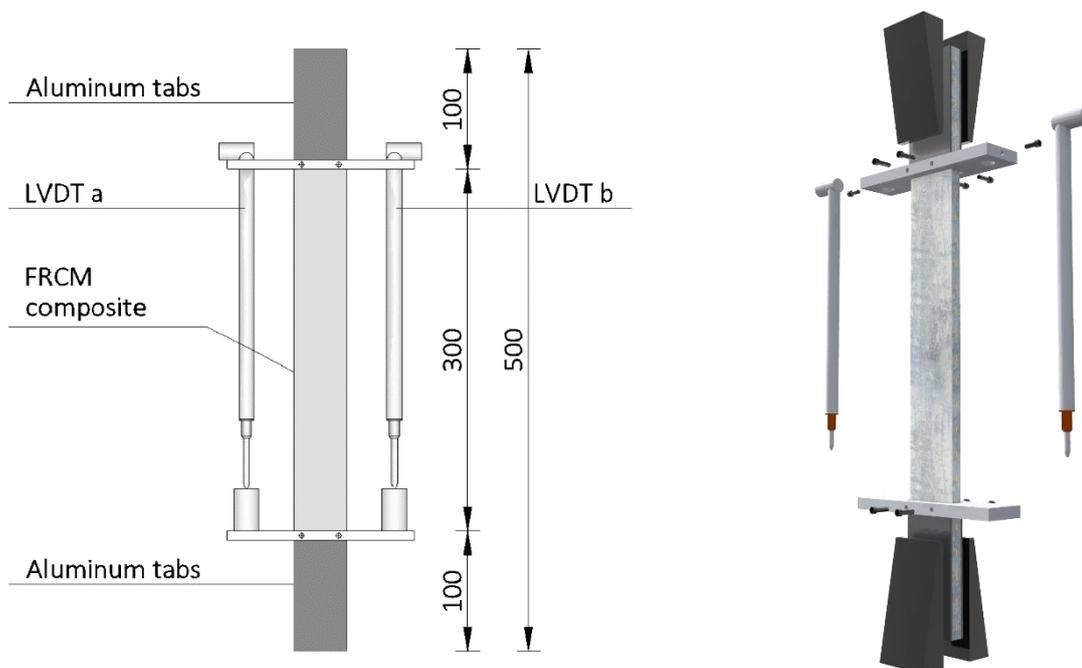


Figura 2.24 – Test di trazione: setup di prova (dimensioni in mm)

2.3.2 DIRECT SHEAR BOND TEST

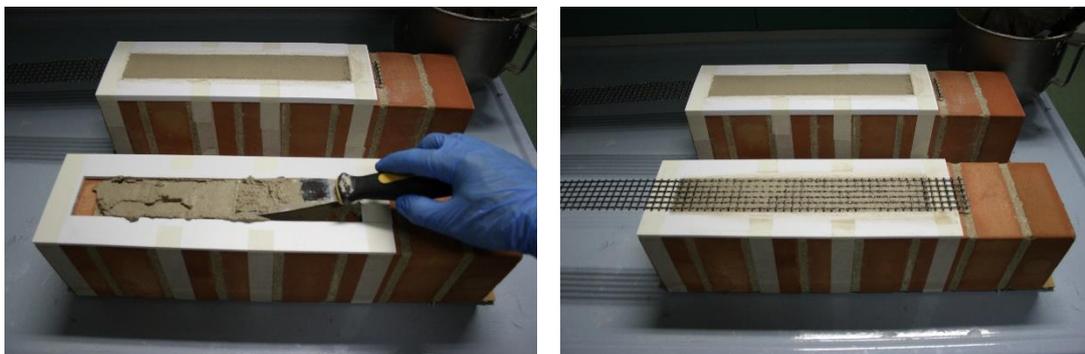
Per eseguire i test di aderenza su supporto murario sono stati realizzati dei prismi di muratura di dimensioni 120 mm x 120 mm x 510 mm in mattoni pieni e malta di allettamento come definito in (par. 2.2.3).



Figura 2.25 – Test di taglio diretto: realizzazione supporti in muratura

I test sono stati condotti su campioni di composito di 10 mm di spessore e larghezza definita in funzione della maglia della rete, applicati su una faccia del prisma come riportato in Figura 2.26. La rete, annegata tra due strati di matrice dello spessore di 5 mm ciascuno, è stata posizionata oltre l'estremità inferiore dell'area in aderenza al supporto, al fine di valutare eventuali scorrimenti all'interno della matrice. La malta è stata applicata limitatamente all'area interessata dalla lunghezza di aderenza lasciando la rete tal quale sino alla ganascia di aggrappo (Figura 2.26 e Figura 2.27). Sono state adottate differenti lunghezze di aderenza per valutare la risposta del composito, pari a 100 mm, 200 mm, 300 mm e 400 mm.

I campioni sono stati mantenuti umidi per almeno 7 giorni e per i successivi 21 giorni a 20 °C e 60% U.R.



(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 2.26 - Test di taglio diretto: preparazione dei campioni

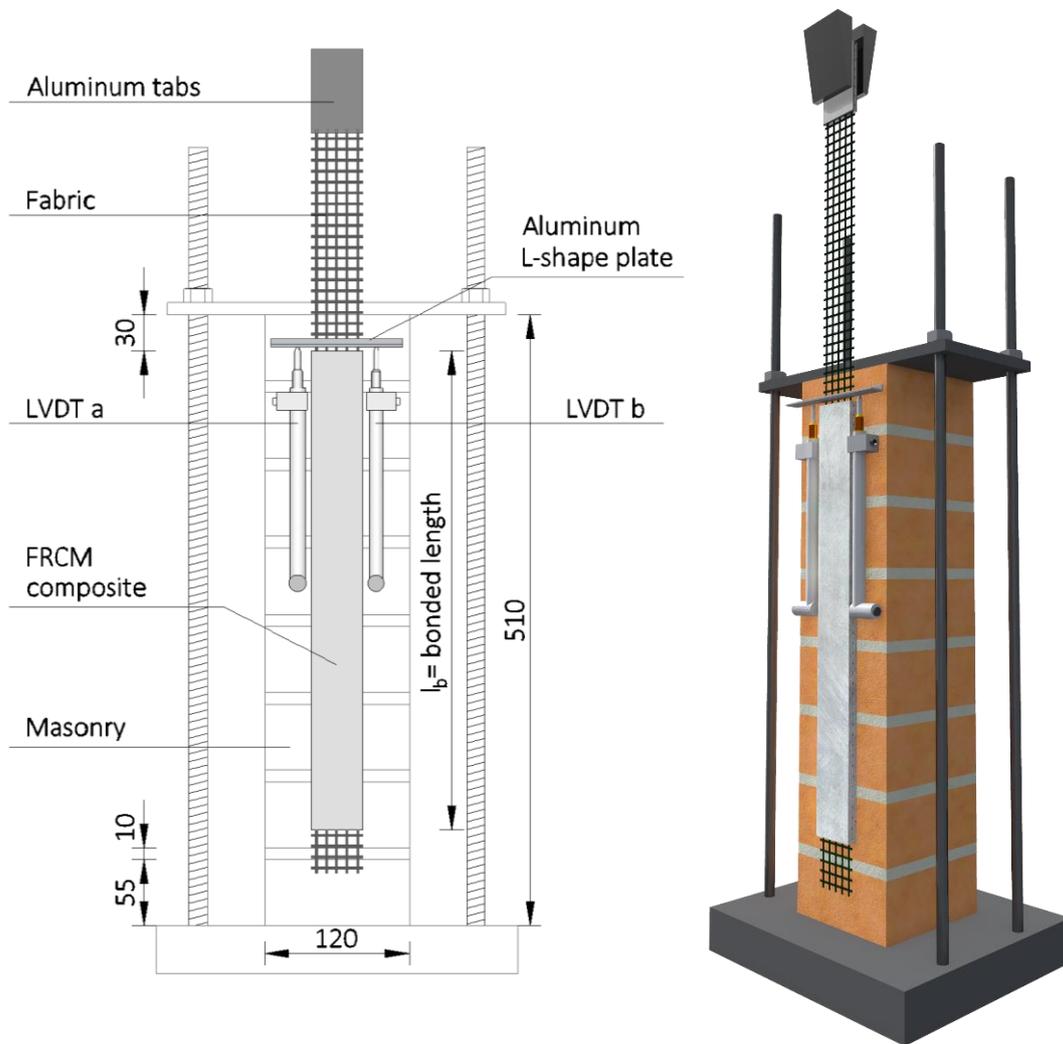


Figura 2.27 – Test di taglio diretto: setup di prova (dimensioni in mm)

La prova di aderenza a taglio di tipo diretto, è stata effettuata mediante setup di tipo “single lap” per mezzo di una configurazione “push pull”. Il rinforzo è applicato su una faccia del substrato, il quale è vincolato alla base del telaio di prova per mezzo di una piastra e 4 tirafondi.

Il carico è applicato alla rete di rinforzo alla cui estremità sono stati incollati tab in alluminio per assicurare una omogenea distribuzione degli sforzi. La prova è condotta in controllo di spostamento della traversa del telaio con una velocità pari a 0.18mm/min [27] [28], con macchina di prova Instron 5582.

Lo scorrimento globale s , definito come lo spostamento relativo tra il tessuto del composito all'estremità caricata dello stesso e il supporto, è stato determinato per mezzo di due trasduttori di spostamento (LVDT a e b) collocati sulla superficie. A tal fine viene collocato un profilo in alluminio in corrispondenza del fascio trasversale adiacente all'estremità caricata del composito (Figura 2.28a) [87] [88].

Al fine di valutare eventuali rotazioni del supporto e, quindi, eccentricità del carico applicato, sono stati disposti due ulteriori trasduttori di spostamento collocati posteriormente a un'altezza di circa 350 mm (Figura 2.28b).

Tutti i dati sono stati acquisiti con frequenza 10 Hz.

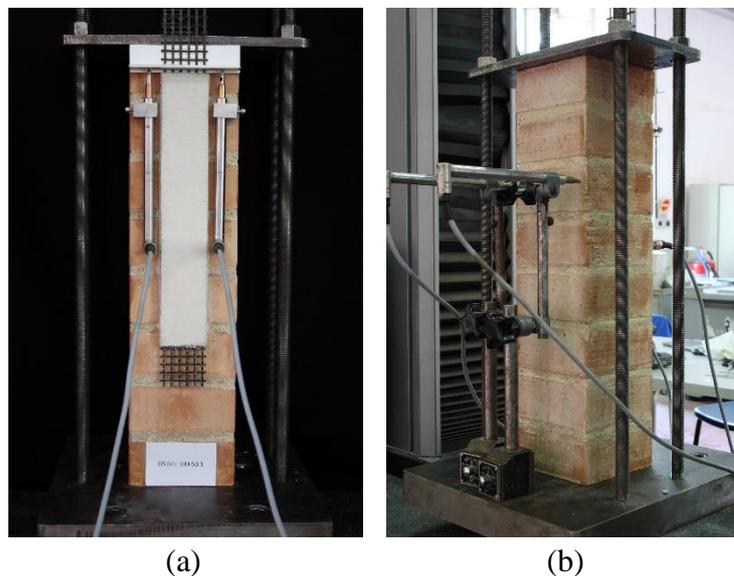


Figura 2.28 – Test di taglio diretto: setup di prova vista frontale (a) e posteriore (b)

2.3.3 TEST DI DEGRADO TERMICO

Il programma sperimentale ha riguardato prove di aderenza a taglio diretto di tipo ‘single-lap’ su substrato in muratura a valle di trattamenti termici. Nello specifico è stato investigato il comportamento del sistema di rinforzo in fibra di basalto con rete a bassa (B2-FRCM) e ad alta densità (B4-FRCM), in fibra di acciaio (S-FRCM) e in fibra di carbonio (C-FRCM).

Le temperature adottate per effettuare i trattamenti termici sono pari a 100°C, 300°C e 500°C. Test effettuati a temperatura ambiente sono stati utilizzati come riferimento.

I supporti utilizzati presentano la stessa geometria illustrata nel paragrafo 2.3.2. Il composito è stato applicato al supporto per una lunghezza di 300 mm e una larghezza di 50 mm per tutti i sistemi di rinforzo oggetto di studio, al fine di escludere effetti relativi alla diversa geometria di esposizione.

La preparazione dei campioni segue le stesse procedure illustrate precedentemente nel paragrafo 2.3.2 (Figura 2.29).



Figura 2.29 – Preparazione dei campioni del sistema di rinforzo in acciaio

Il trattamento termico è stato effettuato sul composito cercando di limitare gli effetti della temperatura sul tessuto di rinforzo che si estende oltre la lunghezza in aderenza al substrato (necessaria al fine di eseguire i test).

A tal proposito, i campioni sono stati dotati di un isolamento in fibrocera mica collocato in corrispondenza delle aree in cui il rinforzo non è inglobato dalla matrice (Figura 2.30a e b).

I campioni sono quindi stati collocati nel forno, in posizione orizzontale, mantenendo all'esterno dello stesso la porzione rimanente di rinforzo fibroso (Figura 2.30c e d).

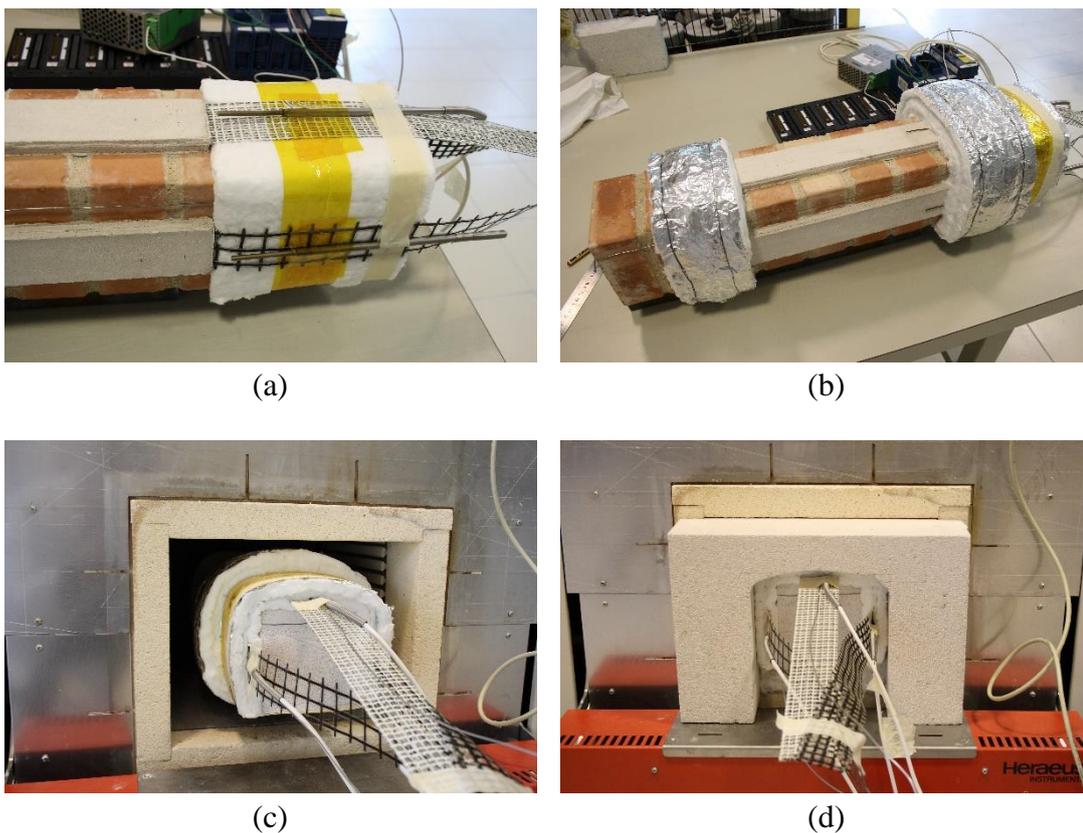


Figura 2.30 – Trattamento termico: preparazione del campione

Durante il trattamento termico sono stati monitorati i valori della temperatura all'interno del forno e della parte isolata mediante l'impiego di 4 termocoppie di tipo K e 3 termoresistenze.

Le tre termoresistenze (TR) sono state collocate, una per ogni faccia della colonna, all'interno dell'area isolata a diretto contatto con il rinforzo fibroso, al fine di valutare la massima temperatura raggiunta Figura 2.30a.

Una termocoppia (TC F) è stata collocata all'interno del forno in prossimità del supporto a una distanza di 3 cm per monitorare le variazioni di temperatura tra i valori di settaggio e quelli raggiunti all'interno del forno stesso. Tre termocoppie (TC) sono state infine collocate appena oltre l'area protetta dall'isolamento per valutare la temperatura raggiunta sulla superficie del composito.

Il trattamento è stato effettuato con un gradiente termico pari a $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$, fino al raggiungimento della temperatura prefissata. I campioni sono stati mantenuti a temperatura costante per 3 ore, al termine delle quali è seguito un naturale processo di raffreddamento all'interno del forno stesso. I test sono stati condotti pertanto a

temperatura ambiente. Per eseguire le prove di aderenza è stato adottato il setup precedentemente descritto nel paragrafo 2.3.2.

2.3.4 TEST DI COMPRESSIONE SU COLONNE CONFINATE

Il programma sperimentale ha riguardato prove di compressione su colonne in muratura confinate mediante sistemi FRCM. L'altezza nominale dei campioni è di 770 mm con sezione trasversale da 250 mm di larghezza e 250 mm di profondità, con un rapporto d'aspetto approssimativamente di 3:1 (Figura 2.31, Figura 2.32). Le colonne sono state realizzate assemblando due unità per corso di mattoni e alternando la disposizione in direzione ortogonale per i corsi successivi, per un totale di 12 corsi e di 11 letti di malta. Lo spessore nominale dei giunti è di 10 mm.

Al fine di riprodurre proprietà meccaniche, piuttosto scadenti tipiche di strutture in muratura esistenti, è stata utilizzata una malta d'allettamento a base di calce idraulica NHL 3.5, pozzolana e inerti di sabbia silicea e calcare dolomitico in curva granulometrica 0 – 2.5 mm. I valori medi di resistenza a flessione e a compressione a 28 giorni di stagionatura, ottenuti secondo la norma UNI EN 1015-11 [82], sono rispettivamente pari a 1.22 MPa (CoV 3.88%) e 2.10 MPa (CoV 6.73%).

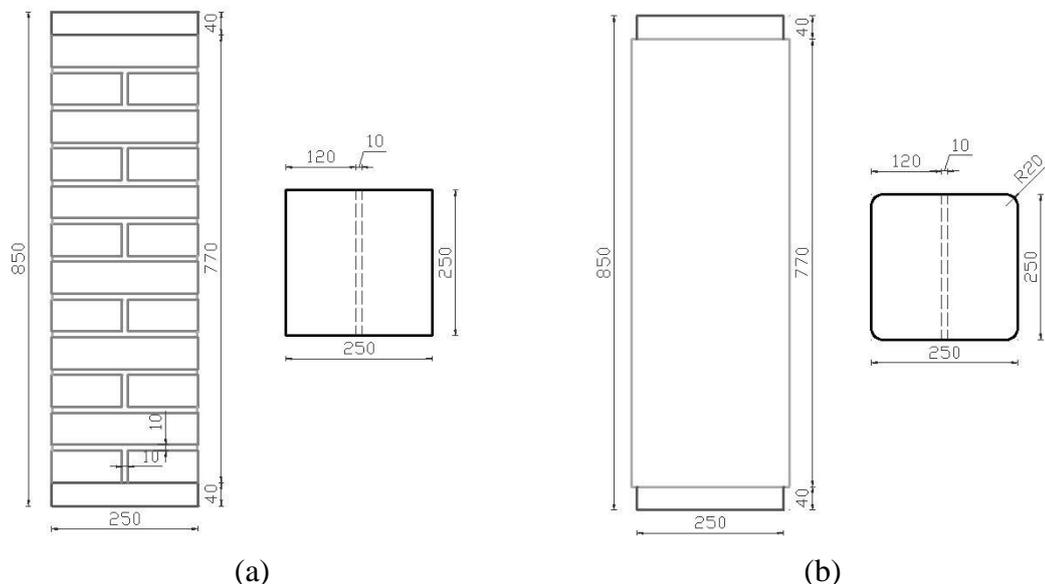


Figura 2.31 – Geometria dei campioni (dimensioni in mm): (a) non confinato (b) confinato

Per le colonne confinate si è proceduto a un preventivo arrotondamento degli spigoli per mezzo di una mola diamantata, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione ivi localizzate, che potrebbero provocare una rottura prematura del composito. Il raggio di curvatura conferito è pari a 20 mm, in accordo con studi di letteratura e i requisiti minimi previsti dalle Istruzioni CNR-DT 200 R1/2013 [47].

Per ogni colonna è stato infine disposto uno strato di malta ad alta resistenza dello spessore di 40 mm, in testa e al piede, al fine di fornire un piano di contatto regolare con la piastra del telaio di prova e assicurare una uniforme distribuzione del carico.



Figura 2.32 – Realizzazione colonne

Le colonne sono state preventivamente bagnate a rifiuto prima dell'applicazione del rinforzo. Questo è applicato mediante una prima stesura di uno strato di malta con spessore medio 3-4 mm, la successiva disposizione del tessuto e un secondo strato di malta, di analogo spessore al precedente, al fine di ricoprire completamente il rinforzo. Nel caso di più strati di rinforzo si procede alla posa di un secondo strato di tessuto e di un ulteriore strato di malta procedendo sempre fresco su fresco (Figura 2.33). Al termine delle operazioni di confinamento, le colonne sono state mantenute umide per 28 giorni. È stato valutato l'impiego di tre sistemi di rinforzo: in fibra di basalto con rete ad alta densità (B4-FRCM), acciaio (S-FRCM) e PBO (PBO-FRCM).

Il tessuto in fibra di acciaio è stato disposto fasciando le colonne orientando i trefoli perpendicolari all'asse longitudinale del prisma. Poiché il tessuto presenta una larghezza di 300 mm, minore dell'altezza della colonna, il confinamento è stato realizzato per mezzo di più fasce, accostandole senza sovrapposizioni lungo l'asse verticale. Il tessuto inoltre è stato presagomato per essere conforme alla superficie della colonna in

corrispondenza degli spigoli (Figura 2.34). Tale accorgimento si è reso necessario per evitare che l'azione di confinamento venga meno agli spigoli a causa di distacchi locali della fibra metallica dovuti alla propria rigidezza flessionale. Le reti in fibra di basalto e PBO invece, sono state disposte fasciando le colonne mediante un'unica fascia di altezza pari all'altezza della colonna, senza alcuna sagomatura preventiva.



Figura 2.33 – Confinamento con rinforzo in fibra di basalto



Figura 2.34 – Preparazione del rinforzo in acciaio

CONFIGURAZIONI DI PROVA

I parametri oggetto di studio sono stati l'influenza del numero di strati di rinforzo (1, 2 e 3 layer) e la disposizione dello strato in sovrapposizione (overlap). La lunghezza dell'overlap è stata fissata pari al 25% del perimetro totale della sezione trasversale della colonna, equivalente quindi alla larghezza di una faccia.

Il confinamento multilayer è stato realizzato avendo cura di disporre l'overlap degli strati successivi su lati diversi. Nello specifico, l'overlap del primo strato è stato disposto sul lato A, quello del secondo strato sul lato C e quello del terzo strato sul lato B (Figura 2.35).

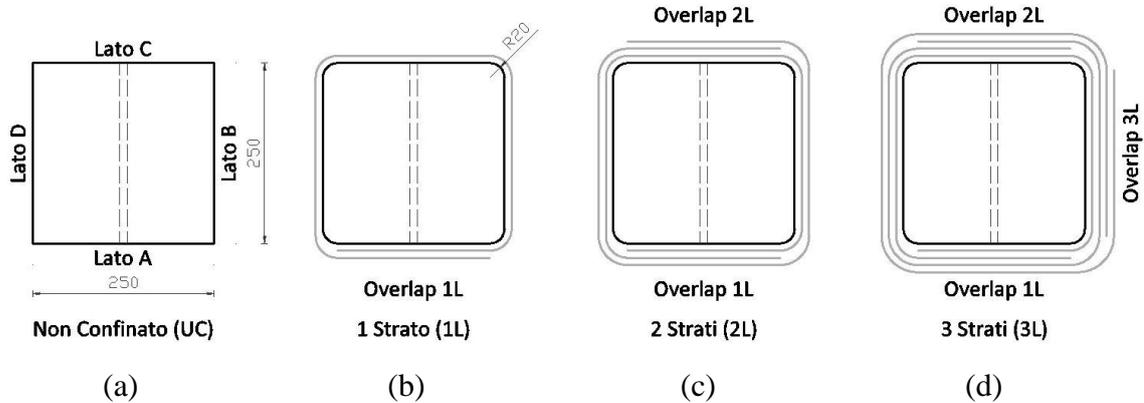


Figura 2.35 – Configurazioni di prova: (a) non confinato, (b) 1 layer, (c-d) multilayer

In particolare, il confinamento mediante sistema in fibra di acciaio con 1 layer è stato realizzato accostando le 3 fasce (di altezza pari a 1/3 della colonna) con due configurazioni:

- disposizione continua (OC) degli overlap delle 3 fasce su un unico lato (Figura 2.36a),
- disposizione alternata (OA) degli overlap delle 3 fasce su lati opposti (Figura 2.36b), overlap prima e terza fascia sul lato A, overlap della 2 fascia sul lato C.

Nei sistemi multilayer, le fasce sono state disposte traslando l'accostamento delle stesse in corrispondenza della mezzera delle singole fasce sottostanti (Figura 2.37).

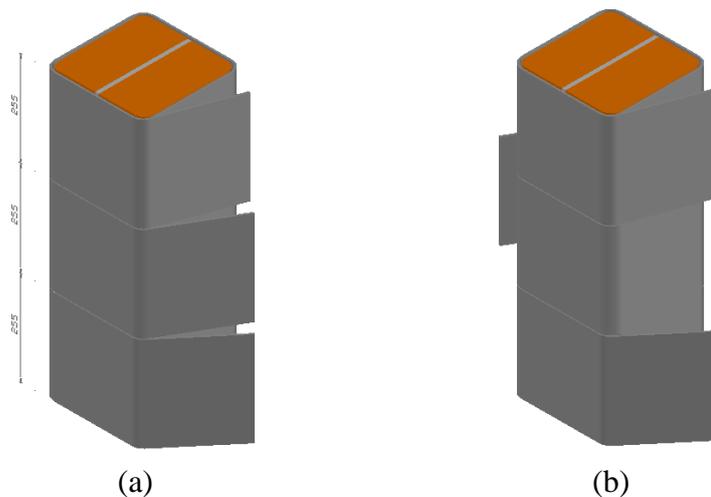


Figura 2.36 – 1 layer in S-FRCM (a) overlap continuo (OC), (b) overlap alternato (OA)

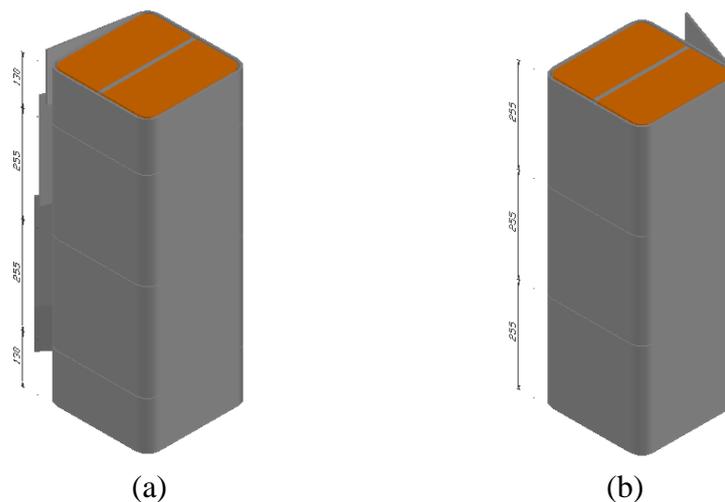


Figura 2.37 – Configurazioni multilayer in S-FRCM (a) secondo strato, (b) terzo strato

TEST SETUP

Sono stati condotti test di compressione a carico centrato per tutte le geometria di prova e a carico eccentrico per le colonne confinate con un layer in acciaio con disposizione alternata degli strati in sovrapposizione. L'eccentricità è stata posta pari a 25mm e a 50mm.

Le prove sono state condotte per mezzo di un telaio in acciaio appositamente realizzato, equipaggiato con un martinetto idraulico e una cella di carico da 1000 kN.

Il carico viene trasferito alla colonna mediante una piastra in acciaio realizzata in modo da accogliere un elemento a forma di cuneo posto a diretto contatto con la cella di carico. Tale sistema è stato collocato in testa e al piede della colonna. Le prove sono state condotte in controllo di carico.

Lo spostamento assiale è stato acquisito per mezzo di 4 LVDT verticali collocati agli spigoli della colonna (Figura 2.38). Gli spostamenti laterali sono stati acquisiti per mezzo di 12 LVDT, 3 per ogni faccia della colonna posizionati in testa, in mezzeria e al piede (Figura 2.39).

Il setup di prova così composto è illustrato in Figura 2.40.

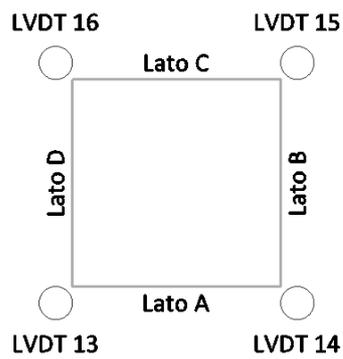


Figura 2.38 – Disposizione in pianta LVDT longitudinali

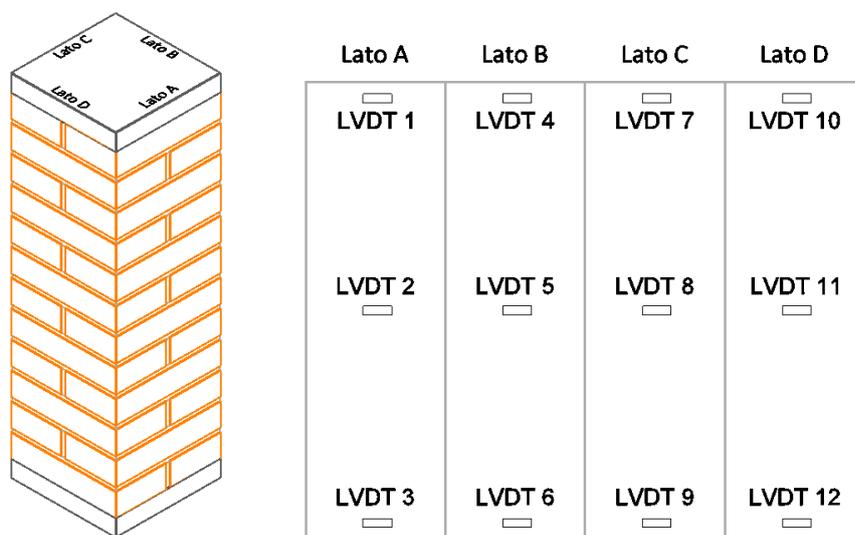


Figura 2.39 – Disposizione LVDT laterali

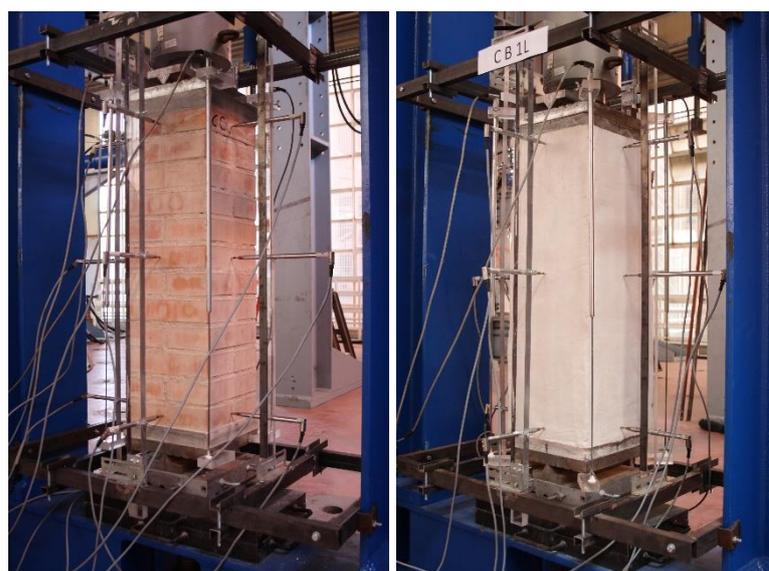


Figura 2.40 – Test di compressione: setup di prova

Capitolo 3

RISULTATI E DISCUSSIONI

3.1 PREMESSA

In questo capitolo verranno esposti e discussi i risultati relativi alle diverse campagne sperimentali condotte. Sarà dapprima analizzato il comportamento meccanico di sistemi di rinforzo FRCM in fibra di basalto mediante prove di trazione e prove di taglio di tipo diretto (single lap direct shear test) al fine di indagare l'aderenza al substrato in muratura, l'interazione rinforzo-matrice e le modalità di rottura. Sarà analizzato inoltre il degrado di tali sistemi a seguito di trattamenti termici anche attraverso un'analisi comparativa tra diversi sistemi di rinforzo (in fibra di carbonio e acciaio). È stata altresì valutata l'efficacia in applicazioni strutturali di confinamento di colonne in muratura mediante diversi sistemi di rinforzo (in fibra di basalto, acciaio e PBO). Infine verranno presentati i risultati relativi alla definizione, preparazione e caratterizzazione di matrici inorganiche innovative appartenenti alla famiglia dei leganti attivati alcalinamente e all'impiego di tale matrice in un composito fibrorinforzato in fibra di basalto.

3.2 ANALISI DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL SISTEMA DI RINFORZO B-FRCM

3.2.1 TEST DI TRAZIONE

I risultati delle prove di trazione sono espressi in termini di diagrammi tensione-deformazione. Le tensioni sono state valutate in riferimento all'area trasversale del rinforzo, A_f , determinata come prodotto dello spessore equivalente del tessuto, t_{eq} , in direzione dell'ordito (coincidente con la direzione di carico) e la larghezza del composito b_{eff} . Questa è stata determinata come prodotto del numero di fasci n_y e il loro interasse b_y .

Si assume quindi che le fibre siano sparse lungo la larghezza. Le deformazioni sono state valutate dividendo gli spostamenti per la base di misura dei dispositivi (vedi par. 2.3.1).

$$\sigma = \frac{F}{A_f} \text{ con } A_f = t_{eq} \times b_{eff} \text{ e } b_{eff} = n_y \times b_y \quad 3.1$$

È stata inoltre valutata la tensione di prima fessurazione della matrice, $\sigma_{I,m}$, dividendo il carico applicato per la sezione trasversale lorda del campione.

Le curve di risposta mostrano un comportamento di tipo trilineare. Il primo tratto lineare (Fase I) rappresenta la fase non fessurata, fino alla formazione di una prima lesione, relativa alla resistenza a trazione della matrice (Figura 3.1a). Il secondo tratto (Fase II) corrisponde alla formazione e propagazione delle fessure (Figura 3.1b-c). Il terzo tratto (Fase III) corrisponde alla fase in cui il quadro fessurativo è completamente sviluppato (Figura 3.1d), con l'apertura delle lesioni esistenti fino a rottura per cedimento dei fasci (Figura 3.1e, Figura 3.2).

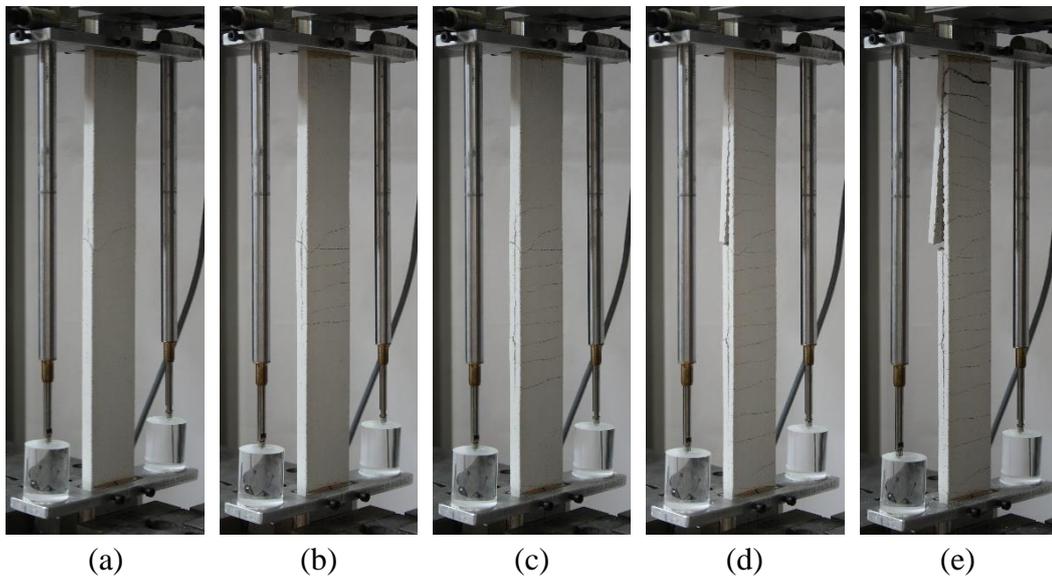


Figura 3.1 – Fasi della prova: (a) prima fessurazione, (b,c) fase di fessurazione, (d) termine della fessurazione e (e) rottura.

