



Università degli studi ROMA TRE

Scuola Dottorale in Ingegneria

Dottorato di ricerca in Scienze dell'Ingegneria Civile
XXII Ciclo

Tesi di Dottorato

**Delaminazione di compositi a matrice cementizia
su supporti murari.**

Dottorando: Irene Carbone

Docente guida: Prof. Gianmarco de Felice

Coordinatore del dottorato: Prof. Leopoldo Franco

Roma, Febbraio 2010

Sommario

Il presente lavoro è volto allo studio dell'efficacia di rinforzi in materiali compositi realizzati con matrice cementizia ed applicati su supporti in muratura. L'impiego di compositi con matrice cementizia sembra acquisire un crescente interesse nelle applicazioni su strutture murarie, grazie al loro basso impatto, che richiede una più approfondita conoscenza dell'interazione meccanica tra supporto e rinforzo. Attraverso una campagna di prove sperimentali eseguite su provini in muratura rinforzati rispettivamente con fibre in carbonio (Carbon Fiber Reinforced Cementitious Matrix) e in acciaio (Steel Reinforced Grout), ambedue applicate con la medesima malta inorganica, viene analizzato il processo di delaminazione fino al completo distacco. Le prove, condotte con diversi assetti di prova, al variare della lunghezza di ancoraggio, del tipo di rinforzo (CFRCM o SGR), del materiale di supporto (laterizio o muratura in mattoni) e della superficie di applicazione dello stesso (piana o curva), illustrano le modalità di comportamento globale (manifestazione del collasso e relativa resistenza di delaminazione) e locale (legame di aderenza, energia specifica di frattura, lunghezza efficace di ancoraggio). Il processo di delaminazione è infine modellato adottando un legame bilineare tra lo scorrimento e la tensione tangenziale di interfaccia, definito a partire dalle letture sperimentali, che si presta ad una risoluzione analitica del problema e fornisce una stima del comportamento globale in termini forza-scorrimento, confrontabile con i risultati sperimentali. Per le superfici curve, in particolare, il modello proposto considera l'interazione tra le tensioni normali e tangenziali all'interfaccia, in modo tale da riprodurre la riduzione di resistenza osservata sperimentalmente con l'aumento della curvatura del supporto. In conclusione, il lavoro pone le basi per una adeguata comprensione del comportamento di compositi a matrice inorganica, offrendo un contributo conoscitivo utile per la progettazione strutturale di questi rinforzi.

Parole chiave: Muratura, Rinforzo, Materiali compositi, Delaminazione.

Abstract

The present work is devoted to the study the performances of externally bonded fibre reinforced composites with cement matrix on brick masonry supports. The use of cement matrix is getting a growing interest for applications to masonry structures for their low impact and therefore a deeper understanding of the bond is needed. To this end, an experimental campaign has been performed on brick masonry samples reinforced either with Carbon Fiber Reinforced Cementitious Matrix (CFRCM) or Steel Reinforced Grout (SRG) both applied with the same inorganic matrix and the whole debonding process is analyzed. Different double laps test setups are considered, when varying anchorage length, reinforcement type (CFRCM or SGR), support material (either clay brick or brick masonry) and geometry (either straight or curved). The tests provide the global behaviour in terms of delamination load and collapse type as well as the local behaviour in terms of bond adhesion, specific fracture energy and effective anchorage length. The experimental failure load results are then compared with predictive bond-slip models which are based on a bilinear interface law, derived from the experimental data, which allows getting an analytical solution of the debonding problem. For curved surfaces, in particular, a model is proposed which is able to take into account the interaction between normal and tangential stress at the interface, which reproduces the decrease in bond strength for increasing curvature, as shown by experimental results. In conclusion, the work lays the foundation for understanding the behaviour of the bond between masonry and inorganic matrix composites, giving a contribution for structural design of such reinforcements.

Keywords: Masonry, reinforcement, composites, debonding.

Indice

1. Introduzione	17
2. Compositi con matrice cementizia.....	20
2.1 Steel Reinforced Grout (SRG).....	23
2.1.1 Caratteristiche fisiche.....	24
2.1.2 Caratteristiche meccaniche.....	26
2.2 Carbon Fibre Reinforced Cementitious Matrix (CFRCM).....	31
2.2.1 Caratteristiche fisiche.....	32
2.2.2 Caratteristiche meccaniche.....	33
3. Programma sperimentale e assetto di prova.....	38
3.1 Assetto di prova e geometria dei campioni.....	43
3.2 Strumentazione di acquisizione	52
3.3 Caratteristiche dei materiali.....	55
3.4 Programma sperimentale.	57
4. Risultati sperimentali: modalità di delaminazione.....	59
4.1 Descrizione delle modalità di crisi	59
4.2 SRG	60
4.3 CFRCM	67
4.4 Commenti e confronti.....	75
5. Risultati sperimentali: comportamento globale	79
5.1 SRG	80
5.2 CFRCM	85
5.3 Confronti.....	87
5.4 Legame forza scorrimento	90
6. Risultati sperimentali: comportamento locale.....	94

6.1 Lunghezza efficace di ancoraggio	99
7. Modellazione delle prove.....	107
7.1 Formulazione del problema	109
7.2 Confronto con le linee guida CNR DT-200.....	112
7.3 Richiami del modello in (Yuan et al. 2004).....	115
7.4 Determinazione dei legami di interfaccia	120
7.5 Applicazione e confronto con i risultati sperimentali.....	122
7.6 Richiami del modello in (De Lorenzis e Zavarise 2009).....	129
7.7 Applicazione alle prove sperimentali e adozione di un criterio esponenziale di collasso	133
7.8 Formulazione proposta	135

Elenco delle figure

Figura 2.1 pannelli in muratura di tufo (Faella et al. 2010) in a) e di mattoni (Mantegazza, Barbieri 2002) in b), entrambi rinforzati a taglio	21
Figura 2.2 delaminazione di travi in calcestruzzo rinforzate con CFRCM (Di Tommaso et al. 2007) in a) e SRG (Huang et al. 2005) in b)	21
Figura 2.3 prove su archi in muratura rinforzati con SRG (Bori et al. 2007)	22
Figura 2.4 prove su archi in muratura rinforzati con CFRCM (Jasienko et al. 2009)	22
Figura 2.5 tessuto in fibre d'acciaio	23
Figura 2.6 tipologie di trefolo disponibili	25
Figura 2.7 tessuto con densità di 4 trefoli per pollice (sinistra) e di 12 trefoli per pollice (destra)	26
Figura 2.8 prove di trazione su un trefolo (sinistra) e su una striscia di tessuto in acciaio di larghezza 38.1mm (destra)	28
Figura 2.9 diagramma tensione-defomazione del tessuto in acciaio.....	28
Figura 2.10 collasso della fibra	29
Figura 2.11 prove di trazione sul rinforzo SRG	30
Figura 2.12 diagramma tensione-deformazione (sinistra), andamento della rigidità del tessuto SRG (destra)	31
Figura 2.13 tessuto in fibre di carbonio	32
Figura 2.14 geometria del tessuto in carbonio	32
Figura 2.15 prova di trazione sulla singola fascia (sinistra) e su una striscia di 40 mm (destra) di tessuto in carbonio	34
Figura 2.16 collasso della fibra	34
Figura 2.17 diagramma tensione-deformazione del tessuto in carbonio.....	35
Figura 2.18 prova di trazione su lamine di rinforzo CFRCM	36

Figura 2.19 diagramma tensione-deformazione (sinistra), andamento della rigidità del tessuto CFRCM (destra).....	37
Figura 3.1 prove di pull out di SRG su blocchi di calcestruzzo (Matana et al. 2005)	39
Figura 3.2 prove di pull out di SRG su muratura (Cancelli et al. 2007)	39
Figura 3.3 prove per trazione diretta di GFRCM su mattone (Briccoli Bati 2004)	41
Figura 3.4 prove di pull out di PBO-CFRCM su calcestruzzo (Di Tommaso et al. 2008)	41
Figura 3.5 prove di pull out di CFRCM su muratura (Faella et al. 2009).....	42
Figura 3.6 prove di pull out di CFRCM su muratura (Focacci Mantegazza 2009)	42
Figura 3.7 prova preliminare con CFRCM in due strati di tessuto su mattone: collasso della fibra.	44
Figura 3.8 schematizzazione dei setup A (sinistra) e B (destra)	44
Figura 3.9 accorgimenti costruttivi	45
Figura 3.10 campioni A con setup A	46
Figura 3.11 campioni D con setup A	46
Figura 3.12 campioni tipo L con setup A e lunghezza di ancoraggio 440 mm...	47
Figura 3.13 campioni tipo A con setup B	47
Figura 3.14 campioni tipo B con setup B.....	48
Figura 3.15 campioni tipo D con setup B	48
Figura 3.16 campioni tipo E con setup B.....	49
Figura 3.17 campioni tipo F con setup A e lunghezza di ancoraggio 315 mm ...	49
Figura 3.18 campioni tipo F con setup B e lunghezza di ancoraggio 315 mm ...	50
Figura 3.19 campioni tipo Ca con setup B.....	50
Figura 3.20 campioni tipo Cb con setup B.....	51

Figura 3.21 campioni Cc con setup B.....	51
Figura 3.22 campioni tipo Cd con setup B.....	52
Figura 3.23 macchina universale MTS (sinistra), centralina di acquisizione dati National instruments (destra).....	53
Figura 3.24 traduttore di spostamento potenziometrico (sinistra) e induttivo (centro), strain-gauge 10mm (destra).....	53
Figura 3.25 setup A.....	54
Figura 3.26 setup B.....	54
Figura 3.27 dettaglio dell'applicazione degli strain-gauges	55
Figura 3.28 dettaglio del trefolo 3SX	56
Figura 3.29 prova preliminare con rinforzo 3SX-4 su mattone: collasso della fibra.....	57
Figura 4.1 modalità di collasso riscontrate	60
Figura 4.2 delaminazione C) per ancoraggi di 55 mm e D) per ancoraggi 220 mm tra mattone e SRG.....	61
Figura 4.3 modalità di delaminazione D) per ancoraggi 440mm tra mattone e SRG.....	62
Figura 4.4 delaminazione mista C) D) tra muratura e SRG.....	63
Figura 4.5 delaminazione D) tra muratura e SRG: si osserva la formazione di una fessura nello spessore del rinforzo che progressivamente raggiunge il primo giunto di malta, segue improvvisamente il collasso	63
Figura 4.6 delaminazione D) tra muratura e SRG con setup B.....	65
Figura 4.7 delaminazione mista C) D) tra SRG e muratura curva	66
Figura 4.8 delaminazione E) per ancoraggi 55 mm tra CFRCM e mattone.....	68
Figura 4.9 delaminazione E) per ancoraggi 110 mm tra CFRCM e mattone.....	68
Figura 4.10 delaminazione E) per ancoraggio 165 mm tra CFRCM e mattone..	69
Figura 4.11 delaminazione D) per ancoraggi 220 mm tra CFRCM e mattone ...	70

Figura 4.12 dettaglio della fessurazione sulla malta per ancoraggi 220 mm tra CFRCM e mattone	71
Figura 4.13 dettaglio della delaminazione E) per ancoraggi 315 mm tra CFRCM e muratura	71
Figura 4.14 dettaglio dell'interfaccia di delaminazione tra CFRCM e muratura	71
Figura 4.15 delaminazione mista C) D) E) tra CFRCM e muratura	72
Figura 4.16 delaminazione tra CFRCM e muratura su supporti curvilinei	73
Figura 4.17 delaminazione mista B) C) D) tra CFRCM e muratura curva	74
Figura 4.18 delaminazione SRG-calcestruzzo in a) (Matana et al 2005) e b) (Cancelli et al. 2007).....	75
Figura 4.19 influenza della scabrezza del supporto sul carico di delaminazione (Matana et al. 2005)	76
Figura 4.20 delaminazione CFRCM-muratura: perdita di aderenza col supporto (Faella 2009) e sfilamento della fibra nella matrice (Focacci Mantegazza 2009)	76
Figura 5.1 ripartizione del carico nei campioni in SRG su laterizio con ancoraggio 55 mm	80
Figura 5.2 andamento del carico nelle prove con SRG su laterizio e ancoraggio 55 mm	81
Figura 5.3 andamento del carico nelle prove con SRG su laterizio e lunghezza di ancoraggio 220 mm.....	81
Figura 5.4 andamento del carico nelle prove con SRG su laterizio e lunghezza di ancoraggio 440 mm.....	82
Figura 5.5 ripartizione del carico nelle prove con CFRCM su laterizio (setupB)	85
Figura 5.6 ripartizione del carico CFRCM-muratura: setup B sopra e setup A sotto.....	86
Figura 5.7 carichi di delaminazione.....	88

Figura 5.8 confronto con altre sperimentazioni con composito SRG : (●presente sperimentazione, ▲sperimentazione in Matana et al. 2005, ■sperimentazione in Cancelli et al. 2007)	89
Figura 5.9 confronto con altre sperimentazioni con composito CFRCM su muratura: ●presente sperimentazione, △□◇ sperimentazione in (Faella et al. 2009), ▲■◆ sperimentazione in (Focacci e Mantegazza 2009)	90
Figura 5.10 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in SRG su supporti in laterizio	91
Figura 5.11 diagramma carico-scorrimento di rinforzi in SRG su supporti in muratura	91
Figura 5.12 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in SRG su supporti in muratura con superficie curva.....	92
Figura 5.13 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in CFRCM su supporti in laterizio	92
Figura 5.14 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in CFRCM su supporti in muratura	93
Figura 5.15 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in CFRCM su supporti in muratura con superficie curva.....	93
Figura 6.1 andamento della deformazioni lungo il rinforzo adeso nei campioni con SRG su Laterizio con ancoraggio 220 mm	94
Figura 6.2 andamento delle deformazioni lungo il rinforzo adeso nei campioni con SRG su laterizio con ancoraggio 440 mm.....	95
Figura 6.3 andamento delle deformazioni lungo il rinforzo adeso nei campioni con SRG su muratura.....	96
Figura 6.4 andamento delle deformazioni lungo il rinforzo adeso nelle prove con CFRCM su laterizio con ancoraggio 220 mm	97
Figura 6.5 andamento delle deformazioni lungo il rinforzo adeso nelle prove con CFRCM su muratura.....	98
Figura 6.6 profili di deformazione per livelli di carico SRG-laterizio con L ancoraggio 440 mm (setup A).....	100

Figura 6.7 profili di deformazione per livelli di carico CFRCM-mattone con L ancoraggio 220 mm (setup B).....	101
Figura 6.8 profili di deformazione per livello di carico CFRCM su laterizio con L ancoraggio 220 (setup B).....	102
Figura 6.9 profili di deformazioni per livello di carico SRG su muratura con L ancoraggio 315 mm (setup A).....	103
Figura 6.10 profili di deformazione per livelli di carico SRG su muratura con L ancoraggio 315 mm (setup B).....	104
Figura 6.11 profili di deformazioni per livelli di carico CFRCM su muratura con L ancoraggio 315 mm (setup B)	105
Figura 6.12 profili di deformazione per livelli di carico CFRCM su muratura con L ancoraggio 315 mm (setup A)	106
Figura 7.1 propagazione della frattura	110
Figura 7.2 schematizzazione dello stato tensionale	111
Figura 7.3 Stima del carico di delaminazione in funzione della lunghezza di ancoraggio suggerita in DT 200 e confronto con la sperimentazione: a) SRG su laterizio; b) SRG su muratura; c) CFRCM su laterizio; d) CFRCM su muratura	114
Figura 7.4 legame di interfaccia bilineare.....	116
Figura 7.5 profilo delle tensioni tangenziali di interfaccia nella fase elastica ..	116
Figura 7.6 profilo delle tensioni tangenziali nella seconda fase	117
Figura 7.7 profilo delle tensioni tangenziali nella fase di delaminazione.....	119
Figura 7.8 andamento globale carico scorrimento	119
Figura 7.9 schema del setup sperimentale con il posizionamento degli strain-gauges	120
Figura 7.10 profilo delle deformazione assunto lungo il rinforzo	121
Figura 7.11 profilo delle tensioni tangenziali assunta lungo il rinforzo	121
Figura 7.12 profilo degli scorrimenti assunto lungo il rinforzo	121

Figura 7.13 legame di interfaccia SRG-mattone.....	123
Figura 7.14 legame di interfaccia SRG-muratura	123
Figura 7.15 legame di interfaccia CFRCM-mattone.....	124
Figura 7.16 legame di interfaccia CFRCM-muratura	124
Figura 7.17 legame forza scorrimento SRG-mattone	125
Figura 7.18 legame forza scorrimento SRG-muratura.....	125
Figura 7.19 legame forza scorrimento CFRCM-mattone	126
Figura 7.20 legame forza scorrimento CFRCM-muratura.....	126
Figura 7.21 profilo delle deformazioni del rinforzo SRG su mattone (sinistra) e muratura (destra).....	127
Figura 7.22 profilo delle deformazioni del rinforzo CFRCM su mattone (sinistra) e su muratura (destra).....	127
Figura 7.23 profilo delle tensioni di interfaccia del rinforzo SRG su mattone (sinistra) e su muratura (destra)	128
Figura 7.24 profilo delle tensioni di interfaccia del rinforzo CFRCM su mattone (sinistra) e su muratura (destra)	128
Figura 7.25 definizione del problema	129
Figura 7.26 legami di interfaccia: in direzione tangenziale (sinistra) e in direzione normale (destra).	130
Figura 7.27 energia rilasciata nei due modi	131
Figura 7.28 Andamento forza-scorrimento al variare del raggio di curvatura..	133
Figura 7.29 andamento forza-scorrimento: confronto tra modello e sperimentazione.	134
Figura 7.30 criterio di collasso esponenziale di modo misto.	135
Figura 7.31 confronto fra modello e sperimentazione	139
Figura 7.32 legami di interfaccia tangenziali modificati per effetto dello scorrimento normale	141

Figura 7.33 profilo delle tensioni tangenziali di interfaccia per livelli di carico	142
Figura 7.34 profilo delle tensioni di interfaccia normali per livelli di carico ...	143
Figura 7.35 profilo degli scorrimenti tangenziali per livelli di carico	144
Figura 7.36 profilo degli scorrimenti normali per livelli di carico	145
Figura 7.37 profilo delle deformazioni per livelli di carico	146

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1 caratteristiche del trefolo in acciaio	27
Tabella 2.2 caratteristiche del tessuto in acciaio	27
Tabella 2.3 caratteristiche meccaniche della matrice.....	27
Tabella 2.4 prove sul tessuto in acciaio	27
Tabella 2.5 caratteristiche meccaniche del rinforzo SRG	31
Tabella 2.6 caratteristiche geometriche del tessuto in carbonio	33
Tabella 2.7 caratteristiche meccaniche del tessuto in carbonio	33
Tabella 2.8 prove sul rinforzo CFRCM	34
Tabella 2.9 caratteristiche meccaniche tessuto in carbonio	36
Tabella 2.10 caratteristiche meccaniche CFRCM.....	37
Tabella 3.1 caratteristiche meccaniche dei componenti del supporto murario ...	56
Tabella 3.2 programma sperimentale di delaminazione su laterizio	58
Tabella 3.3 programma sperimentale di delaminazione su muratura	58
Tabella 4.1 modalità di collasso su laterizio	77
Tabella 4.2 modalità di collasso di provini in muratura su supporto rettilineo...	77
Tabella 4.3 modalità di collasso di provini in muratura su supporto curvilineo.	78
Tabella 5.1 carico di delaminazione prove SRG-mattone	82
Tabella 5.2 carico di delaminazione SRG-muratura	84
Tabella 5.3 carico di delaminazione SRG-muratura curva	84
Tabella 5.4 carico di delaminazione CFRCM-mattone	85
Tabella 5.5 carico di delaminazione CFRCM-muratura	86
Tabella 5.6 carico di delaminazione CFRCM-muratura curva	87
Tabella 7.1 modelli per la resistenza alla delaminazione.....	109

Tabella 7.2 valori assunti per il confronto	113
Tabella 7.3 confronto tra risultati sperimentali e valori da normativa.....	113
Tabella 7.4 valori assunti per il confronto	113
Tabella 7.5 confronto tra risultati sperimentali e valori di normativa.....	113
Tabella 7.6 definizione dei legami di interfaccia bilineari.....	122
Tabella 7.7 valori delle lunghezza di ancoraggio ricavate dal modello e sperimentalmente	128
Tabella 7.8 confronto fra le prove sperimentali e il modello.	133
Tabella 7.9 confronto fra carico di delaminazione sperimentale e modellato. .	135

1. Introduzione

Il consolidamento strutturale e, più in generale, gli interventi di rinforzo delle strutture esistenti, costituiscono oggi una delle principali attività nel settore dell'ingegneria civile. L'evoluzione dell'approccio progettuale, che richiede il soddisfacimento di verifiche di sicurezza, l'aggiornamento del quadro normativo con il progressivo incremento delle prestazioni richieste e, non ultimo, l'insieme delle modifiche strutturali intervenute nelle costruzioni esistenti, sono alcune delle ragioni che spingono a realizzare interventi di consolidamento sulle strutture esistenti.

In Italia, in particolare, un forte impulso al consolidamento strutturale è determinato dalla necessità di ripristinare i dissesti prodotti dagli eventi sismici e soprattutto di garantire un adeguato livello di sicurezza sismica rispetto agli eventi futuri.

In quest'ambito, l'impiego di materiali compositi fibrorinforzati rappresenta un'importante innovazione tecnologica che trova crescente impiego nella pratica professionale. Si tratta di una tecnologia ormai consolidata nelle applicazioni su strutture in cemento armato e in costante crescita anche nelle applicazioni su strutture in muratura. Uno dei vantaggi risiede nelle elevate caratteristiche meccaniche dei compositi che consentono di ottenere incrementi di resistenza significativi, senza altrettanti incrementi dei carichi sulla struttura.

A fianco dei tradizionali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) si sono sviluppati altri compositi che utilizzano fibre ad alta resistenza immerse in una matrice di malta inorganica con la funzione di garantire l'adesione tra le fibre ed il supporto. Le malte, pur essendo meno efficaci delle resine come adesivi, possono offrire alcuni vantaggi in termini di costi e modalità applicative, oltre che di traspirabilità e resistenza al fuoco, specie per il rinforzo di murature, dove le migliori proprietà meccaniche dei tradizionali FRP non possono essere completamente sfruttate a causa della intrinseca debolezza del supporto murario. Uno dei limiti nelle applicazioni di rinforzi con matrice inorganica, dipende dall'effettiva resistenza alla delaminazione, che è poi uno dei meccanismi di crisi fondamentali del sistema di rinforzo; infatti, in presenza di matrici cementizie, la superficie di delaminazione tende a localizzarsi non già nello

strato superficiale del supporto, ma piuttosto all'interno della matrice, che risulta essere l'elemento più debole.

La tesi si inserisce in questo contesto, con il proposito di fornire un contributo alla conoscenza del comportamento di rinforzi con matrice cementizia applicati su supporti in muratura. Viene presentata una campagna sperimentale che prende in esame due tipologie di rinforzo, rispettivamente con fibre di acciaio e di carbonio, applicate con lunghezze di ancoraggio diverse su supporti piani e curvi.

Nel capitolo seguente, dopo un breve richiamo ai principali contributi sperimentali presenti in letteratura sui compositi con matrice cementizia, sono illustrate le caratteristiche fisiche e le proprietà meccaniche delle due tipologie di composito, Steel Reinforced Grout (SRG), e Carbon Fibre Reinforced Cementitious Matrix (CFRCM) oggetto di sperimentazione, anche con l'ausilio dei risultati di prove di trazione eseguite sulle fibre e sull'intero rinforzo, volte a caratterizzare sperimentalmente rigidità e resistenza dei materiali impiegati.

Il Capitolo 3 presenta l'assetto di prova impiegato e la strumentazione di acquisizione utilizzata, illustrandone i limiti e le potenzialità anche con riferimento alle altre prove disponibili in letteratura, ed illustra il programma complessivo delle prove di delaminazione eseguite. In particolare, sono stati adottati due setup di prova ed effettuate prove con due materiali di supporto (mattone e muratura di mattoni), aventi superficie piana o curva, con diverse lunghezze di applicazione del rinforzo. L'insieme delle prove eseguite mette in luce l'influenza della discontinuità nel supporto rappresentata dal giunto di malta, l'effetto della curvatura nella geometria del supporto che comporta la nascita di tensioni di trazione nell'interfaccia in aggiunta a quelle tangenziali, l'influenza della lunghezza di ancoraggio.

I capitoli 4,5,6 illustrano l'insieme dei risultati sperimentali ottenuti per tipologia di composito e di supporto. In particolare, nel capitolo 4 sono illustrate le modalità di delaminazione riscontrate sperimentalmente; il capitolo 5 è invece dedicato alla descrizione del comportamento globale, ivi inclusa la modalità di ripartizione del carico di prova sui due lati del campione in modo da ricostruire il diagramma forza-scorrimento del processo di delaminazione. Il comportamento locale è descritto nel capitolo 6 a partire dalle letture effettuate per mezzo degli strain-gauges, attraverso i quali viene ricostruita la distribuzione delle tensioni e delle deformazioni lungo il rinforzo, in modo da determinare

sperimentalmente, per le varie combinazioni rinforzo-supporto, la lunghezza efficace di ancoraggio ed il legame di interfaccia relativo.

Il Capitolo 7, infine, affronta il tema della modellazione del processo di delaminazione, adottando un modello bilineare del legame di interfaccia, come proposto in (Yuan et al. 2004), tarato sulla base dei risultati sperimentali, che integrato, fornisce una espressione analitica della legge forza-scorrimento globale. Analogamente, per supporti curvilinei, viene adottata la formulazione proposta in (De Lorenzis e Zavarise 2008) introducendo nelle equazioni costitutive un termine aggiuntivo che modella l'interazione tra le tensioni normali e tangenziali in modo da rappresentare correttamente la riduzione di rigidità e di resistenza osservata nelle prove all'aumentare della curvatura.

2. Compositi con matrice cementizia

Negli ultimi anni è stato sperimentato con successo l'impiego di rinforzi costituiti da fibre ad alta resistenza entro matrici inorganiche (malta cementizia) che risultano compatibili sotto il profilo chimico, fisico e meccanico con supporti in c.a. e in muratura. A fronte della minore capacità adesiva della matrice cementizia rispetto alle resine polimeriche, la prima offre tuttavia alcuni vantaggi:

- ha la medesima resistenza al fuoco del supporto (calcestruzzo o muratura) e quindi garantisce una buona prestazione anche in caso di incendio, proteggendo la fibra al suo interno dall'esposizione diretta alle fiamme. Al contrario dei polimeri, per i quali superata una temperatura di 60°- 80°C si ha in generale un decadimento delle proprietà meccaniche;
- ha una permeabilità 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 storici in cui spesso sono presenti decorazioni e affreschi;
- garantisce l'applicabilità del sistema di rinforzo anche su supporti umidi, al contrario dei sistemi FRP dove le resine (polimeriche ed epossidiche) non catalizzano alla presenza dell'acqua;
- rende più facile l'applicazione su superfici scabre ed irregolari e di manipolazione, infatti, è la matrice stessa a colmare le irregolarità della superficie (considerati gli spessori del sistema) senza necessità di una preventiva rasatura.
- è di semplice applicazione, essendo la malta un materiale di uso comune nella pratica edilizia, che non necessita di particolari misure precauzionali o di manodopera altamente specializzata.

Nella letteratura tecnico-scientifica, sono ancora relativamente pochi i contributi che riguardano il comportamento sperimentale di rinforzi con matrice cementizia. Tra le applicazioni su elementi strutturali, in (Kolosh 1998) sono stati testati sistemi di rinforzo su pareti realizzati con un tessuto bidirezionale di fibre in carbonio applicato in uno o più strati come sottile rifodera della parete; il placcaggio consente di incrementare le capacità del pannello attraverso una

ripartizione delle tensioni di trazione su una superficie più estesa, con un significativo incremento della resistenza ad azioni fuori dal piano. In (Faella et al. 2010) un sistema di rinforzo analogo è stato utilizzato su pareti in muratura di tufo, che sono state sottoposte a prove di compressione diagonale valutando l'incremento di resistenza dei pannelli rinforzati; un ulteriore incremento della resistenza può essere conferito applicando due strati di tessuto sovrapposti (Mantegazza, Barbieri 2002).