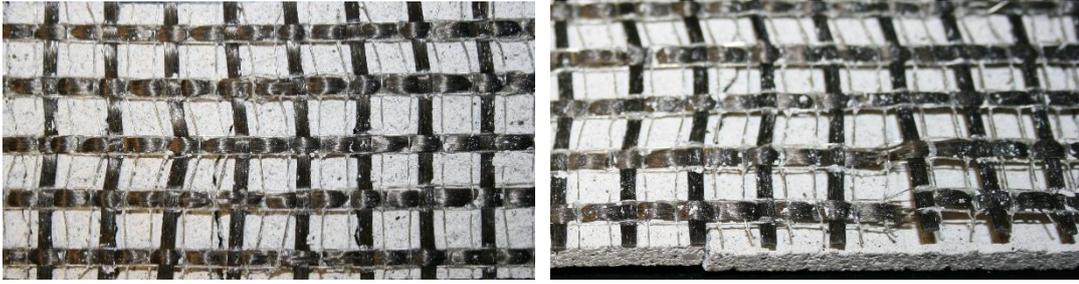


Figura 3.2 – Rottura dei fasci

In accordo con l'idealizzazione trilineare della risposta riportata Figura 3.3, la curva tensione-deformazione del composito può essere identificata da 9 parametri, quali le tensioni σ_I , σ_{II} e σ_u e le corrispondenti deformazioni ε_I , ε_{II} e ε_u , e i moduli elastici E_I , E_{II} e E_{III} relativi ai tre tratti che costituiscono la risposta. La tensione σ_I e la corrispondente deformazione ε_I definiscono il punto di transizione tra la fase I e la fase II, che coincide con la prima fessurazione della matrice. La tensione σ_{II} e la corrispondente deformazione ε_{II} definiscono il punto di transizione tra la fase II e la fase III, che corrisponde con l'inizio del tratto lineare della curva tensione-deformazione dove il carico applicato è assorbito solo dal rinforzo. La rottura del campione è individuata dalla tensione ultima σ_u e la corrispondente deformazione ε_u .

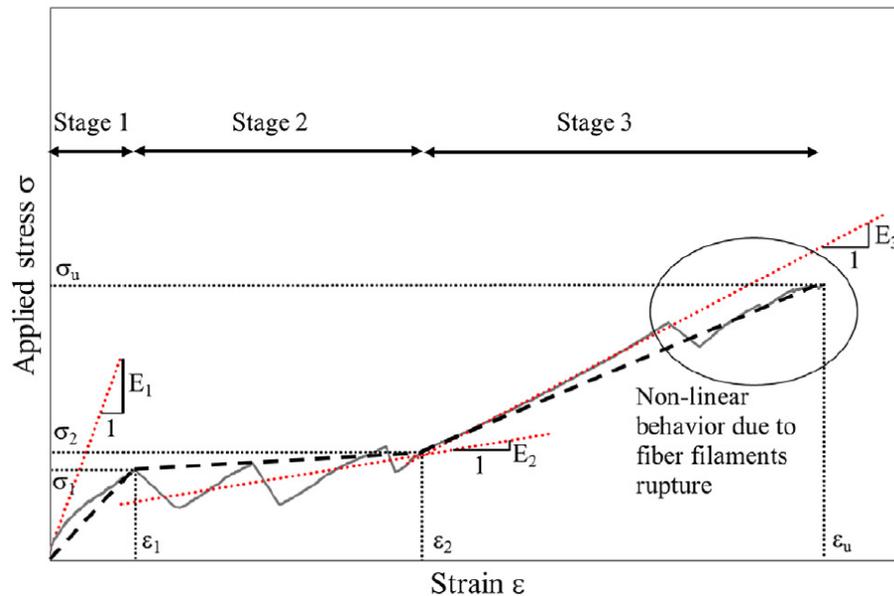


Figura 3.3 – Identificazione delle diverse fasi della risposta [86]

Poiché l'individuazione dei nove parametri non risulta sempre immediata, sarà adottata una procedura che prevede, quando necessario l'interpolazione della curva [86]. A causa del comportamento non lineare, le pendenze dei tratti che individuano le diverse fasi della risposta possono differire dalla pendenza della linea individuata dai punti di transizione. Nella Fase I il composito presenta un tratto inizialmente lineare seguito da un andamento non lineare dovuto alla graduale microfessurazione della matrice. In questo caso, E_I è determinato come la pendenza del porzione lineare del primo tratto. La formazione della prima macro lesione determina il passaggio alla fase di fessurazione. La pendenza nella Fase II, E_{II} , è valutata mediante interpolazione della curva tra i punti $(\sigma_I, \varepsilon_I)$ e $(\sigma_{II}, \varepsilon_{II})$. Il modulo elastico E_{III} è valutato come la pendenza nel tratto nella fase fessurata. La progressiva rottura di alcuni filamenti o la rottura prematura di qualche fascio durante la Fase III, può condurre a un comportamento non lineare prima che si verifichi la completa rottura del tessuto di rinforzo. In questo caso, il modulo E_{III} è valutato come la pendenza della porzione lineare.

In Figura 3.4 e in Tabella 3.1 si riportano rispettivamente i diagrammi relativi ai test effettuati, e i relativi parametri meccanici dedotti, ottenuti utilizzando la rete di rinforzo ad alta densità.

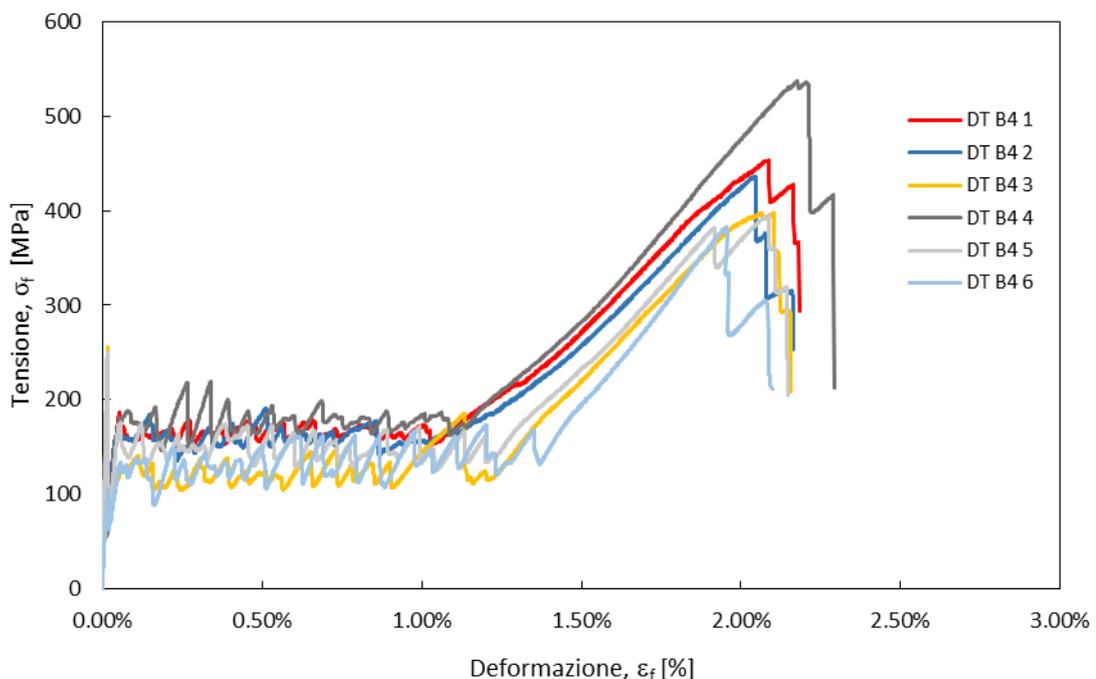


Figura 3.4 – B4-FRCM: curve di risposta tensione-deformazione a trazione

Tabella 3.1 – B4-FRCM: parametri meccanici a trazione

ID	ε_I [%]	σ_I [MPa]	ε_{II} [%]	σ_{II} [MPa]	ε_u [%]	σ_u [MPa]	E_I [GPa]	E_{III} [GPa]	$\sigma_{I,m}$ [MPa]
DT B4 1	0.007	128	1.11	171	2.04	454	1846	34	0.79
DT B4 2	0.010	117	1.22	185	2.03	437	1658	34	0.72
DT B4 3	0.016	256	1.36	175	2.01	398	1631	35	1.59
DT B4 4	0.009	169	1.21	200	2.16	537	1653	39	1.05
DT B4 5	0.015	250	1.32	178	1.95	395	1704	36	1.56
DT B4 6	0.018	106	1.45	177	1.95	383	1380	43	0.64
Media	0.012	171	1.28	181	2.02	434	1645	37	1.06
CoV	0.319	0.359	0.088	0.052	0.035	0.121	0.084	0.091	0.363

L'andamento del diagramma risulta pressoché simile per tutti i campioni. In tutti i test la curva di risposta è governata principalmente dalle Fasi II e III, indicando che i meccanismi principali sono identificati dalla formazione e apertura delle fessure.

Tutti i campioni infatti, hanno esibito un esteso quadro fessurativo lungo l'intero tratto utile, con una lesione longitudinale all'interfaccia fibra-matrice e lesioni trasversali generalmente localizzate in corrispondenza dei fasci di fibra trasversali (Figura 3.1d). Ciò è imputabile a concentrazioni di tensioni localizzate all'intersezione tra i fasci di ordito e di trama, la cui sovrapposizione determina delle variazioni di spessore della matrice. L'estensione della Fase II è determinata dal disallineamento iniziale dei fasci di ordito (direzione di carico) acquisito per l'intreccio degli stessi nella rete durante il processo di termosaldatura. A tal proposito si riporta in Figura 3.5 un fascio di ordito privato dei fasci trasversali e una micrografia nel punto di intersezione ordito/trama. La deformazione acquisita viene recuperata all'aumentare dello spostamento applicato durante la prova inducendo le numerose lesioni trasversali. Ciò potrebbe essere la causa inoltre dell'espulsione della matrice favorita anche dalla bassa spaziatura dei fasci stessi (Figura 3.1e). Il recupero del disallineamento iniziale determina infine il passaggio sulla curva di risposta dalla Fase II alla III [86]. Tale comportamento annulla il contributo irrigidente della matrice tra lesioni trasversali successive, "tension stiffening", determinando l'estensione significativa del diagramma tensione-deformazione verso deformazioni maggiori. Ciò comporta, di conseguenza, una traslazione della risposta nella fase fessurata e dell'attivazione delle proprietà meccaniche del rinforzo.

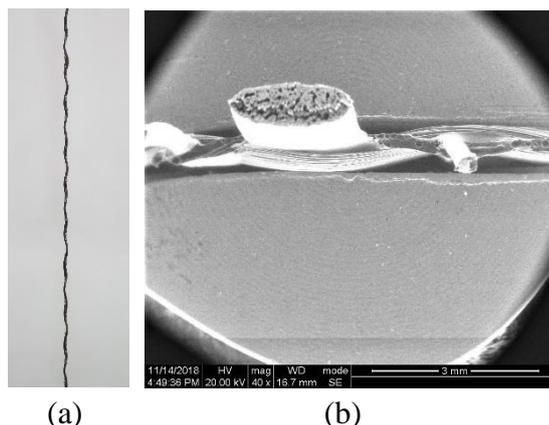


Figura 3.5 – Fascio di ordito privato dei fasci trasversali (a), immagine SEM all’intersezione tra i fasci di ordito e trama (b)

I valori ottenuti del modulo elastico in terza fase e della tensione di rottura risultano minori dei valori nominali della rete. Ciò probabilmente causato dalla prematura rottura di alcuni filamenti [89] a causa del ridotto effetto ridistributivo trasversale della matrice determinato dal quadro fessurativo riscontrato. Un’ulteriore causa può essere attribuita alla presenza all’interno del fascio di gruppi di filamenti interni scarsamente collegati tra loro e che quindi non partecipano significativamente alla trasmissione del carico [90]. Ciò è confermato da osservazioni al microscopio elettronico a scansione sulla sezione trasversale del singolo fascio che evidenziano un numero considerevole di vuoti all’interno dello stesso (Figura 3.6).

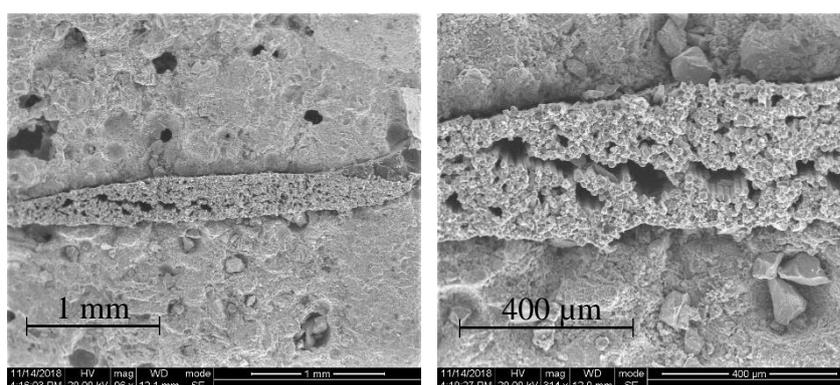


Figura 3.6 – Immagini SEM a differenti ingrandimenti della sezione trasversale di un fascio immerso in matrice

Il valore medio della tensione di prima fessurazione $\sigma_{I,m}$ risulta del 36% più basso rispetto al valore atteso di resistenza a trazione della sola malta f_{ctm} . Secondo le indicazioni fib Model Code 2010 [91], quest'ultimo può essere assunto approssimativamente pari alla metà del valore di resistenza a trazione ottenuto per flessione. I valori ridotti di $\sigma_{I,m}$, associati a prematura rottura della matrice, possono essere attribuiti a due contributi: eventuali microlesioni preesistenti nella matrice, e in misura maggiore, alla presenza di sezioni in cui l'area trasversale della matrice risulta asimmetrica e ridotta a causa dell'offset del tessuto dal piano medio e dalla presenza della sovrapposizione dei fasci ordito/trama.

3.2.2 DIRECT SHEAR BOND TEST

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalla campagna di indagine sull'aderenza su substrato in muratura, mediante prove di taglio di tipo diretto.

I campioni sono identificati dalla notazione DS Bn X-Y N, dove DS identifica la tipologia di test, Bn individua la massa della rete in fibra di basalto (B2 per 200 gr/m² e B4 per 400 gr/m²), X e Y lunghezza e larghezza del campione ed N il numero identificativo del campione stesso.

Le curve di risposta dei campioni rinforzati con rete in basalto ad alta densità (400 gr/m²), evidenziano una prima fase lineare. A questa segue una brusca variazione di carico che segna l'avvio di un comportamento non lineare caratterizzato dall'evoluzione della fessurazione e il raggiungimento del carico di picco. Si rileva infatti la formazione di lesioni trasversali e l'evolversi di una lesione longitudinale localizzata all'interfaccia fibra matrice, a partire dall'estremità caricata del composito verso l'estremità libera. Queste sono identificabili sulla curva di risposta in corrispondenza delle brusche variazioni di carico. In particolare la delaminazione avviene all'interfaccia fibra-matrice lungo lo strato interno a causa della frattura della matrice compresa tra i fasci di fibre.

Si riportano in Figura 3.7 le varie fasi della prova e il quadro fessurativo per un campione con lunghezza di aderenza pari a 400 mm (DS B4 400-43-1). Le lesioni trasversali coinvolgono solo lo strato esterno della matrice il quale, aderente alla rete di rinforzo, trasla lungo la direzione di carico all'aumentare dello scorrimento. La rottura avviene per delaminazione, con il distacco completo del rinforzo (senza evidenti segni di rotture sui fasci di fibre) e l'espulsione dello strato di matrice esterno fessurato (indicata con MR).

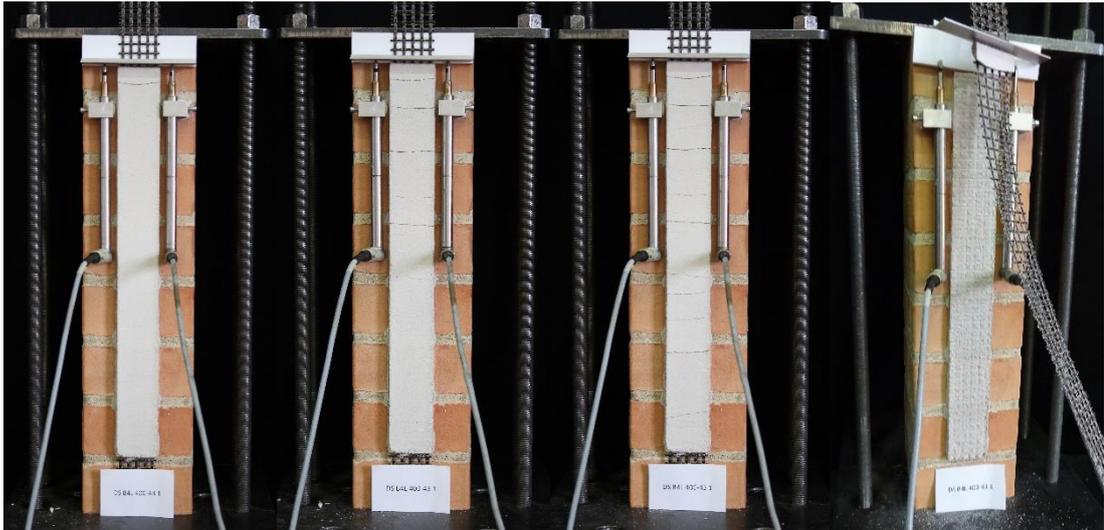


Figura 3.7 – Fasi della prova e modalità di rottura campione DS B4 400-43-1

In Figura 3.8 si può notare la lesione di interfaccia e l'entità dello scorrimento all'estremità caricata del campione. Le modalità di rottura riscontrate non risultano influenzate dalla geometria di prova e sono analoghe per tutte le lunghezze di aderenza investigate, vedi Figura 3.9.

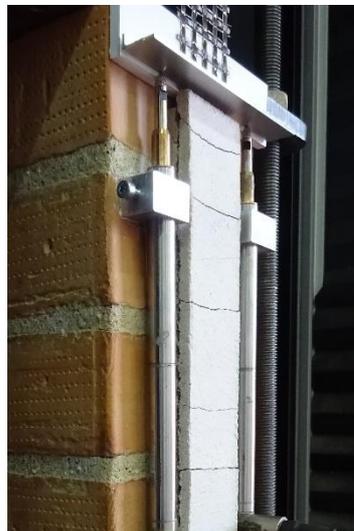


Figura 3.8 – B4-FRCM: scorrimento all'estremità caricata $L_b = 400$ mm

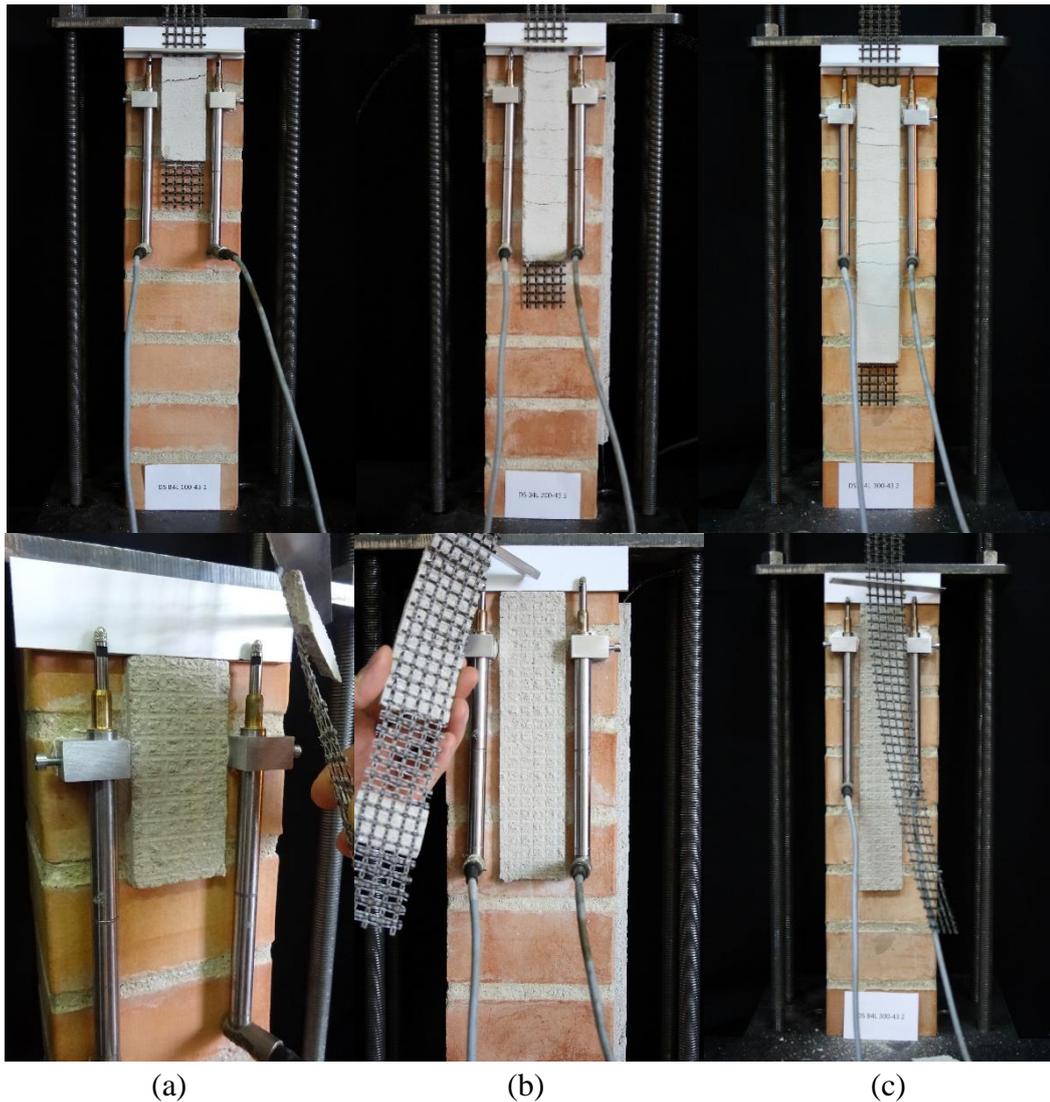
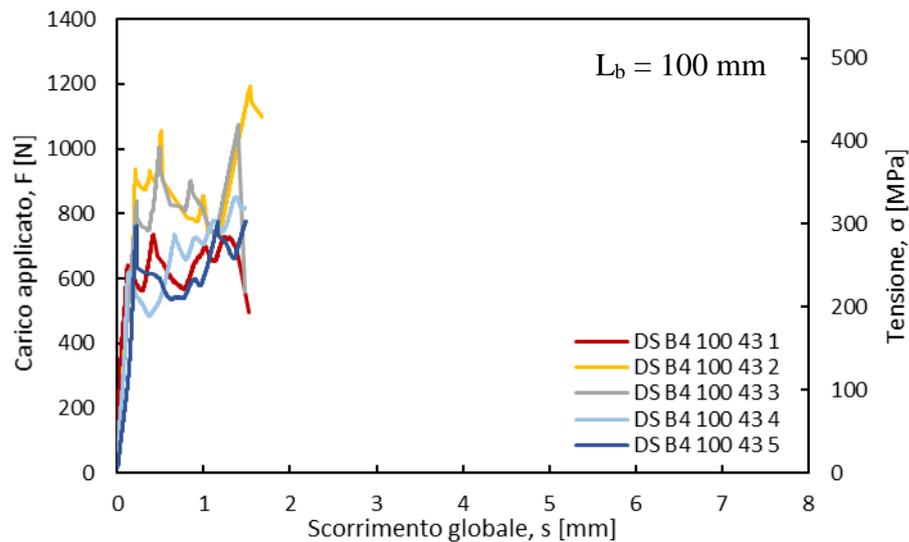


Figura 3.9 – B4-FRCM: modalità di rottura $L_b = 100$ mm (a), 200 mm (b), 300 (c)

In Tabella 3.2, si riportano in sintesi i risultati delle prove effettuate per tutte le lunghezze di aderenza investigate. Per ogni campione si riportano il carico di picco, il corrispondente valore in termini di tensione determinato tramite l'eq. 3.1, nonché lo scorrimento associato. I risultati ottenuti hanno consentito inoltre di determinare il rapporto di sfruttamento del tessuto di rinforzo ottenuto dividendo la tensione massima raggiunta dal sistema σ_{max} , per la resistenza del tessuto stesso f_u , determinata in (2.2.1). Sono riportate altresì le curve di risposta in termini di carico-scorrimento-tensione normale distinte per ogni lunghezza di aderenza investigata (Figura 3.10). I valori dello scorrimento globale sono ottenuti come media delle acquisizioni effettuate dai due LVDT.

Tabella 3.2 – B4-FRCM: risultati dei test di aderenza a taglio diretto (geometria a 5 fasci)

ID Campione	L_b mm	Fasci di fibra n°	Carico di picco [N]	Media [N]	Carico per unità di larghezza [kN/m]	Tensione di			Scorrimento al picco [mm]	σ_{max}/f_u	Modalità di rottura
						picco σ_{max} [MPa]	Media [MPa]	CoV [%]			
DS B4 100 43 1	100		736		18.41	288			0.42	0.31	MR
DS B4 100 43 2	100		1194		29.85	466			1.54	0.50	MR
DS B4 100 43 3	100	5	1074	926	26.86	420	362	19%	1.40	0.45	MR
DS B4 100 43 4	100		851		21.27	332			1.37	0.36	MR
DS B4 100 43 5	100		776		19.39	303			1.49	0.32	MR
DS B4 200 43 1	200		892		22.31	349			3.00	0.37	MR
DS B4 200 43 2	200		1201		30.03	469			0.97	0.50	MR
DS B4 200 43 3	200	5	1011	1115	25.27	395	435	15%	1.33	0.42	MR
DS B4 200 43 4	200		1086		27.15	424			2.55	0.45	MR
DS B4 200 43 5	200		1384		34.61	541			1.14	0.58	MR
DS B4 300 43 1	300		845		21.12	330			4.77	0.35	MR
DS B4 300 43 2	300		1219		30.48	476			3.29	0.51	MR
DS B4 300 43 3	300	5	981	1151	24.52	383	449	22%	2.89	0.41	MR
DS B4 300 43 4	300		1590		39.74	621			5.01	0.66	MR
DS B4 300 43 5	300		1119		27.97	437			0.15	0.47	MR
DS B4 400 43 1	400		1180		29.50	461			6.97	0.49	MR
DS B4 400 43 2	400		918		22.96	359			0.34	0.38	MR
DS B4 400 43 3	400	5	1500	1162	37.49	586	454	19%	5.14	0.63	MR
DS B4 400 43 4	400		925		23.12	361			3.73	0.39	MR
DS B4 400 43 5	400		1289		32.22	503			3.38	0.54	MR



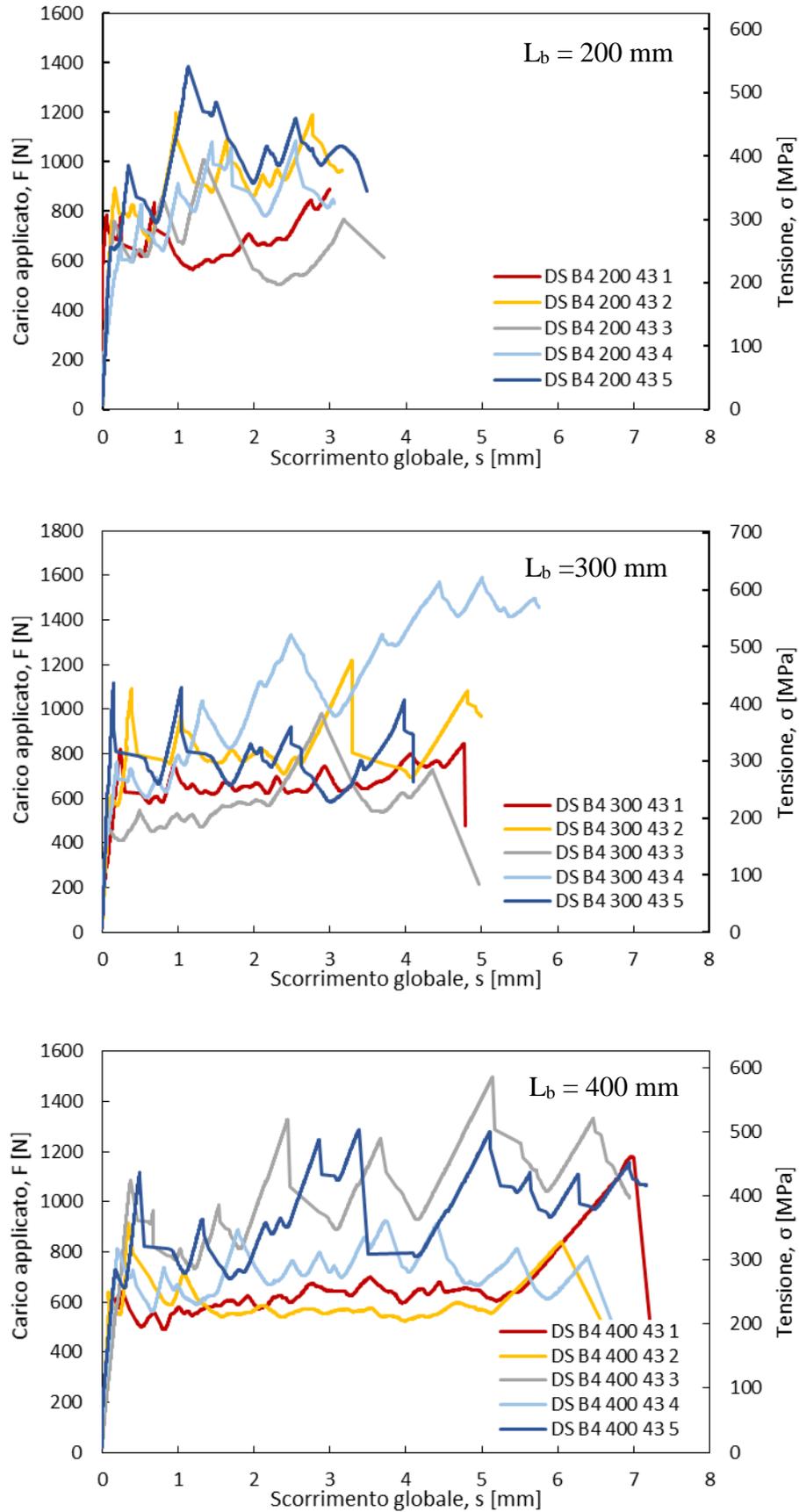


Figura 3.10 – B4-FRCM: curve di risposta per lunghezza di aderenza

Dalle curve rappresentative carico-scorrimento per ogni geometria (Figura 3.11), è possibile notare che lunghezze maggiori di 200 mm comportano un incremento del valore massimo dello scorrimento globale a rottura, nessun beneficio in termini di carico di picco.

In Figura 3.12 si riporta inoltre con una linea tratteggiata la variazione del valore medio dei carichi di rottura distinti per ogni lunghezza indagata e relativa dispersione delle singole prove.

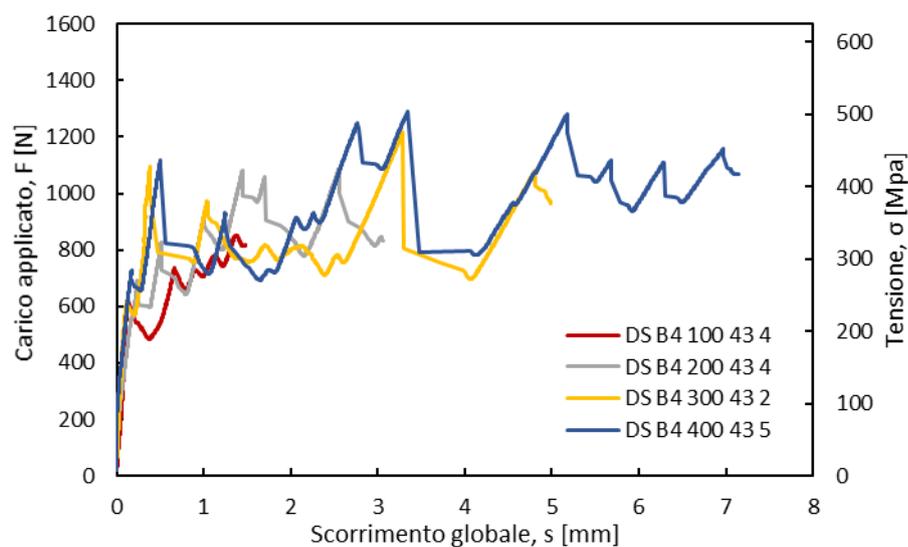


Figura 3.11 – B4-FRCM: curve di risposta rappresentative per lunghezza di aderenza

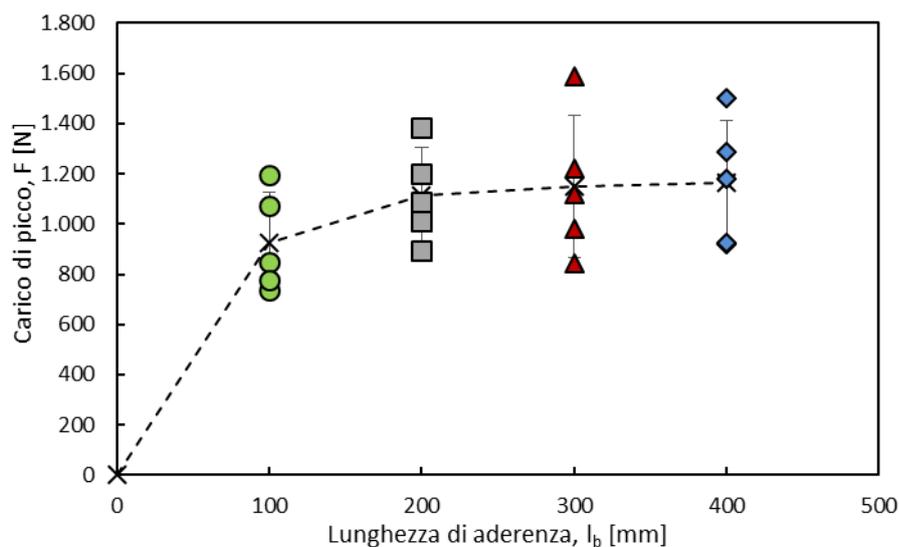


Figura 3.12 – B4-FRCM: carico di rottura per lunghezza di aderenza

I risultati ottenuti mostrano come per lunghezze di aderenza maggiori di 200 mm il carico massimo rilevato sia pressoché invariato, pertanto tale valore rappresenta la lunghezza efficace di aderenza. Questa è definita come il valore minimo per ottenere il massimo carico trasferibile al sistema di rinforzo, quindi affinché si attivi il completo meccanismo di trasferimento delle tensioni.

Le prove condotte hanno inoltre evidenziato un effetto positivo con l'impiego di una geometria di prova con una larghezza maggiore (Figura 3.13, Tabella 3.3). Si ottengono infatti valori in termini di tensioni normali pari a 449 MPa (CoV 0.22) e 700 MPa (CoV 0.03) rispettivamente per geometria a 5 e 6 fasci inglobati. Ciò è imputabile ad una maggiore capacità di redistribuzione della forza tra i fasci, come confermato dalla minore dispersione dei dati. Ciò comporta, inoltre, una maggiore capacità di sfruttamento delle proprietà meccaniche del rinforzo in media con valori pari al 75% della resistenza ultima. Tale geometria è stata pertanto adottata nelle successive indagini.