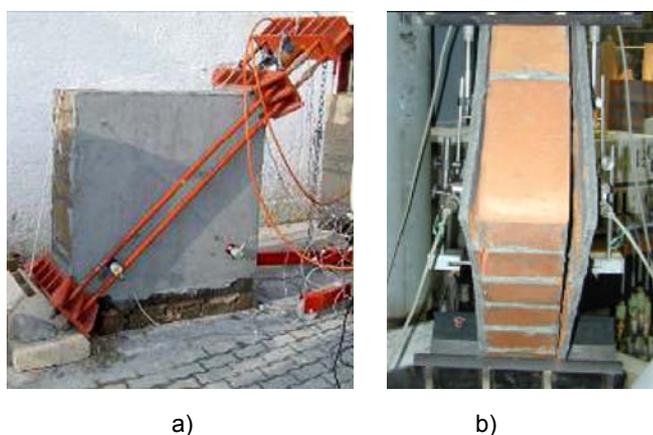


Figura 2.1 pannelli in muratura di tufo (Faella et al. 2010) in a) e di mattoni (Mantegazza, Barbieri 2002) in b), entrambi rinforzati a taglio

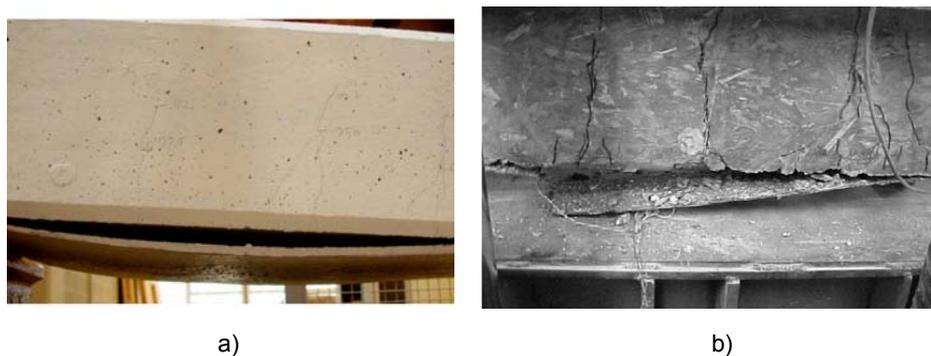


Figura 2.2 delaminazione di travi in calcestruzzo rinforzate con CFRCM (Di Tommaso et al. 2007) in a) e SRG (Huang et al. 2005) in b)

L'uso di placcaggi in compositi con matrice cementizia è stato impiegato nel rinforzo di travi in calcestruzzo armato: in (Wobbe et al. 2004; Huang et

al.2004) sono state realizzate prove di flessione su travi rinforzate con strisce di tessuto unidirezionale in acciaio (SRG), e l'incremento di resistenza a flessione valutato in (Barton et al 2005); in (Di Tommaso et al. 2007) è stato posto a confronto l'incremento di resistenza ottenuto con compositi a matrice cementizia (CFRCM) rispetto a quello ottenuto con resine polimeriche (CFRP), utilizzando tessuti in fibre di carbonio. L'osservazione del collasso ha mostrato un minor incremento di resistenza nelle travi rinforzate in CFRCM associato tuttavia ad un incremento della duttilità dovuto alla modalità di delaminazione che si manifesta all'interno della matrice, piuttosto che nello strato di supporto prossimo all'incollaggio.

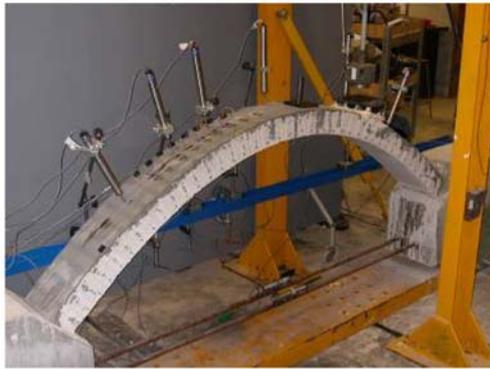


Figura 2.3 prove su archi in muratura rinforzati con SRG (Bori et al. 2007)



Figura 2.4 prove su archi in muratura rinforzati con CFRCM (Jasienko et al. 2009)

Per quel che riguarda il rinforzo di archi e volte, sono state effettuate prove sperimentali con compositi con matrice cementizia, rinforzati con fibre in acciaio (SRG) (Borri et al. 2007) o in carbonio (CFRCM) (Jasienko et al. 2009); in particolare, nelle applicazioni all'intradosso dell'arco, la matrice cementizia ha garantito una buona capacità di distribuzione delle tensioni sulla muratura di supporto. In (Briccoli Bati e Rovero 2007) sono stati impiegati tessuti in fibre di vetro (GFRCM) applicati con malta cementizia su tutta la superficie di intradosso dell'arco riscontrando un incremento della capacità portante, senza un'alterazione del cinematismo di collasso tipico dell'arco non rinforzato.

Pur nella ristrettezza delle applicazioni proposte nella letteratura tecnico-scientifica, si evince uno specifico interesse verso i rinforzi in materiale composito con matrice cementizia, di cui tuttavia manca ancora una adeguata comprensione e modellazione dei fenomeni di crisi per delaminazione. Nel seguito, in particolare, vengono presentate e descritte le due tipologie di composito utilizzate nella presente sperimentazione, che differiscono per il tipo di rinforzo, realizzato rispettivamente con trefoli di acciaio ad alta resistenza (SRG) o con tessuto in fibre di carbonio (CFRCM).



Figura 2.5 tessuto in fibre d'acciaio

2.1 Steel Reinforced Grout (SRG)

Gli SRG sono composti da fili di acciaio ad alta resistenza (Ultra High Tensile Strength Steel) intrecciati a formare trefoli, a loro volta assemblati in un tessuto, e quindi immersi in una matrice cementizia. La fibra in acciaio permette di ottenere un rinforzo non troppo costoso e relativamente duttile. Attualmente

sono pochi i produttori di compositi con rinforzi in acciaio sul mercato mondiale. Le fibre di rinforzo oggetto di questa sperimentazione sono state prodotte dalla società americana HardWire LLC, mentre la matrice impiegata è una malta cementizia addizionata con fibre polimeriche sintetiche prodotta dalla società Ruredil SpA.

2.1.1 Caratteristiche fisiche

Le fibre che costituiscono i rinforzi SRG sono trefoli di acciaio ad alta resistenza, simili ai fili di armatura per c.a. precompresso, con sezioni molto ridotte in modo da conferire al foglio di rinforzo un'elevata flessibilità.

I principali fattori fisico-geometrici del rinforzo che influenzano la risposta meccanica del composito sono:

- Classe di resistenza dell'acciaio. L'acciaio impiegato è un acciaio perlitico o ipereutetoidico, con contenuti di carbonio compresi tra $0,80 \div 0,96\%$, sottoposto a un processo di trafilatura, rinvenimento, placcatura in ottone o zinco, e infine trafilatura fine e taglio. In questo modo si raggiungono valori di resistenza molto elevate (tra 2400 e 4000 MPa). Lo svantaggio legato al raggiungimento di classi di resistenza elevate con diametri molto ridotti sta in una perdita di duttilità del filo, che può subire una rottura fragile dovuta alla torsione che si genera nei fili stessi, accompagnata da un minor allungamento a rottura rispetto a fili di diametro maggiore.
- Diametro del trefolo. I singoli fili hanno diametri dell'ordine di $0,2 \div 0,48$ mm, per cui nel complesso il trefolo ha dimensioni variabili tra 0,89 e 1,02 mm, ossia meno di un decimo del diametro di un trefolo da precompressione. La scelta di diametri così ridotti per la realizzazione di compositi di rinforzo ha due motivi: innanzitutto permette la realizzazione di fogli flessibili e di spessore contenuto, e poi è proprio il processo di trafilatura di diametri così ridotti che, provocando mutamenti nella microstruttura dell'acciaio, conferisce ad esso quelle spiccate proprietà meccaniche necessarie per l'utilizzo a fini strutturali.
- Tipologia del trefolo. La scelta del trefolo deve garantire una adeguata aderenza meccanica tra matrice e fibra, affinché la rottura del rinforzo preceda la sua espulsione dalla matrice. Questa aderenza si può ottenere attraverso una superficie corrugata del trefolo, che quindi viene realizzato intrecciando più fili in modalità diverse.

- Densità del tessuto. Si tratta del numero di trefoli per unità di lunghezza (in genere espressa in pollici). Questa caratteristica geometrica influenza la risposta meccanica del composito sia in termini di resistenza che di rigidità, e inoltre permette l'uso di un'ampia gamma di matrici con caratteristiche meccaniche diverse.

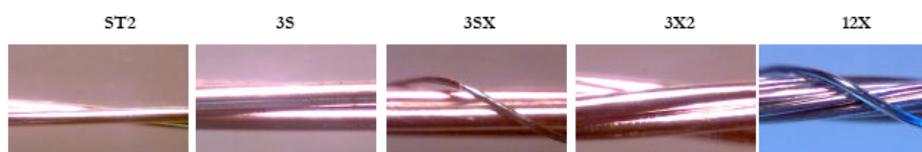


Figura 2.6 tipologie di trefolo disponibili

La HardWire LLC fornisce 5 tipologie di trefolo, tutte realizzate attraverso l'intreccio di più fili singoli, nelle seguenti configurazioni:

- ST2: realizzato con due fili avvolti intorno a un asse comune, rappresenta la tipologia più semplice;
- 3S: costituito da tre fili avvolti intorno a un asse comune, fornisce maggiore rigidità e carico di rottura;
- 3SX: simile al precedente, presenta in più un quarto filo più sottile che risulta avvolto intorno ai precedenti con passo più grande; la sua funzione è quella di migliorare l'aderenza del filo con la matrice;
- 3X2: costituito da tre fili rettilinei intorno ai quali sono avvolti altri due fili dello stesso diametro;
- 12X: realizzato mediante undici fili di pari diametro e intrecciati tra di loro a formare una corda; il dodicesimo filo gira attorno ai precedenti con passo più ampio e verso opposto.

Per quanto riguarda invece la densità del foglio di rinforzo è possibile scegliere tra:

- Bassa → 4-6-8 trefoli per pollice

Questa densità è impiegata per rinforzi strutturali che non necessitano di caratteristiche meccaniche particolarmente elevate, e dove l'estensione della superficie da rinforzare consente l'applicazione di lamine di grandi dimensioni. I tessuti di fibre di questa densità possono essere applicati mediante malta cementizia che penetra molto bene negli spazi presenti tra le fibre.

- Media → 12-16 trefoli per pollice

È una soluzione intermedia che conferisce al rinforzo caratteristiche meccaniche elevate e allo stesso tempo consente ancora l'applicazione con malte cementizie.

- Alta → 21-23 trefoli per pollice

In questa densità si raggiungono le massime caratteristiche meccaniche del materiale. È consigliata per interventi in cui la superficie su cui è possibile intervenire è molto ridotta e dove sono necessarie resistenze elevate. In questo caso l'applicazione del foglio di rinforzo può essere effettuata solo con resine, poiché la malta cementizia non riesce a penetrare nei vuoti tra i trefoli, che hanno dimensioni inferiori al millimetro.

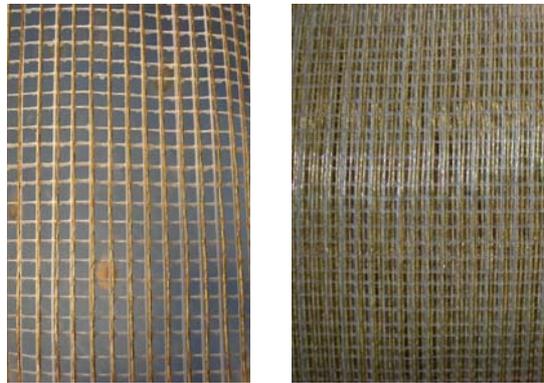


Figura 2.7 tessuto con densità di 4 trefoli per pollice (sinistra) e di 12 trefoli per pollice (destra)

2.1.2 Caratteristiche meccaniche

I rinforzi SRG sfruttano le caratteristiche meccaniche delle fibre di acciaio trafilato con prestazioni elevate in termini di resistenza, in combinazione con matrici a base di malte cementizie. Inoltre essi presentano una resistenza a taglio che riduce i problemi legati alle connessioni e agli ancoraggi.

Le prove sperimentali eseguite, condotte su fili e su lamine di SRG evidenziano come l'acciaio rimane sostanzialmente in campo elastico fino a rottura, con un comportamento simile a quello che si riscontra nei trefoli impiegati per il cemento armato precompresso (vedi anche Huang et al. 2004).

Nella presente sperimentazione è stato utilizzato il tessuto 3SX-12-12 le cui caratteristiche fornite dal produttore sono riportate nelle tabelle 2.1 e 2.2.

La matrice cementizia utilizzata è la Ruredil X Mesh M25, una malta inorganica costituita da un legante idraulico pozzolanico, addizionata con fibre polimeriche

sintetiche, prodotta specificatamente per il rinforzo di strutture murarie; le caratteristiche meccaniche fornite dalla casa produttrice sono riportate nella tabella 2.3.

Trefolo	Diametro filo [mm]	Diametro trefolo [mm]	Classe resistenza [MPa]	Carico max [KN]	Def. al collasso [%]
3SX	0,48	1,016	2400	1,34	2,30

Tabella 2.1 caratteristiche del trefolo in acciaio

Densità [trefoli per pollice]	Peso kg/m ²	Resistenza a trazione [KN/cm]	Spessore [cm]	Modulo elastico [GPa]
12	2,11	6,34	0,132	143

Tabella 2.2 caratteristiche del tessuto in acciaio

Resistenza a compressione [MPa]	Resistenza a flessione [MPa]	Modulo Elastico [GPa]
38	7,5	15

Tabella 2.3 caratteristiche meccaniche della matrice

Per caratterizzare il tessuto, sono state preliminarmente eseguite alcune prove di trazione sui trefoli in acciaio e su una striscia di rinforzo come indicato in tabella 2.4.

Tipo di prova	Campioni	Numero di prove
Trazione del trefolo	T1	1
Trazione di una striscia di tessuto larga 38.1 mm.	S1 – S2	2
Trazione di una lamina di rinforzo larga 38.1 mm.	R1 – R2	2

Tabella 2.4 prove sul tessuto in acciaio

Sono state eseguite prove di trazione su un singolo trefolo e prove di trazione su una striscia di fibre di larghezza pari a 1,5 pollici (38,1 mm), corrispondente a 18 trefoli. Sono state realizzate 2 prove su trefoli e due prove su strisce di tessuto. La fibra è stata ancorata nelle ganasce della macchina di trazione con piastre di piombo. Le prove sono state condotte con una macchina universale MTS in controllo di spostamento con elettronica Testar II, associata ad una servo-valvola

Moog. La velocità di carico impressa è pari a 0,005 mm/s. La forza è registrata direttamente dal sistema di controllo MTS tramite una cella di carico da 500KN. Un trasduttore di spostamento LVDT con una corsa di 250 mm registra invece la variazione di lunghezza impressa.



Figura 2.8 prove di trazione su un trefolo (sinistra) e su una striscia di tessuto in acciaio di larghezza 38.1mm (destra)

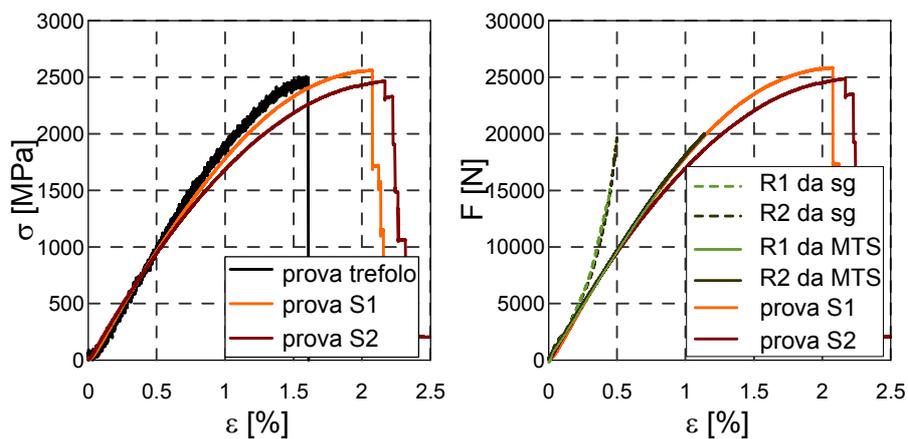


Figura 2.9 diagramma tensione-defomazione del tessuto in acciaio

Dai valori ottenuti si osserva che la resistenza a trazione determinata sperimentalmente sul singolo trefolo è pressoché identica a quelle riportate sulla scheda tecnica del prodotto; per quanto riguarda la striscia di rinforzo formata da

18 trefoli si ha un carico di rottura pari a circa 18 volte il valore relativo ad un trefolo. Il modulo elastico risulta invece di poco più elevato rispetto ai dati forniti dal produttore. Confrontando i dati del singolo trefolo con quelli della striscia si osserva una buona corrispondenza che evidenzia una omogenea distribuzione delle tensioni nei trefoli, con una deformazione ultima maggiore in quanto in prossimità del collasso la rottura non avviene simultaneamente per tutte le fibre.



Figura 2.10 collasso della fibra

Le caratteristiche meccaniche globali, della lamina in SRG sono state valutate sperimentalmente attraverso 2 prove di trazione semplice (R1, R2). Il rinforzo è stato realizzato con una striscia di fibre di larghezza 38.1 mm immersa in uno strato di malta come precedentemente descritto di spessore pari a 7 mm. La forza è stata trasmessa direttamente alla fibra vincolando le due estremità del tessuto nella macchina universale attraverso placche di piombo e imponendo la sollecitazione di trazione in controllo di spostamento.

Viene determinata la deformazione globale del rinforzo dalla lettura del trasduttore in spostamento della macchina MTS e una deformazione locale misurata con degli strain-gauges disposti nella zona centrale del rinforzo e applicati sulla matrice.



Figura 2.11 prove di trazione sul rinforzo SRG

Nel campione R1 sono stati utilizzati 2 strain-gauges disposti alla stessa altezza ai lati della fibra; data l'omogeneità della misura ottenuta da questa prova, si è scelto di usare un solo strain-gauge per il campione R2. Tuttavia, dai risultati ottenuti rappresentati in figura 2.12, si osserva la progressiva inattendibilità delle letture di deformazione locale rilevate attraverso gli strain-gauges che, essendo applicati sulla superficie del rinforzo e non sulle fibre all'interno della matrice, sono compromesse dalla fessurazione della matrice. Le misure globali, forniscono una stima della rigidità che, in presenza di fessurazione si assesta intorno ad un valore di circa 1800 KN, poco più della rigidità della sola fibra. In tabella è riportato il valore della rigidità assiale iniziale quando la matrice fornisce il massimo contributo. La significativa riduzione di rigidità apparente (E) dipende dall'aver considerato tutta la sezione del rinforzo, pari alla larghezza della striscia 38.1 mm per lo spessore della matrice 7 mm e non più solo la sezione delle fibre in acciaio. Il comportamento a trazione di rinforzi a bassa e media densità risulta in definitiva poco influenzato dalle proprietà della matrice cementizia, per effetto della fessurazione, d'altra parte, l'impiego di malte con buone prestazioni è necessario per garantire un'adeguata resistenza a taglio e quindi a delaminazione della matrice come verrà chiarito nel seguito.

Prova	T	S1	S2	R1	R2
Resistenza a trazione [KN/cm]	6,63	6,78	6,53	-	-
EA [KN]	108	1890	1650	1885	1850
A [mm]	0,56	10,09	10,09	266,7	266,7
E [MPa]	192857	187314	163528	7071	6936

Tabella 2.5 caratteristiche meccaniche del rinforzo SRG

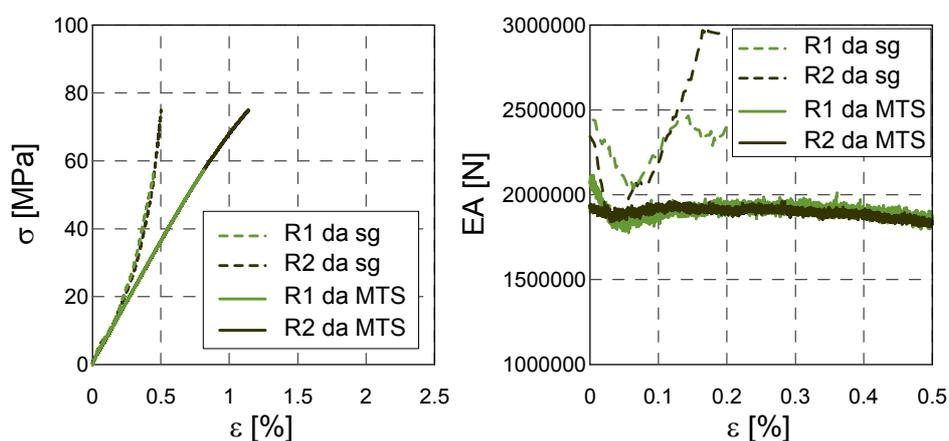


Figura 2.12 diagramma tensione-deformazione (sinistra), andamento della rigidità del tessuto SRG (destra)

2.2 Carbon Fibre Reinforced Cementitious Matrix (CFRCM)

Il composito CFRCM è formato da un tessuto bidirezionale in fibre in carbonio che vengono applicate al supporto per mezzo della malta cementizia in cui sono immerse. Per garantire l'aderenza tra matrice e fibra, il tessuto è progettato con maglie sufficientemente larghe da permettere l'immersione nella matrice. Nella presente sperimentazione è stata utilizzato un prodotto della Ruredil S.p.A. denominato X MESH C10, per il quale la stessa ditta fornisce l'apposita matrice X MESH C25, già impiegata precedentemente.



Figura 2.13 tessuto in fibre di carbonio

2.2.1 Caratteristiche fisiche

La geometria del tessuto è raffigurata in figura 2.14 e descritta in tabella 2.6

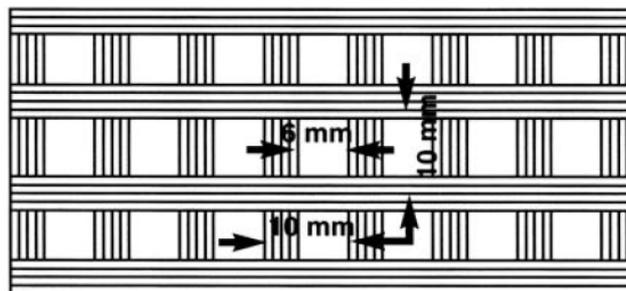


Figura 2.14 geometria del tessuto in carbonio

Peso di fibra di carbonio nella rete	Spessore per il calcolo della sezione di carbonio a 0° e 90°	Carico di rottura riferito ad una larghezza unitaria di 10 mm sia in direzione 0° che in direzione 90°
[g/m ²]	[mm]	[kg/cm]
168	0,047	> 160

Tabella 2.6 caratteristiche geometriche del tessuto in carbonio

2.2.2 Caratteristiche meccaniche

Il tessuto Ruredil X MESH C10 è costituito da fibre di carbonio ad alta resistenza le cui proprietà meccaniche dichiarate dal produttore sono riassunte in tabella 2.7

Carico di rottura a trazione	Modulo elastico	Densità fibra	Allungamento a rottura
[MPa]	[GPa]	[g/cm ³]	[%]
4.800	240	1,78	1,8

Tabella 2.7 caratteristiche meccaniche del tessuto in carbonio

La malta di applicazione è la stessa utilizzata per i rinforzi in SRG le cui proprietà sono descritte nel paragrafo 2.1.2.

Sono state eseguite prove di trazione sia sulla singola fascia di carbonio che su una striscia di tessuto della larghezza di 40 mm corrispondente a 4 fasce. Per questa tipologia di fibra sono state eseguite inoltre prove di trazione accoppiando due fasce di tessuto della stessa larghezza al fine di valutare il comportamento di più strati di tessuto sovrapposti nello stesso sistema di rinforzo. Per ogni tipologia sono state realizzate due prove come riassunto in tabella 2.8. Le prove a trazione semplice sono state eseguite con la macchina universale MTS, dove la fibra è stata ammorsata per mezzo di placche di piombo come precedentemente descritto.



Figura 2.15 prova di trazione sulla singola fascia (sinistra) e su una striscia di 40 mm (destra) di tessuto in carbonio



Figura 2.16 collasso della fibra

Tipo di prova	Campioni	Numero di prove
Trazione della singola fascia di fibre	C_T1	2
Trazione di una striscia di tessuto larga 40 mm (4 fasce)	C_S1 – C_S2	2
Trazione di due strisce di tessuto larghe 40 mm ciascuna	C_Sd1 – C_Sd2	2
Trazione di una striscia di rinforzo larga 40 mm.	C_R1 – C_R2	2

Tabella 2.8 prove sul rinforzo CFRCM

Le prove su una singola fascia presentano un diagramma tensione–deformazione in cui la forza cresce linearmente fino al valore massimo per il quale si verifica la rottura della fascia. La crisi non è del tutto fragile, si osserva un decadimento significativo ma solo parziale della forza, e al proseguire della prova questa rimane pressoché costante per un breve tratto per poi decrescere linearmente ed assestarsi intorno ad un valore pari a ca. il 10 % della forza massima. Questo comportamento può essere attribuito alla microstruttura della fascia di filamenti che costituisce la fibra che comporta non la rottura netta di una sezione ma bensì la rottura dei filamenti in diversi punti con un progressivo sfilacciamento della fascia. Nel complesso la resistenza a trazione del tessuto risulta essere inferiore a quella dichiarata dal produttore.

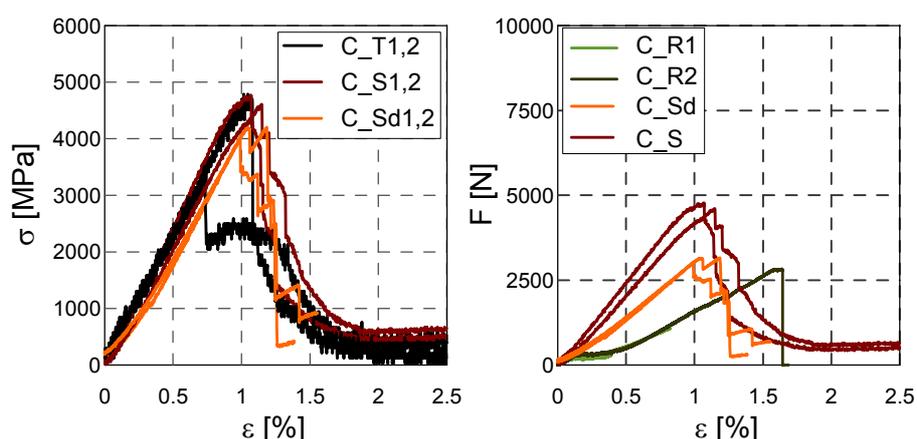


Figura 2.17 diagramma tensione-deformazione del tessuto in carbonio

Le prove su una striscia di tessuto (C_S) mostrano un comportamento analogo alle precedenti nel ramo crescente, ed un ramo decrescente a gradini, che rivela la non uniformità della tensione nelle quattro fasce che compongono la striscia di tessuto. Questo comportamento è più marcato per le prove su due strisce accoppiate (C_{Sd}) in cui la distribuzione non uniforme delle sollecitazioni comporta una riduzione della rigidità apparente nel ramo crescente, una riduzione della forza massima di circa il 25%, un comportamento a scaletta del ramo discendente, con riprese di carico conseguenti alla redistribuzione delle tensioni tra le due strisce di tessuto. Rispetto alle caratteristiche meccaniche fornite dal produttore, le prove sperimentali hanno evidenziato una resistenza media a trazione di 0,8 KN/cm e una deformazione corrispondente di circa 1.1%

Sono state realizzate infine prove di trazione semplice su lamine di rinforzo realizzato interponendo tre strisce di fibre di carbonio di larghezza pari a 40 mm con la matrice cementizia per uno spessore complessivo di 7 mm. I campioni sono stati ammorsati in corrispondenza delle due estremità come nelle analoghe prove su SRG tramite placche di piombo alle morse della macchina MTS e sottoposti a trazione in controllo di spostamento.