Tabella 3.3 – B4-FRCM: risultati dei test di aderenza a taglio diretto (geometria a 6 fasci)

ID Campione	L_b mm	Fasci di fibra n°	Carico di picco [N]	Media [N]	Carico per unità di larghezza [kN/m]	Tensione di picco σ_{max} [MPa]	Media [MPa]	CoV [%]	Scorrimento al picco [mm]	σ_{max}/f_u	Modalità di rottura
DS B4 300 51 1	300		2114		44.03	688			0.72	0.74	MR
DS B4 300 51 2	300	6	2243	2149	46.72	730	700	3%	4.65	0.78	MR
DS B4 300 51 3	300		2118		44.12	689			3.58	0.74	MR
DS B4 300 51 4	300		2122		44.21	691			4.56	0.74	MR

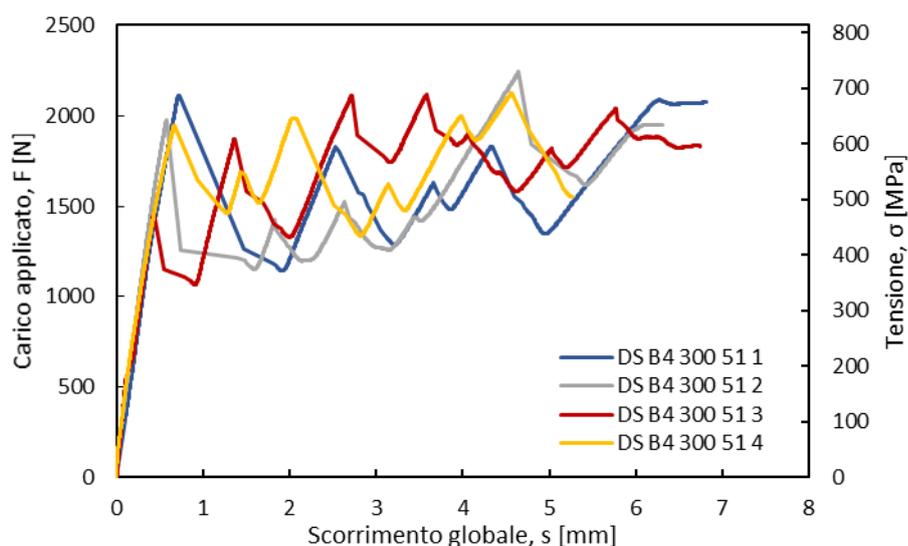


Figura 3.13 – B4-FRCM: curve di risposta geometria a 6 fasci $L_b=300$ mm

Al fine di evidenziare che le modalità di rottura, con i maggiori carichi raggiunti, non siano affette da rotazioni del supporto in muratura, si riportano le singole acquisizioni degli LVDT per un campione con geometria a 6 fasci (Figura 3.14). Le curve in arancio e in grigio si riferiscono alle misurazioni degli LVDT posti sulla superficie frontale. L'eventuale spostamento del supporto, perpendicolare al composito, è fornito dalle misurazioni degli LVDT collocati posteriormente (curve in verde e in giallo). Le misurazioni effettuate dai singoli LVDT, come si evince dalla Figura 3.14, mostrano che la rotazione del supporto è trascurabile. Ciò garantisce che le modalità di rottura non siano affette da distacco dovuto a modi di frattura di tipo I.

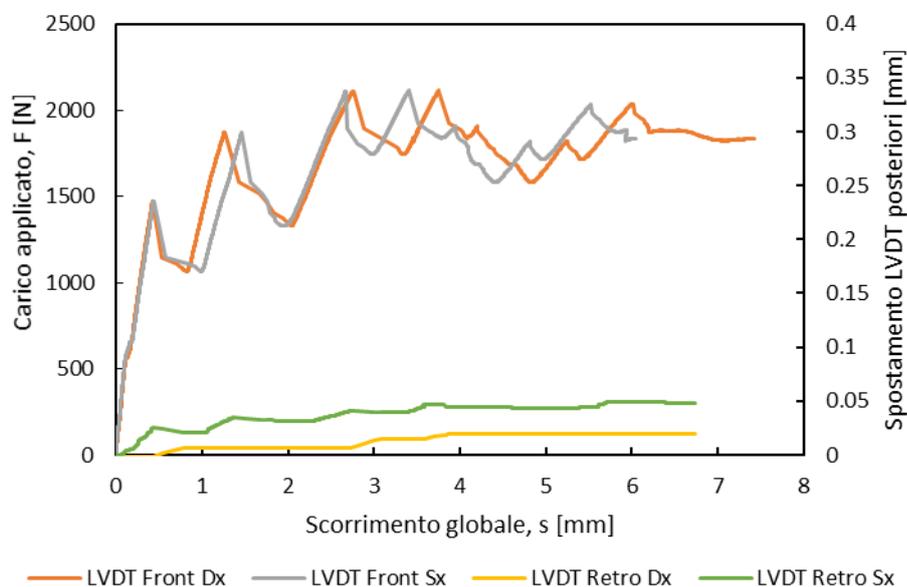


Figura 3.14 – Curve di risposta del campione DS B4 300 51 3

Le curve di risposta ottenute dalle prove dei campioni rinforzati con rete a bassa densità (200 g/m^2) sono riportate in Figura 3.15. Dai test effettuati si evince una diversa modalità di rottura. Le curve di risposta esibiscono infatti un primo tratto lineare cui segue una fase non lineare della risposta prima del raggiungimento dei valori di picco. Si rileva successivamente una repentina variazione di carico associata alla rottura. Questa è caratterizzata, a differenza del sistema con rinforzo ad alta densità, dal sequenziale cedimento dei fasci di fibra (FR) appena oltre l'estremo caricato dell'area di aderenza (Figura 3.16). Tale modalità è comune a tutte le prove effettuate.

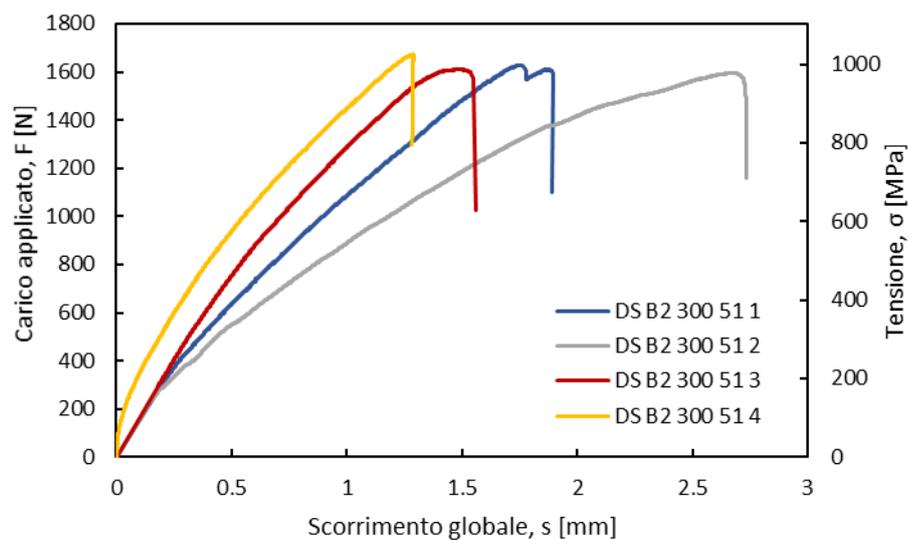


Figura 3.15 – B2-FRCM: curve di risposta $L_b=300$ mm

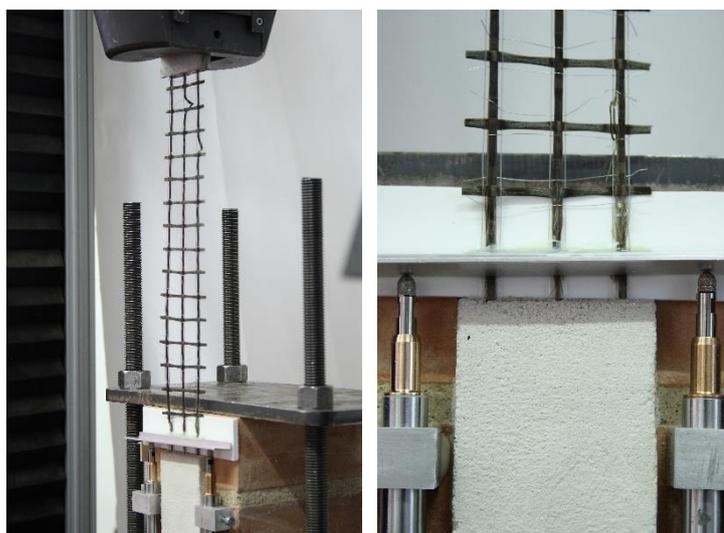


Figura 3.16 – B2-FRCM: modalità di rottura

Tabella 3.4 – B2-FRCM: risultati dei test di aderenza a taglio diretto

ID Campione	L_b mm	Fasci di fibra n°	Carico di picco [N]	Media [N]	Carico per unità di larghezza [kN/m]	Tensione di picco σ_{max} [MPa]	Media [MPa]	CoV [%]	Scorrimento al picco [mm]	σ_{max}/f_u	Modalità di rottura
DS B2 300 51 1	300		1628		31.92	998			1.75	0.93	FR
DS B2 300 51 2	300	3	1596	1627	31.29	978	997	2%	2.67	0.91	FR
DS B2 300 51 3	300		1611		31.58	987			1.49	0.92	FR
DS B2 300 51 4	300		1673		32.80	1025			1.29	0.96	FR

I valori delle resistenze ottenuti sono confrontabili con un coefficiente di variazione pari al 2% (Tabella 3.4).

Le misurazioni effettuate dai singoli LVDT, (Figura 3.17), hanno consentito di escludere effetti dovuti a possibili rotazioni all'estremità caricata e quindi non contemporanea messa in trazione dei fasci.

Le resistenze ottenute sono confrontabili con i valori ottenuti dalle prove di caratterizzazione della rete, con rapporto di sfruttamento prossimo all'unità (Tabella 3.4). È possibile pertanto dedurre come la modalità di rottura riscontrata per il composito realizzato con rete con maggiore densità sia principalmente dovuta alla ridotta aliquota di matrice presente tra i fasci di fibra.

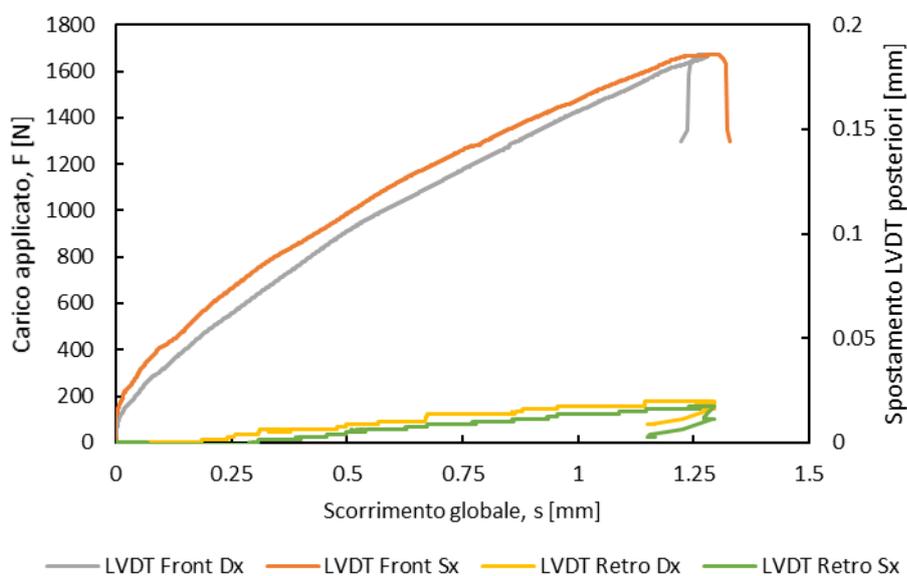


Figura 3.17 – Curve di risposta del campione DS B2 300 51 4

3.2.3 MODELLAZIONE ANALITICA DEL LEGAME DI INTERFACCIA τ - s

Al fine di valutare i meccanismi all'interfaccia e poter condurre simulazioni numeriche su strutture rinforzate con FRCM, è necessario definire una appropriata relazione tra le tensioni di aderenza e lo scorrimento (τ - s). A tale proposito si è provveduto a individuare un legame di aderenza τ - s all'interfaccia fibra-matrice, di tipo non lineare, calibrato e validato in funzione dei risultati sperimentali.

Generalmente per ottenere una relazione locale tra tensioni di aderenza e scorrimento all'interfaccia dalle prove di taglio di tipo diretto, è necessario strumentare il composito

con estensimetri collocati sulla superficie del tessuto di rinforzo a una distanza di circa 10-20 mm l'uno dall'altro. Di conseguenza, è possibile ottenere la distribuzione delle deformazioni longitudinalmente al rinforzo in relazione ai diversi livelli di carico. In Figura 3.18 si riporta una schematizzazione del setup per una prova di taglio di tipo diretto utile a tale scopo.

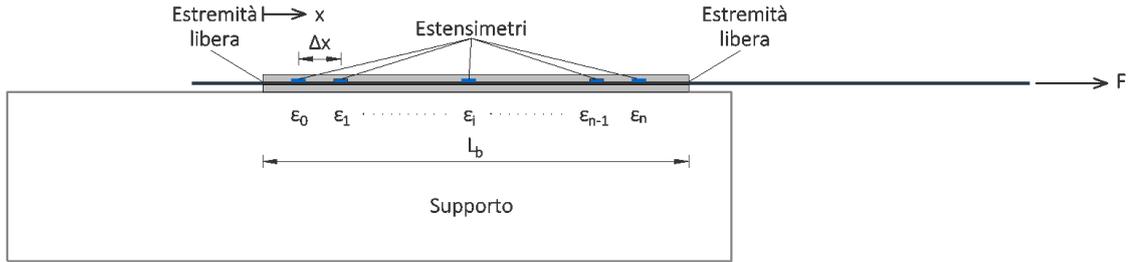


Figura 3.18 – Disposizione estensimetri

Assumendo una distribuzione ad intervalli costanti Δx e da considerazioni sull'equilibrio, la tensione di aderenza può essere ottenuta dalla seguente espressione:

$$\tau_i = E_f t_f \frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{E_f t_f (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{\Delta x} \quad 3.2$$

dove τ_i è il valore medio della tensione di aderenza all'interfaccia nella sezione i , ε_i e ε_{i-1} sono rispettivamente i valori delle deformazioni nelle sezioni di misura i e $i-1$ disposte lungo il tessuto di rinforzo del composito, E_f e t_f sono rispettivamente il modulo elastico e lo spessore del rinforzo.

Lo scorrimento locale è determinato dalla differenza di deformazione tra la matrice e il rinforzo. La deformazione nel supporto e nella matrice possono essere assunti trascurabili e lo scorrimento all'estremità libera del composito può essere considerato nullo. Lo scorrimento locale pertanto può essere espresso come:

$$s_i = \frac{\Delta x}{2} \left(\varepsilon_0 + 2 \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j + \varepsilon_i \right) \quad 3.3$$

dove s_i è lo scorrimento tra rinforzo e matrice nella sezione i , ε_0 è la deformazione nel rinforzo all'estremità libera e ε_j ($j = 1, i$) è la deformazione relativa al j -esimo estensimetro collocato sul rinforzo stesso. La deformazione relativa all'estremità libera

del composito può essere assunta approssimativamente pari a 0 nel caso di lunghezze di aderenza consistenti (300 mm in questo studio e comunque maggiori delle lunghezza di aderenza efficace).

In generale si riscontrano delle difficoltà nel disporre un numero elevato di estensimetri, per ottenere una distribuzione delle deformazioni accurata. A queste si associa molto spesso una forte dispersione delle relazioni locali τ - s determinata da inflessioni locali dei fasci causate dalla bassa rigidezza flessionale o da modalità realizzative del tessuto di rinforzo stesso (vedi par. 1.3).

In questo studio, pertanto, si è fatto riferimento a un metodo alternativo per determinare la relazione interfacciale τ - s , senza ricorrere all'acquisizione della distribuzione delle deformazioni lungo il composito. Questo è stato proposto da Dai et al [92] per sistemi di rinforzo in FRP, assumendo che in ogni punto dell'interfaccia FRP-supporto (dove è localizzato il distacco), con condizioni al contorno di scorrimento nullo all'estremo libero del composito ($L_b \geq L_{eff}$), esiste una unica relazione τ - s e una unica relazione tra le deformazioni nel rinforzo e lo scorrimento di interfaccia. Quest'ultimo può essere espresso come segue:

$$\varepsilon = f(s) \quad 3.4$$

dove ε è la deformazione nel rinforzo e s è il corrispondente scorrimento in ogni punto. Un calcolo differenziale del primo ordine di ε rispetto a x conduce alla seguente equazione:

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{df(s)}{ds} \frac{ds}{dx} = \frac{df(s)}{ds} \varepsilon = \frac{df(s)}{ds} f(s) \quad 3.5$$

Pertanto le tensioni di aderenza interfacciali (eq. 3.2) possono essere espresse come

$$\tau = E_f t_f \frac{d\varepsilon}{dx} = E_f t_f \frac{df(s)}{ds} f(s) \quad 3.6$$

Si sottolinea che la relazione τ - s può essere determinata se è definita la relazione tra le deformazioni e lo scorrimento ε - s . Durante le prove di aderenza a taglio diretto, la forza di estrazione e il corrispondente scorrimento all'estremo caricato possono essere accuratamente valutati rispettivamente attraverso la cella di carico e trasduttori di spostamento (LVDT). Di conseguenza, la relazione tra le deformazioni del rinforzo e lo scorrimento all'estremo caricato, cioè $f(s)$, può essere ottenuta direttamente dalle prove sperimentali.

Assumendo che il comportamento del rinforzo sia lineare elastico fino a rottura, il valore medio della deformazione all'estremo caricato (Figura 3.18) può essere determinato, per ogni livello di carico, come:

$$\varepsilon = \frac{F}{E_f b_f t_f} \quad 3.7$$

dove F è appunto la forza valutata durante la prove e b_f la larghezza del tessuto di rinforzo.

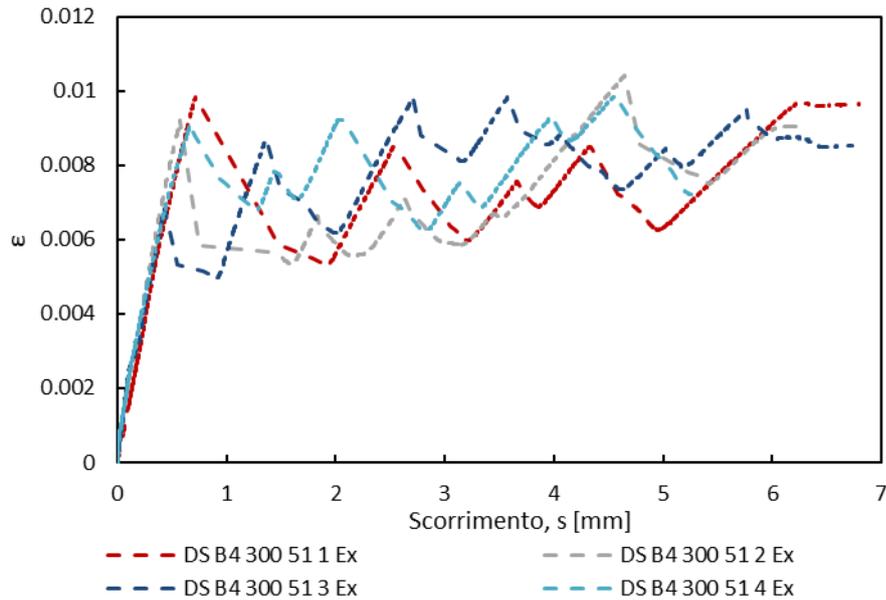


Figura 3.19 – Curve sperimentali deformazione-scorrimento globale

Come descritto nei precedenti paragrafi lo scorrimento è stato valutato come la media delle acquisizioni dei due trasduttori collocati sul supporto in prossimità dell'estremo caricato. Le curve di risposta in termini di ε - s così ottenute sono riportate in Figura 3.19. Si è quindi proceduto a calibrare l'espressione esponenziale (eq. 3.8) basata su assunzioni empiriche proposta da Dai et al [92] e adottata anche da Bencardino et al [93] in funzione di due parametri sperimentali A e B

$$\varepsilon = f(s) = A[1 - \exp(-Bs)] \quad 3.8$$

i quali sono stati ottenuti attraverso un'analisi di regressione non lineare.

Nota la funzione $f(s)$:

$$\frac{df(s)}{ds} = AB\exp(-Bs) \quad 3.9$$

e sostituendo la 3.8 e la 3.9 nella 3.6, il legame τ - s può essere ottenuto come segue:

$$\tau = A^2 B E_f t_f \exp(-Bs) [1 - \exp(-Bs)] \quad 3.10$$

Poiché l'energia di frattura è definita come:

$$G_f = \int_0^{\infty} \tau ds \quad 3.11$$

sostituendo la 3.10 nella 3.11, diventa:

$$G_f = \frac{1}{2} A^2 E_f t_f \quad 3.12$$

Ottenendo pertanto la seguente espressione per A :

$$A = \sqrt{\frac{2G_f}{E_f t_f}} \quad 3.13$$

Sostituendo la 3.13 nella 3.10, questa può essere riscritta in funzione dell'energia di frattura G_f e della costante B come:

$$\tau = 2B G_f \exp(-Bs) [1 - \exp(-Bs)] \quad 3.14$$

Lo scorrimento s_{max} corrispondente al valore massimo della tensione di aderenza τ_{max} , in cui $d\tau/ds = 0$, può essere determinato come segue:

$$s_{max} = 0.693/B \quad 3.15$$

e sostituendo la 3.15 nella 3.14, il valore massimo della tensione di aderenza equivale a:

$$\tau_{max} = 0.5B G_f \quad 3.16$$

Per $L_b \geq L_{eff}$, il valore massimo della forza ottenuto analiticamente, $F_{max,An}$, può essere calcolato utilizzando la seguente espressione:

$$F_{max,An} = b_f E_f t_f \varepsilon_{max} = b_f E_f t_f \lim_{s \rightarrow \infty} A [1 - \exp(-Bs)] = b_f E_f t_f A \quad 3.17$$

dove ε_{max} è la deformazione corrispondente al valore massimo della forza. Sostituendo la 3.13, l'espressione diventa:

$$F_{max,An} = b_f \sqrt{2E_f t_f G_f} \quad 3.18$$

I risultati e il confronto tra il carico massimo determinato analiticamente e quello ottenuto sperimentalmente sono riportati in Tabella 3.5.

Tabella 3.5 – Risultati modellazione e confronti

ID	R^2	A	B	G_f	$F_{max,AN}$	τ_{max}	s_{max}	$F_{max,EX}$	Errore [%]
		[%]	[mm^{-1}]	[N/mm]	[N]	[N/mm ²]	[mm]	[N]	
B4 300-51 1	0.81	7.83	3.33	0.14	1684	0.23	0.21	2114	20.31
B4 300-50 2	0.82	7.65	4.09	0.13	1646	0.27	0.17	2243	26.61
B4 300-50 3	0.94	8.20	2.8318	0.15	1764	0.21	0.24	2118	16.71
B4 300-50 4	0.95	8.15	3.63	0.15	1753	0.27	0.19	2122	17.39

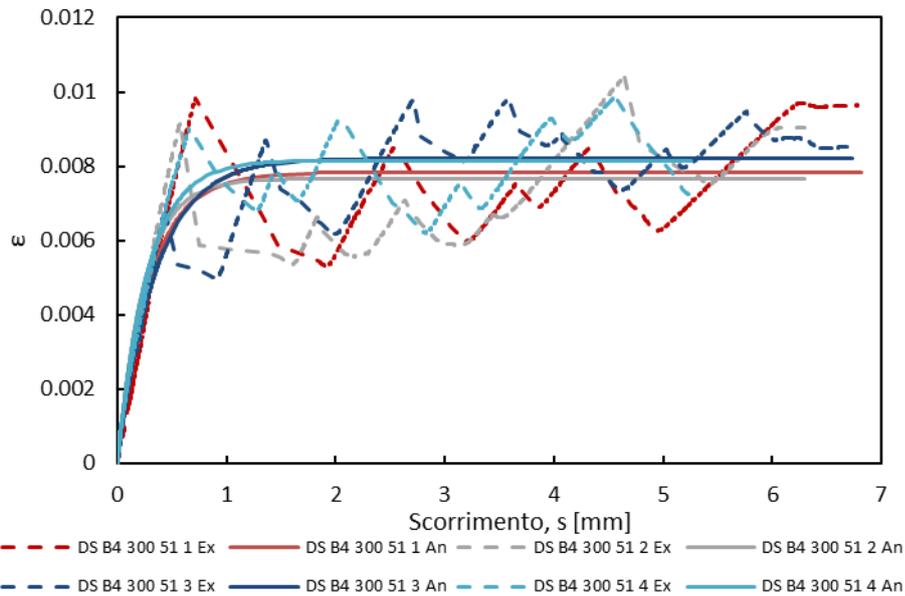


Figura 3.20 – Confronto curve ε -s analitiche e sperimentali

Dai risultati e da un confronto tra le curve ε -s analitiche e sperimentali (Figura 3.20) è possibile affermare che l'eq. 3.8 si adatta abbastanza bene alle curve di risposta ottenute sperimentalmente del presente studio. I valori ottenuti di G_f , τ_{max} e dello scorrimento corrispondente s_{max} sono abbastanza simili per tutti i campioni con valore medi rispettivamente di 0.14 N/mm, 0.25 MPa e 0.20 mm.

La differenza che si riscontra tra i valori del carico massimo è attribuibile alla modalità con cui i valori di picco del carico vengono attinti durante la prova. Come discusso nei paragrafi precedenti, il meccanismo di fessurazione e distacco all'interfaccia determina una variazione repentina del carico, dipendente dal comportamento fragile della matrice e dalla scarsa compenetrazione dei due strati di malta. Il modello descrive infatti un andamento medio nel tratto a seguito della prima fessurazione, senza cogliere tale

variabilità nella risposta. In Figura 3.20 è possibile altresì osservare come l'espressione adottata approssimi le diverse curve di risposta con curve pressoché sovrapponibili.

In Figura 3.21 sono riportati infine i legami di aderenza ottenuti per ogni campione e il legame medio individuato.

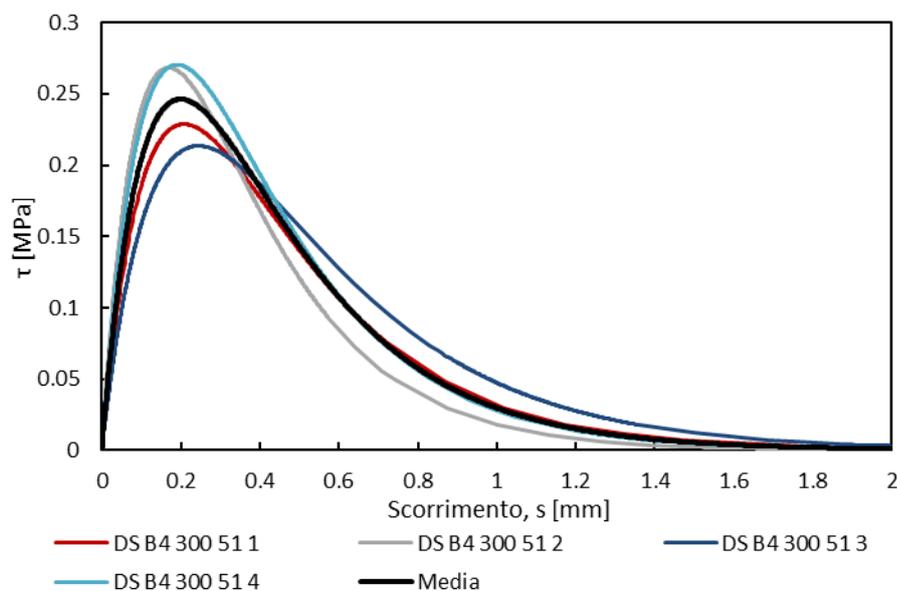


Figura 3.21 – Legame di aderenza τ - s all'interfaccia

3.3 ANALISI DEL DEGRADO PER EFFETTO DI TRATTAMENTI TERMICI

L'esposizione ad alte temperature dei sistemi di rinforzo FRCM potrebbe risultare dannosa per le capacità di aderenza al supporto principalmente a causa di: alterazioni fisico-chimiche delle matrici, riduzione delle proprietà meccaniche del rinforzo fibroso e fenomeni fisici differenziali all'interfaccia composito-supporto. Tra questi ultimi, ad esempio, si annoverano la diversa dilatazione termica e/o differente perdita di umidità dei due elementi con conseguente formazione di diverse microlesioni interfacciali.

I primi due meccanismi hanno un effetto negativo sull'aderenza all'interfaccia rinforzo-matrice, mentre i fenomeni differenziali influiscono sull'aderenza composito-supporto inducendo modalità di rottura premature.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalla campagna di indagine sul degrado a seguito di trattamenti termici ad alta temperatura anche attraverso analisi comparativa tra diversi sistemi di rinforzo.

Nello specifico è stato investigato il comportamento del sistema di rinforzo in fibra di basalto con rete a bassa (B2-FRCM) e ad alta (B4-FRCM) densità, in acciaio (S-FRCM) e in fibra di carbonio (C-FRCM).

Lo studio è stato condotto mediante prove di aderenza a taglio diretto su substrato in muratura al fine di valutare l'effetto della temperatura sulla risposta carico-scorrimento, sulla variazione dei carichi di picco e sulle modalità di rottura. Le temperature adottate per i trattamenti sono state 100 °C, 300 °C e 500 °C, mantenendo i campioni a temperatura costante per 3 ore. Test effettuati a temperatura ambiente sono stati utilizzati come riferimento.

In una prima fase, è stato effettuato uno studio sul degrado termico della sola componente matrice, utilizzando le stesse metodologie adottate per il trattamento termico dei sistemi di rinforzo. Sono state quindi valutate le variazioni di resistenza a flessione e compressione, nonché la variazione della perdita in massa. Sono stati testati 3 provini, di dimensioni 40 mm x 40 mm x 160 mm, per ogni matrice a ogni livello di temperatura. È stata inoltre valutata la composizione delle fasi dei prodotti ottenuti dall'idratazione del legante per mezzo dell'analisi diffrattometrica e termogravimetrica.

Di seguito vengono riportati i risultati relativi alla matrice abbinata ai sistemi di rinforzo in basalto e acciaio, identificata con l'acronimo GCF (Tabella 3.6). Si riportano altresì i diagrammi della variazione delle resistenze a flessione e a compressione e della perdita in massa (Figura 3.22, Figura 3.23 e Figura 3.24) in funzione della temperatura.

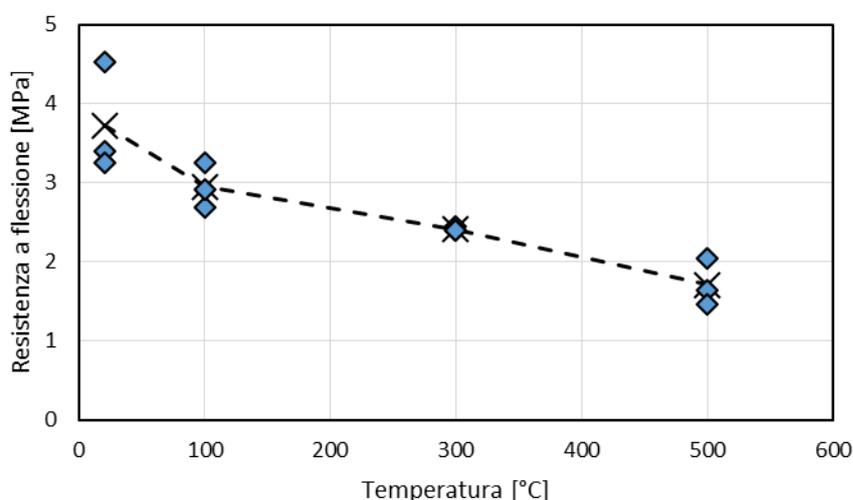


Figura 3.22 – Matrice GCF: variazione della resistenza a flessione con la temperatura

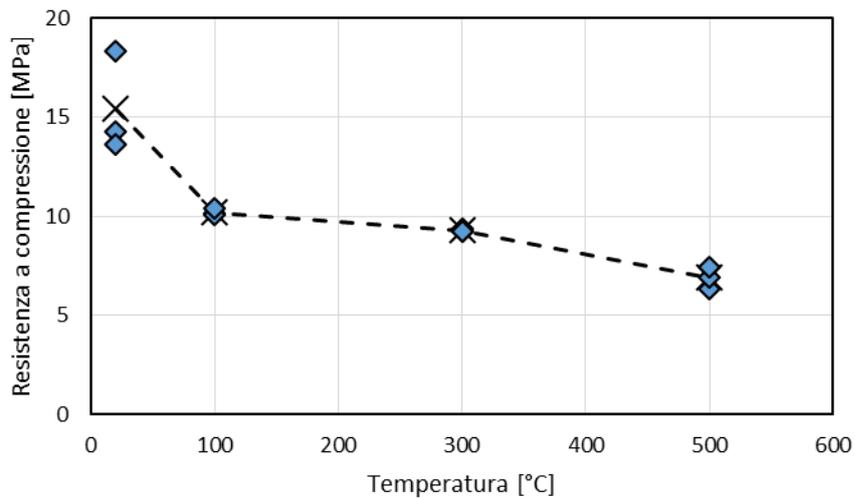


Figura 3.23 – Matrice GCF: variazione della resistenza a compressione con la temperatura

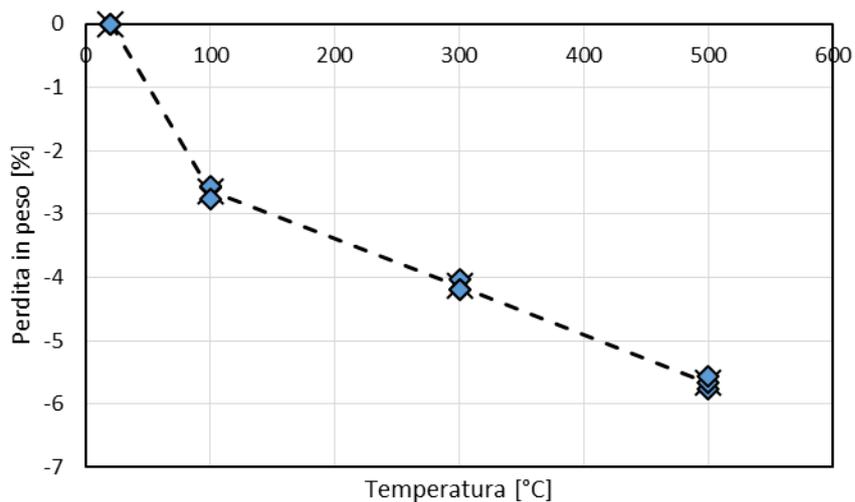


Figura 3.24 – Matrice GCF: variazione della perdita in massa con la temperatura

All'aumentare della temperatura si riscontra una riduzione delle resistenze a flessione e a compressione che risulta pari a circa il 55% a 500°C e una modesta perdita in peso, pari a circa il 6%.

Occorre evidenziare che a seguito del trattamento a 500°C i campioni presentano una alterazione cromatica (Figura 3.25a) e in alcuni casi lesioni longitudinali e trasversali significative (Figura 3.25b).

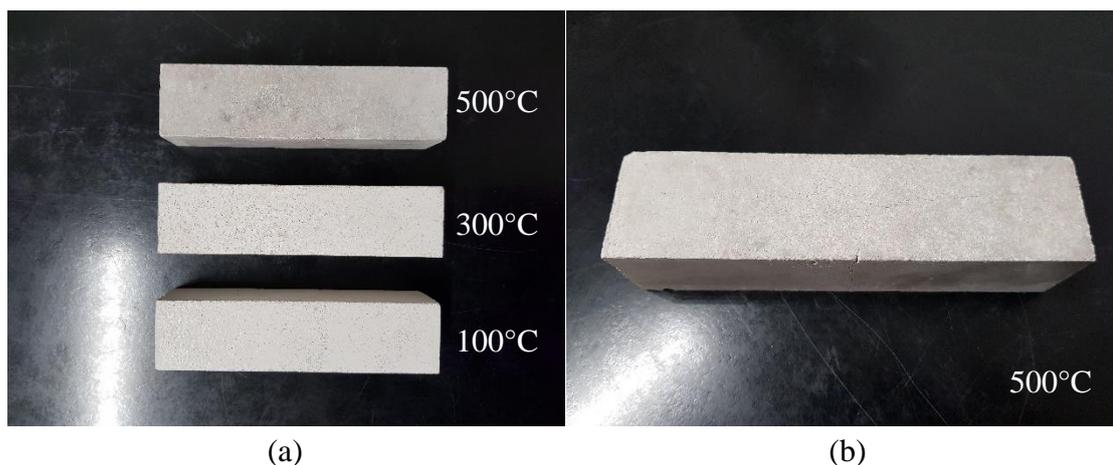


Figura 3.25 – Matrice GCF: campioni a seguito del trattamento termico

Le fasi ottenute dall'idratazione del legante sono state valutate per mezzo dell'analisi diffrattometrica e termogravimetrica. Le analisi sono state condotte su campioni di malta, dopo 28 giorni di stagionatura. I risultati sono riportati rispettivamente in Figura 3.26, Figura 3.27 e Figura 3.28.