Figura 2.18 prova di trazione su lamine di rinforzo CFRCM

Prova	C_T1	C_T2	C_S1	C_S2	C_Sd1	C_Sd2
Resistenza a trazione [KN/cm]	0,9	0,65	0,86	0,89	0,79	0,75
EA [KN]	89	86	350	367	679	682
A [mm]	0,47	0,47	1,88	1,88	3,76	3,76
E [MPa]	195744	182978	186170	195212	180585	181382

Tabella 2.9 caratteristiche meccaniche tessuto in carbonio

La deformazione locale del rinforzo è stata valutata mediante la misura degli strain-gauges disposti nella zona centrale del rinforzo, mentre la forza

considerata e la deformazione globale sono ricavate dalle letture della macchina di prova. Emerge una rigidità iniziale che dalla misura di deformazione locale raggiunge valori di circa 1500 – 2000 KN . Si ha successivamente un tratto in cui il campione subisce un assestamento nella macchina di prova evidenziato da un aumento di deformazione dallo 0.1% allo 0.4% per forze pressoché costanti e successivamente alla ripresa di carico si raggiungono valori di rigidità prossimi a quelli del solo tessuto, mentre le letture delle deformazioni locali non sono più attendibili per effetto della fessurazione della matrice. Anche per questo composito si assume la rigidità della sola fibra.

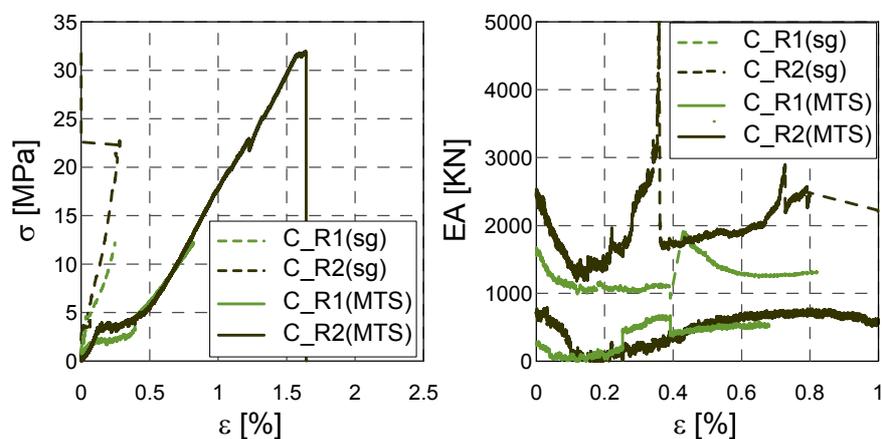


Figura 2.19 diagramma tensione-deformazione (sinistra), andamento della rigidità del tessuto CFRCM (destra)

Prova	C_R1	C_R2
EA [KN]	1071	-
A [mm]	280	280
E [MPa]	3827	-

Tabella 2.10 caratteristiche meccaniche CFRCM

3. Programma sperimentale e assetto di prova

Il comportamento di elementi strutturali rinforzati esternamente con materiali compositi ha come fattore chiave il fenomeno della delaminazione del composito dal supporto. Numerosi studi sperimentali e teorici hanno indagato l'aderenza di FRP su calcestruzzo e negli ultimi anni la ricerca si è concentrata anche sull'aderenza tra FRP e muratura. Il campo di indagine è tuttavia molto esteso data l'eterogeneità dei supporti in muratura considerata la varietà di murature esistenti.

In (Aiello e Sciolti 2003, 2004) e (Ceroni et al. 2003) sono illustrati i risultati di prove di delaminazione su pietre naturali. In (Briccoli Bati e Fagone 2008) e in (Briccoli Bati et al. 2009) vengono presentate prove di delaminazione su singolo mattone. Prove di delaminazione su muratura sono invece studiate in (Casareto et al. 2003) e in (Basilio et al. 2005) al variare della lunghezza e della modalità di ancoraggio e al variare della geometria del supporto considerata piana e curva. Le sperimentazioni effettuate dimostrano come non solo le proprietà dei materiali, ma anche la geometria dei campioni possono influenzare la crisi per delaminazione.

Tra gli assetti di prova proposti, si annoverano prove di flessione realizzate su elementi (Ceroni e Pecce 2006) o su pannelli murari (Tumialan et al. 2002) anche soggetti a presso flessione, tests di trazione diretta (Ceroni e Pecce 2006; Briccoli Bati et al. 2004). L'applicazione diretta della forza di trazione al blocco sebbene comporti uno stato tensionale analogo a quello delle strutture reali comporta alcune difficoltà operative (Ceroni e Pecce 2006), generalmente viene utilizzato uno schema di pull-out singolo o doppio in cui l'elemento rinforzato è soggetto a compressione (Aiello e Sciolti 2006).

Più rare in letteratura sono invece prove di delaminazione con compositi a matrice cementizia, che vengono brevemente riassunte di seguito per poi confrontare i risultati con quelli ottenuti nella presente sperimentazione. Il comportamento di compositi SRG è affrontato in (Castori 2006) attraverso prove di delaminazione su sedici provini costituiti da nastri di fibre di acciaio adesi a supporti in calcestruzzo. Il setup di prova impiegato fornisce la tensione di trazione massima per delaminazione.

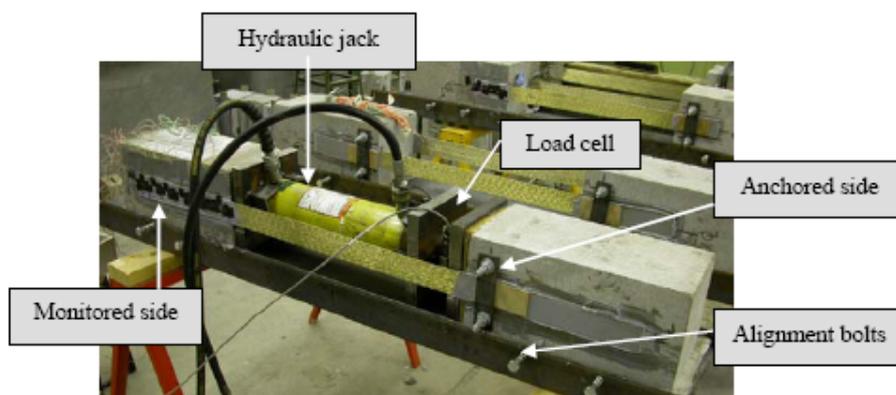


Figura 3.1 prove di pull out di SRG su blocchi di calcestruzzo (Matana et al. 2005)



Figura 3.2 prove di pull out di SRG su muratura (Cancelli et al. 2007)

Altre prove sperimentali con compositi SRG e SRP sono state eseguite in diretta collaborazione con la HardWire LLC, casa produttrice del composito (Matana et al. 2005). La sperimentazione consiste in prove di pull-out su blocchi di calcestruzzo rinforzati delle dimensioni di 191 x 191 x 394 mm. L'assetto di prova comprende due blocchi di calcestruzzo allineati, con due strisce di rinforzo incollate alle due superfici laterali, mentre l'azione è trasmessa da un martinetto idraulico posizionato in mezzo ai due blocchi; la prova consiste in una unica rampa di carico in cui il martinetto imprime ai due blocchi una forza crescente che mette in tensione le strisce di rinforzo fino alla rottura. La figura 3.1 mostra un provino pronto per la prova. Il setup scelto, simmetrico grazie

all'impiego di due strisce di rinforzo, fornisce risultati non alterati dalle rotazioni relative tra i due blocchi. Un setup analogo è stato adottato per la presente sperimentazione e definito in seguito come setup B. Nel lavoro citato, viene bloccata meccanicamente al supporto uno dei lati della striscia, in modo da forzare la delaminazione nell'unica estremità libera, dove è applicata la strumentazione di controllo.

In (Cancelli et al.2007) sono presentate prove di delaminazione di lamine in SRG/SRP su supporti murari. Il campione è realizzato con cinque filari di mattoni e ha dimensioni di 100 x 200 x 300 mm. Il setup impiegato prevede un'unica striscia di rinforzo che gira su ambedue le facce, la cui parte non adesiva è sollecitata a trazione per mezzo di una sede a profilo curvilineo. Un setup analogo è stato adottato anche nella presente sperimentazione per una parte delle prove ed è definito nel seguito come setup A.

Il tipo di rinforzo sperimentato generalmente per i provini adesi con malta cementizia è il trefolo 3SX nella densità 12 fili/pollice, lo stesso scelto per le prove del presente lavoro. Le matrici generalmente utilizzate nelle sperimentazioni sono malte ad elevata resistenza addizionate con fibre polimeriche come la SikaTop 121 Plus o la Mapefinish 304. Le caratteristiche meccaniche sono molto simili al prodotto impiegato nella nostra campagna di prove. Le lunghezze di ancoraggio e le larghezze del rinforzo sperimentate sono rispettivamente: 102 mm 203 mm e 305 mm per 51 mm in (Matana et al. 2005) e 200 mm per 75 mm in (Cancelli et al.2007). È usuale lasciare una zona iniziale più o meno lunga non incollata per ridurre gli effetti di bordo.

Prove di delaminazione con compositi CFRCM sono state presentate in (Briccoli Bati et al. 2004) su supporti in laterizio rinforzati con GFRCM e confrontate con prove analoghe su laterizi rinforzati con CFRCM. I campioni sono costituiti da due mezzi mattoni uniti tramite placcaggi con 3 larghezze: 80,100 e 120 mm. La rete in fibra di vetro è un prodotto commerciale costituito da fibre ortogonali a maglie larghe. La densità del tessuto è più fitta rispetto a quella in carbonio, il modulo elastico è di 87 GPA la resistenza di 0.9 KN/cm (valore nominale). La malta impiegata è semplicemente cemento con sabbia senza l'aggiunta di microfibre, la resistenza a compressione è analoga a quella della malta Ruredil, mentre la resistenza a flessione è di poco inferiore.

In (Di Tommaso et al.2008) sono presentate prove di delaminazione mediante trazione diretta su blocchi di calcestruzzo rinforzati con un composito di fibre in PBO poliparafenilenbenzobisoxazolo, un polimero di sintesi studiato per

applicazioni con matrice cementizia. Tuttavia il collasso avviene per sfilamento delle fibre all'interno della matrice, e pertanto gli autori determinano la resistenza alla delaminazione considerando come interfaccia di delaminazione quella tra fibre e matrice.

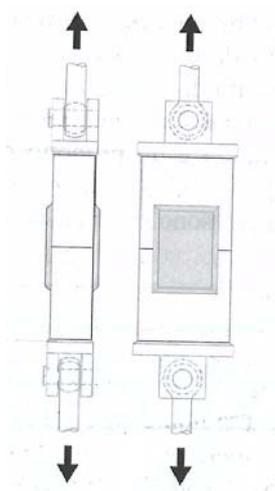


Figura 3.3 prove per trazione diretta di GFRCM su mattone (Briccoli Bati 2004)

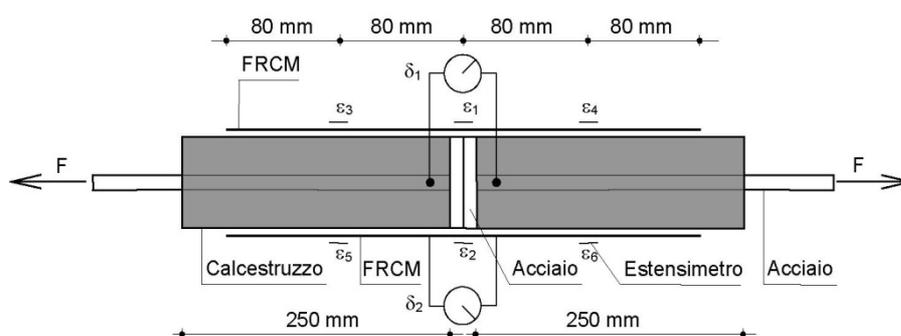


Figura 3.4 prove di pull out di PBO-CFRCM su calcestruzzo (Di Tommaso et al. 2008)

Matrice e tessuto in carbonio uguali alla presente sperimentazione sono stati sottoposti a sperimentazione in (Faella et al. 2009). Le prove di tipo pull-out simmetrico sono eseguite su campioni in muratura in pietra e in mattoni. I campioni sono costituiti da pile di elementi sovrapposti analoghi ai campioni in

muratura proposti nella presente campagna sperimentale. Lo stesso materiale di rinforzo è anche sperimentato in (Focacci Mantegazza 2009) con setup di prova e campioni in muratura di mattoni simili. In (Garmendia 2009) sono state presentate prove di delaminazione su rinforzi in fibre di basalto applicate con matrici inorganiche BTRM.



Figura 3.5 prove di pull out di CFRCM su muratura (Faella et al. 2009)

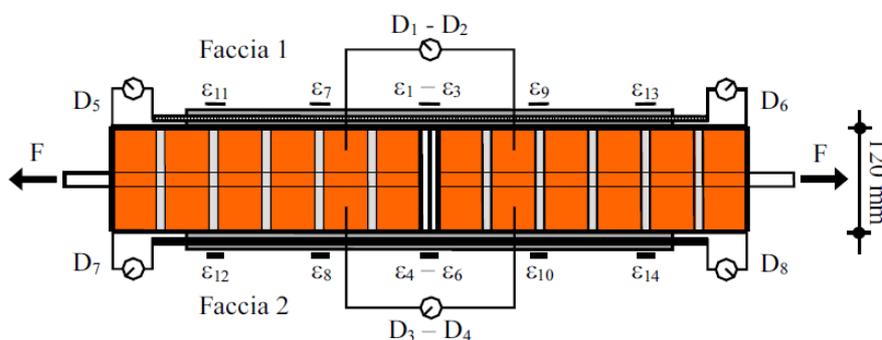


Figura 3.6 prove di pull out di CFRCM su muratura (Focacci Mantegazza 2009)

L'indagine sperimentale oggetto di questa tesi è volta allo studio del fenomeno della delaminazione su laterizi e muratura di laterizi, al fine di rilevare l'influenza delle discontinuità indotte dai giunti di malta nel comportamento complessivo. La sperimentazione permette di ricavare il carico di delaminazione in funzione dello scorrimento globale, la lunghezza efficace di ancoraggio e il legame di interfaccia per le diverse combinazioni supporto rinforzo. Le prove sono condotte su supporti piani e curvi in modo da misurare il decadimento della resistenza alla delaminazione per effetto delle tensioni di trazione indotte dalla curvatura. Nel paragrafo 3.1 sono descritte le prove preliminari che hanno

portato alla scelta della geometria dei campioni e dei setup di prova e, successivamente, sono presentate le diverse tipologie di campione sottoposte a prova sperimentale. La strumentazione di acquisizione è descritta nel dettaglio nel paragrafo 3.2 e le proprietà dei materiali utilizzate nel paragrafo 3.3. L'intero programma sperimentale è presentato nel paragrafo 3.4

3.1 Assetto di prova e geometria dei campioni

Per le prove su supporto omogeneo (laterizio) si è scelta una configurazione a due mattoni disposti parallelamente e bloccati tra loro. Il rinforzo è realizzato con due applicazioni costituite da un'unica striscia di fibra conformata ad "U" e applicata con la malta sulle facce esterne di ciascuno dei due mattoni ai due lati opposti del campione. Le tensioni tangenziali sono trasmesse per mezzo di un supporto metallico curvo, di larghezza pari a quella del campione, intorno al quale è disposto il tratto libero del rinforzo, mentre il campione è trattenuto da una piastra di contrasto saldata ad un tirante collocato tra i due laterizi. Questo assetto di prova è definito setup A.