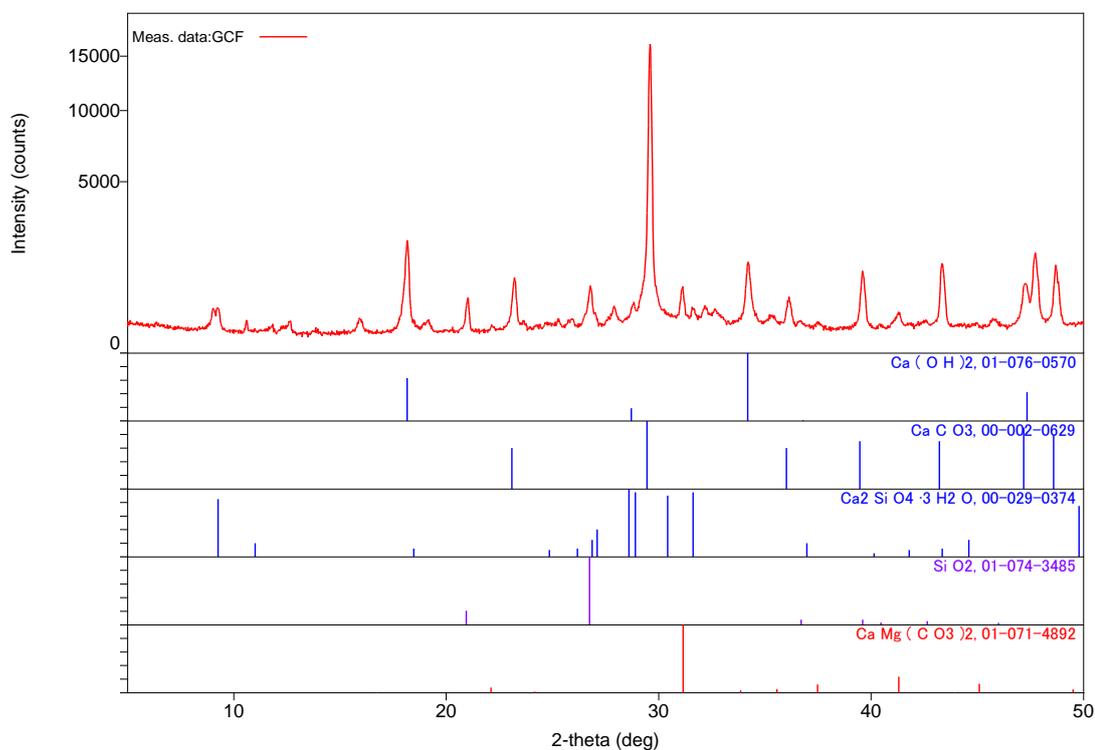


Figura 3.26 – Matrice GCF: analisi diffrattometrica

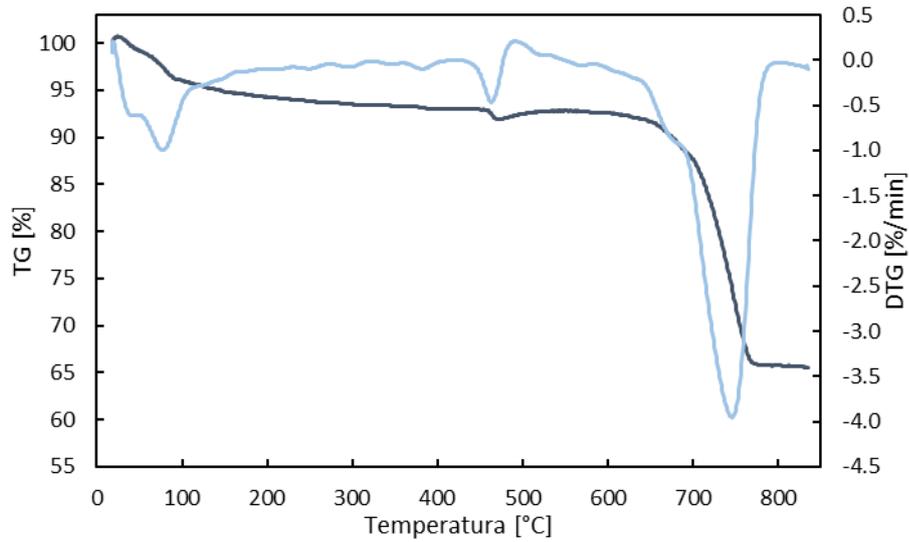


Figura 3.27 – Matrice GCF: analisi termogravimetrica, TG(—) DTG(—)

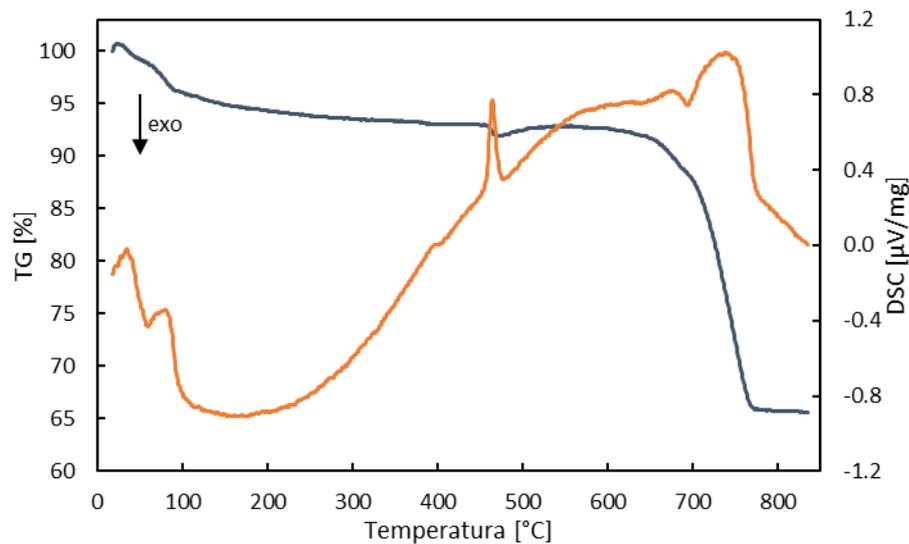


Figura 3.28 – Matrice GCF: analisi termogravimetrica, TG(—) DSC(—)

L'analisi diffrattometrica effettuata ha permesso di identificare che le principali fasi cristalline presenti sono: silicati di calcio idrati (C-S-H), portlandite, calcite, dolomite e quarzo (derivanti dall'inerte utilizzato).

L'analisi termogravimetrica ha confermato quanto riscontrato nella precedente analisi. Infatti in Figura 3.27 è possibile osservare che per temperature inferiori a 100 °C sono presenti 2 picchi associati alla perdita di acqua libera e chimicamente legata del C-S-H.

Alla temperatura di 470 °C si rileva la decomposizione dell'idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in ossido di calcio (CaO) e la decomposizione dei carbonati avviene tra 600 °C e 750 °C.

Tabella 3.6 – Matrice GCF: variazioni di resistenza e in massa

Temperatura °C	Flessione			Compressione			Massa
	σ_f	CoV	$\Delta\sigma_f$	σ_c	CoV	$\Delta\sigma_c$	Δm
	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]	[%]
20	3.73	15.20	0.00	15.42	13.62	0.00	0
100	2.95	7.86	-20.75	10.20	1.25	-33.85	-2.64
300	2.41	1.10	-35.35	9.29	0.78	-39.74	-4.14
500	1.71	14.28	-54.09	6.91	6.41	-55.15	-5.67

La perdita in massa a valle del trattamento termico a 500 °C sui provini prismatici è pari circa al 6% ed è confrontabile con quella determinata mediante analisi termogravimetrica alla stessa temperatura, pari a circa il 9%.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti relativi alla matrice abbinata al sistema di rinforzo in carbonio (C-FRCM), indentificata con l'acronimo M25 (Tabella 3.7). Si riportano altresì le curve carico-spostamento a flessione, i diagrammi della variazione delle resistenze a flessione e a compressione e della perdita in massa (Figura 3.29, Figura 3.30, Figura 3.31 e Figura 3.32).

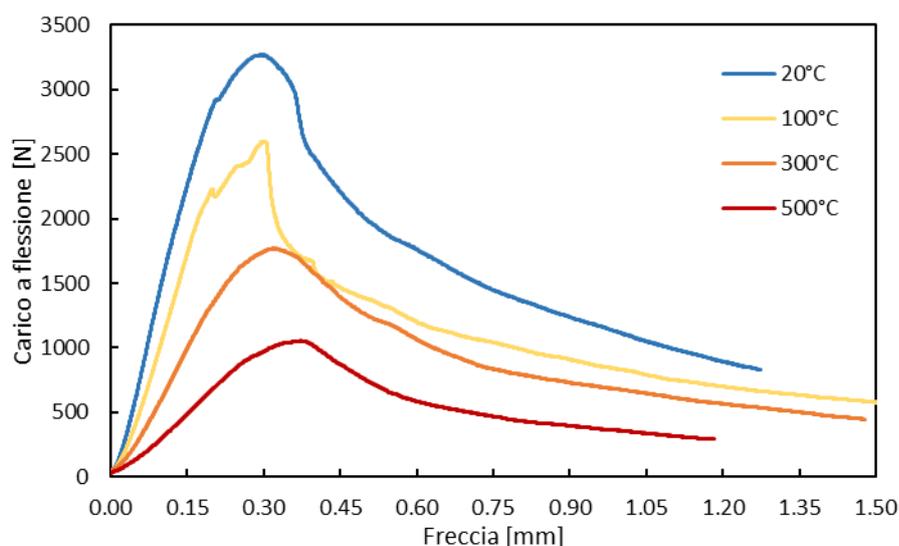


Figura 3.29 – Matrice M25: curve carico-spostamento a flessione

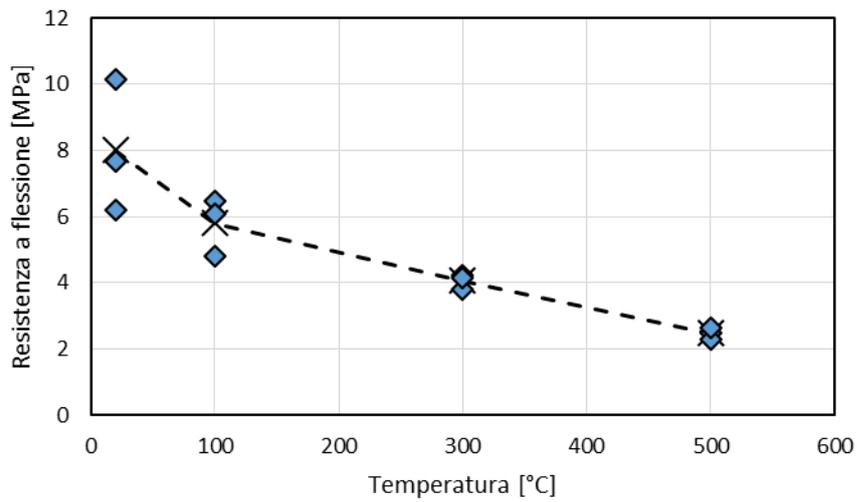


Figura 3.30 – Matrice M25: variazione della resistenza a flessione con la temperatura

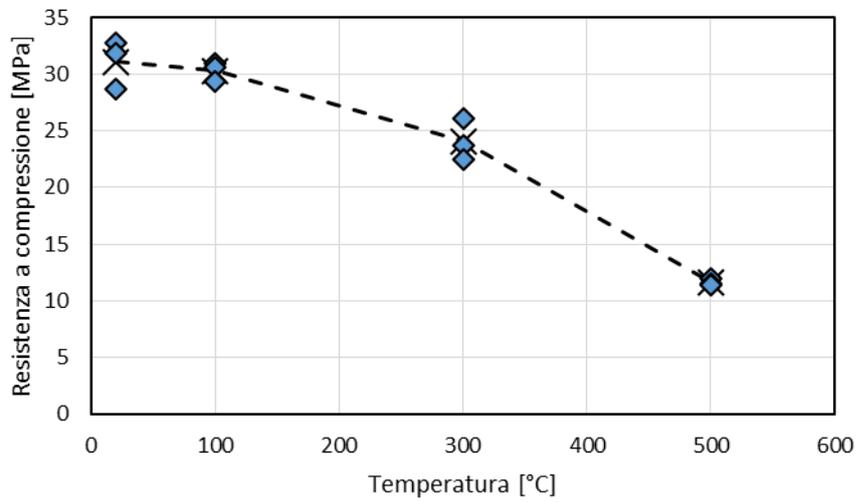


Figura 3.31 – Matrice M25: variazione della resistenza a compressione con la temperatura

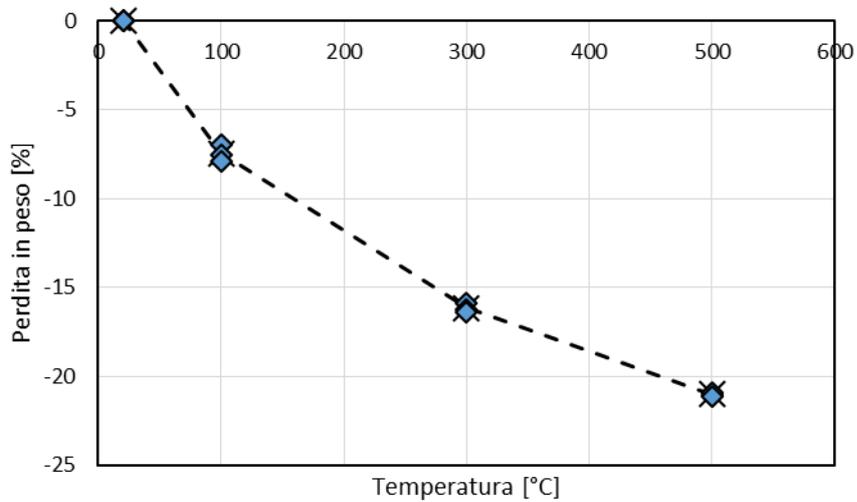


Figura 3.32 – Matrice M25: variazione della perdita in massa con la temperatura

Il comportamento a flessione di questa matrice è caratterizzato da un andamento post-picco di tipo strain-softening, determinato dal rinforzo a fibre sparse. Tale comportamento si conserva a valle dei trattamenti termici, i quali determinano, tuttavia, una progressiva riduzione della rigidità della risposta nella fase iniziale e della resistenza, come è possibile osservare in Figura 3.29. All'aumentare della temperatura si riscontra una riduzione delle resistenze a flessione e a compressione pari a circa il 65% a 500 °C e una considerevole perdita in peso, pari a circa il 21%.

Occorre evidenziare che a partire dal trattamento a 300 °C i campioni presentano una progressiva alterazione cromatica e microlesioni superficiali diffuse (Figura 3.33).

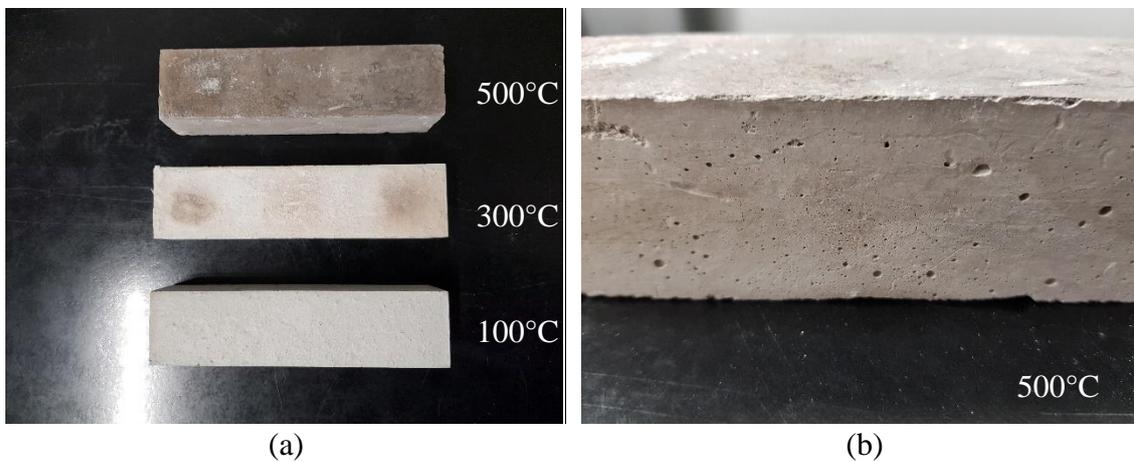


Figura 3.33 – Matrice M25: campioni a seguito del trattamento termico

Analogamente a quanto effettuato precedentemente, le fasi presenti sono state valutate per mezzo dell'analisi diffrattometrica e termogravimetrica. I risultati sono riportati rispettivamente Figura 3.34, Figura 3.35 e Figura 3.36.

L'analisi diffrattometrica effettuata ha permesso di identificare che le principali fasi presenti sono: silicati di calcio idrati (C-S-H), ettringite, portlandite, calcite, caolinite e quarzo (derivante dall'inerte utilizzato).

L'analisi termogravimetrica ha confermato quanto riscontrato nella precedente analisi, infatti i picchi presenti compresi tra 30 °C e 200 °C indicano la perdita di acqua libera e chimicamente legata del C-S-H e dell'ettringite.

È possibile osservare che per temperature comprese tra 250 °C e 430 °C si rileva la decomposizione della componente polimerica presente in miscela, a 470 °C la

decomposizione dell'idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in ossido di calcio (CaO), e a 710°C la decomposizione del CaCO_3 in ossido di calcio CaO .

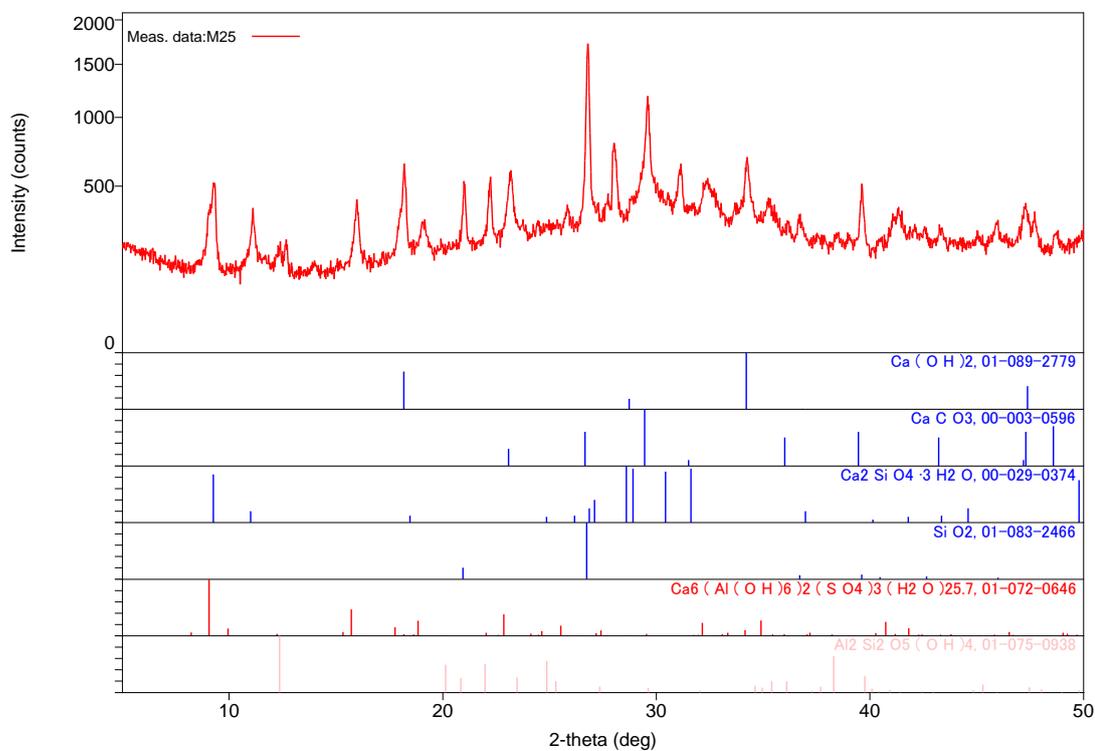


Figura 3.34 – Matrice M25: analisi diffrattometrica

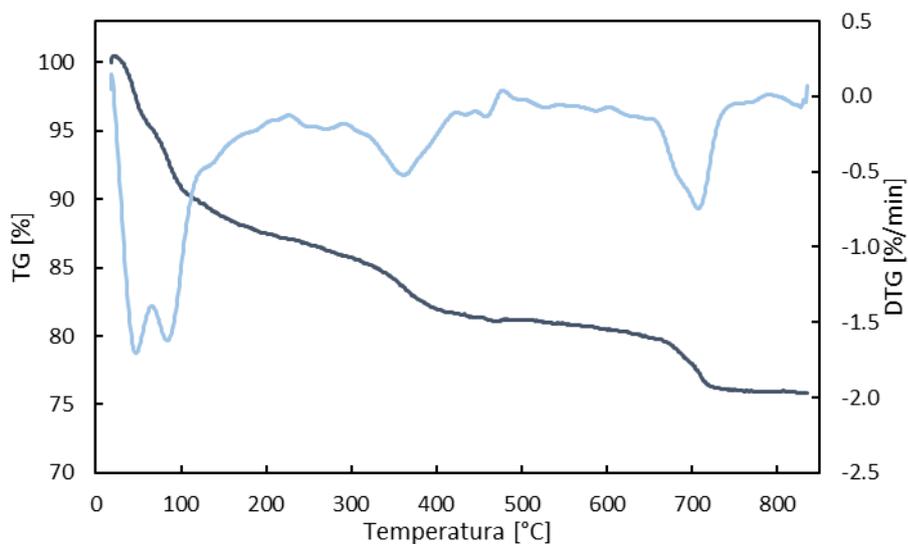


Figura 3.35 – Matrice M25: analisi termogravimetrica, TG(—) DTG(—)

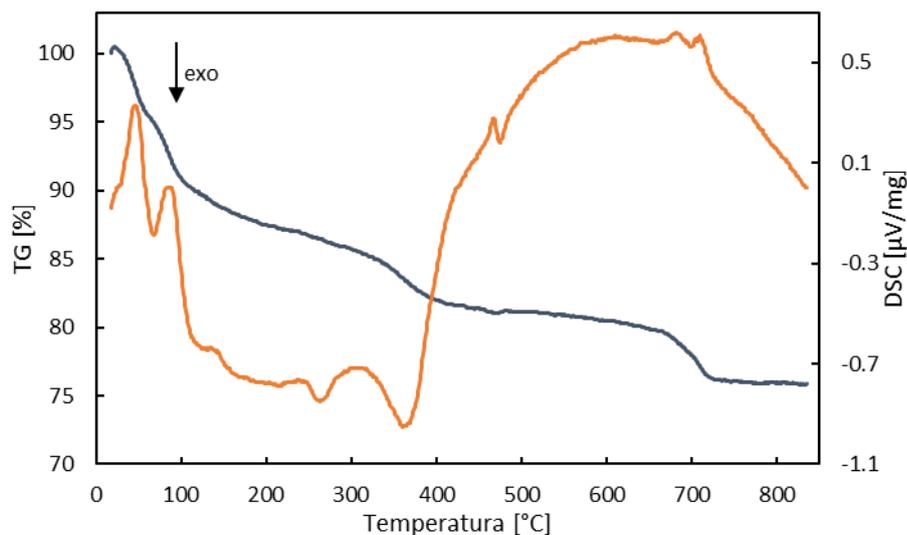


Figura 3.36 – Matrice M25: analisi termogravimetrica, TG(—) DSC(—)

Tabella 3.7 – Matrice M25: variazioni di resistenza e in massa

Temperatura	Flessione			Compressione			Massa
	σ_f	CoV	$\Delta\sigma_f$	σ_c	CoV	$\Delta\sigma_c$	Δm
	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]	[%]
20	8.01	20.34	0.00	31.06	5.63	0.00	0.00
100	5.80	12.17	-27.62	30.27	2.26	-2.56	-7.46
300	4.06	4.56	-49.31	24.09	6.31	-22.43	-16.17
500	2.47	5.90	-69.15	11.64	2.28	-62.53	-21.03

La perdita in massa ottenuta dai trattamenti termici sui provini prismatici a 500 °C è pari circa al 21% ed è confrontabile con quella determinata mediante analisi termogravimetrica alla stessa temperatura, pari a circa il 19%.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dall'indagine sperimentale sull'aderenza al supporto in muratura, distinti per i sistemi di rinforzo oggetto di questo studio. A tal proposito vengono illustrati i profili della temperatura acquisiti durante i diversi trattamenti termici (Figura 3.37). Le misure sono relative alle termocoppie e alle termoresistenze posizionate come descritto in par. 2.3.3.

Non si registrano variazioni tra la temperatura di settaggio e quella registrata all'interno del forno. Come si evince dai grafici in Figura 3.37, la temperatura misurata sulla superficie del composito, nell'area prossimale alla chiusura del forno, poco si discosta da quella all'interno del forno stesso. Inoltre, quella registrata all'interno dell'area isolata, a diretto contatto con le fibre, risulta nettamente inferiore.

Nello specifico, la temperatura massima raggiunta all'interno della parte isolata posta in testa al campione risulta pari a 65 °C, 180 °C, 360 °C, rispettivamente per i trattamenti termici a temperatura di 100 °C, 300 °C e 500 °C. La temperatura raggiunta sulla superficie del composito risulta pari a 80 °C, 250 °C e 480 °C, rispettivamente.

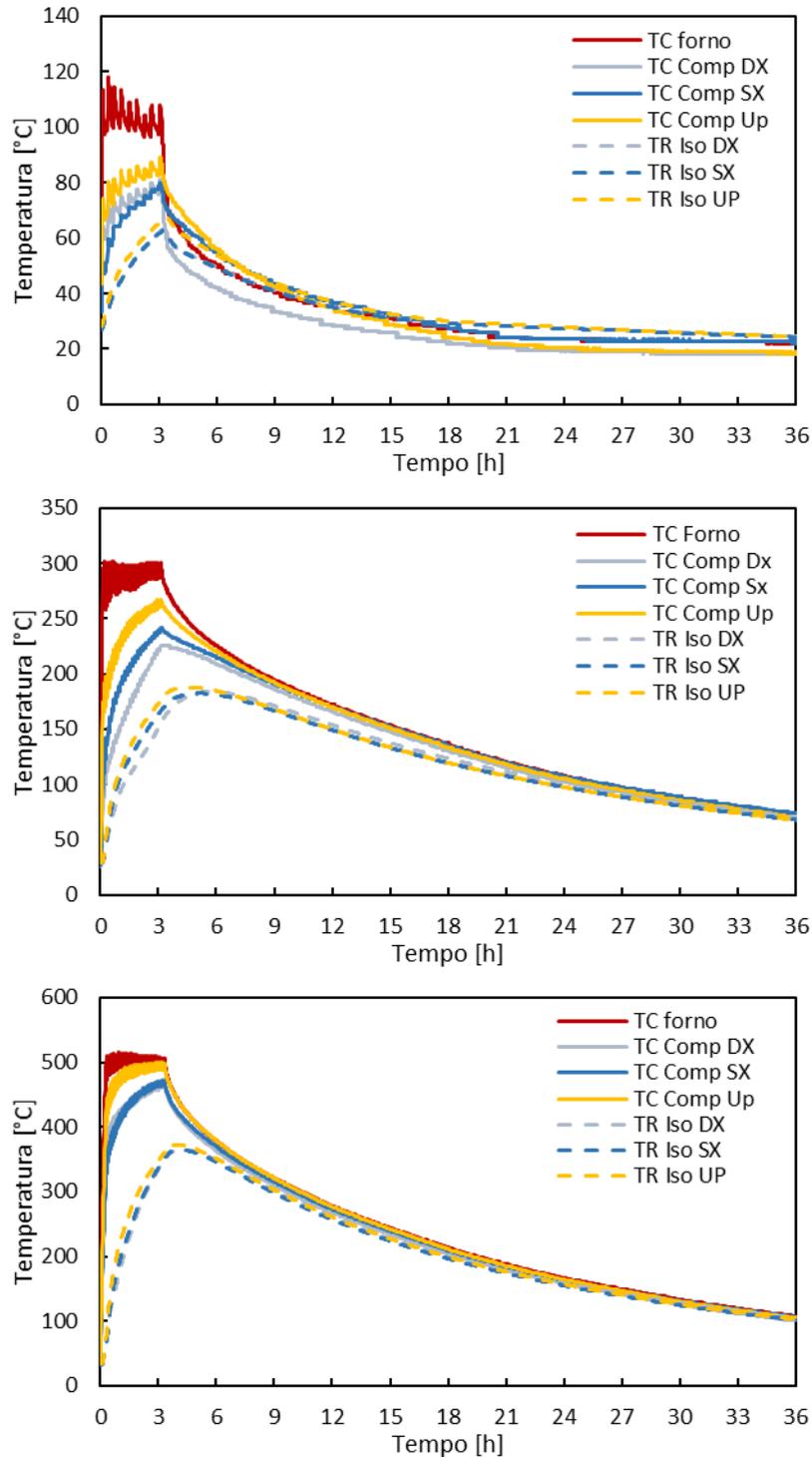


Figura 3.37 – Profili di temperatura a 100 °C (a), 300 °C (b) e 500 °C (c)

3.3.1 DEGRADO DEL SISTEMA B-FRCM

A seguito dei trattamenti termici non si rilevano quadri fessurativi sulla superficie del composito o all'interfaccia composito-supporto (Figura 3.38a-c). Per i trattamenti a temperature superiori a 300 °C si è verificata la fusione del rivestimento basato su resina ad acqua, come evidenziato, in particolare, in Figura 3.38b.

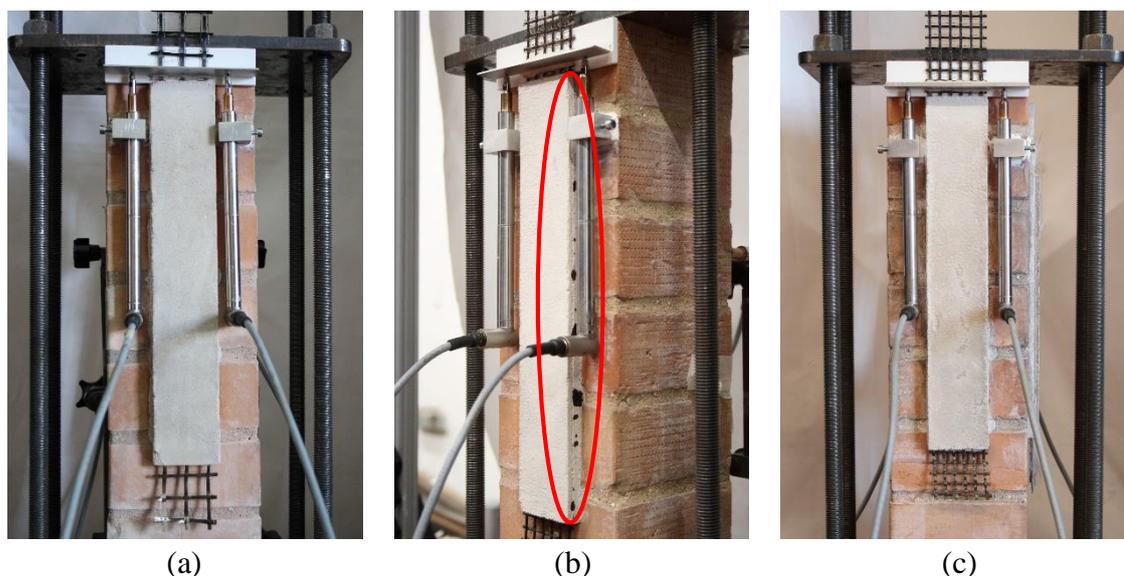


Figura 3.38 – B-FRCM: post trattamento a 500 °C (B2) (a), a 300 °C (b) e a 500 °C (c) (B4)

In Figura 3.39 e Figura 3.41 si riportano le curve di risposta ottenute dalle prove di aderenza a seguito del trattamento termico rispettivamente per il sistema con rete in fibra di basalto a bassa densità (B2-FRCM) e ad alta densità (B4-FRCM). Si riporta altresì la risposta ottenuta a temperatura ambiente come riferimento.

Il composito con rete a bassa densità (Figura 3.39), a seguito del trattamento a 300 °C, mostra una curva di risposta caratterizzata da una maggiore rigidità, e una riduzione del carico di picco intorno all'11%, associabile, ad alterazioni del coating. A seguito del trattamento a 500 °C, si osserva una riduzione del carico di picco pari al 74%, e una diminuzione della rigidità del sistema di rinforzo. I compositi trattati a 100 °C e a 300 °C, mostrano una rottura caratterizzata dal cedimento dei fasci all'estremo caricato all'esterno dell'area di aderenza, così come riscontrato nei test effettuati a temperatura ambiente (Figura 3.40a). A seguito del trattamento a 500°C la rottura dei fasci si verifica invece all'interno dell'area di aderenza in prossimità dell'estremo caricato (Figura 3.40b).

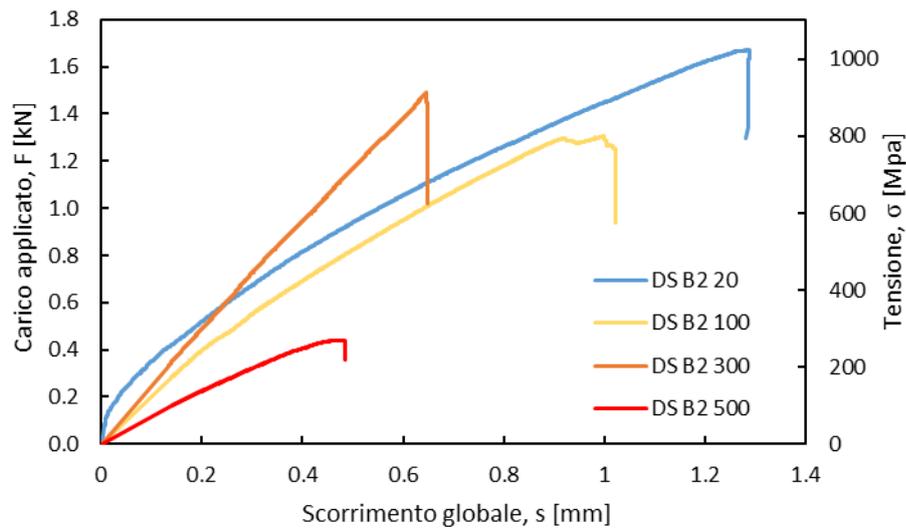


Figura 3.39 – B2-FRCM: curve di risposta post trattamento termico

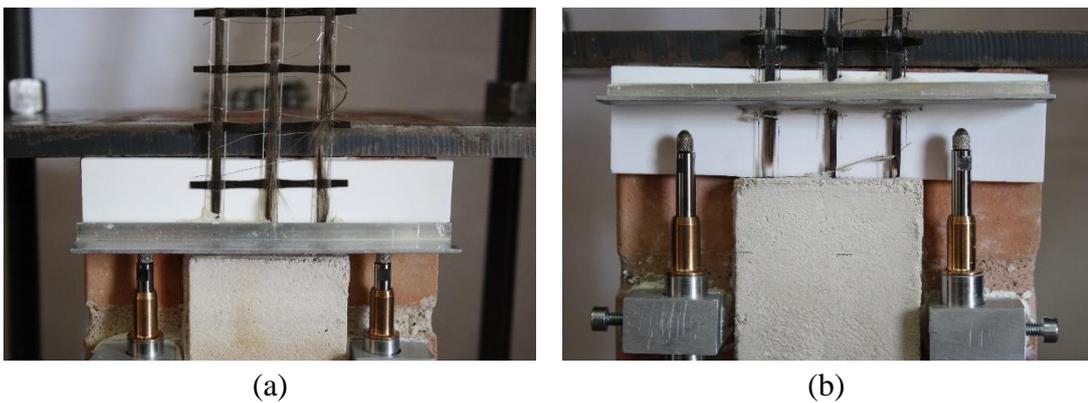


Figura 3.40 – B2-FRCM: modalità di rottura a 300°C (a) e a 500°C (b)

I compositi con rete ad alta densità (B4-FRCM) (Figura 3.41) mostrano, a seguito dei trattamenti a 100 °C e a 300 °C, una riduzione del carico di picco intorno al 13%, mentre non si rilevano significative variazioni dello scorrimento globale a rottura. A seguito del trattamento a 500 °C si rileva invece una significativa riduzione del carico di picco, pari al 65%, e del relativo valore dello scorrimento, pari a circa il 92%. Tale comportamento è ascrivibile, per i campioni trattati a 100 °C e a 300 °C alla modalità di rottura che si verifica per delaminazione all'interfaccia rinforzo-matrice, con il distacco completo del rinforzo e l'espulsione dello strato di matrice esterno (Figura 3.42a e b), così come riscontrato nei test effettuati a temperatura ambiente.