Alcuni test sono stati condotti con ancoraggio di lunghezza superiore a quella della faccia del mattone disponendo quattro mattoni invece di due secondo la stessa configurazione descritta sopra. Per limitare la discontinuità nella superficie di incollaggio le teste dei laterizi in battuta sono state ben levigate e pareggiate.

Il setup descritto ha fornito buoni risultati per i rinforzi in SRG, mentre nelle prove preliminari realizzate con rinforzi in CFRCM si è riscontrata la nascita di tensioni non uniformi sul rinforzo con la conseguente tendenza della fibra a sfilacciarsi e lacerarsi all'interno della matrice e successivamente a scorrere entro la matrice stessa. Tale disuniformità di sollecitazione dipendeva anche dalla presenza di più (tre) strati di rinforzo; in alcune prove, peraltro, si è raggiunto il collasso della fibra libera. Al fine di limitare la disuniformità di tensione nel rinforzo è stato studiato un secondo setup definito come tipo B, in cui la tensione tangenziale è trasmessa indirettamente al rinforzo per allontanamento delle due parti del provino. Questi ultimi sono realizzati con due lamine di rinforzo applicate tra le due parti del provino sulle facce esterne; il carico è trasmesso attraverso due piastre di acciaio inserite tra le due parti del provino e saldate a barre in acciaio le cui estremità sono bloccate nelle morse

della macchina universale. Mettendo in trazione le barre le piastre allontanano le due metà del provino trasferendo la sollecitazione alle lamine di rinforzo.



Figura 3.7 prova preliminare con CFRCM in due strati di tessuto su mattone: collasso della fibra.

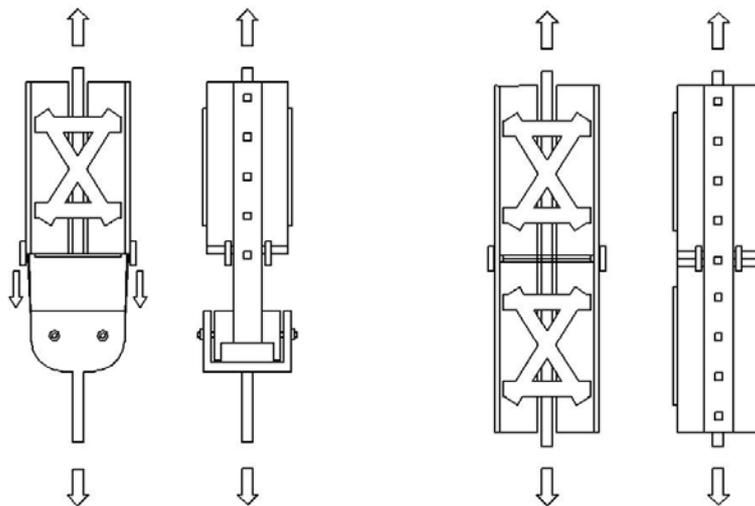


Figura 3.8 schematizzazione dei setup A (sinistra) e B (destra)

I campioni in muratura sono stati realizzati con i medesimi setup di prova precedentemente descritti. I provini sono composti da 5 mattoni con interposti giunti di malta dello spessore di circa 10 mm. I mattoni vengono preventivamente forati al centro per alloggiare la barra in acciaio saldata alla

piastra di contrasto. Il rinforzo è costituito da un'unica lamina adesa sulle due facce (setup A) o da due lamine (setup B). In quest'ultimo il provino si compone di due elementi affiancati con al centro interposte le piastre in acciaio.

Per realizzare le prove su supporto curvilineo si è utilizzata quest'ultima configurazione in cui, i campioni composti da 10 mattoni, vengono assemblati con laterizi preventivamente lavorati sulle superfici esterne per ottenere il profilo curvilineo voluto.

Per rendere efficace l'azione delle piastre di contrasto, le facce dei mattoni a contatto con le piastre sono state levigate e spianate e, nei campioni in muratura, è stato interposto uno strato di malta di allettamento.



Figura 3.9 accorgimenti costruttivi

L'applicazione del rinforzo richiede alcune accortezze. La matrice viene preparata con il quantitativo di acqua previsto dalle schede tecniche, mentre il supporto deve essere preventivamente immerso nell'acqua; la fibra viene applicata nella configurazione voluta e, solo dopo, applicato lo strato di malta sulla superficie di ancoraggio. La malta che fuoriesce dalle maglie del tessuto deve essere regolarizzata in modo da realizzare un'adeguata copertura delle fibre. Il campione viene fatto stagionare per un periodo di 28 giorni tenendolo per i primi tre giorni in condizioni ambientali con un elevato tasso di umidità.

Le principali tipologie dei campioni realizzate sono illustrate nelle figure seguenti. I campioni in laterizio sono denominati tipo A, B, D, E a seconda della lunghezza di ancoraggio. I campioni con due mattoni intestati per ottenere una lunghezza di ancoraggio maggiore della lunghezza del mattone sono denominati

tipo L. I provini in muratura sono denominati tipo F e quelli in muratura curva tipo C. Per distinguere la fibra di rinforzo viene anteposta la lettera S o C per fibre in acciaio o in carbonio, rispettivamente. Il tipo di setup è invece contraddistinto posponendo la lettera "u" nei campioni con setup di tipo A.

I quattro raggi di curvatura con cui sono realizzati i campioni in muratura curva sono contraddistinti dalle lettere a,b,c,d nell'ordine di curvatura crescente e precisamente raggio di curvatura $R=5000$ mm (tipo a), $R=2650$ mm (tipo b), $R=1800$ mm (tipo c), $R=1300$ mm (tipo d).