I risultati ottenuti a 500 °C sono legati alla variazione della modalità di rottura caratterizzata dal cedimento dei fasci all'interno del composito in prossimità dell'estremo caricato (Figura 3.42c), analogamente a quanto riscontrato con il rinforzo a bassa densità (B2-FRCM).

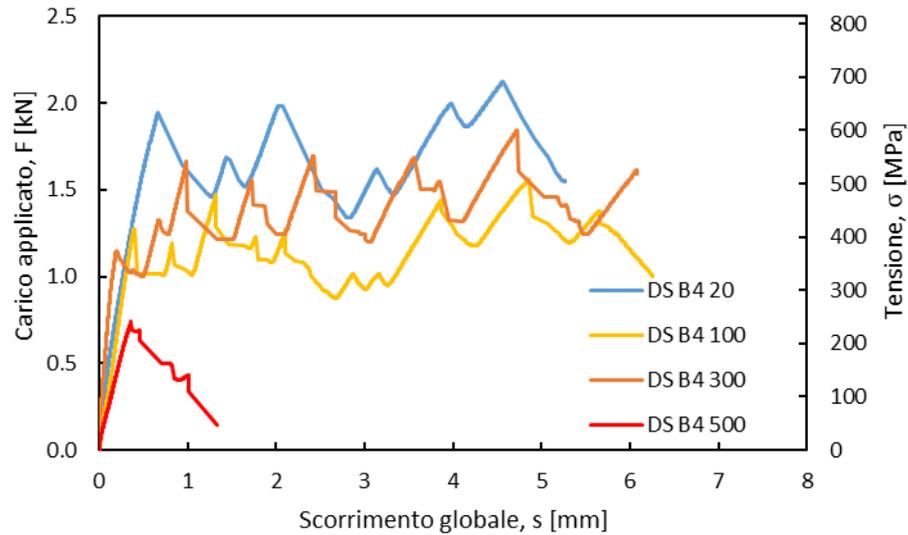


Figura 3.41 – B4-FRCM: curve di risposta post trattamento termico

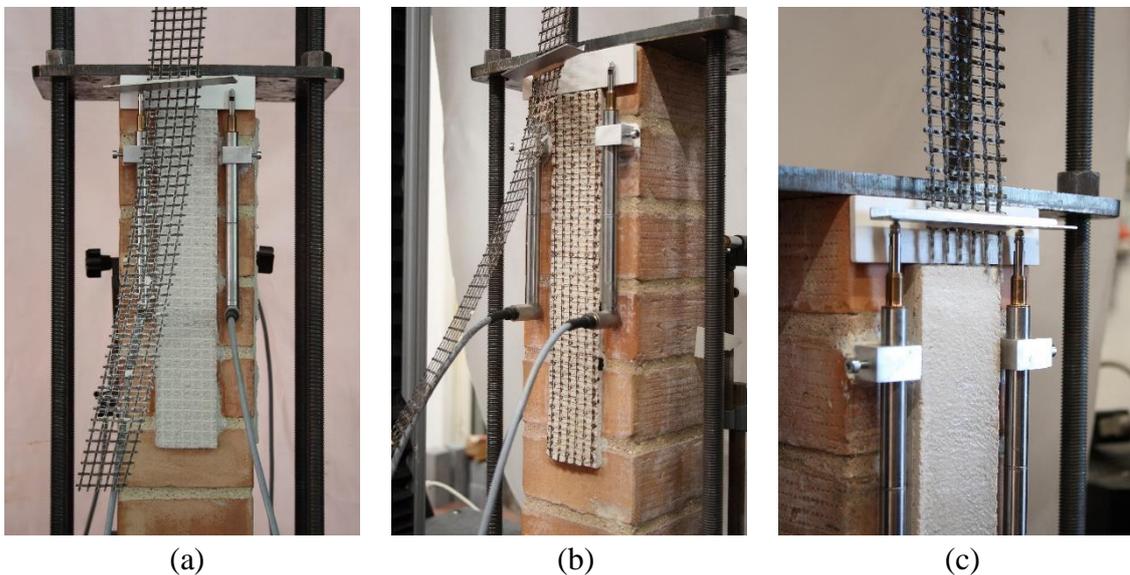


Figura 3.42 – B4-FRCM: modalità di rottura a 100 °C (a), 300 °C (b) e a 500 °C (c)

3.3.2 DEGRADO DEL SISTEMA S-FRCM

I test di degrado condotti sul composito in acciaio determinano un quadro fessurativo solo a seguito del trattamento termico a 500 °C. Si rileva infatti una lesione all'interfaccia composito-substrato all'estremo superiore e inferiore (Figura 3.43). Ciò probabilmente imputabile all'effetto combinato della dilatazione termica dell'acciaio e decadimento delle proprietà meccaniche della matrice.



Figura 3.43 – S-FRCM: delaminazione all'interfaccia post trattamento a 500 °C

In Figura 3.44 si riportano le curve di risposta carico-scorrimento ottenute dalle prove di aderenza a seguito dei trattamenti termici. Si riporta altresì la risposta ottenuta a temperatura ambiente come riferimento.

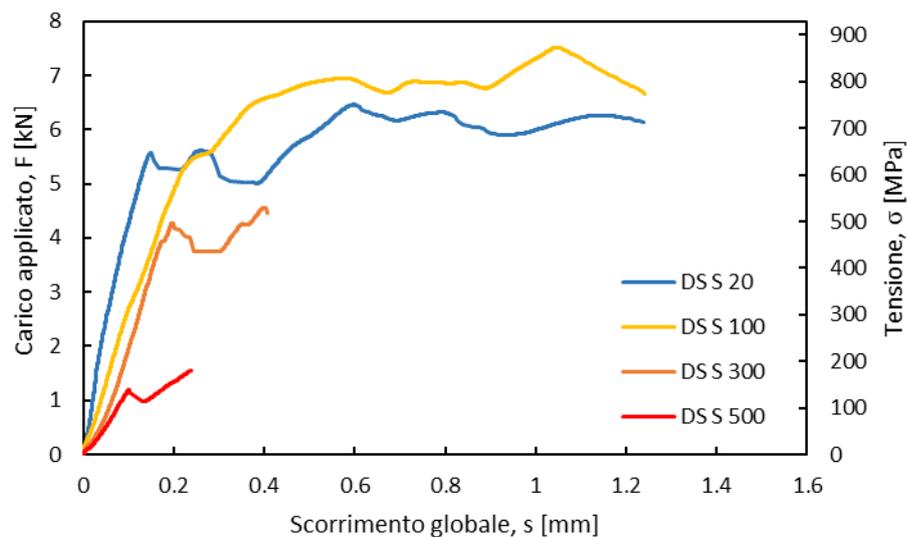


Figura 3.44 – S-FRCM: curve di risposta post trattamento termico

Come evidenziato dalle curve di risposta si riscontra nel tratto ascendente iniziale una diminuzione della rigidità del sistema all'aumentare della temperatura. A seguito dei trattamenti condotti a 300 °C a 500 °C, si rileva, inoltre, una riduzione del carico di picco rispettivamente pari al 30% e al 76% e dello scorrimento pari a circa il 67% e 80%.

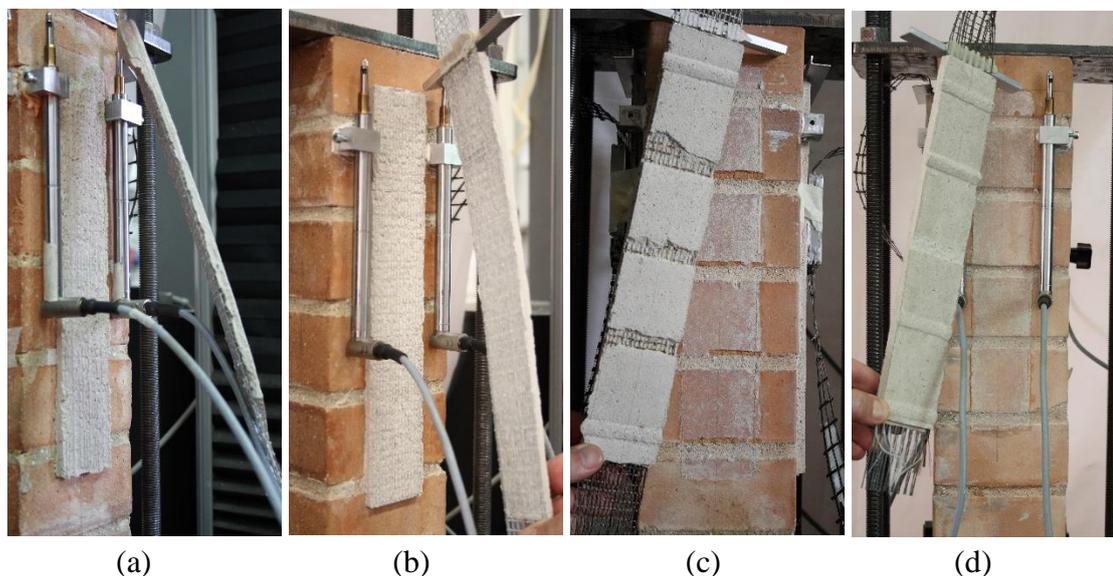


Figura 3.45 – S-FRCM: modalità di crisi 20 °C (a), 100 °C (b), 300 °C (c) e 500 °C (d)

La modalità di crisi a 20 °C e a 100 °C è caratterizzata da fessurazione longitudinale all'interfaccia fibra-matrice e conseguente distacco del rinforzo e dello strato di matrice esterno (Figura 3.45a e b). A seguito dei trattamenti termici condotti a 300 °C e a 500 °C si assiste invece a rottura all'interfaccia con il supporto e conseguente distacco del composito (Figura 3.45c e d).

Tale comportamento conferma quanto ipotizzato a valle dei trattamenti termici.

All'aumentare della temperatura, il progressivo decadimento delle proprietà meccaniche della matrice implica una riduzione dell'aderenza al supporto. Inoltre, la maggiore dilatazione termica dell'acciaio rispetto al substrato genera tensioni tangenziali all'interfaccia composito-supporto. La combinazione di tali fenomeni induce la formazione di lesioni su tale superficie determinando le differenti modalità di crisi riscontrate alle più alte temperature. Ciò ha comportato pertanto il prematuro distacco del composito e quindi una diminuzione delle prestazioni meccaniche offerte dal sistema di rinforzo.

3.3.3 DEGRADO DEL SISTEMA C-FRCM

Per il composito in fibra di carbonio si è riscontrato un quadro fessurativo a seguito dei trattamenti condotti a 300 °C e a 500 °C. Nello specifico, a seguito dell'esposizione alla temperatura di 300 °C si rileva una lesione all'interfaccia composito-supporto (Figura 3.46a), mentre a 500° C si riscontrano sia lesioni trasversali sulla superficie del composito che una lesione all'interfaccia composito-supporto (Figura 3.46b).

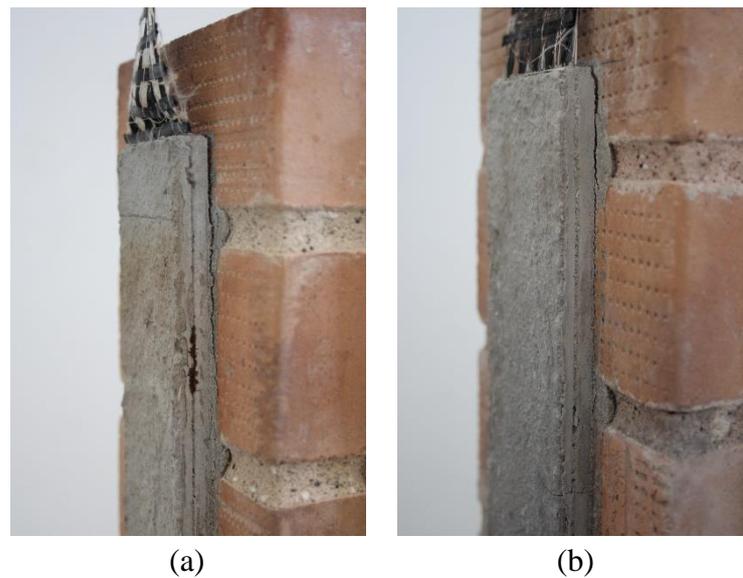


Figura 3.46 – C-FRCM: campioni post trattamento a 300°C (a) e a 500°C (b)

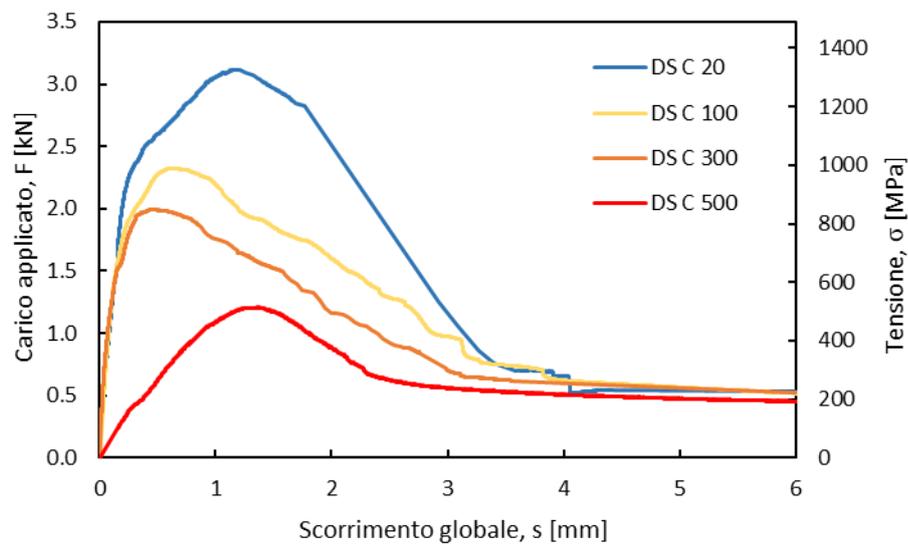


Figura 3.47 – C-FRCM: curve di risposta post trattamento termico

Come si evince dalle curve di risposta in Figura 3.47 il composito esibisce una graduale riduzione del carico di picco all'aumentare della temperatura, con una diminuzione pari al 36% e al 61% rispettivamente per i campioni esposti alle temperature di 300°C e 500°C. La rottura è caratterizzata dal comportamento telescopico dei fasci di fibra all'interno della matrice.

Le modalità di crisi delle fibre nella porzione esterna del fascio avviene per rottura dovuta al superamento della resistenza a trazione, mentre le fibre interne scorrono per effetto della forza di pull out. Il meccanismo è combinato nelle regioni intermedie.

La perdita di efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo dissipazione energetica, manifestando un comportamento pseudo-duttile.

Nonostante il quadro fessurativo rilevato, la modalità di rottura non sembra affetta dai trattamenti termici (Figura 3.48 e Figura 3.49).

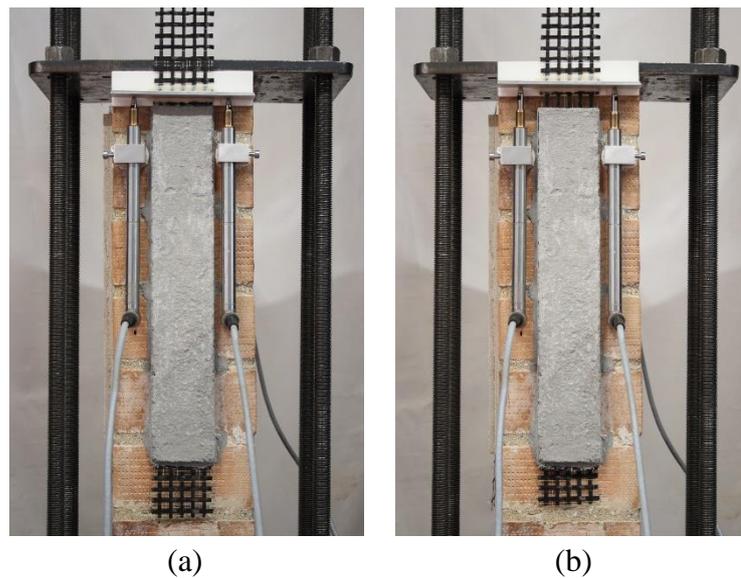


Figura 3.48 – C-FRCM: campione trattato a 100 °C: prima della prova (a), scorrimento telescopico dei fasci a rottura (b)

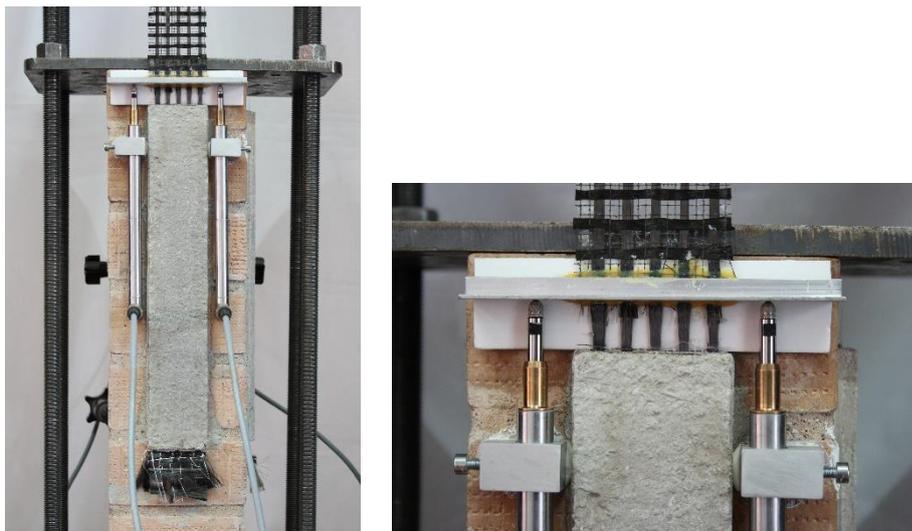


Figura 3.49 – C-FRCM: modalità di rottura telescopica post-trattamento a 500 °C

3.3.4 CONFRONTI

A seguito dei test condotti, è stato effettuato un confronto delle prestazioni meccaniche offerte dai diversi sistemi di rinforzo. A tal fine si riporta, l'andamento delle tensioni di picco al variare della temperatura (Figura 3.50), e le curve di risposta ottenute a seguito dei trattamenti a 300 °C (Figura 3.51) e 500 °C (Figura 3.52).

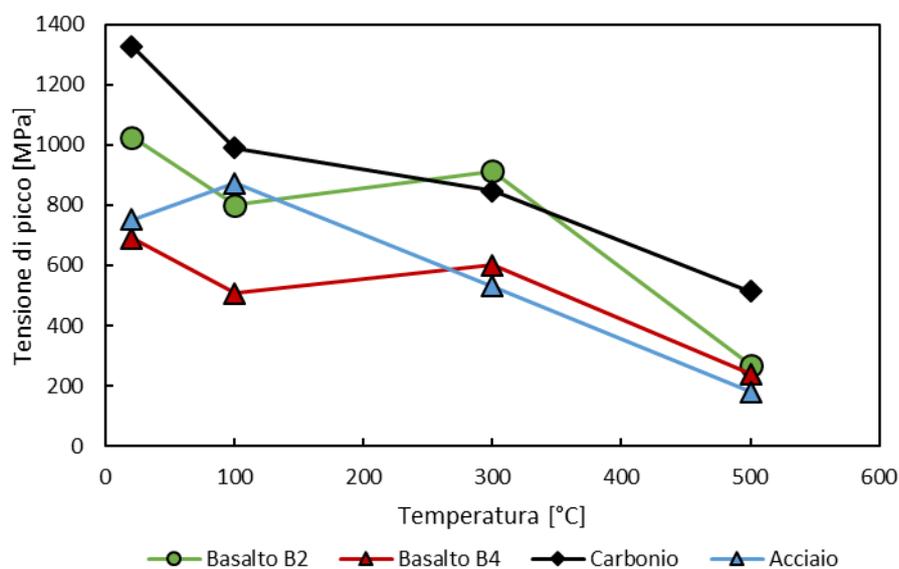


Figura 3.50 – Confronto delle tensioni di picco al variare della temperatura

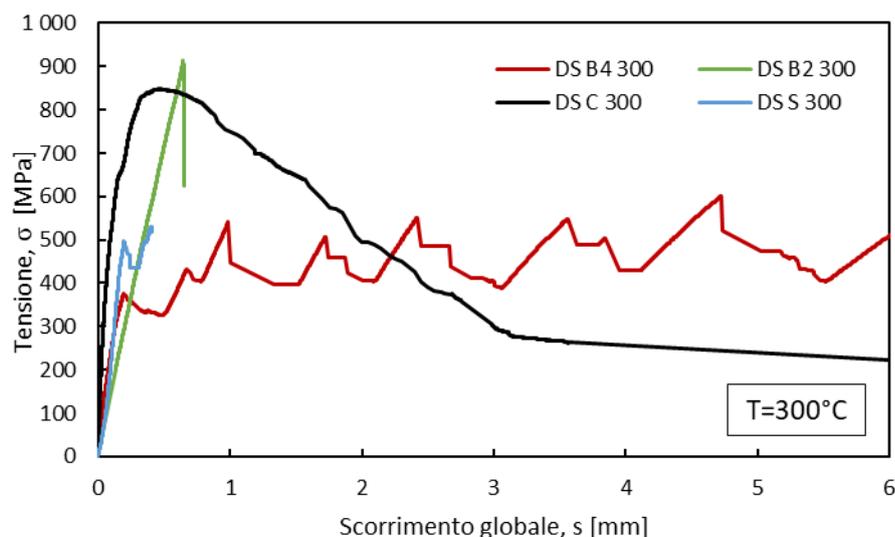


Figura 3.51 – Confronto delle curve di risposta a 300°C

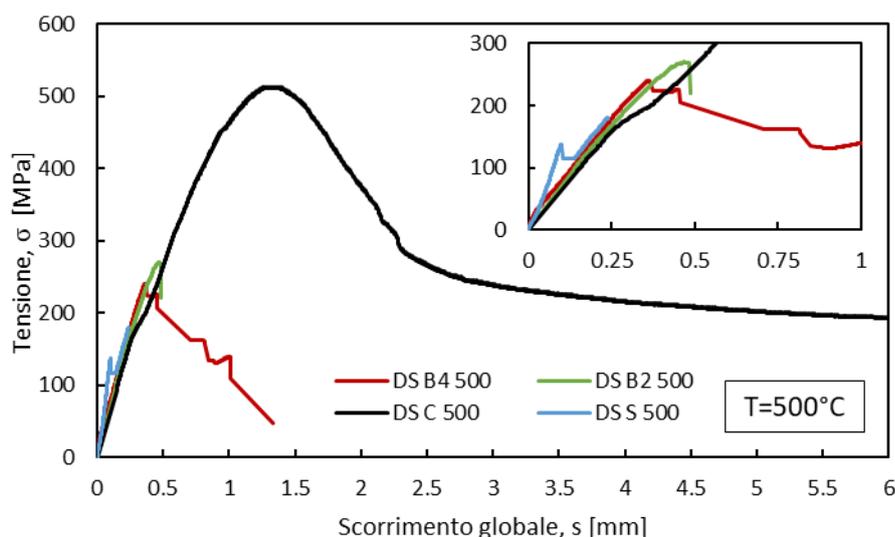


Figura 3.52 – Confronto delle curve di risposta a 500 °C

Il composito C-FRCM ha mostrato valori di tensione di picco, per ogni temperatura investigata, più elevati rispetto agli altri sistemi di rinforzo, seguito dal composito B2-FRCM mentre per il composito con rete ad alta densità (B4-FRCM) sono stati misurati valori della tensione più bassi fino alla temperatura di 300 °C. A seguito del trattamento a 500 °C entrambi i sistemi in basalto mostrano valori confrontabili delle tensioni di picco. Il composito S-FRCM ha mostrato, altresì, significative variazioni della tensione di picco a seguito dei trattamenti a 300 °C e a 500 °C (Figura 3.50). I valori della tensione di picco a 500 °C per i compositi B2-FRCM, B4-FRCM, C-FRCM e S-FRCM sono

rispettivamente pari a 270 MPa, 240 MPa, 514 MPa e 180 MPa corrispondenti a un decadimento del 74%, 65%, 61% e 76%.

I compositi C-FRCM e B4-FRCM fino alla temperatura di esposizione di 300°C esibiscono scorrimenti globali elevati e paragonabili, ma dovuti a differenti modalità di rottura, per comportamento telescopico il primo e delaminazione e conseguente distacco all'interfaccia rinforzo-matrice per il secondo (Figura 3.51). A 500 °C il composito C-FRCM continua a presentare il medesimo comportamento, mentre il composito B4-FRCM mostra una rottura caratterizzata dal cedimento dei fasci di fibra con importante riduzione dello scorrimento globale (Figura 3.52).

Il composito B2-FRCM mostra una rottura caratterizzata dal cedimento dei fasci per tutte le temperature testate e conseguentemente limitati scorrimenti.

Per il composito S-FRCM, è stata riscontrata una variazione della modalità di crisi: distacco del rinforzo e dello strato di matrice esterno osservato a 20 °C e 100 °C e rottura all'interfaccia con il supporto e conseguente distacco del composito a 300 °C e 500 °C. Tale variazione incide significativamente sullo scorrimento globale di tale composito.

3.4 VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEL CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA MEDIANTE SISTEMI DI RINFORZO FRCM

In questa sezione saranno presentati e discussi i risultati della campagna sperimentale finalizzata alla valutazione del comportamento di colonne in muratura, di sezione quadrata, confinate mediante sistemi FRCM e soggette a carico di compressione monotono. L'efficacia del confinamento è valutata in termini di: influenza di diverse tipologie di rinforzi (in fibra di basalto ad alta densità, acciaio e PBO), variazioni di resistenza al variare del numero degli strati di rinforzo (1, 2 e 3 layer), influenza della disposizione degli strati in sovrapposizione, effetto di carichi eccentrici, modalità di rottura e duttilità.

Le curve di risposta sono riportate in termini di tensione-deformazione assiale e laterale, distinte per tipologia di rinforzo e di carico. Si riporta altresì la curva di risposta del campione non confinato per effettuare gli opportuni confronti.

Le tensioni sono determinate dividendo il carico per la sezione trasversale della colonna tenendo in considerazione il raggio di curvatura per le colonne confinate.

La deformazione assiale è determinata come la media delle acquisizioni dei 4 LVDT longitudinali. Le deformazioni laterali sono determinate in corrispondenza della sezione trasversale posta a metà altezza della colonna e in relazione ai 2 assi principali (par. 2.3.4). La nomenclatura adottata per l'identificazione delle colonne confinate segue la forma C-X-YL-OZ-W, dove: C indica che la colonna è confinata, X indica la fibra di rinforzo (basalto B, acciaio S, PBO P), YL indica il numero di strati di rinforzo (1, 2 o 3 layer), OZ, se presente, indica la disposizione degli strati in sovrapposizione delle fasce di rinforzo lungo l'altezza (OA, OC) e W, se presente, indica il valore dell'eccentricità di carico (25 o 50 mm). La colonna non confinata è identificata con l'acronimo UC.

3.4.1 COLONNA NON CONFINATA

La rottura della colonna non confinata è di tipo improvviso e associata allo schiacciamento della muratura a seguito del raggiungimento del carico di picco di 334 kN corrispondente a una resistenza a compressione f'_{co} di 5.35 MPa. Si rilevano lesioni longitudinali lungo l'asse del campione, localizzate quindi al centro di ciascuna faccia della colonna (Figura 3.53).

La curva di risposta è caratterizzata da un comportamento lineare fino a circa il 38% del carico di picco cui segue un andamento non lineare ascendente fino al raggiungimento dello stesso. Si riscontra inoltre una limitata estensione e marcata pendenza del tratto post picco abbinata a una limitata deformazione laterale.



Figura 3.53 – Colonna non confinata a rottura

3.4.2 CONFINAMENTO CON SISTEMA S-FRCM

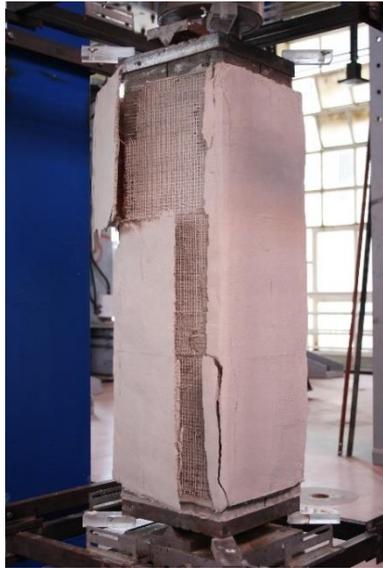
In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti effettuando il confinamento con tessuto unidirezionale in fibra di acciaio, distinti per la diversa configurazione di applicazione del carico di compressione.

3.4.2.1 CARICO CENTRATO

Per le colonne confinate soggette a carico di compressione centrato si delinea un quadro fessurativo, in generale, caratterizzato da lesioni verticali, a carico delle facce interessate dagli strati in sovrapposizione in prossimità degli spigoli, e trasversali parallele alla direzione dei trefoli. Questo si estende anche alle altre facce dei campioni. Si rilevano inoltre lesioni trasversali in corrispondenza dell'accostamento delle diverse fasce (vedi 2.3.4).

La rottura è caratterizzata dal distacco del rinforzo in corrispondenza degli strati in sovrapposizione, lungo una porzione limitata dell'altezza per i campioni CS1LOA (Figura 3.55) e CS2L (Figura 3.56), lungo tutta l'altezza invece, per CS1LOC (Figura 3.54a) e CS3L (Figura 3.57a). Questa si sviluppa con il propagarsi di una lesione localizzata tra gli strati in sovrapposizione all'interfaccia matrice-strato di tessuto interno. Generalmente solo lo strato esterno tende ad aprirsi, mentre quello interno rimane adeso alla superficie della colonna. Per il campione CS3L, tuttavia, la rottura interessa anche gli strati di rinforzo più interni con il distacco all'interfaccia composito-nucleo interno (Figura 3.57b).

Al termine delle prove è stato possibile verificare, più in dettaglio, le condizioni del nucleo interno delle colonne. In Figura 3.54b, campione CS1LOC, è possibile notare lo schiacciamento del nucleo e la rottura coesiva all'interfaccia composito-substrato, relativa alla faccia non interessata da strato in sovrapposizione. Si osserva infatti un sottile strato di muratura adeso sulla superficie interna del composito stesso.



(a)



(b)

Figura 3.54 – CS1LOC: (a) modalità di crisi, (b) particolare del nucleo interno



(a)



(b)

Figura 3.55 – CS1LOA: modalità di crisi

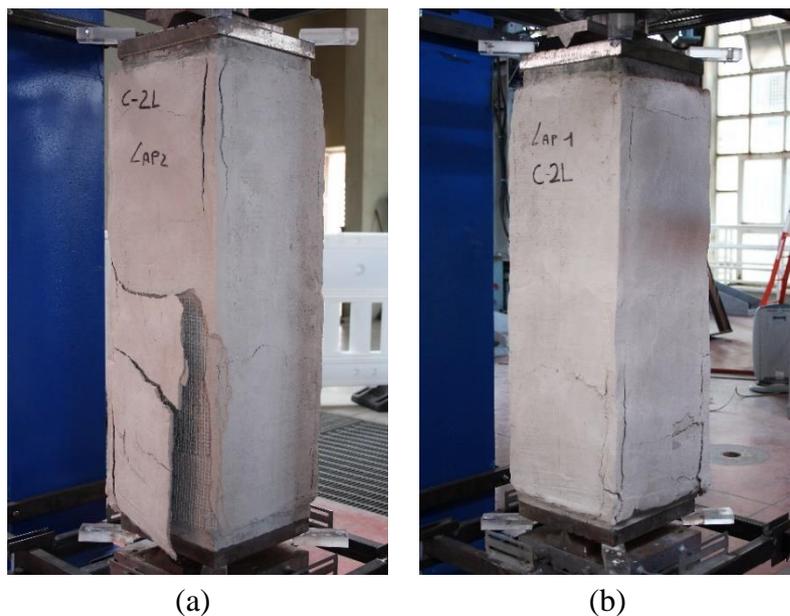


Figura 3.56 – CS2L: modalità di crisi

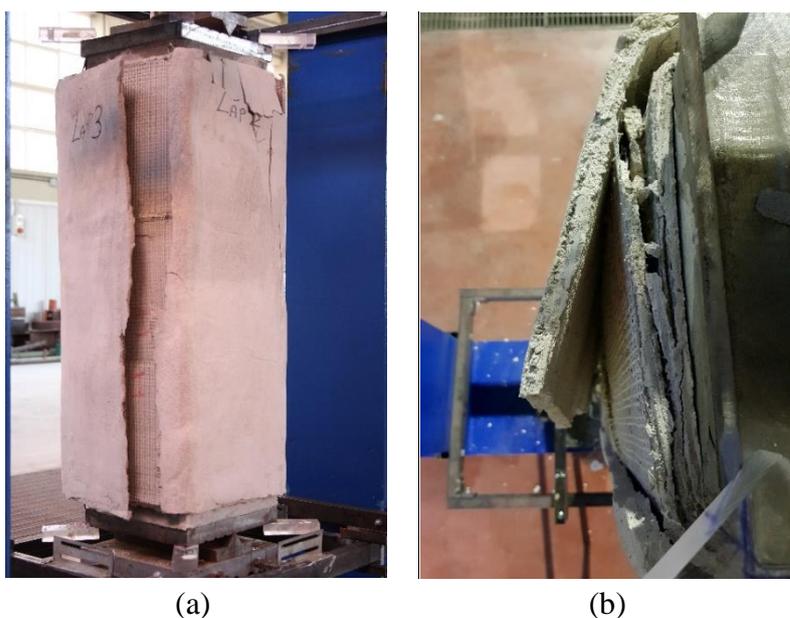


Figura 3.57 – CS3L: (a) modalità di crisi, (b) particolare della rottura

In generale le curve di risposta (Figura 3.58) presentano inizialmente un andamento lineare fino a circa il 43% della resistenza per i sistemi con un layer di rinforzo e di circa il 53% per i sistemi multilayer. Il comportamento quindi diviene non lineare con un notevole incremento dello stato tensionale sino al raggiungimento dei valori di picco cui segue un andamento discendente sino a rottura associata a una repentina riduzione della

resistenza. In particolare si riscontra una limitata estensione del tratto discendente per tutte le geometrie di prova, tranne per il campione CS1LOC.

In Figura 3.58 si riportano i diagrammi tensione-deformazione assiale e deformazione laterale relativa all'asse non interessato da overlap (BD) e in Tabella 3.8 i principali parametri meccanici dedotti. Si evidenzia che alcuni dati relativi alle deformazioni laterali di picco, per i campioni CS2L e CS3L, non sono riportati in quanto non acquisiti per preventiva rimozione della strumentazione a causa dell'apertura dell'overlap. Inoltre il valore ultimo della deformazione laterale per il campione CS2L lungo l'asse AC è riferito a un valore di carico antecedente al picco. Per quanto riguarda il campione CS3L viene riportata la deformazione laterale relativa all'asse AC in quanto la dilatazione lungo l'asse opposto risulta alterata dall'apertura dell'overlap del terzo strato.

Dalle curve di risposta è possibile riscontrare in generale un incremento di rigidezza all'aumentare del grado di confinamento (CS2L, CS3L) e con disposizione alternata degli strati in sovrapposizione (CS1LOA). Tale incremento risulta tuttavia trascurabile per la configurazione con disposizione continua degli overlap (CS1LOC).

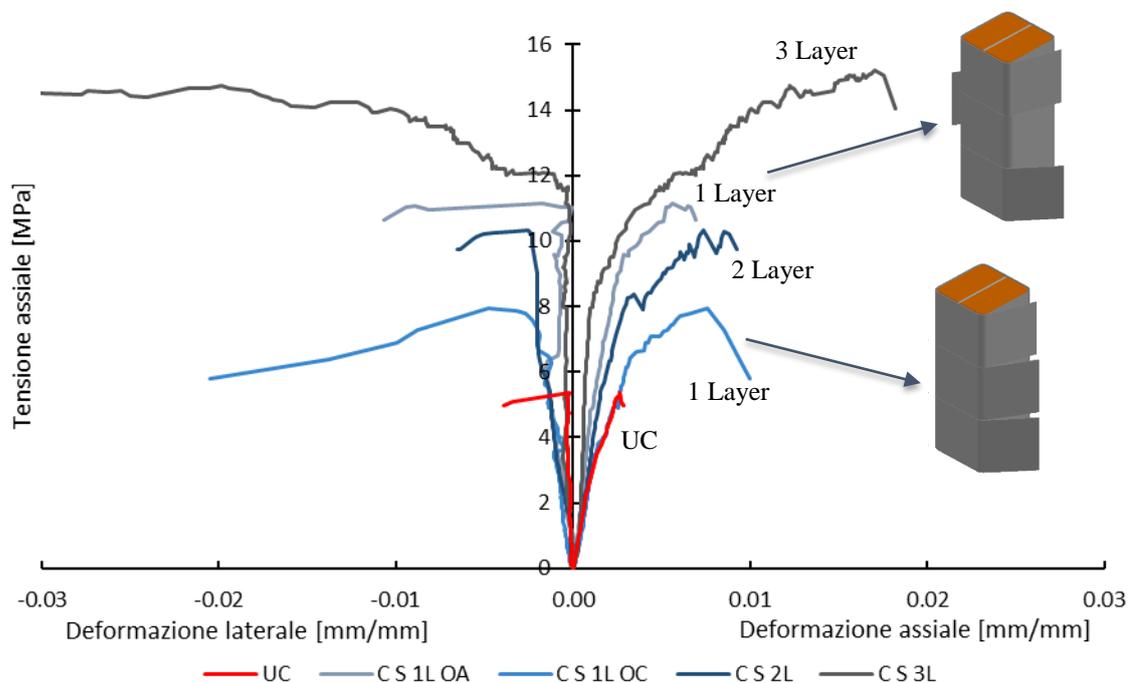


Figura 3.58 – Curve di risposta confinamento con S-FRCM – carico centrato

Tabella 3.8 – Confinamento con S-FRCM: parametri meccanici (carico centrato)

Campione	Carico di picco [kN]	Resistenza f'_{co}, f'_{cc} [Mpa]	Deformazione assiale [%]				$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	Indice di duttilità $\epsilon_{0.95 f'_{cc}}/\epsilon_{cc}$	Deformazione laterale [%]			
			Picco		Ultima				Picco		Ultima	
			$\epsilon_{co}, \epsilon_{cc}$	ϵ_{cu}	Asse A-C	Asse B-D			Asse A-C	Asse B-D		
UC	334.44	5.35	0.26	0.28	1.00	1.00	1.00	0.03	0.02	0.06	0.39	
CS1L OA	692.66	11.14	0.56	0.69	2.08	2.12	1.24	0.23	0.17	0.63	1.07	
CS1L OC	487.54	7.84	0.76	1.00	1.47	2.88	1.07	0.69	0.48	8.87	2.05	
CS2L	642.69	10.34	0.73	0.93	1.93	2.78	1.07	-	0.26	0.20	0.65	
CS3L	945.59	15.21	1.70	1.84	2.84	6.46	1.05	6.41	-	6.85	7.19	

I valori di resistenza f'_{cc} , per le geometrie con 1, 2 e 3 layer di rinforzo e disposizione continua dell'overlap sono rispettivamente pari a 7.84 MPa, 10.34 MPa, 15.21 MPa e per 1 layer con disposizione alternata degli overlap di 11.14 MPa, con incrementi di resistenza rispetto alla colonna non confinata rispettivamente del 47%, 93%, 184% e di 108%. Si riscontra quindi un aumento di resistenza pari al 42% alternando la disposizione degli overlap delle singole fasce (CS1LOA/CS1LOC) e una riduzione della deformabilità.

Mettendo a confronto le curve di risposta delle colonne confinate con 1 e 2 layer, si rileva tuttavia un'analogia capacità deformativa imputabile probabilmente al prematuro distacco dell'overlap della fascia inferiore per il campione con 2 layer. I valori di deformazione ottenuti per i campioni con 1, 2 e 3 layer di rinforzo con disposizione continua dell'overlap sono rispettivamente di 0.76%, 0.73% e 1.70% per la deformazione di picco e di 1%, 0.93% e 1.84% per la deformazione ultima. In termini di deformazione laterale si ottengono valori di picco rispettivamente di 0.48%, 0.26% e 6.41%, e valori ultimi di 2.05%, 0.65% e 6.85%, rilevati in corrispondenza dell'asse non interessato da overlap del layer esterno. Si riscontra pertanto una ridotta capacità deformativa laterale ultima per la configurazione con 2 layer.

3.4.2.2 CARICO ECCENTRICO

Per le colonne confinate soggette a carico di compressione eccentrico si rilevano durante la prova lesioni verticali in corrispondenza degli spigoli compressi (Figura 3.59a e Figura 3.60a), lesioni orizzontali nella parte sommitale in corrispondenza del lembo teso e inclinate sulle altre 2 facce opposte (Figura 3.59b e Figura 3.60b). L'ampiezza delle stesse aumenta con l'evolversi della prova fino a rottura. Questa si caratterizza per il distacco del rinforzo, in particolare al lembo compresso, all'interfaccia composito-substrato per un terzo dell'altezza.

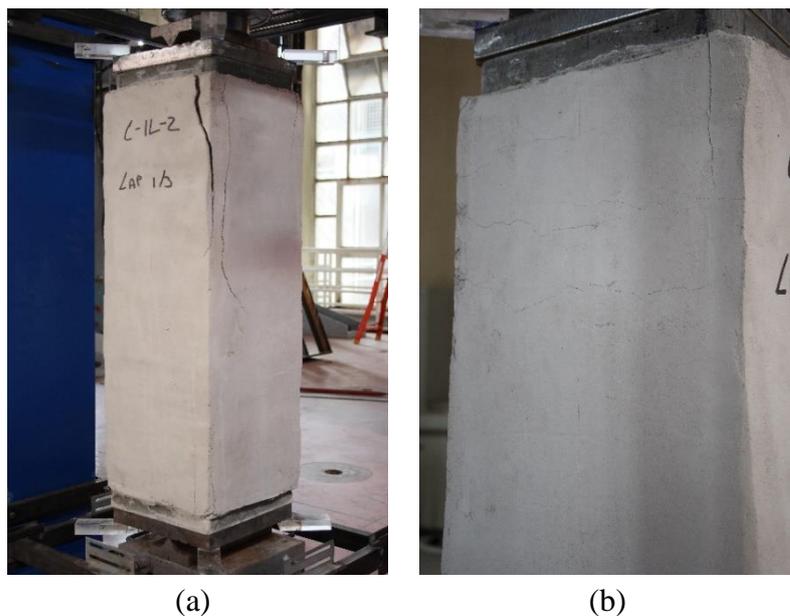


Figura 3.59 – CS1LOA25: (a) modalità di crisi, (b) particolare della rottura

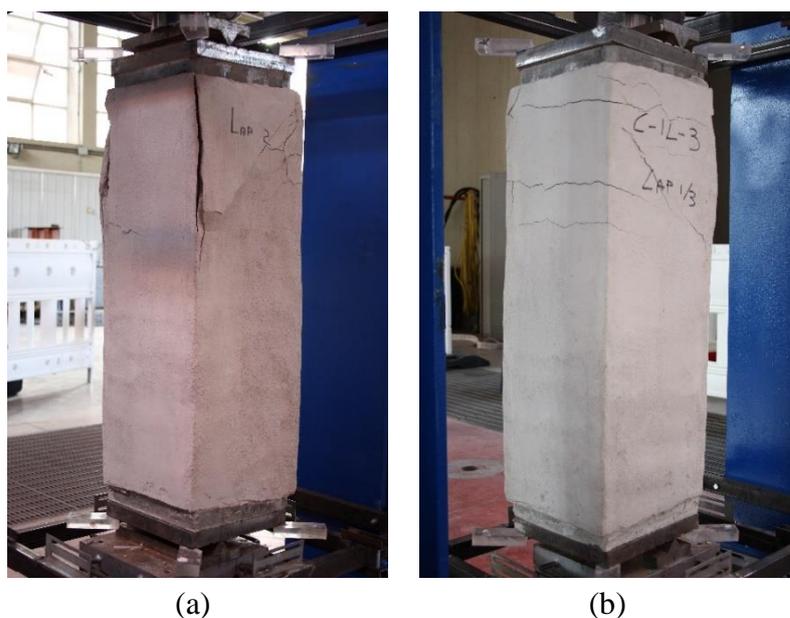


Figura 3.60 – CS1LOA50: (a) modalità di crisi, (b) particolare della rottura

In Figura 3.61 si riportano i diagrammi tensione-deformazione assiale e deformazione laterale relativa all'asse non interessato da overlap e in Tabella 3.9 i principali parametri meccanici dedotti.

In generale le curve di risposta esibiscono un andamento piuttosto simile sia in termini di carico che di deformazione per entrambi i valori di eccentricità indagati, 25 mm e 50 mm. I valori di resistenza risultano rispettivamente pari a 6.82 MPa e 6.68 MPa. Si

riscontrano pertanto incrementi di resistenza, rispetto alla colonna non confinata, rispettivamente del 28% e 25%, e una diminuzione del 40% rispetto al campione con la stessa configurazione soggetto a carico centrato (CS1LOA). Si riduce inoltre, la deformabilità assiale del 50% per il valore di picco e rispettivamente del 32% e 52% per i valori ultimi, così come la deformabilità laterale ultima la quale diminuisce del 60%.

A conferma di quanto riscontrato precedentemente, la disposizione alternata degli overlap determina un aumento di rigidezza rispetto alla geometria con overlap continuo lungo l'altezza.

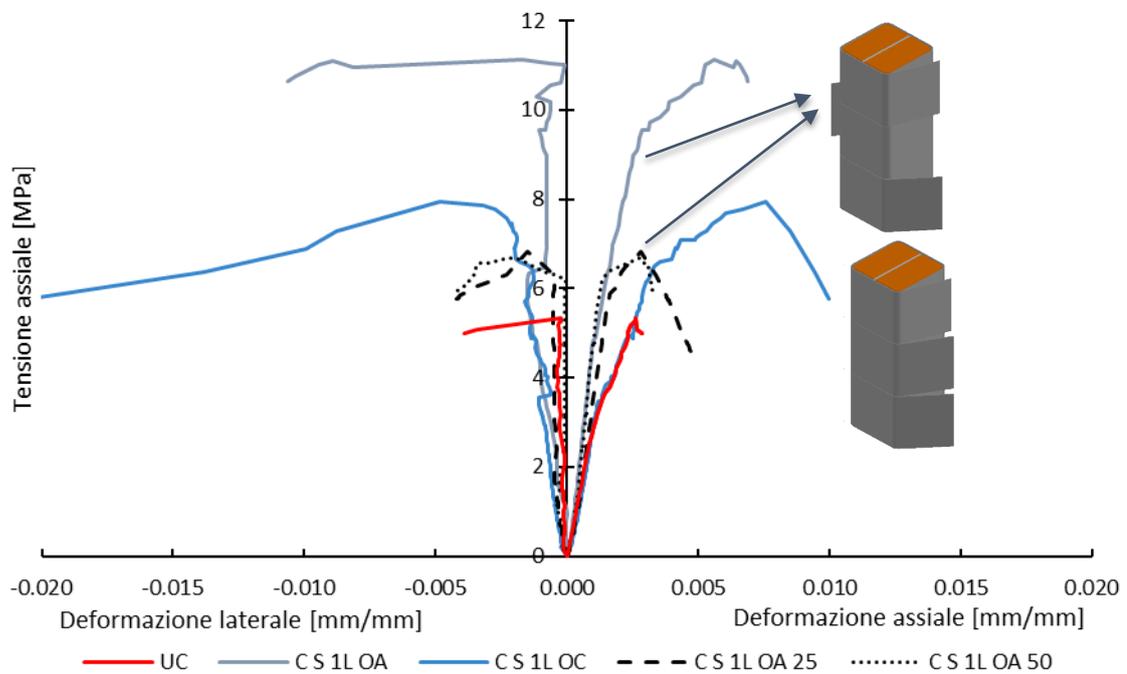


Figura 3.61 – Curve di risposta confinamento con S-FRCM – carico eccentrico

Tabella 3.9 – Confinamento con S-FRCM: parametri meccanici (carico eccentrico)

Campione	Carico di picco [kN]	Resistenza f'_{co}, f'_{cc} [Mpa]	Deformazione assiale [%]		f'_{cc}/f'_{co}	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	Indice di duttilità $\epsilon_{0,95 f_{cc}}/\epsilon_{cc}$	Deformazione laterale [%]			
			Picco $\epsilon_{co}, \epsilon_{cc}$	Ultima ϵ_{cu}				Asse A-C		Asse B-D	
UC	334.44	5.35	0.26	0.28	1.00	1.00	1.00	0.03	0.02	0.06	0.39
CS1L OA	692.66	11.14	0.56	0.69	2.08	2.12	1.24	0.23	0.17	0.63	1.07
CS1L OA25	424.09	6.82	0.28	0.47	1.28	1.07	1.13	0.19	0.15	0.23	0.42
CS1L OA50	415.02	6.68	0.28	0.33	1.25	1.05	1.13	0.13	0.22	0.15	0.43
CS1L OC	487.54	7.84	0.76	1.00	1.47	2.88	1.07	0.69	0.48	8.87	2.05

3.4.3 CONFINAMENTO CON SISTEMA B-FRCM

Le colonne confinate con rete in fibra di basalto ad alta densità esibiscono un analogo quadro fessurativo durante l'evolversi della prova. Lesioni longitudinali si sviluppano lungo l'asse dapprima a carico delle facce interessate dagli strati in sovrapposizione cui seguono ulteriori lesioni disposte simmetricamente a esso. Tale quadro fessurativo si amplifica manifestandosi quindi anche sulle altre facce poste in direzione ortogonale (Figura 3.62a e Figura 3.63a). Lesioni particolarmente evidenti si registrano a carico degli spigoli interessati dagli overlap.

Per la colonna con un layer di rinforzo la rottura è determinata dallo schiacciamento del nucleo interno e il cedimento di alcuni fasci di fibra (Figura 3.62b-c) probabilmente imputabile al 'knife effect' in corrispondenza degli spigoli nonostante preventivamente arrotondati con raggio di curvatura di 20 mm. Tale rottura, riscontrata anche in Cascardi et al. [68] con l'impiego di reti in fibra di vetro AR e in Santandrea et al. [67] con reti in fibra di basalto a bassa densità, può essere determinata probabilmente anche dalla minore resistenza a trazione della fibra.

Per la colonna con due layer di rinforzo si rileva invece il distacco dello strato in sovrapposizione localizzato nella metà inferiore della colonna con evidente dilatazione e contenimento del nucleo interno di muratura fratturato (Figura 3.63b-c).

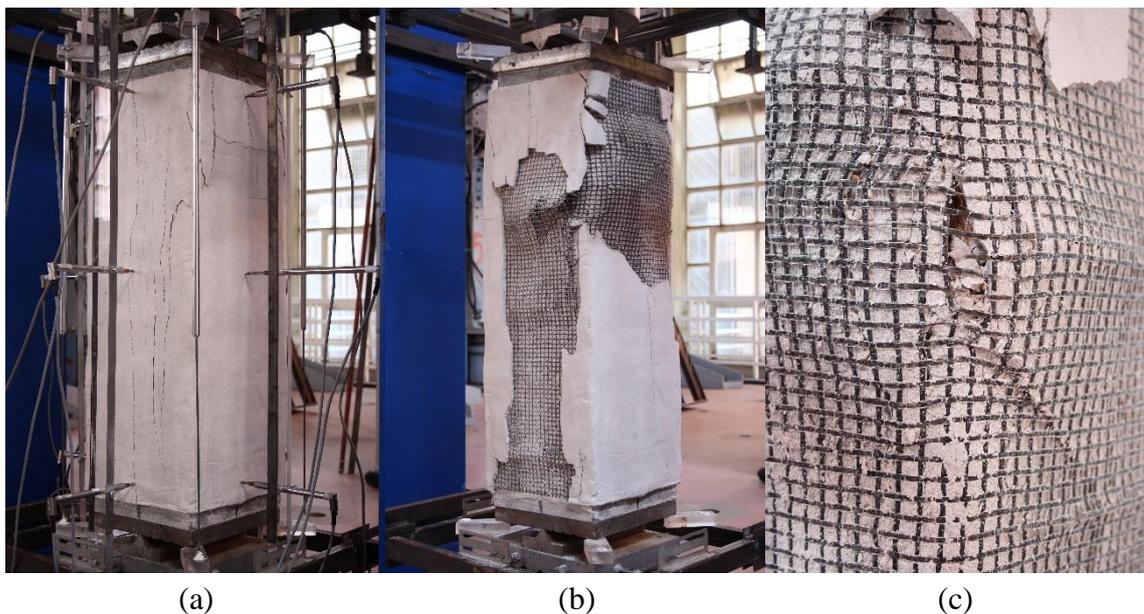


Figura 3.62 – CB1L: (a) fase della prova, (b) modalità di crisi e (c) rottura dei fasci

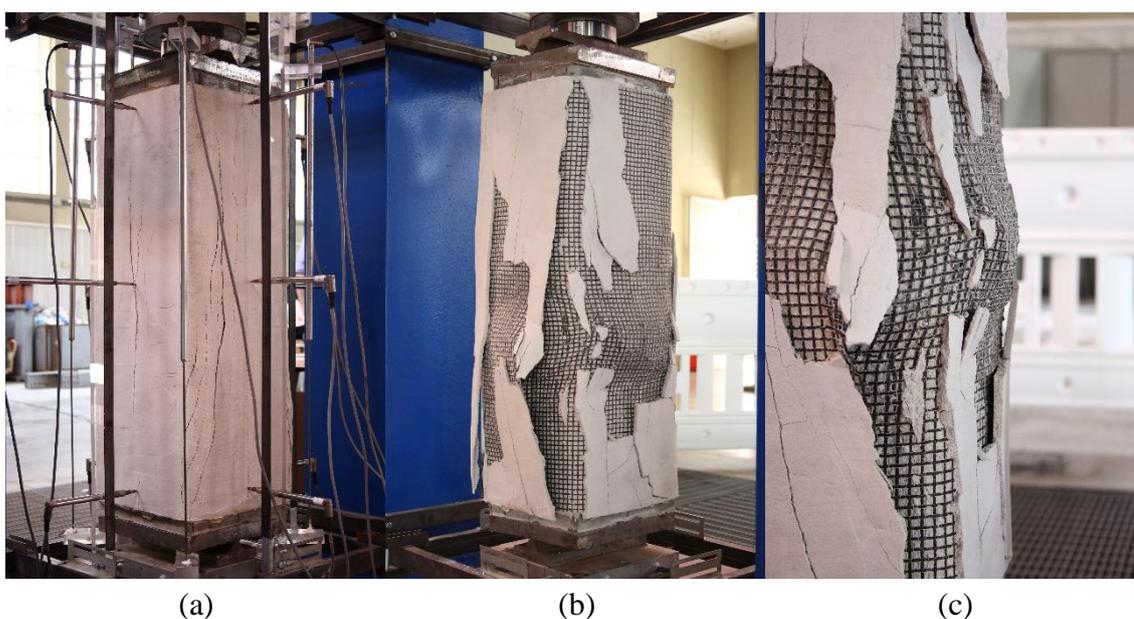


Figura 3.63 – CB2L: (a) fase della prova, (b) modalità di crisi e (c) particolare a rottura

Per entrambe le configurazioni si riscontra inoltre il distacco all'interfaccia composito-muratura su tutte le 4 facce, determinato dalla messa in trazione della rete di rinforzo.

Al termine della prova gran parte dello strato esterno di matrice fratturato risulta sconnesso dallo strato interno, analogamente a quanto riscontrato nelle prove di trazione e di aderenza a taglio diretto.

Le curve di risposta (Figura 3.64) esibiscono un primo tratto pressoché sovrapponibile a quello della colonna non confinata. La risposta diviene successivamente non lineare ascendente sino al raggiungimento del carico di picco, cui segue un tratto discendente fino a rottura. Dalle curve di risposta è possibile rilevare una rigidità iniziale affine a quella della colonna non confinata per entrambe le configurazioni di prova, imputabile al modulo elastico del rinforzo in basalto.

Il carico di picco raggiunto con la configurazione con 2 layer, risulta più basso rispetto alla colonna confinata con uno strato di rinforzo, ciò determinato dalla diversa modalità di rottura riscontrata legata a effetti locali nello strato di sovrapposizione esterno. Il distacco quindi non consente di raggiungere resistenze più elevate nel tessuto di rinforzo impedendo quindi di conferire una maggiore pressione di confinamento. Si riscontra tuttavia una maggiore capacità deformativa. I valori di resistenza ottenuti per le configurazioni con 1 e 2 layer sono rispettivamente pari a 7.74 MPa e 6.95 MPa con un

incremento di resistenza pari al 45% e al 30%. Significativo è invece l'aumento dei valori delle deformazioni di picco con valori pari a 0.98% e 1.58%, e ultime pari a 1.73% e 2.63%, riscontrando sulla curva di risposta un esteso ramo discendente post picco. Quanto detto si riflette anche in termini di deformazione laterale (Tabella 3.10). Analogamente ai test precedenti si riporta in grafico la deformazione laterale relativa all'asse non interessato da overlap (asse BD). Occorre sottolineare infatti che i valori ultimi della dilatazione lungo l'asse AC risultano elevati in quanto determinati anche dal distacco dello strato esterno di matrice (CB1L) e ulteriormente amplificati dal distacco dell'overlap (CB2L).

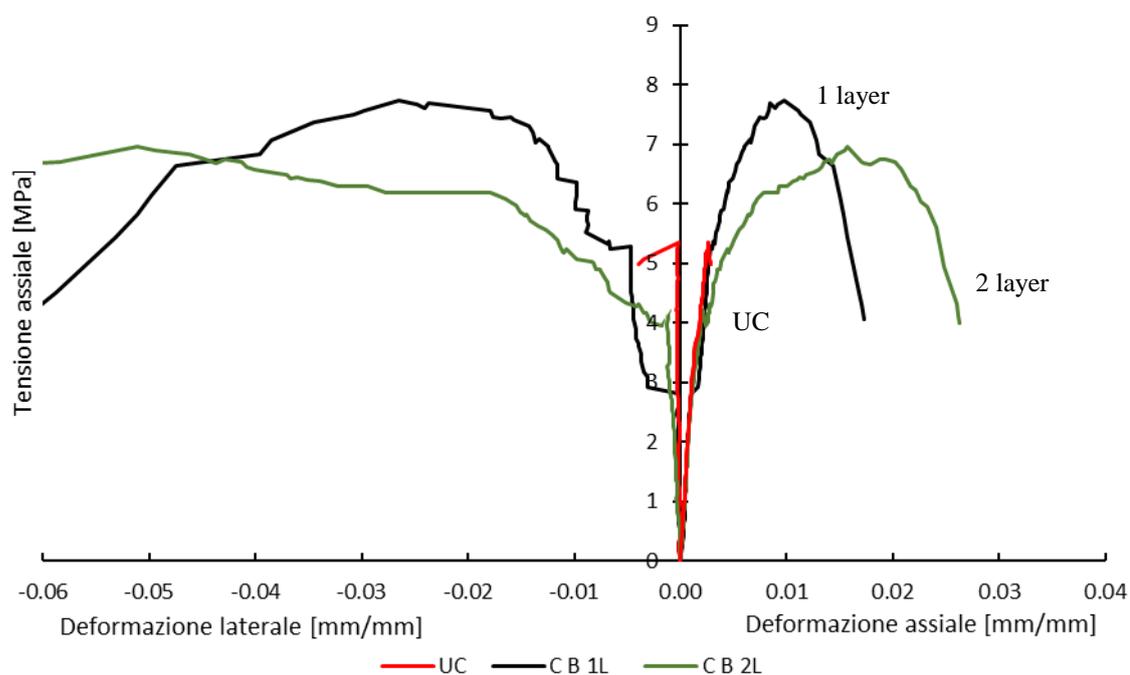


Figura 3.64 – Curve di risposta confinamento con B-FRCM

Tabella 3.10 – Confinamento con B-FRCM: parametri meccanici

Campione	Carico di picco [kN]	Resistenza f'_{co}, f'_{cc} [Mpa]	Deformazione assiale [%]			$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	Indice di duttilità $\epsilon_{0.95 f_{cc}}/\epsilon_{cc}$	Deformazione laterale [%]			
			Picco $\epsilon_{co}, \epsilon_{cc}$	Ultima ϵ_{cu}	f'_{cc}/f'_{co}			Picco	Asse A-C	Asse B-D	Ultima
UC	334.44	5.35	0.26 $\epsilon_{co}, \epsilon_{cc}$	0.28 ϵ_{cu}	1.00	1.00	1.00	0.03	0.02	0.06	0.39
CB1L	481.36	7.74	0.98	1.73	1.45	3.71	1.25	5.96	2.65	15.92	6.17
CB2L	432.27	6.95	1.58	2.63	1.30	5.97	1.31	6.39	5.11	12.09	10.48

3.4.4 CONFINAMENTO CON SISTEMA PBO-FRCM

Per le colonne confinate con rete in fibra di PBO si delinea un quadro fessurativo, in generale, caratterizzato da lesioni verticali a carico degli spigoli, particolarmente evidenti in corrispondenza degli strati in sovrapposizione. A queste si aggiungono microlesioni diffuse, distribuite sia in larghezza che in altezza su tutte le facce delle colonne.

Per la colonna con un layer di rinforzo la rottura è determinata dallo schiacciamento del nucleo interno e il cedimento improvviso dei fasci di fibra (Figura 3.65) probabilmente imputabile al ‘knife effect’ in corrispondenza degli spigoli. Si rileva inoltre una rottura coesiva all’interfaccia composito-substrato, evidenziato da un sottile strato di muratura adeso sulla superficie interna del composito stesso.

Per le colonne confinate con 2 e 3 layer la rottura avviene per l’apertura significativa della lesione in corrispondenza degli spigoli interessati dall’overlap (Figura 3.66). Si osserva una dilatazione significativa con evidente distacco del composito dalla superficie della muratura su tutti i 4 lati.

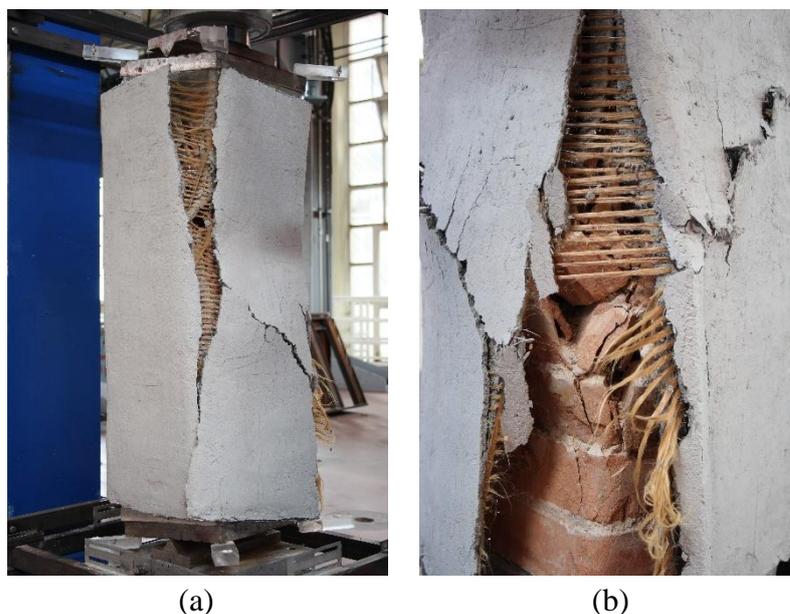


Figura 3.65 – CP1L: (a) modalità di crisi, (b) particolare della rottura

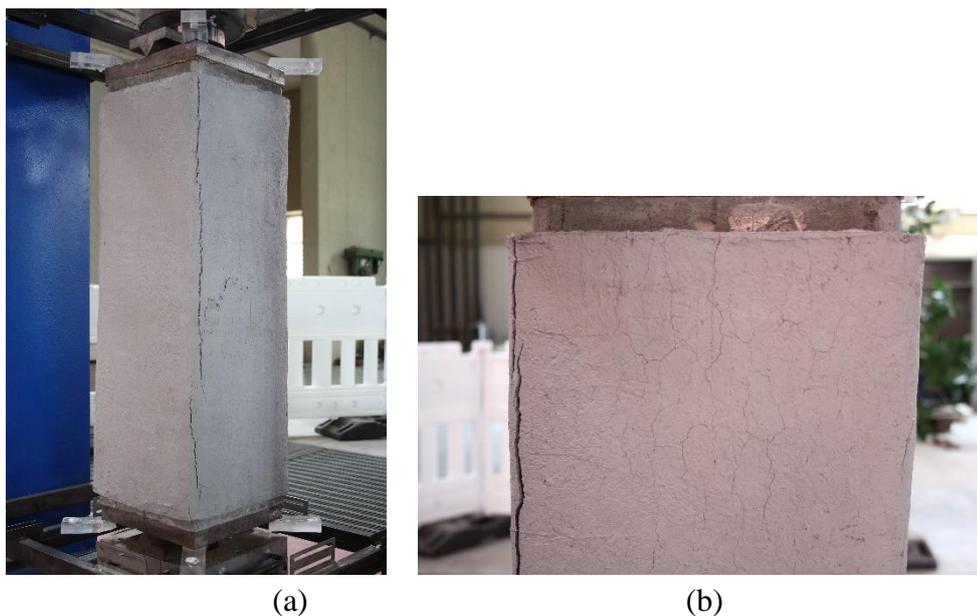


Figura 3.66 – CP2L: (a) modalità di crisi, (b) particolare microlesioni

In Figura 3.67 si riportano i diagrammi tensione-deformazione assiale e deformazione laterale relativa all'asse non interessato da overlap e in Tabella 3.11 i principali parametri meccanici dedotti.

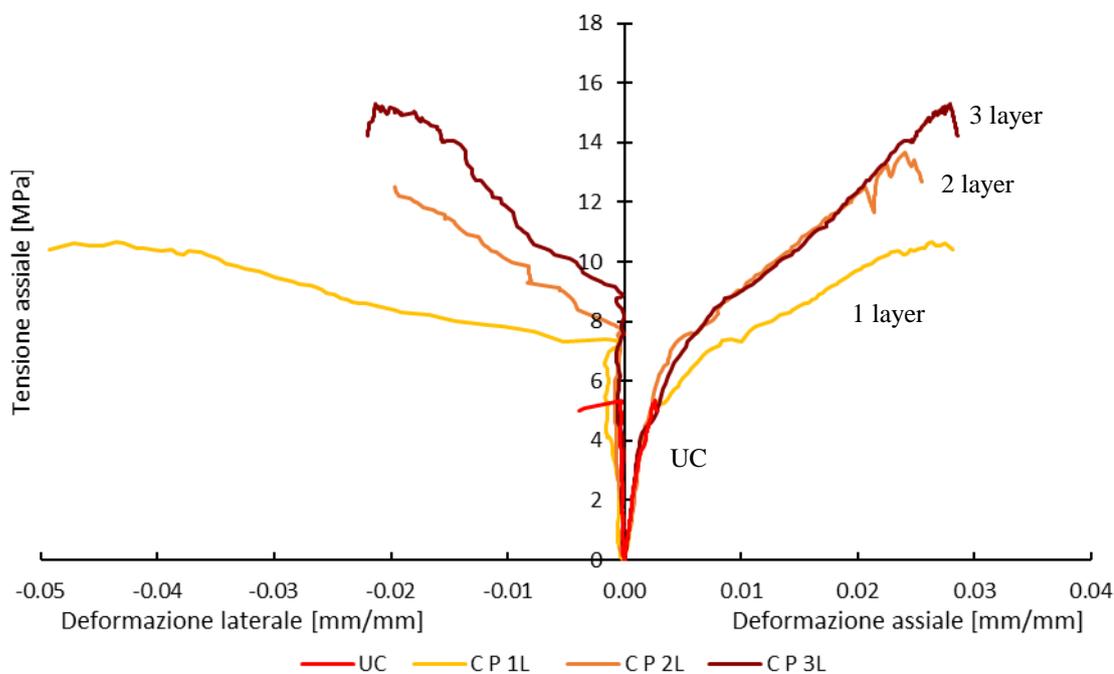


Figura 3.67 – Curve di risposta confinamento con PBO-FRCM

In generale le curve di risposta presentano inizialmente un andamento lineare fino a circa il 38% della resistenza per i sistemi con un layer di rinforzo, di circa il 33% e il 28% rispettivamente per i sistemi con 2 e 3 layer di rinforzo. Il comportamento diviene quindi non lineare con un notevole incremento dello stato tensionale sino al raggiungimento dei valori di picco e un trascurabile ramo discendente della curva.

Dalle curve di risposta non si riscontrano significativi incrementi di rigidezza all'aumentare del grado di confinamento.

Tabella 3.11 – Confinamento con PBO-FRCM: parametri meccanici

Campione	Carico di picco [kN]	Resistenza f'_{co}, f'_{cc} [Mpa]	Deformazione assiale [%]				$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	Indice di duttilità $\epsilon_{0.95 f_{cc}}/\epsilon_{cc}$	Deformazione laterale [%]			
			Picco		Ultima				Picco		Ultima	
			$\epsilon_{co}, \epsilon_{cc}$	ϵ_{cu}	f'_{cc}/f'_{co}				Asse A-C	Asse B-D	Asse A-C	Asse B-D
UC	334.44	5.35	0.26	0.28	1.00	1.00	1.00	0.03	0.02	0.06	0.39	
CP1L	661.88	10.65	2.63	2.81	1.99	9.98	1.07	4.23	4.35	4.91	4.93	
CP2L	849.76	13.67	2.40	2.55	2.55	9.11	1.05	-	-	1.52	1.96	
CP3L	951.88	15.31	2.79	2.86	2.86	10.57	1.02	2.30	2.13	2.36	2.20	

I valori di resistenza, per le configurazioni con 1, 2 e 3 layer, sono rispettivamente pari a 10.65 MPa, 13.67 MPa e 15.31 MPa con incrementi di resistenza rispetto alla colonna non confinata pari al 99%, 155% e 186%. In particolare si ottengono incrementi di resistenza tra le configurazioni con 1 e 2 layer pari al 28% e tra 2 e 3 layer del 12%. Si riscontrano analoghi valori sia per la deformazione di picco, rispettivamente pari a 2.63%, 2.40% e 2.79%, che per la deformazione ultima. L'aumentare del grado di confinamento determina quindi solo incrementi di resistenza, nessun effetto si rileva in termini di capacità deformativa assiale. Si rileva invece una maggiore dilatazione per il confinamento con 1 layer, rispetto alle configurazioni multilayer. Occorre sottolineare che i valori riportati in Tabella 3.11 relativi alla dilatazione ultima, per la configurazione con due layer di rinforzo, non corrispondono al valore ultimo di carico. Questi tuttavia sono relativi all'ultimo valore acquisito, per la preventiva rimozione degli LVDT, corrispondente ad un carico pari a 12.53 MPa.

3.4.5 CONFRONTI

Effettuando un confronto tra le curve di risposta ottenute con 1 layer di rinforzo (Figura 3.68) si evince come le resistenze esibite dalle colonne confinate con basalto e acciaio

(con disposizione continua dell'overlap) risultino paragonabili, con incrementi di resistenza rispetto alla colonna non confinata pari al 45% e al 47%. Significativo è invece l'incremento di resistenza, pari al 108% determinato dalla disposizione alternata degli overlap con 1 layer in acciaio. Analogo incremento di resistenza, pari al 99%, si registra invece per il confinamento con rete in fibra di PBO, che evidenzia inoltre maggiori deformazioni assiali e laterali.

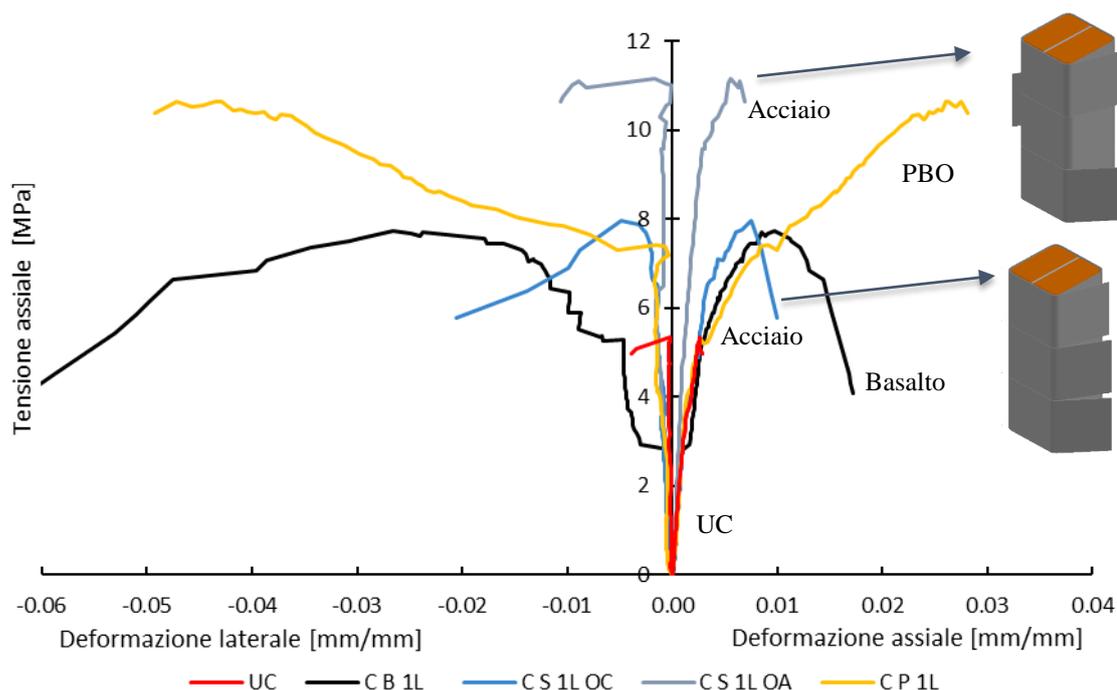


Figura 3.68 – Curve di risposta con 1 layer di rinforzo

L'incremento della capacità deformativa assiale, a seguito del confinamento, è stata valutata mediante il rapporto tra la deformazione assiale di picco delle colonne confinate e non confinata ($\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$). Si ottengono valori per le configurazioni in acciaio con disposizione alternata e continua degli overlap rispettivamente pari a 2.12 e 2.88, e per le configurazioni con 1 layer in basalto e PBO rispettivamente pari a 3.71 e 9.98. Per questi due ultimi sistemi, si ottengono valori significativi anche in termini di dilatazione trasversale, rispettivamente pari a 6.17% e 4.93% determinati in relazione all'asse non interessato da overlap (Tabella 3.12).