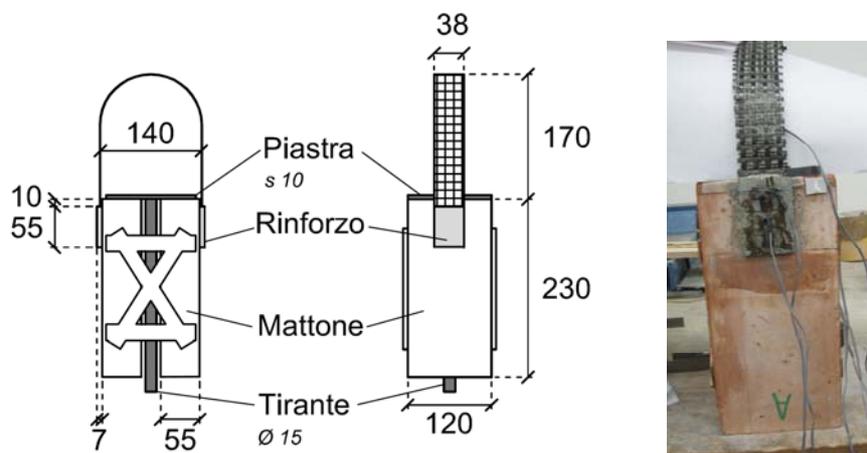


Figura 3.10 campioni A con setup A

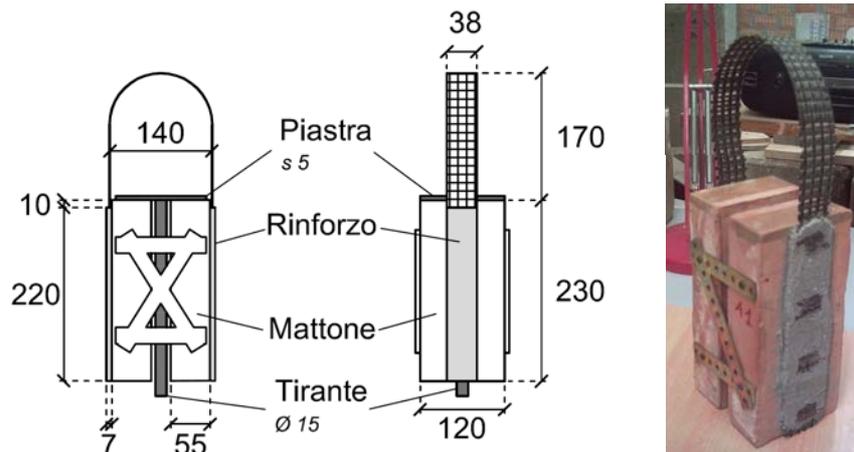


Figura 3.11 campioni D con setup A

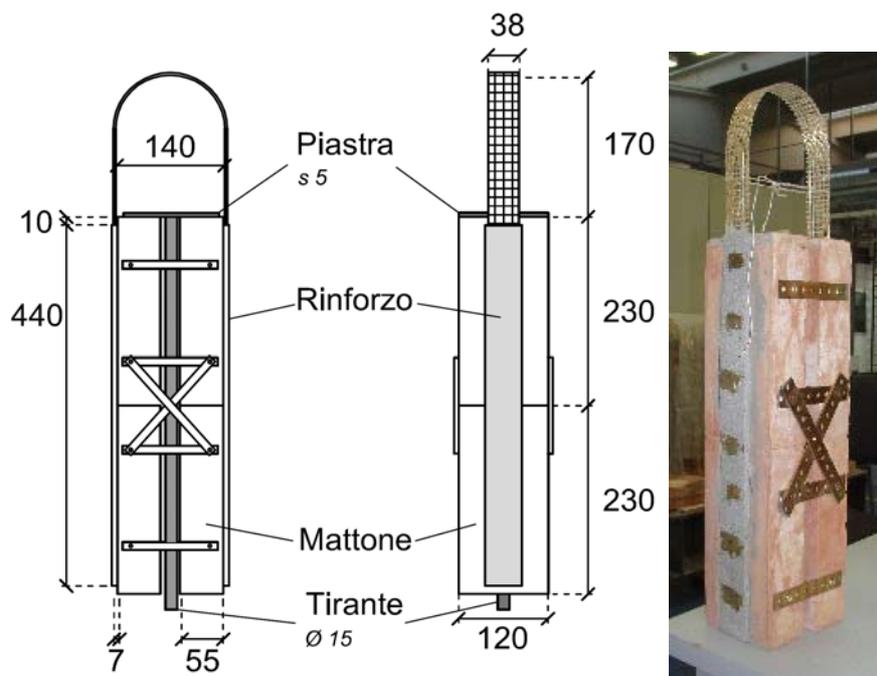


Figura 3.12 campioni tipo L con setup A e lunghezza di ancoraggio 440 mm

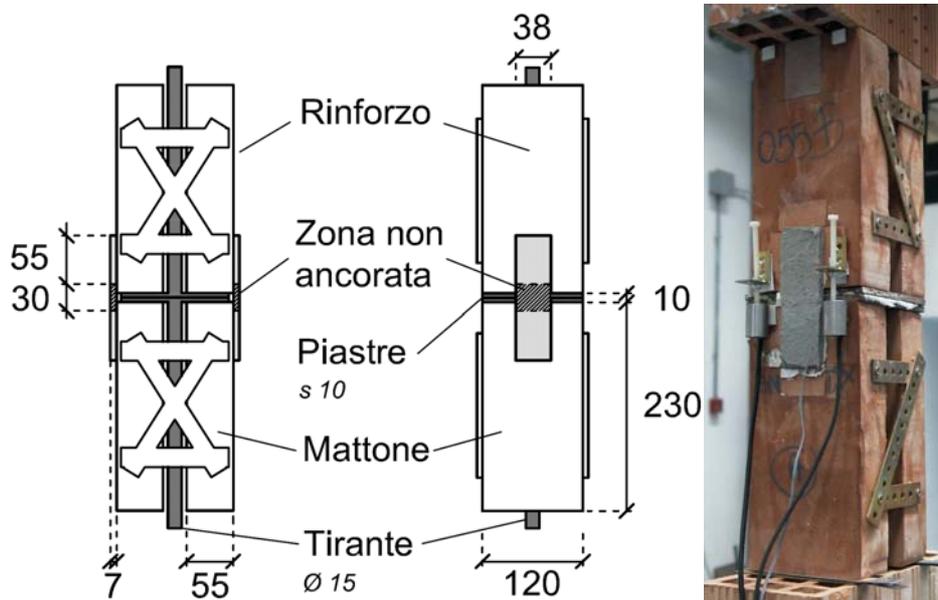


Figura 3.13 campioni tipo A con setup B

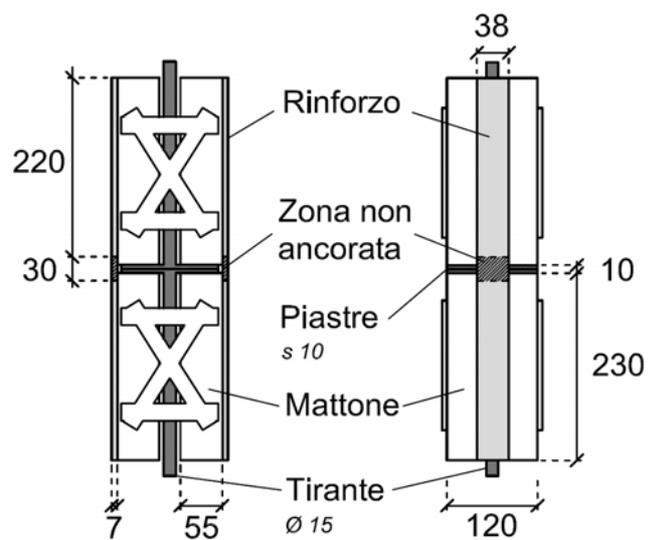


Figura 3.16 campioni tipo E con setup B

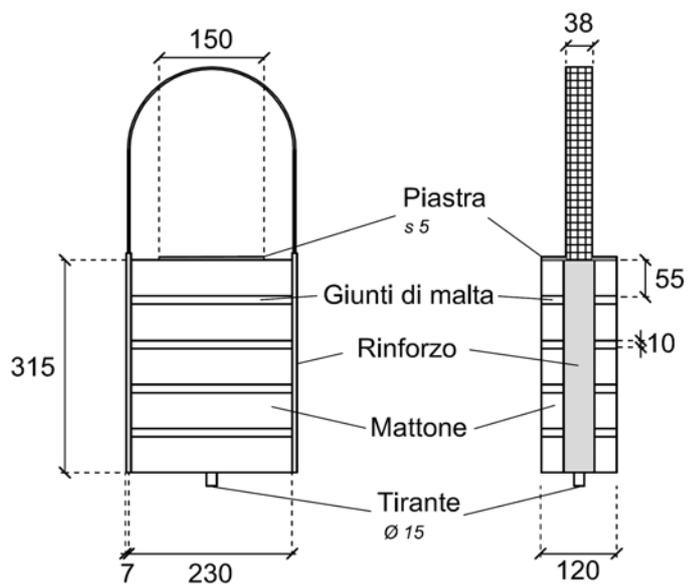


Figura 3.17 campioni tipo F con setup A e lunghezza di ancoraggio 315 mm

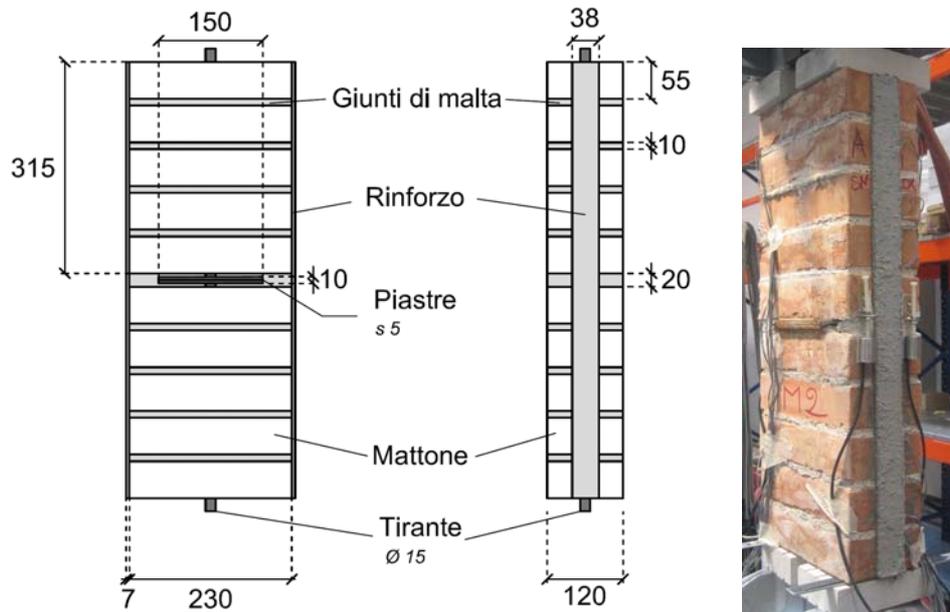


Figura 3.18 campioni tipo F con setup B e lunghezza di ancoraggio 315 mm

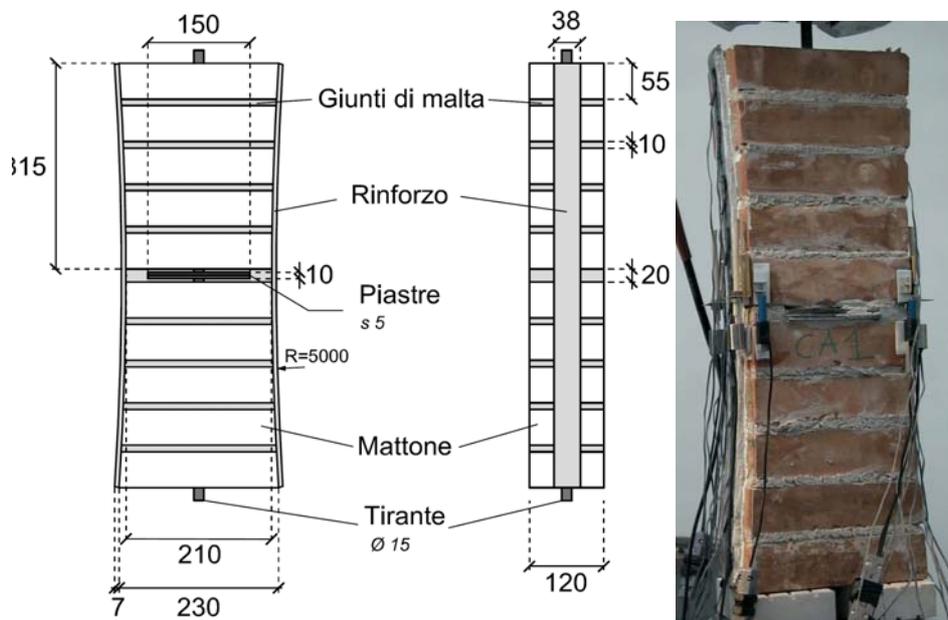


Figura 3.19 campioni tipo Ca con setup B

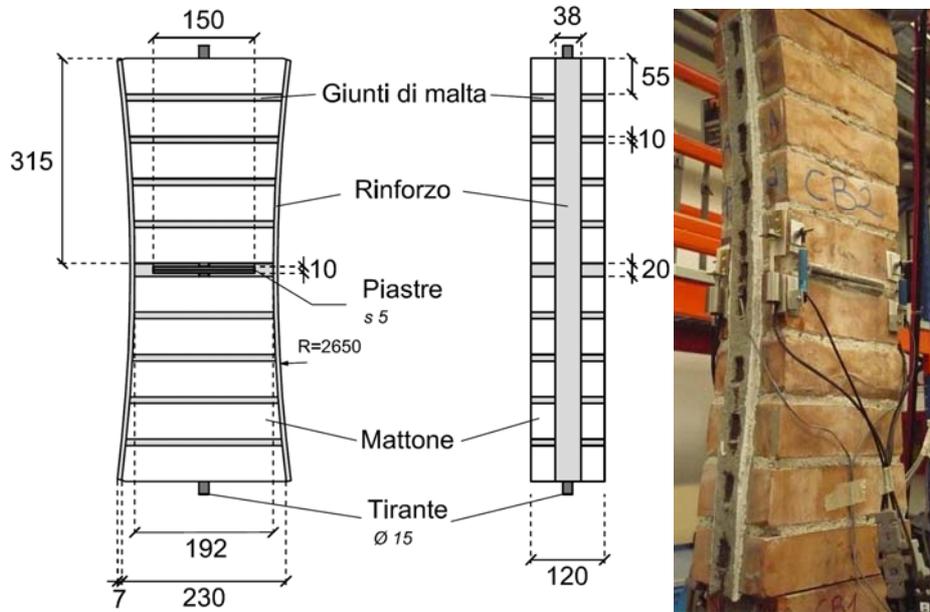


Figura 3.20 campioni tipo Cb con setup B

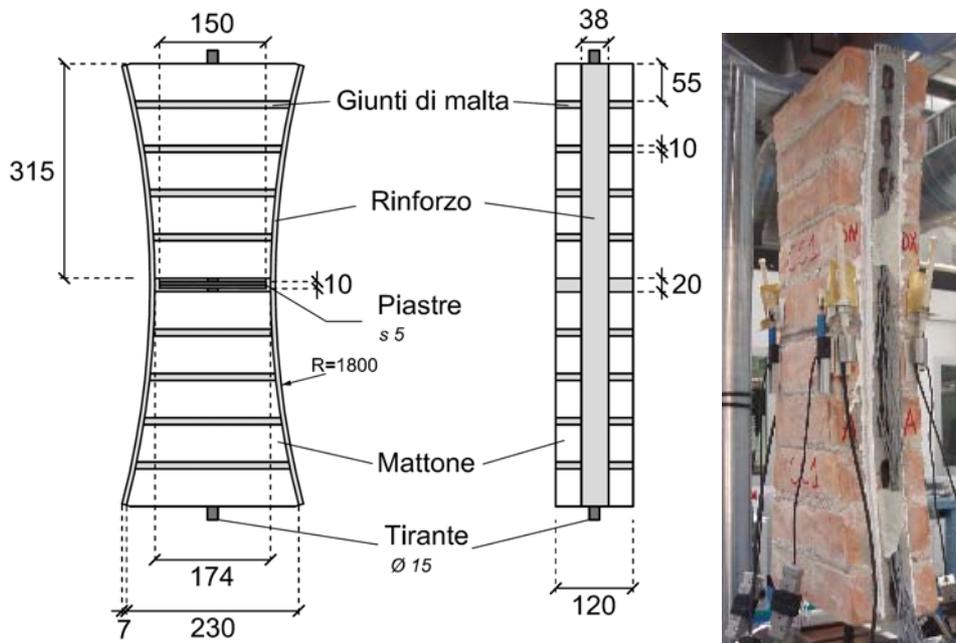


Figura 3.21 campioni Cc con setup B

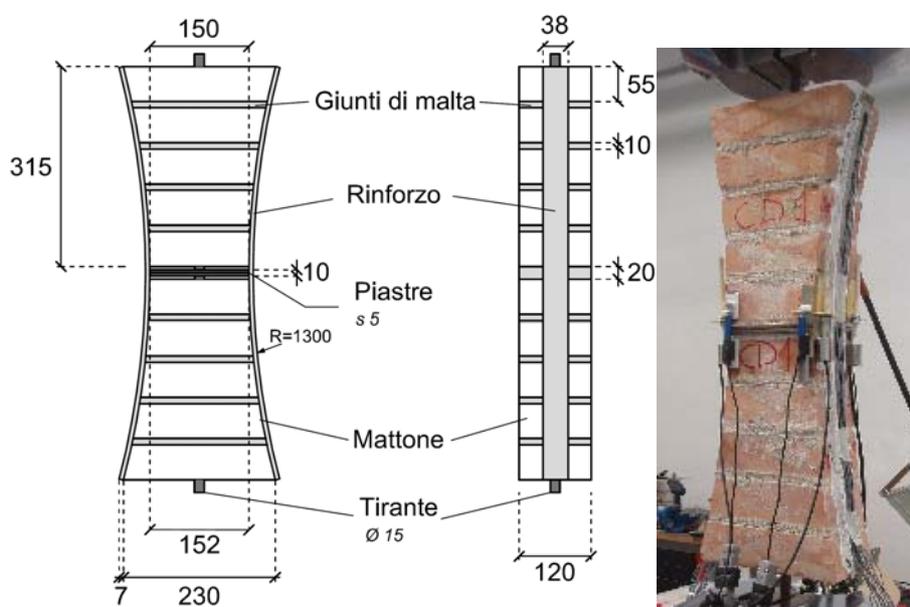


Figura 3.22 campioni tipo Cd con setup B

3.2 Strumentazione di acquisizione

Le prove sono eseguite con la macchina universale MTS. La velocità di carico è costante pari a 0,01 mm/s. Sono state effettuate prove con velocità di 0,005 mm/s e 0,05 mm/s, dalle quali si rileva che velocità di prova più elevate possono portare ad una sovrastima del carico di delaminazione, mentre velocità inferiori non comportano significative variazioni dell'esito della prova.

In entrambi i setup descritti nel paragrafo precedente, la forza viene registrata direttamente dal sistema di controllo della macchina MTS che fornisce il valore la forza totale trasmessa alle fibre del tessuto nelle due facce di ciascun campione.

La misura degli scorrimenti viene ottenuta da 4 trasduttori in spostamento induttivo LVDT con corsa pari a 2,5 mm collocati ai due lati della larghezza del rinforzo su entrambe le facce. Per registrare spostamenti maggiori, al fianco di ogni LVDT è collocato un traduttore di spostamento potenziometrico con corsa 10 mm.

Le deformazioni della fibra lungo il rinforzo adesivo sono misurate da una serie di strain-gauges da 10 mm posizionati ad intervalli regolari. Gli strain-gauges sono collocati all'interno del rinforzo direttamente sulla fibra, interponendo, nel caso

dell'acciaio, un sottile strato di resina per regolarizzare la superficie di incollaggio; le dimensioni sono tali che può essere incollato solo su una fascia nel caso del Carbonio e su alcuni trefoli nel caso dell'acciaio.



Figura 3.23 macchina universale MTS (sinistra), centralina di acquisizione dati National instruments (destra)



Figura 3.24 traduttore di spostamento potenziometrico (sinistra) e induttivo (centro), strain-gauge 10mm (destra)

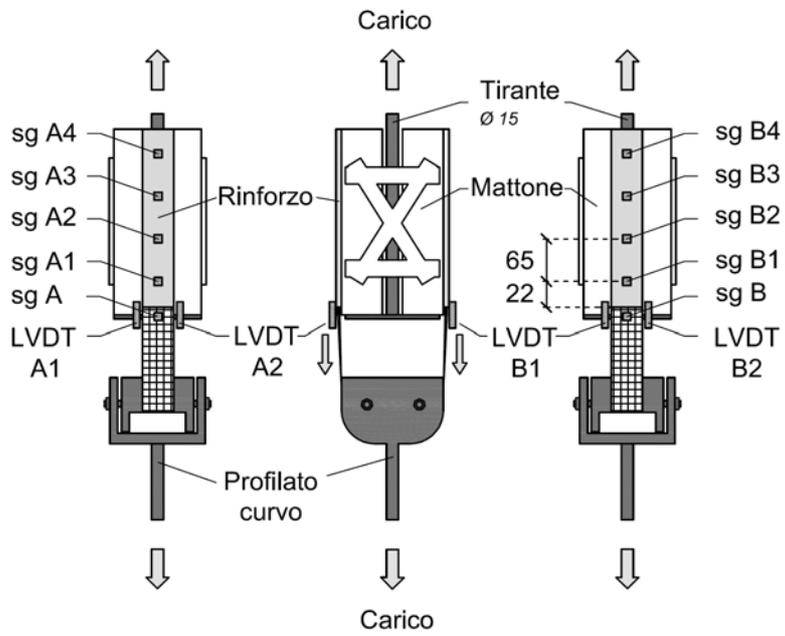


Figura 3.25 setup A

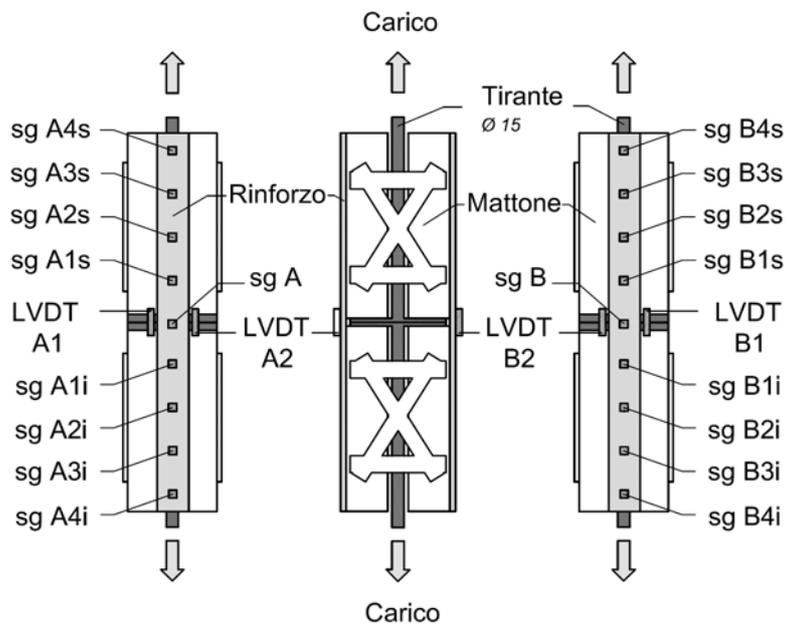


Figura 3.26 setup B

Il passo a cui sono posti gli strain-gauges è pari a 27.5 mm nelle applicazioni su supporto omogeneo in laterizio e di 65 mm nelle applicazioni su muratura. Quest'ultimo è determinato in modo che lo strain-gauge sia collocato al centro del laterizio, mentre, nei campioni a supporto omogeneo è stato adottato un passo pari alla metà, escludendo il giunto di malta. I dati dei sensori sono acquisiti attraverso la centralina Multifunction Data Acquisition (DAQ) system della National Instruments e rielaborati per mezzo di un software specifico scritto in LabView.