Ciò è attribuibile alla modalità di rottura riscontrata per cedimento dei fasci rispetto alla rottura con rinforzo in acciaio che si verifica per distacco dello strato in sovrapposizione.

Si evince quindi un incremento della capacità deformativa assiale e laterale maggiore per il confinamento con rinforzo in fibra basalto e in particolare con il rinforzo in fibra di PBO.

Tabella 3.12 – Confronto parametri meccanici per 1 layer di rinforzo

Campione	Carico di picco [kN]	Resistenza f'_{co}, f'_{cc} [Mpa]	Deformazione assiale [%]				$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	Indice di duttilità $\epsilon_{0,95 f'_{cc}}/\epsilon_{cc}$	Deformazione laterale [%]			
			Picco		Ultima				Picco		Ultima	
			$\epsilon_{co}, \epsilon_{cc}$	ϵ_{cu}	f'_{cc}/f'_{co}				Asse A-C	Asse B-D	Asse A-C	Asse B-D
UC	334.44	5.35	0.26	0.28	1.00	1.00	1.00	0.03	0.02	0.06	0.39	
CB1L	481.36	7.74	0.98	1.73	1.45	3.71	1.25	5.96	2.65	15.92	6.17	
CS1L OA	692.66	11.14	0.56	0.69	2.08	2.12	1.24	0.23	0.17	0.63	1.07	
CS1L OC	487.54	7.84	0.76	1.00	1.47	2.88	1.07	0.69	0.48	8.87	2.05	
CP1L	661.88	10.65	2.63	2.81	1.99	9.98	1.07	4.23	4.35	4.91	4.93	

Effettuando un confronto tra le curve di risposta delle colonne confinate con più layer, si riscontra, una deformazione assiale di picco paragonabile per la colonna confinata con 2 layer in basalto e 3 layer in acciaio, con valori di 1.58% e 1.70% (Figura 3.69 e Figura 3.70). I rispettivi valori del rapporto $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ sono pari a 5.97 e 6.46. Valori di deformazione di picco maggiori si ottengono con 2 e 3 layer in PBO, pari al 2.40% e 2.79%, con valori del rapporto $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ rispettivamente di 9.11 e 10.57. Per i sistemi con 2 layer di rinforzo in basalto e PBO si ottengono valori confrontabili della deformazione assiale ultima raggiunta, rispettivamente pari a 2.63% e 2.55%. Le resistenze per i sistemi con 3 layer di rinforzo in acciaio e PBO risultano infine paragonabili (Figura 3.70) con incrementi rispetto alla colonna non confinata rispettivamente pari a 184% e 186%.

La rigidità risulta significativamente aumentata per il confinamento in acciaio con 2 e 3 layer di rinforzo e per 1 layer con disposizione alternata degli strati di sovrapposizione. Tale incremento risulta trascurabile per 1 layer con overlap continuo in acciaio e le colonne confinate con fibra di basalto e PBO.

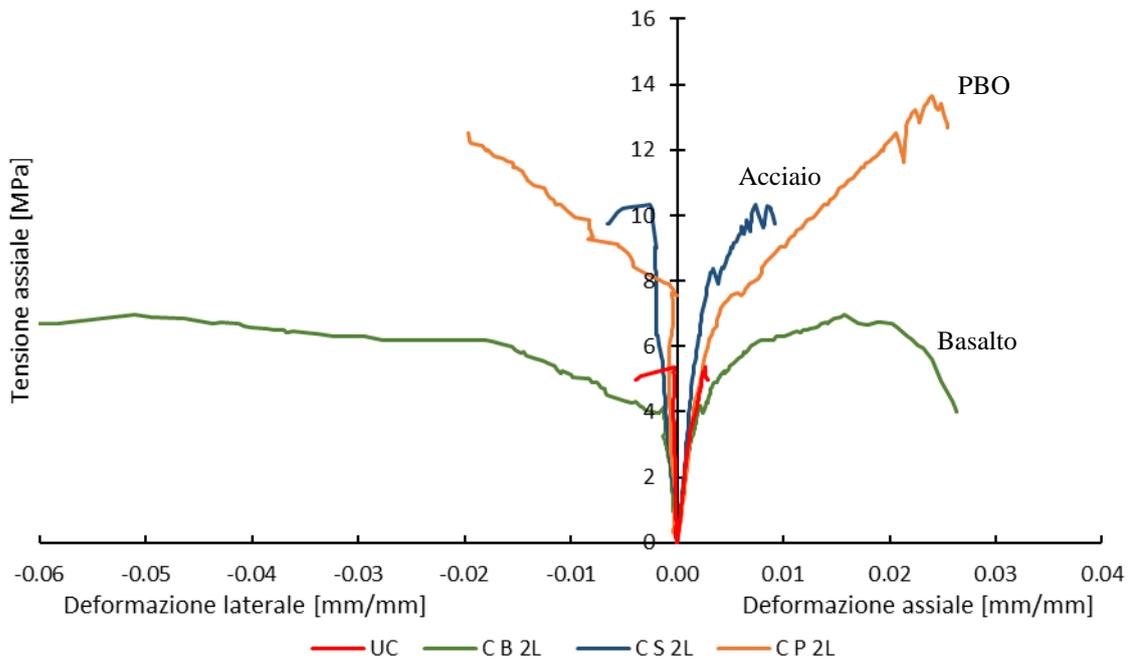


Figura 3.69 – Curve di risposta con 2 layer di rinforzo

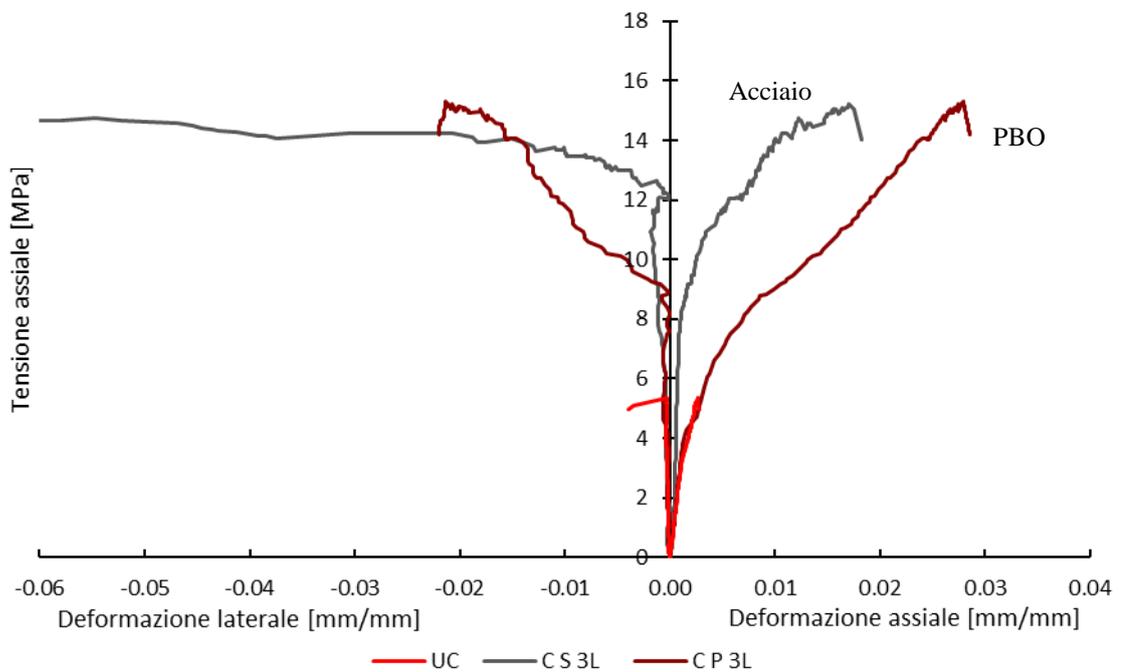


Figura 3.70 – Curve di risposta con 3 layer di rinforzo

Per tutte le configurazioni testate si riportano in sintesi in Figura 3.71 i valori di deformazione assiale di picco e ultima e in Figura 3.72 gli incrementi di resistenza e di capacità deformativa assiale rispetto alla colonna non confinata. In Figura 3.71 risulta evidente il differente comportamento post-picco esibito dal confinamento con fibra di basalto.

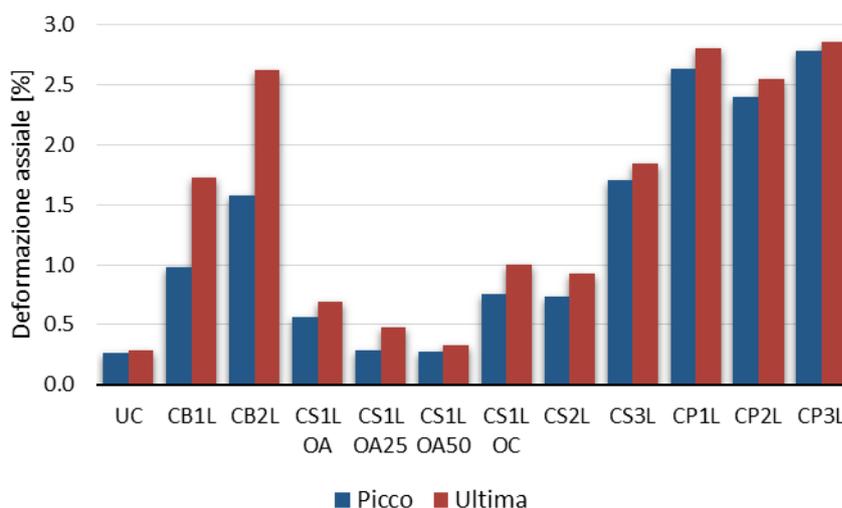


Figura 3.71 – Deformazioni assiali di picco e ultime

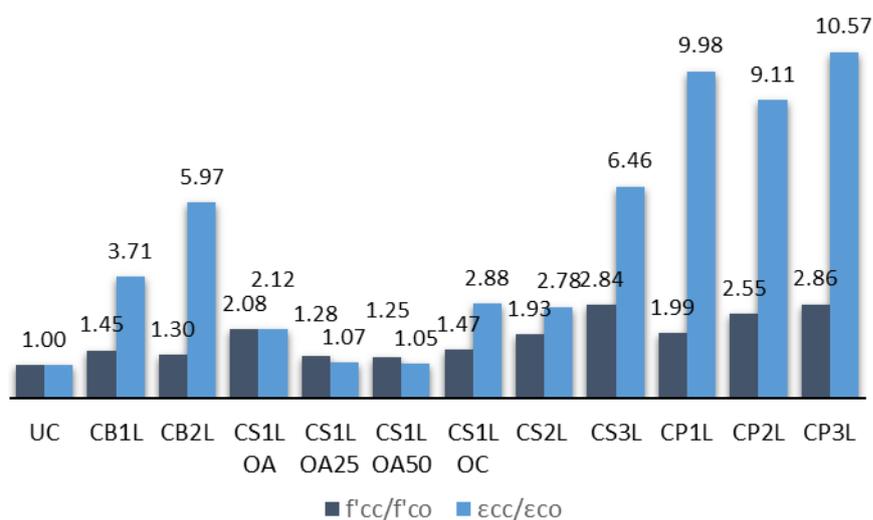


Figura 3.72 – Incrementi di resistenza e capacità deformativa rispetto alla colonna non confinata

È stato valutato quindi un indice di duttilità per ogni configurazione di prova, determinato come il rapporto tra la deformazione corrispondente al 95% della resistenza, individuata

sul ramo post picco della curva di risposta, e la deformazione di picco ($\epsilon_{0.95f_{cc}}/\epsilon_{cc}$). Come evidenziato in Figura 3.73, tale indice risulta più elevato per le colonne confinate con fibra di basalto con valori di 1.25 e 1.31 rispettivamente per le configurazioni con 1 e 2 layer di rinforzo. Analogo valore, pari a 1.24 si riscontra solo per il confinamento con un layer in acciaio e disposizione alternata degli overlap. Per gli altri sistemi inoltre, si rilevano valori inferiori dell'indice di duttilità e una ulteriore riduzione all'aumentare del grado di confinamento, a differenza di quanto riscontrato con l'impiego del rinforzo in fibra di basalto.

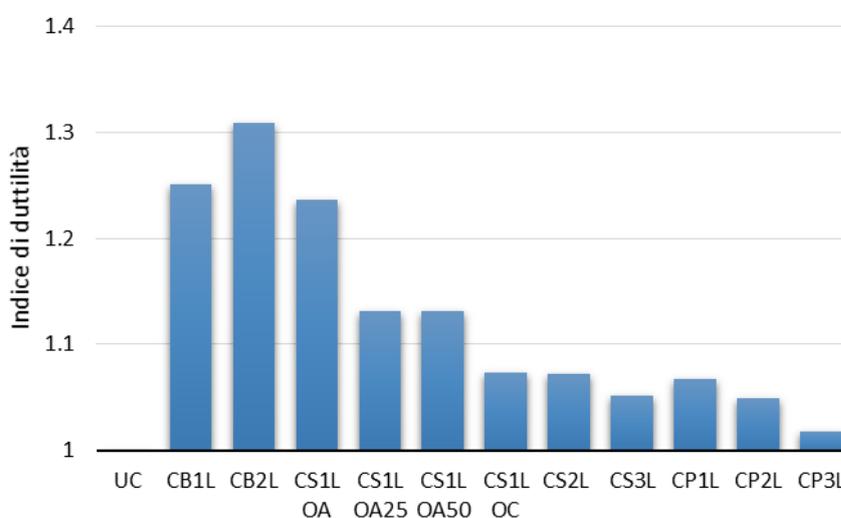


Figura 3.73 – Indice di duttilità

I sistemi di rinforzo in acciaio e PBO favoriscono, quindi, un accumulo più alto di energia durante le fasi di carico nel nucleo della colonna, dovuto alla maggiore rigidità assiale dei compositi, che viene rilasciata bruscamente alla rottura dei sistemi.

Nel caso di sistema di rinforzo con rigidità assiale inferiore, quale quello in fibra di basalto, il rilascio di energia avviene gradualmente con grandi deformazioni della colonna e del sistema di rinforzo.

3.5 MATRICI INORGANICHE INNOVATIVE

In questa sezione verranno riportati e discussi i risultati dell'attività sperimentale relativa alla definizione, preparazione e caratterizzazione di una matrice inorganica innovativa ad attivazione alcalina, al fine di valutarne l'impiego in sistemi fibrorinforzati. Questa sarà

progettata al fine di contenere un elevato quantitativo di sottoprodotti e scarti industriali, quali loppa d'altoforno, fly ash e ceneri ottenute dal processo di combustione di biomassa forestale in centrali termoelettriche, assicurando così efficienza ecologica ed economica nonché proprietà meccaniche paragonabili o superiori ai prodotti attualmente in commercio. Sono state valutate pertanto le proprietà allo stato fresco, quali la lavorabilità, le proprietà meccaniche e il ritiro. In particolare sono stati valutati gli effetti della concentrazione alcalina e del rapporto acqua/leganti (w/b) sul ritiro e sulle prestazioni meccaniche, valutate secondo le opportune tecniche di caratterizzazione.

3.5.1 INDIVIDUAZIONE DEL MIX DESIGN

La fase preliminare consiste nell'individuazione delle materie prime che si intende utilizzare. La scelta è ricaduta su materiali derivanti da scarti industriali, quali loppa d'altoforno, fly ash e cenere da biomassa, e di origine naturale quali il metacaolino, derivante dall'attivazione termica del caolino, un particolare tipo di argilla.

In particolare sono state realizzate malte da miscele ternarie delle stesse, con l'obiettivo di identificare i vantaggi in termini prestazionali di ciascuna scelta. Le soluzioni attivatrici sono state inoltre variate per tenere in conto delle diverse condizioni necessarie ad attivare le singole componenti. Tale soluzione è costituita da acqua, idrossido di potassio (KOH) e silicato di sodio. I rapporti di cui si è tenuto conto nella definizione e nella taratura della soluzione attivatrice sono $\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ ed $\text{H}_2\text{O}/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$.

Al fine di identificare i diversi mix design è stata utilizzata la seguente nomenclatura, SnK-SsXxAa: dove con SnK si indica la soluzione attivatrice, nello specifico la soluzione 2 e 5, entrambe a base idrossido di potassio (K) e silicato di sodio, con SyXzAq si indica il tipo di solidi reattivi e la loro percentuale in peso. Nello specifico S indica la loppa d'altoforno, X può identificare il metacaolino (M) o la cenere volante (F) e con A si identifica la cenere da biomassa.

In Tabella 3.13 sono riportate le composizioni dei mix design individuati, su cui si è basata la campagna sperimentale. Il rapporto inerti/leganti (I/B) è stato fissato a 2.7.

Tabella 3.13 – Mix design

ID	W/B	H ₂ O [g]	KOH [g]	Silicato [g]	Loppa [g]	Metacaolino [g]	Cenere [g]	Fly Ash [g]	Sabbia [g]
S5K-S7M2A1	0.53	608.50	73.70	165.8	700	200	100	-	2700
S5K-S7F2A1	0.53	608.50	73.70	165.8	700	-	100	200	2700
S5.1K-S7F2A1	0.42	482.20	73.70	165.8	700	-	100	200	2700
S2K-S7F2A1	0.53	558.56	73.64	45.45	700	-	100	200	2700
S2.1K-S7F2A1	0.42	442.70	73.64	45.45	700	-	100	200	2700

Tabella 3.14 – Rapporti soluzioni attivatrici

	SiO ₂ /(K ₂ O + Na ₂ O)	H ₂ O/(K ₂ O + Na ₂ O) mol	H ₂ O/(K ₂ O + Na ₂ O) peso	Concentrazione K ₂ O + Na ₂ O
S2K	1.43	32.25	9	0.14
S5K	0.593	39.34	7.29	0.21

3.5.2 COMPORTAMENTO MECCANICO E RITIRO

La campagna sperimentale ha come miscela di partenza il sistema S5K-S7M2A1 costituito da polveri reattive quali loppa d'altoforno, metacaolino e cenere da biomassa, rispettivamente nelle percentuali del 70%, 20% e 10%. Tale miscela presenta una lavorabilità in termini di spandimento pari a 21 cm.

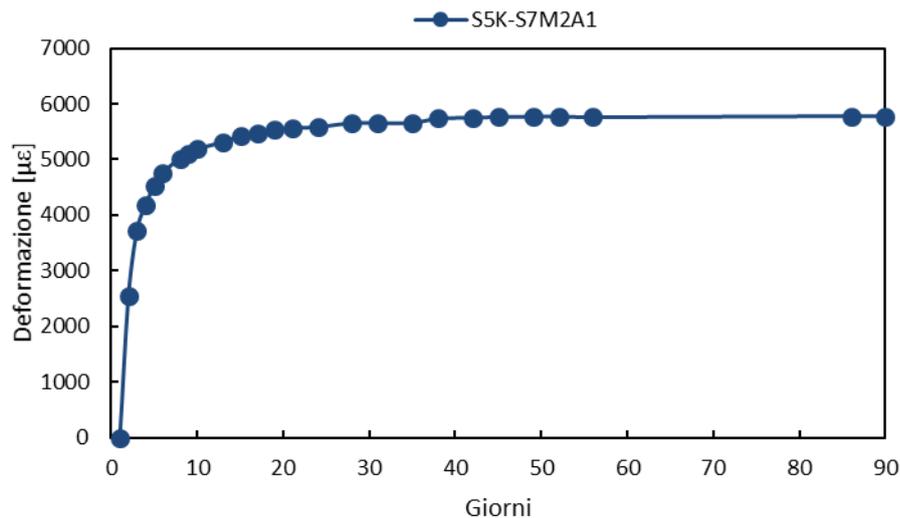


Figura 3.74 – Deformazione da ritiro S5K-S7M2A1

Come si evince dalla Figura 3.74 la deformazione da ritiro della miscela così costituita, a 90 giorni dal disarmo, risulta pari a 5800 $\mu\epsilon$. Tale valore, è imputabile alla reazioni riguardanti il metacaolino. I valori della resistenza a flessione e a compressione, ottenuti a 28 giorni, sono rispettivamente pari a 8.71 e 71.74 MPa.

Nel sistema con metacaolino, non è stato possibile valutare l'effetto della riduzione del rapporto w/b dato il valore iniziale della lavorabilità del sistema.

Si è pertanto valutato l'effetto della sostituzione del metacaolino con fly ash. È noto che l'uso di fly ash determina una maggiore lavorabilità della malta. Essa è risultata, infatti, pari a 30 cm per w/b pari a 0.53 (S5K-S7F2A1). Il valore del ritiro è risultato essere di circa 7700 $\mu\epsilon$ e superiore a quello del sistema con il metacaolino. Si è poi proceduto a ridurre il rapporto w/b a 0.42 (S5.1-S7F2A1). La lavorabilità della malta, in questo caso, è risultata pari a 25 cm. La variazione del rapporto w/b ha determinato un abbassamento del ritiro da 7700 $\mu\epsilon$ ai 6800 $\mu\epsilon$ a 90 giorni, con una riduzione solo pari al 12% (Figura 3.75). L'80% del valore ultimo del ritiro, in tutti i sistemi, è raggiunto nei primi 7 giorni di curing.

Le proprietà meccaniche a flessione e a compressione, valutate a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura sono riportate in Figura 3.76 con valori di resistenza a compressione a 28 giorni superiore ai 70 MPa.

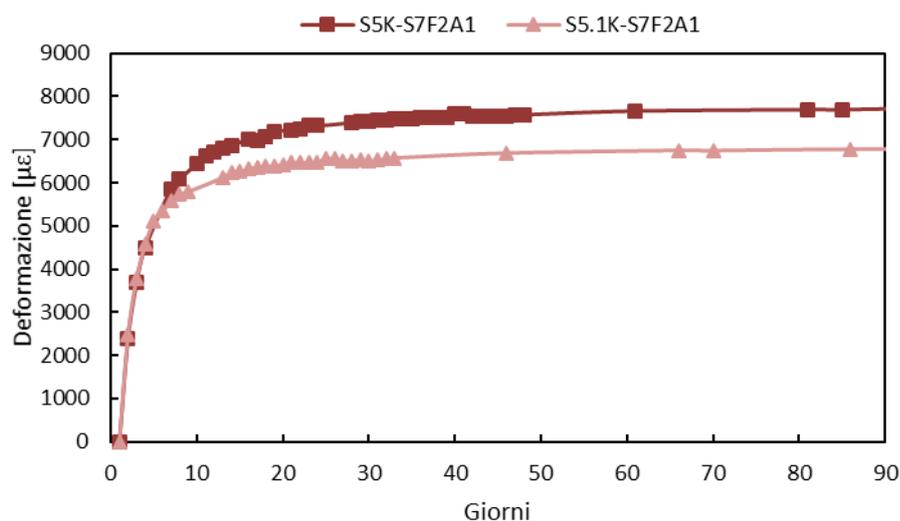


Figura 3.75 – Confronto deformazione da ritiro, sistemi: S5K-S7F2A1 e S5.1K-S7F2A1

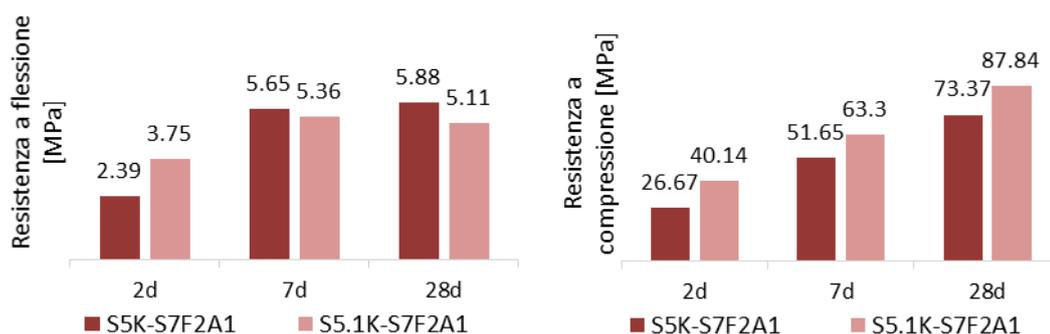


Figura 3.76 – Resistenze a flessione e a compressione, sistemi: S5K-S7F2A1 e S5.1K-S7F2A1

Al fine di valutare l'effetto sul ritiro del contenuto di solidi nella soluzione attivatrice, la S5K è stata sostituita con la S2K, la cui alcalinità non è risultata però sufficiente ad attivare il metacaolino.

I mix design studiati sono stati pertanto S2K-S7F2A1 e S2.1K-S7F2A1, rispettivamente con un rapporto acqua/leganti pari a 0.53 e 0.42.

La lavorabilità per i due sistemi, in termini di spandimento, è risultata rispettivamente pari a 30 cm e 21 cm. L'andamento dei ritiri, riportato in Figura 3.77, non mostra sostanziale differenza tra i due sistemi.

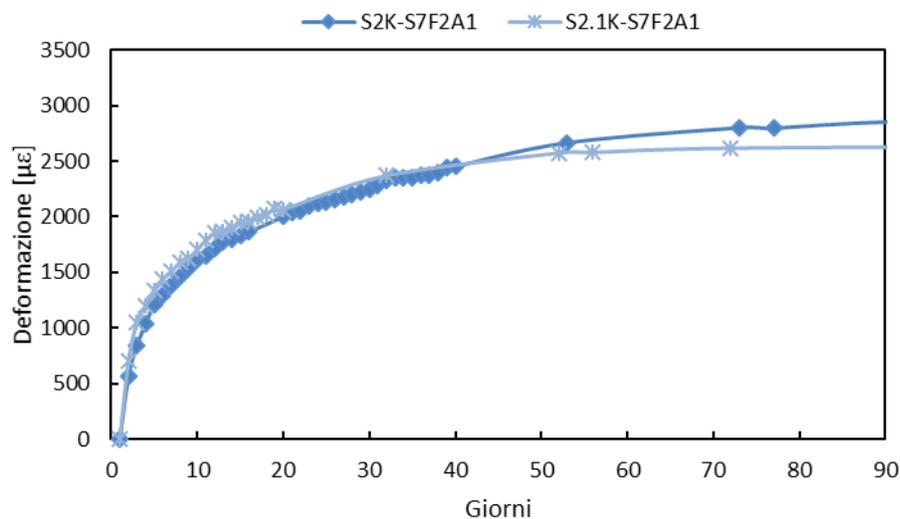


Figura 3.77 – Confronto deformazione da ritiro, sistemi: S2K-S7F2A1 e S2.1K-S7F2A1

In Figura 3.78 vengono riportati gli effetti combinati della riduzione di acqua e tipologia di soluzione attivatrice nel sistema S7F2A1.

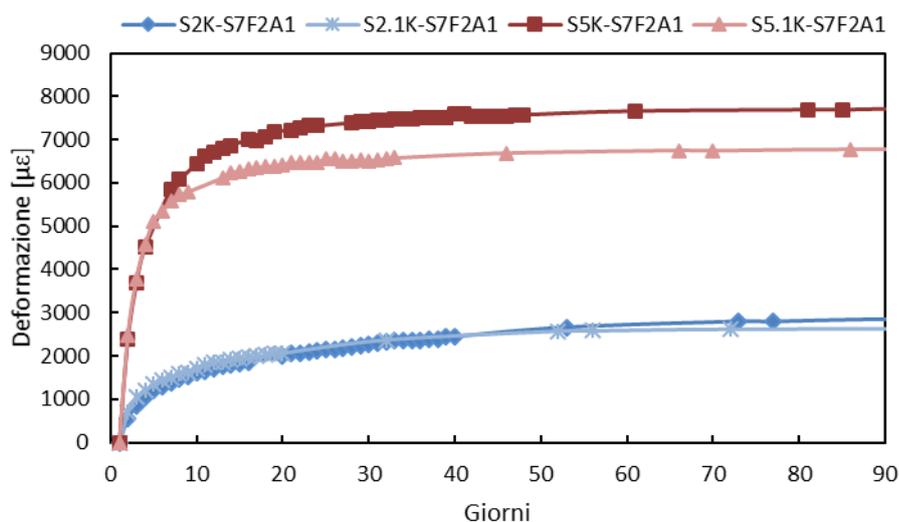


Figura 3.78 – Confronto deformazione da ritiro, sistemi: S5K-S7F2A1, S5.1K-S7F2A1, S2K-S7F2A1 e S2.1K-S7F2A1

La variazione della soluzione attivatrice, a parità di polveri reattive, determina una riduzione del ritiro del 63% rispetto al sistema S5K-S7F2A1, legata a una minore percentuale di legante reagito. Ciò è confermato dalla diminuzione della resistenza a flessione e a compressione, rispetto ai sistemi S5K-S7F2A1 e S5.1K-S7F2A1, con valori a 28 giorni pari a 44 MPa e 68 MPa per i sistemi S2K-S7F2A1 e S2.1K-S7F2A1 (Figura 3.79). Ciò si traduce in un abbassamento pari al 40% (Figura 3.80) e 22% (Figura 3.81).

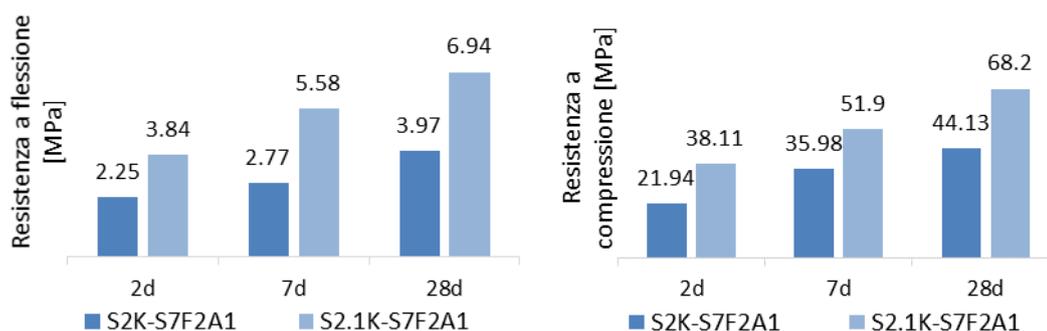


Figura 3.79 – Resistenze a flessione e a compressione, sistemi: S2K-S7F2A1 e S2.1K-S7F2A1

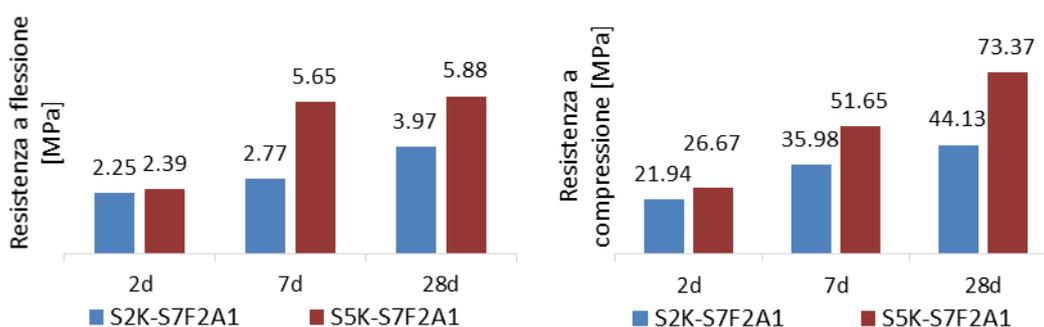


Figura 3.80 – Confronto resistenze meccaniche, sistemi: S2K-S7F2A1 e S5K-S7F2A1

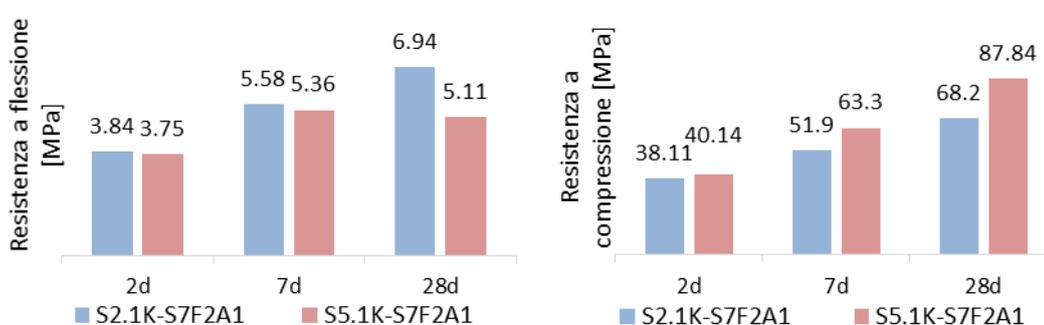


Figura 3.81 – Confronto resistenze meccaniche, sistemi: S2.1K-S7F2A1 e S5.1K-S7F2A1

A rapporti w/b più bassi corrispondono soluzioni attivatrici più alcaline e ciò consente di ottenere anche in presenza di soluzioni attivatrici meno ricche in silicato e alcali, variazioni di resistenze più contenute.

Tra le alternative per ridurre ulteriormente il ritiro si è valutato l'impiego di agenti espansivi.

Si è quindi preso come riferimento il sistema S2K-S7F2A1, in quanto l'aggiunta di un agente espansivo ne riduce la lavorabilità, valutandone il comportamento con l'aggiunta del 2% in peso di CaO sui solidi reattivi, identificato come S2K-S7F2A1-C2. Tale sistema ha esibito una lavorabilità pari a 20 cm di spandimento, una diminuzione del 36% della deformazione da ritiro a 90 giorni (Figura 3.82). Il valore del ritiro riscontrato è ritenuto comunque accettabile in quanto determinato in condizioni di umidità relativa pari al 55%. Si riscontra inoltre una riduzione delle prestazioni meccaniche (Figura 3.83) le quali risultano tuttavia paragonabili alle malte commerciali.

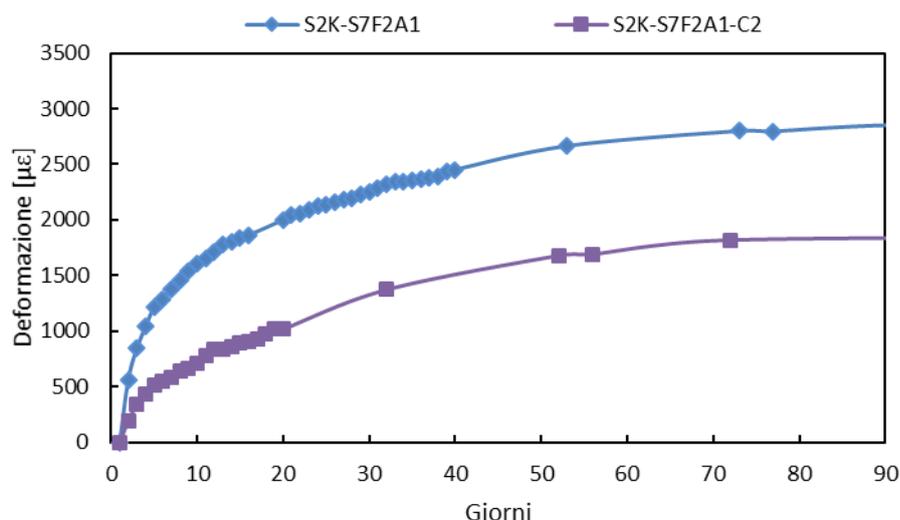


Figura 3.82 – Confronto deformazione da ritiro, sistemi: S2K-S7F2A1 e S2K-S7F2A1-C2

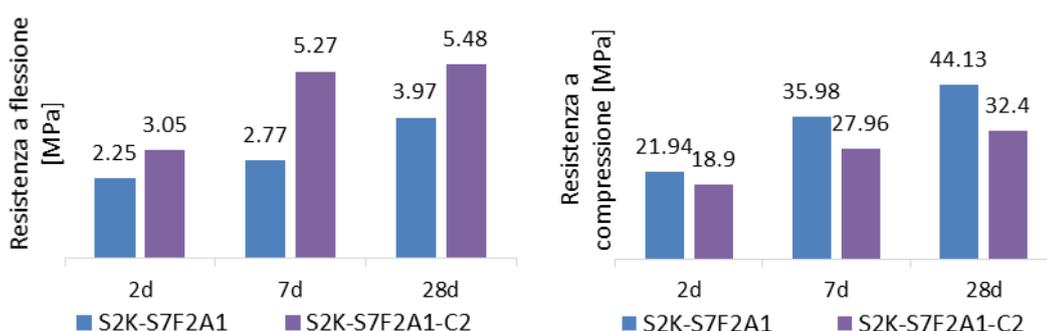


Figura 3.83 – Resistenze a flessione e a compressione, sistemi: S2K-S7F2A1 e S2K-S7F2A1-C2

Si è pertanto individuato in S2K-S7F2A1-C2 il mix design che ha mostrato le migliori prestazioni con valori ultimi della deformazione da ritiro pari a 1800 µε e valori della resistenza a flessione e a compressione rispettivamente pari a 5.48 MPa e 32.4 MPa.

3.5.3 COMPORTAMENTO MECCANICO DI COMPOSITI FIBRORINFORZATI

È stata condotta un'indagine sperimentale al fine di valutare il comportamento meccanico di un composito fibrorinforzato con la matrice ottenuta e rete in fibra di basalto ad alta densità. Sono state al tal fine condotte prove di caratterizzazione meccanica a trazione e di aderenza al supporto a taglio diretto su substrato in muratura, secondo le metodologie precedentemente illustrate in par. 2.3.1 e 2.3.2, valutando l'interazione rinforzo-matrice e le modalità di rottura.

Le curve di risposta dei campioni a trazione mostrano un comportamento trilineare, caratterizzato quindi da una fase non fessurata (fase I), cui segue lo sviluppo progressivo di un quadro fessurativo (Fase II) e una fase fessurata (fase III) fino a rottura per cedimento dei fasci di fibra, analogamente a quanto riscontrato in par 3.2.1. A seguito della prima lesione trasversale infatti, segue la formazione di una lesione longitudinale all'interfaccia rinforzo-matrice e la formazioni di lesioni trasversali fino alla saturazione dell'intero tratto utile (Figura 3.84).

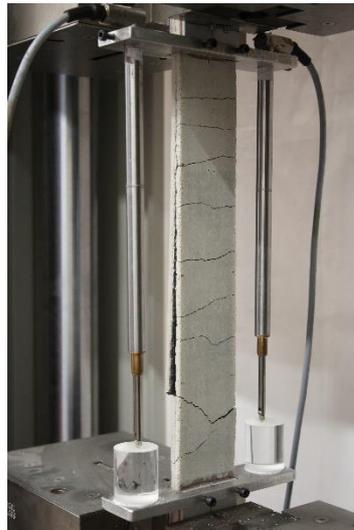


Figura 3.84 – Test di trazione: quadro fessurativo

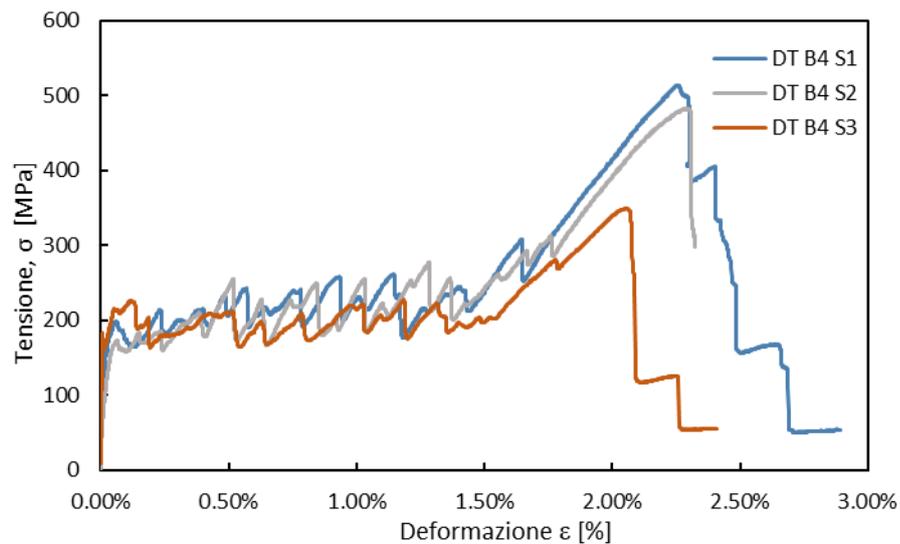


Figura 3.85 – Test di trazione: curve di risposta

Come si evince dalle curve di risposta (Figura 3.85) si assiste a una significativa estensione della fase II dovuta al disallineamento iniziale dei fasci per intreccio degli stessi nella rete, come discusso precedentemente in par. 3.2.1. Di seguito si riportano in Tabella 3.15 i parametri meccanici individuati, secondo la procedura illustrata in par. 3.2.1, i quali risultano paragonabili a quelli ottenuti con la matrice commerciale.

Tabella 3.15 – Test di trazione: parametri meccanici

	σ_i [Mpa]	ε_i [%]	E_i [GPa]	σ_{II} [Mpa]	ε_{II} [%]	E_{II} [GPa]	σ_u [Mpa]	ε_u [%]	E_{III} [GPa]
DT B4 S1	158	0.020%	1618	290	1.72%	4.5	514	2.26%	44
DT B4 S2	166	0.050%	1621	303	1.80%	6.1	483	2.28%	43
DT B4 S3	194	0.007%	2737	288	1.79%	2.6	372	2.06%	36

Le curve di risposta ottenute dalle prove di aderenza a taglio diretto evidenziano una prima fase lineare, cui segue una brusca variazione di carico. Questa segna l'avvio di un comportamento non lineare caratterizzato dall'evoluzione di un quadro fessurativo durante il quale si raggiunge il carico di picco. La fessurazione è caratterizzata dalla formazione di lesioni trasversali e l'evolversi di una lesione longitudinale localizzata all'interfaccia rinforzo-matrice, a partire dall'estremità caricata del composito verso l'estremità libera.

Le lesioni trasversali coinvolgono solo lo strato esterno della matrice il quale, aderente alla rete di rinforzo, trasla lungo la direzione di carico all'aumentare dello scorrimento (Figura 3.86a). La rottura avviene per distacco completo del rinforzo e dello strato di matrice esterno (Figura 3.86b).

Le curve di risposta (Figura 3.87) quindi esibiscono un comportamento confrontabile a quello esibito utilizzando la matrice commerciale, tuttavia mostrano valori dei carichi di picco minori (Tabella 3.16).

Dai risultati preliminari fin qui ottenuti, consentono di affermare che i materiali attivati alcalinamente possono rappresentare una potenziale alternativa all'impiego di malte, a base di leganti tradizionali, nella realizzazione di sistemi di rinforzo FRCM.

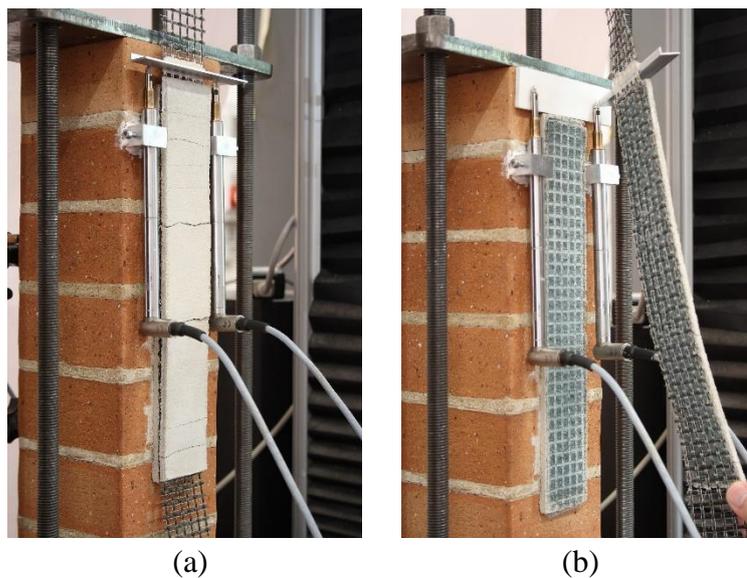


Figura 3.86 – Test di aderenza a taglio diretto: lesione all’interfaccia rinforzo-matrice (a), modalità di crisi (b)

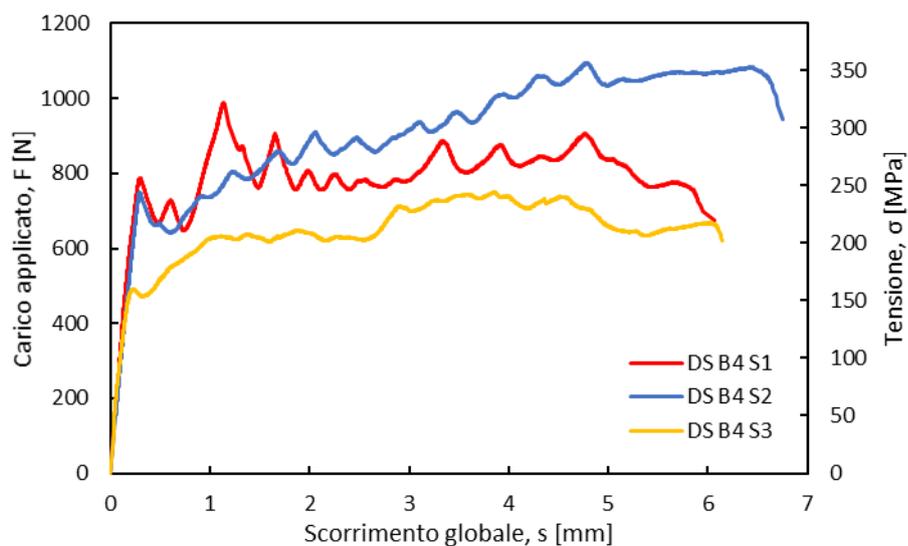


Figura 3.87 – Test di aderenza a taglio diretto: curve di risposta

Tabella 3.16 – Test di aderenza a taglio diretto: risultati

ID	Carico di picco	Tensione di picco	Scorrimento al	Modalità di rottura
	[N]	σ_{max} [Mpa]	picco [mm]	
DS B4 S1	990	322	1.13	MR
DS B4 S2	1095	357	4.78	MR
DS B4 S3	751	244	3.86	MR

CONCLUSIONI

Il presente studio ha riguardato l'analisi del comportamento meccanico di sistemi di rinforzo FRCM in fibra di basalto e la valutazione del degrado per effetto di trattamenti termici ad alta temperatura anche attraverso un'analisi comparativa tra diversi sistemi di rinforzo. È stata altresì valutata l'efficacia del confinamento di colonne in muratura mediante sistemi di rinforzo FRCM. Si è proceduto inoltre all'individuazione di una matrice inorganica innovativa ad attivazione alcalina al fine di valutarne l'impiego in sistemi fibrorinforzati.

Il comportamento meccanico del sistema di rinforzo in fibra di basalto è stato indagato mediante prove di trazione e di aderenza a taglio di tipo diretto. Il comportamento a trazione del sistema di rinforzo in fibra di basalto ad alta densità (B4-FRCM) è di tipo trilineare con una significativa estensione della fase di fessurazione, in conseguenza della sua particolare tessitura. Ciò comporta, una traslazione nell'attivazione delle proprietà meccaniche del rinforzo. Il valore medio del modulo elastico in fase fessurata, della tensione e della deformazione a rottura riscontrati sono rispettivamente pari a 37 GPa, a 434 MPa e al 2%.

Le prove di aderenza a taglio diretto, eseguite su supporto in muratura, sono caratterizzate per il sistema di rinforzo in fibra di basalto a bassa densità (B2-FRCM) dalla rottura dei fasci all'estremo caricato, con percentuale di sfruttamento delle proprietà meccaniche del rinforzo pari al 93%. Per il composito B4-FRCM la rottura risulta, invece, caratterizzata dalla progressiva delaminazione all'interfaccia rinforzo-matrice con percentuali di sfruttamento pari al 75% e con lunghezza efficace di aderenza pari a circa 200 mm. Per tale composito, infine, è stato possibile individuare il legame di aderenza, calibrato e

validato sulle evidenze sperimentali, con l'obiettivo di poter fornire un utile contributo alla conduzione di simulazioni numeriche.

Dagli studi condotti il sistema in fibra di basalto ad alta densità, risulta in grado di fornire buone capacità dissipative come evidenziano le modalità di rottura riscontrate nelle prove di aderenza a taglio diretto. Ciò nonostante una diversa tessitura della rete potrebbe probabilmente consentire un migliore sfruttamento delle proprietà meccaniche del rinforzo come è emerso dalle prove di trazione.

L'analisi del degrado dovuto all'esposizione ad alte temperature è stato condotto mediante prove di aderenza a taglio diretto su supporto in muratura a seguito di trattamenti termici condotti a 100 °C, 300 °C e 500 °C. Si è proceduto analizzando la risposta carico-scorrimento e valutando in particolare la variazione delle tensioni di picco e le modalità di rottura. Test effettuati a temperatura ambiente sono stati utilizzati come riferimento.

Il composito C-FRCM ha mostrato valori di tensione di picco, per ogni temperatura investigata, più elevati rispetto agli altri sistemi di rinforzo, seguito dal composito B2-FRCM mentre per il composito con rete ad alta densità (B4-FRCM) sono stati misurati valori della tensione più bassi fino alla temperatura di 300°C. A seguito del trattamento a 500 °C entrambi i sistemi in basalto mostrano valori confrontabili delle tensioni di picco. Il composito S-FRCM ha mostrato, altresì, significative variazioni della tensione di picco a seguito dei trattamenti a 300°C e a 500°C. I valori della tensione di picco a 500 °C per i compositi B2-FRCM, B4-FRCM, C-FRCM e S-FRCM sono rispettivamente pari a 270 MPa, 240 MPa, 514 MPa e 180 MPa corrispondenti a un decadimento del 74%, 65%, 61% e 76%.

I compositi C-FRCM e B4-FRCM fino alla temperatura di esposizione di 300°C esibiscono scorrimenti globali elevati e paragonabili, ma dovuti a differenti modalità di rottura, per comportamento telescopico il primo e delaminazione e conseguente distacco all'interfaccia rinforzo-matrice per il secondo. A 500 °C il composito C-FRCM continua a presentare il medesimo comportamento, mentre il composito B4-FRCM mostra una rottura caratterizzata dal cedimento dei fasci di fibra con importante riduzione dello scorrimento globale.

Il composito B2-FRCM mostra una rottura caratterizzata dal cedimento dei fasci per tutte le temperature testate e conseguentemente limitati scorrimenti.

Per il composito S-FRCM, è stata riscontrata una variazione della modalità di crisi: distacco del rinforzo e dello strato di matrice esterno osservato a 20 °C e 100 °C e rottura all'interfaccia con il supporto e conseguente distacco del composito a 300 °C e 500 °C. Tale variazione incide significativamente sullo scorrimento globale di tale composito.

L'efficacia del confinamento di colonne in muratura è stata valutata in termini di: influenza di diverse tipologie di rinforzi, variazioni di resistenza al variare del numero degli strati di rinforzo (1, 2 e 3 layer), influenza della disposizione degli strati in sovrapposizione, effetto di carichi eccentrici, modalità di rottura e duttilità.

Dai risultati sperimentali ottenuti è emerso in generale un aumento della resistenza all'aumentare del grado di confinamento e disposizione continua dell'overlap. Tali incrementi risultano essere pari al 47%, 93% e 184% per i sistemi di rinforzo in acciaio (S-FRCM) e al 99%, 155% e 186% per i sistemi di rinforzo in fibra di PBO (PBO-FRCM). Le colonne confinate con sistema di rinforzo in basalto (B4-FRCM) hanno evidenziato un incremento di resistenza pari al 45% e al 30%, rispettivamente per 1 e 2 layer.

La modalità di rottura del sistema in acciaio (S-FRCM) è caratterizzata dal distacco del rinforzo in corrispondenza degli strati in sovrapposizione. Le modalità di crisi riscontrate, per sistemi di rinforzo PBO-FRCM, avvengono, invece, per cedimento dei fasci di fibra con 1 layer di rinforzo e per apertura significativa della lesione localizzata in corrispondenza dello spigolo interessato dall'overlap per le configurazioni multilayer.

La modalità di rottura, nel caso del sistema B4-FRCM avviene per cedimento dei fasci di fibra in corrispondenza degli spigoli in presenza di 1 layer e per distacco dello strato in sovrapposizione in presenza di 2 layer di rinforzo. Il distacco impedisce di sviluppare una maggiore pressione di confinamento.

Poiché il confinamento con sistema S-FRCM è realizzato mediante accostamento di più fasce lungo l'altezza della colonna, è stato valutato l'effetto della disposizione alternata degli overlap su facce opposte con 1 layer di rinforzo anche in presenza di 25 mm e 50 mm di eccentricità di carico. Ciò ha determinato un incremento pari al 108% per carico centrato e incrementi pari a 28% e 25% per carichi eccentrici.

La rigidezza risulta significativamente aumentata per il confinamento in acciaio con 2 e 3 layer di rinforzo e per 1 layer con disposizione alternata degli strati di sovrapposizione.

Tale incremento risulta trascurabile per 1 layer con overlap continuo in acciaio e le colonne confinate con fibra di basalto e PBO.

Dai risultati ottenuti si evince, inoltre, un incremento della capacità deformativa assiale e laterale maggiore per i sistemi confinati con rinforzo in fibra di basalto e PBO a parità di layer di rinforzo.

Si può concludere che i sistemi di rinforzo in acciaio e PBO favoriscono un accumulo più alto di energia durante le fasi di carico nel nucleo della colonna, dovuto alla maggiore rigidità assiale dei compositi, che viene rilasciata bruscamente alla rottura dei sistemi. Nel caso di sistema di rinforzo con rigidità assiale inferiore, quale quello in fibra di basalto, il rilascio di energia avviene gradualmente con grandi deformazioni della colonna e del sistema di rinforzo.

La definizione della matrice ad attivazione alcalina ha previsto l'uso di sottoprodotti e scarti industriali quali loppa d'altoforno, fly ash e cenere da biomassa, e di origine naturale quali il metacaolino. L'utilizzo di sistemi ternari loppa, fly ash e cenere da biomassa ha permesso di ottenere buone caratteristiche allo stato fresco e meccaniche anche in presenza di soluzioni attivatrici a moderato contenuto di alcali, silicato e additivi. Sono stati ottenuti valori della resistenza a flessione e a compressione pari a 5.48 MPa e 32.4 MPa.

I risultati delle prove a trazione e di aderenza a taglio diretto per la valutazione di un composito fibrorinforzato in basalto hanno evidenziato un comportamento confrontabile con quello esibito utilizzando la matrice commerciale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Strengthening of concrete structures with cement based bonded composites.* **Blanksvärd T, Täljsten B.** 2008, Journal of Nordic Concrete Research, 38(2): 133-153.
- [2] *Material and bonding characteristics for dimensioning and modeling of textile reinforced concrete (TRC) elements.* **Banholzer B, Brockmann T, Brameshuber W.** 2006, Materials and Structures, 39: 749–763.
- [3] *Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear.* **Brückner A, Ortlepp R, Curbach M.** 2006, Materials and Structures, 39: 741-748.
- [4] *Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete.* **Hartig J, Häuler-Combe U, Schicktanz K.** 2008, Cement & Concrete Composites, 30: 898-906.
- [5] *Load-bearing behavior and simulation of textile reinforced concrete.* **Hegger J, Will N, Bruckermann O, Voss S.** 2006, Materials and Structures, 39: 765-776.
- [6] *Fibre reinforced cementitious matrix systems for fire-safe flexural strengthening of concrete: Pilot testing at ambient temperature.* **Bisby L.A, Roy E.C, Ward M, Stratford T.J.** 2009, In Proceedings Advanced Composites in Construction, Edinburgh, UK.
- [7] *Innovative Textile-based Composites for Strengthening and Seismic Retrofitting of Concrete and Masonry Structures.* **Triantafillou T.C.** 2010, In Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE-2010, Beijing, China.

- [8] *Fiber reinforced cement based composite sheets for structural retrofit.* **Wu H.C, Sun P.** 2005, In Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, BBFS, Hong Kong, China.
- [9] *Mineral-Based bonding of Carbon FRP to strengthen concrete structures.* **Täljsten B, Blanksvärd T.** 2007, Journal of Composites for Construction, 11(2): 120-128.
- [10] *Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry.* **de Felice G, De Santis S, Garmendia L, Ghiassi B, Larrinaga P, Lourenço P.B, et al.** 2014, Materials and Structures, 47: 2021-2037.
- [11] *Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening.* **Carozzi F.G, Poggi C.** 2015, Composites Part B, 70: 215-230.
- [12] *Testing procedures for the uniaxial tensile characterization of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites.* **Arboleda D, Carozzi F.G, Nanni A, Poggi C.** 2015, Journal of composites for construction, 20(3): 04015063.
- [13] *Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments.* **Donnini J, Corinaldesi V, Nanni A.** 2016, Composites Part B, 88: 220-228.
- [14] **AC434-16.** *Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) and steel reinforced grout (SRG) composite systems.* Whittier, CA : ICC Evaluation Service, 2016.
- [15] **ACI-549.4R-13.** *Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures.* Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2013.
- [16] *Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete.* **RILEM Technical Committee 232-TDT (Wolfgang Brameshuber).** 2016, Materials and Structures, 49(12): 4923-4927.
- [17] *Experimental analysis on tensile and bond properties of PBO and Aramid fabric reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures.* **Caggegi C, Carozzi F.G, De Santis S, Fabbrocino F, Focacci F, Hojdys L, et al.** 2017, Composites Part B, 127: 175-195.

- [18] *Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements.* **Carozzi F.G, Bellini A, D'Antino T, de Felice G, Focacci F, Hojdis L, et al.** 2017, Composites Part B, 128: 100-119.
- [19] *Round Robin Test on tensile and bond behaviour of Steel Reinforced Grout systems.* **De Santis S, Ceroni F, de Felice G, Fagone M, Ghiassi B, Kwiecień A, et al.** 2017, Composites Part B, 127: 100-120.
- [20] *Performance assessment of basalt FRCM for retrofit applications on masonry.* **Lignola G.P, Caggegi C, Ceroni F, De Santis S, Krajewski P, Lourenço P.B, et al.** 2017, Composites Part B, 128: 1-18.
- [21] *Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate.* **Leone M, Aiello M.A, Balsamo A, Carozzi F.G, Ceroni F, Corradi M, et al.** 2017, Composites Part B, 127: 196-214.
- [22] *Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization.* **RILEM Technical Committee 250-CSM (de Felice G, Aiello M.A. et al.).** 2018, Materials and Structures, 51: 95.
- [23] *A qualification method for externally bonded Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems.* **Ascione L, de Felice G, De Santis S.** 2015, Composites Part B, 78: 497-506.
- [24] *Tensile behaviour of mortar-based composites for externally bonded reinforcement systems.* **De Santis S, de Felice G.** 2015, Composites Part B, 68: 401-413.
- [25] *Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC).* **Contamine R, Si Larbi A, Hamelin P.** 2011, Materials Science and Engineering A, 528: 8589-8598.
- [26] *Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile reinforced Concrete specimens.* **Hartig J, Jesse F, Schicktanz K, Häußler-Combe U.** 2012, Materials and Structures, 45: 433-446.
- [27] *Test methods for Textile Reinforced Mortar systems.* **De Santis S, Carozzi F.G, de Felice G, Poggi C.** 2017, Composites Part B, 127: 121-132.
- [28] *Steel reinforced grout systems for the strengthening of masonry structures.* **De Santis S, de Felice G.** 2015, Composite Structures, 134: 533-548.

- [29] *Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition.* **Butler M, Mechtcherine V, Hempel S.** 2010, *Materials and Structures*, 43: 1351-1368.
- [30] *Flexural strengthening of RC beams with cement based composites.* **D'Ambrisi A, Focacci F.** 2011, *Journal of Composites for Construction*, 15(5):707-720.
- [31] *Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material.* **Ombres L.** 2011, *Composite Structures*, 94: 143-155.
- [32] *Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress.* **Larrinaga, P, Chastre, C, Biscaia, H.C. San José, J.T.** 2014, *Materials and Design*, 55: 66–74.
- [33] *Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods.* **Arboleda D.** 2014, Open Access Dissertation, Paper 1282.
- [34] *Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced cementitious-matrix composites.* **Loreto G, Leardini L, Arboleda D, Nanni A.** 2014, *Journal of Composites for Construction*, 18(3): A4013003.
- [35] *Tensile behaviour of a basalt TRM strengthening system: Influence of mortar and reinforcing textile ratios.* **Caggegi C, Lanoye E, Djama K, Bassil A, Gabor A.** 2017, *Composites Part B*, 130: 90-102.
- [36] *Experimental characterization of composite-to-brick masonry shear bond.* **de Felice G, Aiello M.A, Bellini A, Ceroni F, De Santis S, Garbin E, Leone M, Lignola G.P, Malena M, Mazzotti C, Panizza M, Valluzzi M.R.** 2016, *Materials and Structures*, 49: 2581–2596.
- [37] *Experimental investigation of bond between glass textile reinforced mortar overlays and masonry: the effect of bond length.* **Askouni P.D, Papanicolaou C.G.** 2017, *Materials and Structures*, 50: 164.
- [38] *FRCM strengthening - A new tool in the concrete and masonry repair toolbox.* **Nanni A.** 2012, *Concrete International*, 34(4): 43-49.
- [39] *The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements.* **Trapko T.** 2013, *Composites Part B*, 54: 138-145.

- [40] *High temperature mechanical performance and micro interfacial adhesive failure of textile reinforced concrete thin-plate.* **Xu S, Shen L, Wang J, Fu Y.** 2014, J Zhejiang University-SCIENCE A Applied Physics & Engineering, 15(1): 31-38.
- [41] *Effects of elevated temperatures on the interface properties of carbon textile-reinforced concrete.* **Silva F.A, Butler M, Hempel S, Toledo Filho R.D, Mechtcherine V.** 2014, Cement & Concrete Composites, 48: 26-34.
- [42] *Structural strengthening of concrete with fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) at ambient and elevated temperature recent investigations in Switzerland.* **Michels J, Zwicky D, Scherer J, Harmanci Y.E, Motavalli M.** 2014, Advances in Structural Engineering, 17(12): 1785-1799.
- [43] *Textile reinforced mortar at high temperatures.* **Colombo I, Colombo M, Magri A, Zani G, di Prisco M.** 2011, Applied Mechanics and Materials, p. 82: 202–207.
- [44] *Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening system and concrete.* **Ombres L.** 2015, Composites Part B, 69: 418-426.
- [45] *Fabric-reinforced cementitious matrix behavior at high-temperature: Experimental and numerical results.* **Donnini J, De Caso y Basalo F, Corinaldesi V, Lancioni G, Nanni A.** 2017, Composites Part B, 108: 108-121.
- [46] *Effect of High Temperatures on the TRM-to-Masonry Bond.* **Maroudas S.R, Papanicolaou C.G.** 2017, Key Engineering Materials, 747: 533-541.
- [47] **CNR-DT 200 R1/2013.** *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.* Roma : Consiglio Nazionale delle Ricerche, 2013.
- [48] *Effect of confining pressure distribution on the dilation behavior in FRP-confined plain concrete columns using stone, brick and recycled aggregates.* **Choudhury M.S.I, Amin A.F.M.S, Islam M.M, Hasnat A.** 2016, Construction and Building Materials, 102: 541-551.
- [49] **Coppola L, Buoso A.** *Il restauro dell'architettura moderna in cemento armato.* Milano : Hoepli, 2015.
- [50] *Masonry confinement with fibre-reinforced polymers.* **Krevaikas T.D, Triantafillou T.C.** 2005, Journal of Composites for Construction, 9(2): 128-135.

- [51] *Confinement of brick masonry columns with CFRP materials.* **Corradi M, Grazini A, Borri A.** 2007, *Composites Science and Technology*, 67(9): 1772-1783.
- [52] *FRP confinement of square masonry columns.* **Aiello M.A, Micelli F, Valente L.** 2009, *Journal of Composites for Construction*, 13(2): 148-158.
- [53] *FRP Confinement of tuff and clay brick columns: experimental study and assessment of analytical models.* **Di Ludovico M, D'Ambra C, Prota A, Manfredi G.** 2010, *Journal of Composites for Construction*, 14(5): 583-596.
- [54] *Masonry Columns Confined by Steel Fiber Composite Wraps.* **Borri A, Castori G, Corradi M.** 2011, *Materials*, 4(1): 311-326.
- [55] *Masonry columns confined by composite materials: experimental investigation.* **Faella C, Martinelli E, Paciello S, Camorani G, Aiello MA, Micelli F, Nigro E.** 2011, *Composites Part B*, 42(4): 692-704.
- [56] *Masonry columns confined by composite materials: design formulae.* **Faella C, Martinelli E, Paciello S, Camorani G, Aiello M.A, Micelli F, Nigro E.** 2011, *Composites Part B*, 42(4): 705-716.
- [57] *Passive and SMA-activated confinement of circular masonry columns with basalt and glass fibres composites.* **Micelli F, Angiuli R, Corvaglia P, Aiello M.A.** 2014, *Composites Part B*, 67: 348-362.
- [58] *Mechanical behaviour of FRP-confined masonry by testing of full-scale columns.* **Micelli F, Di Ludovico M, Balsamo A, Manfredi G.** 2014, *Materials and Structures*, 47: 2081-2100.
- [59] *Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading.* **Papanicolaou C.G, Triantafillou T.C, Karlos K, Papathanasiou M.** 2007, *Materials and Structures*, 40(10): 1081–1097.
- [60] *Structural upgrade using basalt fibres for concrete confinement.* **Di Ludovico M, Prota A, Manfredi G.** 2010, *Journal of Composites for Construction*, 14(5): 541-552.
- [61] *External confinement of Brick Masonry Columns with Open e Grid Basalt Reinforced Mortar.* **Yilmaz I, Mezrea P, Ispir M, Binbir E, Bal I, Ilki I.** 2013, *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS 2013*, p. Melbourne, Australia.

- [62] *External Jacketing of Unreinforced Historical Masonry Piers with Open-Grid Basalt-Reinforced Mortar.* **Mezrea P.E, Yilmaz I.A, Ispir M, Binbir E, Bal I.E, Ilki A.** 2017, Journal of Composites for Construction, 21(3): 04016110.
- [63] *Confinement effectiveness in eccentrically loaded masonry columns strengthened by Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) jackets.* **Ombres L.** 2015, Key Engineering Materials, 624: 551-558.
- [64] *Comparative experimental analysis on the compressive behaviour of masonry columns strengthened by FRP, BFRCM or steel wires.* **Fossetti M, Minafò G.** 2017, Composites Part B, 112: 112-124.
- [65] *Confinement of Full-Scale Masonry Columns with FRCM Systems.* **Maddaloni G, Cascardi A, Balsamo A, Di Ludovico M, Micelli F, Aiello M.A, Prota A.** 2017, Key Engineering Materials, 747: 374-381.
- [66] *Confinement of Clay Masonry Columns with SRG.* **Sneed L.H, Carloni C, Baietti G, Fraioli G.** 2017, Key Engineering Materials, 747: 350-357.
- [67] *Confinement of masonry columns with steel and basalt FRCM composites.* **Santandrea M, Quartarone G, Carloni C, Gu X.** 2017, Key Engineering Materials, 747: 342–349.
- [68] *FRCM-confined masonry columns: experimental investigation on the effect of the inorganic matrix properties.* **Cascardi A, Micelli F, Aiello M.A.** 2018, Construction and Building Materials, 186: 811-825.
- [69] *Binders alternative to Portland cement and waste management for sustainable construction—part 1.* **Coppola L, Bellezze T, Belli A, Bignozzi M.C, Bolzoni F, et al.** 2018, Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials, 16(3): 186-202.
- [70] *Calcium looping spent sorbent as a limestone replacement in the manufacture of portland and calcium sulfoaluminate cements.* **Telesca A, Marroccoli M, Tomasulo M, et al.** 2015, Environmental Science & Technology, 49(11): 6865-6871.
- [71] *Low-CO₂ cements from fluidized bed process wastes and other industrial by-products.* **Telesca A, Marroccoli M, Tomasulo M, et al.** 2016, Combustion Science and Technology, 188: 492-503.

- [72] **Pacheco-Torgal F, Labrincha J.A, Leonelli C, Palomo A, Chindaprasirt P.** *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes.* Amsterdam : Elsevier, 2015.
- [73] **Bernal S.A, Provis J.L, Fernandez-Jimenez A, et al.** Binder chemistry—High-calcium-activated materials. In: Provis J and van Deventer J (eds). *Alkali activated materials. State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM.* Netherlands : Springer, 2014, 59-85.
- [74] *Direct piezoelectric effect in geopolymetric mortars.* **Lamuta C, Candamano S, Crea F, Pagnotta L.** 2016, *Materials and Design*, 107: 57-64.
- [75] *Alkali-activated slag cements: Kinetic studies.* **Fernández-Jiménez A, Puertas F.** 1997, *Cement and Concrete Research*, 27(3): 359-368.
- [76] *Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class.* **Mobili A, Belli A, Giosuè C, et al.** 2016, *Cement and Concrete Research*, 88: 198-210.
- [77] **Davidovits J.** *Geopolymer chemistry and applications.* Saint-Quentin : Institut Géopolymère, 2011.
- [78] *Steel fiber reinforced geopolymer matrix (S-FRGM) composites applied to reinforced concrete structures for strengthening applications: A preliminary study.* **Carabba L, Santandrea M, Carloni C, Manzi S, Bignozzi M. C.** 2017, *Composites Part B*, 128: 83-90.
- [79] *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior.* **Lanas J, Alvarez J.L.** 2003, *Cement and Concrete Research*, p. 33: 1867-1876.
- [80] *Pre-packed alkali activated cement-free mortars for repair of existing masonry buildings and concrete structures.* **Coppola L, Coffetti D, Crotti E.** 2018, *Construction and Building Materials*, 173: 111-117.
- [81] **ASTM D3039/D3039M.** *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.* West Conshohocken, PA : ASTM International, 1995.
- [82] **UNI EN 1015-11:2007.** *Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.* Milano : UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.

- [83] **UNI EN 1015-3:2007.** *Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse).* Milano : UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.
- [84] **UNI EN 12617-4:2003.** *Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Metodi di prova - Determinazione del ritiro e dell'espansione.* Milano : UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2003.
- [85] **UNI EN 772-1:2015.** *Metodi di prova per elementi di muratura - Determinazione della resistenza a compressione.* Milano : UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2015.
- [86] *Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites.* **D'Antino T, Papanicolau C.** 2017, Composites Part B, 127: 78-91.
- [87] *Matrix-fiber bond behaviour in PBO FRCC composites: A fracture mechanics approach.* **D'Antino T, Carloni C, Sneed L.H, Pellegrino C.** 2014, Engineering Fracture Mechanics, 117: 94-111.
- [88] *Investigation of bond behaviour of PBO Fiber-Reinforced Cementitious Matrix Composite- Concrete Interface.* **Sneed L, D'Antino T, Carloni C.** 2014, ACI Material Journal, 111(5): 569-580.
- [89] *Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading.* **Häußler-Combe U, Hartig J.** 2007, Cement & Concrete Composites, 29: 279-289.
- [90] *Influence of different mechanisms on the constitutive behaviour of textile reinforced concrete.* **Hartig J, Jesse F, Häußler-Combe U.** 2009, 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4), 157-168.
- [91] **Fib.** *Model Code 2010, Volume 1. Bulletin No. 65.* Lausanne, Switzerland : fib (CEB-FIP), 2012.
- [92] *Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-concrete Interfaces with a Simple Method.* **Dai J, Ueda T, Sato Y.** 2005, Journal of Composites for Construction, 9(1): 52-62.
- [93] *Single-lap shear bond tests on Steel Reinforced Geopolymeric Matrix-concrete joints.* **Bencardino F, Condello A, Ashour A.F.** 2017, Composites Part B, 110: 62-71.

- [94] **Focacci F.** *Rinforzo delle murature con materiali compositi*. Palermo : Dario Flaccovio Editore, 2008.
- [95] *Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures*. **Sim J, Park C, Moon D.Y.** 2005, *Composites Part B*, 36: 504–512.