Figura 3.27 dettaglio dell'applicazione degli strain-gauges

Si deve rilevare che, nonostante la simmetria della prova, il carico non si ripartisce esattamente a metà sulle due facce del provino, a causa delle inevitabili imperfezioni geometriche e meccaniche dell'apparato di prova. La ripartizione del carico agente sulle due facce del provino è determinata dalle letture della deformazione sulla fibra libera dei rinforzi dove sono applicati degli strain-gauges. La ripartizione che ne risulta è poi verificata attraverso il confronto del processo di delaminazione che si sviluppa sulle due facce del provino.

3.3 Caratteristiche dei materiali

La scelta dei laterizi impiegati per le prove è ricaduta su elementi pieni di dimensioni nominali UNI 55 x 120 x 230 mm le cui caratteristiche meccaniche sono riassunte in tabella 3.1. La malta di allettamento è a base di calce idraulica

naturale, in modo da rappresentare una malta storica, con modeste proprietà meccaniche, analoga a quella che si può rilevare sulle murature esistenti che richiedono rinforzi strutturali. Sulla base delle prove effettuate, la resistenza a compressione e flessione della malta è riportata in tabella 3.1. Per l'incollaggio del rinforzo è stata impiegata una malta cementizia addizionata con fibre polimeriche sintetiche, le cui caratteristiche meccaniche sono state precedentemente esposte.

	Resistenza a compressione [MPa]	Resistenza a flessione [MPa]	Modulo Elastico [MPa]
Malta muratura	2,31	0,84	476,35
Mattoni	55	-	16000

Tabella 3.1 caratteristiche meccaniche dei componenti del supporto murario



Figura 3.28 dettaglio del trefolo 3SX

Per quanto riguarda il rinforzo SRG, sono stati impiegati trefoli 3SX con finitura superficiale in ottone, densità pari a 12 trefoli per pollice. Come precedentemente descritto, il tessuto è costituito da 3 fili avvolti intorno ad un asse comune, più un quarto filo a sezione inferiore, avvolto intorno a questi controverso e con passo maggiore. Questo ultimo filo non fornisce alcun contributo in termini di resistenza, ma migliora l'aderenza con la matrice. La scelta è stata operata a seguito di alcune prove con tessuto a densità inferiore (4 trefoli per pollice) che hanno manifestato una crisi per superamento della resistenza a trazione dei trefoli, prima dell'insorgere del fenomeno di delaminazione.

Per quanto riguarda il tessuto in carbonio, una singola striscia di tessuto ha una resistenza di circa 3,5KN e pertanto anche a seguito dei risultati di prove preliminari con setup A si è scelto di sovrapporre 3 strisce di tessuto per evitare la modalità di crisi per lacerazione e sfilacciamento delle fibre all'interno della matrice.



Figura 3.29 prova preliminare con rinforzo 3SX-4 su mattone: collasso della fibra

3.4 Programma sperimentale.

Il programma sperimentale comprende:

- 19 prove su supporto in laterizio omogeneo realizzate con i due differenti rinforzi e con cinque diverse lunghezze di ancoraggio. Per il SRG sono state indagate lunghezze di ancoraggio pari a 55 mm (l'altezza di un singolo mattone), 220 mm, pari alla lunghezza del mattone, e 440 mm, affiancando due mattoni per investigare l'intero processo di delaminazione. Per il CFRCM sono state indagate quattro diverse lunghezze: 55 mm, 110 mm, 165 mm, e 220 mm. Per ciascuna tipologia sono state realizzate 2 o 3 prove.
- 12 prove su campioni in muratura con supporto rettilineo;
- 16 prove su campioni in muratura con supporto curvo, aventi raggi di curvatura pari a 5000 mm, 2650 mm, 1800 mm e 1300 mm. Le prove con supporto curvilineo sono state eseguite con il setup B.

Nei campioni in muratura, la lunghezza di ancoraggio è stata mantenuta costante pari a 310 mm (cinque filari di mattoni) e per ogni tipologia sono state condotte generalmente 2 o 3 prove. Alcune delle prove sono state ripetute con ambedue i setup per verificarne l'attendibilità dei risultati.

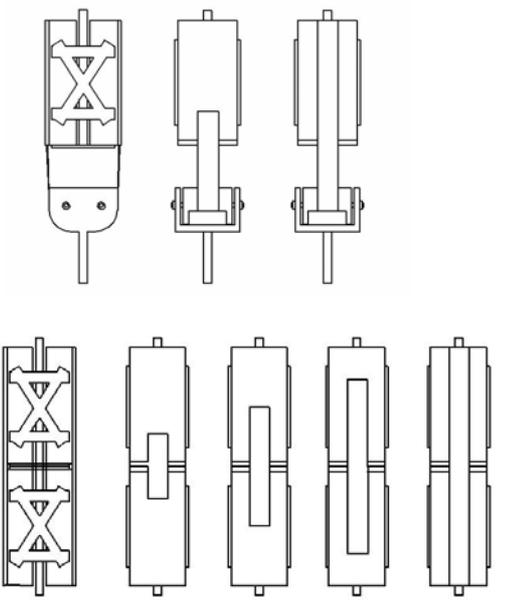
	SRG		CFRCM	
	Setup	N test	Setup	N test
Lunghezza di Ancoraggio [mm]				
55	A	3	B	2
110	-	-	B	2
165	-	-	B	2
220	A	6	B	2
440	A	2	-	-

Tabella 3.2 programma sperimentale di delaminazione su laterizio

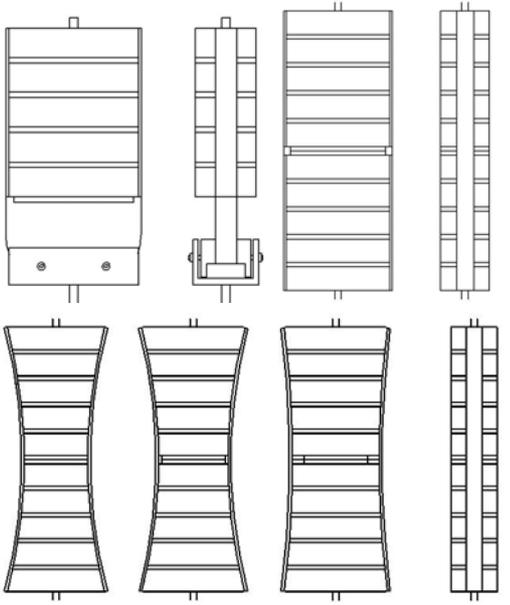
	Rettilinei	SRG		CFRCM	
	Lunghezza di ancoraggio	Setup	N test	Setup	N test
310	A	6	A	2	
310	B	2	B	2	
Curvi	SRG		CFRCM		
R	Setup	N test	Setup	N test	
1300	B	2	-	-	
1800	B	2	B	3	
2650	B	3	B	3	
5000	B	3	-	-	

Tabella 3.3 programma sperimentale di delaminazione su muratura

4. Risultati sperimentali: modalità di delaminazione

Questo capitolo è dedicato alla descrizione delle modalità di collasso ottenute nella campagna di prove sperimentali eseguite. Si tratta di uno degli aspetti che riveste una certa importanza nella comprensione e nella modellazione del fenomeno.

Come è noto, la rottura per delaminazione nei compositi con matrice polimerica si manifesta generalmente con l'asportazione di una parte superficiale del supporto in un meccanismo denominato "peeling", da cui discende il ruolo di primo piano giocato dalle caratteristiche meccaniche del supporto, poiché la tensione di aderenza massima risulta, con buona approssimazione, linearmente proporzionale alla resistenza a trazione del supporto, e l'energia di frattura, linearmente proporzionale alla radice quadrata della resistenza a trazione dello stesso supporto.

Nel caso di compositi con matrice cementizia, come si vedrà nel prosieguo, si incontrano modalità di delaminazione differenti, che dipendono della lunghezza di ancoraggio e della combinazione rinforzo-supporto ma che per lo più non coinvolgono il supporto, ma piuttosto la matrice stessa. Ecco, sinteticamente, le modalità di crisi riscontrate.

4.1 Descrizione delle modalità di crisi

Dall'osservazione della modalità di crisi riscontrate nelle prove sperimentali, si verificano diverse tipologie di collasso spesso in maniera combinata.

Il collasso può avvenire: per rottura a trazione della fibra (modalità A); per rottura all'interno del supporto nello spessore immediatamente prossimo all'incollaggio (modalità B); per delaminazione nell'interfaccia supporto-rinforzo (modalità C); per delaminazione all'interno della matrice nell'interfaccia malta-tessuto (modalità D); per sfilamento delle fibre all'interno della (modalità E). Nel seguito, per ciascuno dei supporti e dei rinforzi impiegati, si descrivono le modalità di crisi riscontrate.

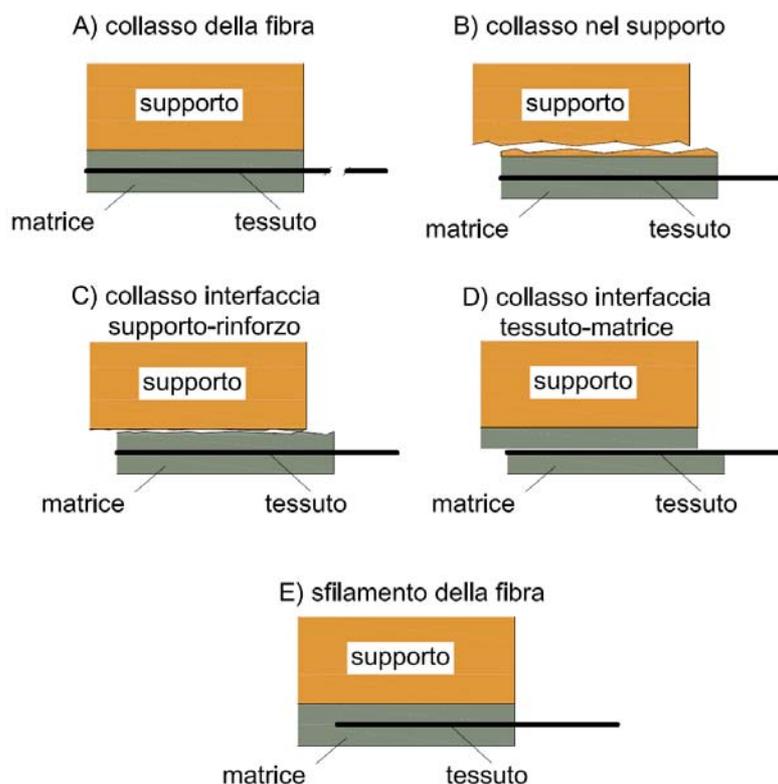


Figura 4.1 modalità di collasso riscontrate

4.2 SRG

La maggior parte delle prove su SRG è stata eseguita con il setup A. Al procedere della prova si verifica inizialmente un adattamento del rinforzo sul profilo sagomato curvo in acciaio, fino alla perfetta aderenza. I primi segnali di danneggiamento consistono in una fessurazione verticale nello spessore della matrice in prossimità dell'applicazione del carico. La superficie superiore del rinforzo non è ancora fessurata. All'aumentare del carico, le fessure tendono ad unirsi in un'unica fessura longitudinale che si propaga dall'estremità caricata lungo l'ancoraggio. Questa fase è difficilmente osservabile nei provini in laterizio con lunghezze di ancoraggio 55 mm, per la subitanea rottura. Viceversa, le prove con ancoraggio 440 mm mostrano chiaramente che, una volta raggiunto il carico massimo, parte del rinforzo che si era progressivamente

fessurato si distacca completamente da supporto, la delaminazione progredisce quindi a carico pressoché costante finché l'ancoraggio residuo non consente più la trasmissione del carico di delaminazione e si verifica il distacco completo.

Nei provini in laterizio con lunghezza di ancoraggio maggiore, si può osservare il procedere della fessura lungo il rinforzo, ma la delaminazione si manifesta comunque con la rottura fragile, e distacco istantaneo del rinforzo dal supporto. In generale la delaminazione si verifica nel piano individuato dalle fibre d'acciaio (modalità D), in cui l'area resistente a taglio della matrice risulta inferiore, anche a causa della presenza della rete plastica cui sono incollate le stesse fibre

Viceversa, nei provini con ancoraggio corto (55 mm) si verifica la rottura nell'interfaccia tra matrice e mattone (tipo C). Il fatto che lunghezze di ancoraggio inferiori comportano una rottura che coinvolge uno strato del supporto più spesso trova conferma in precedenti studi sperimentali su supporti in calcestruzzo dove per ancoraggi corti si verifica l'estrazione di alcuni inerti dalla matrice cementizia (ripping).



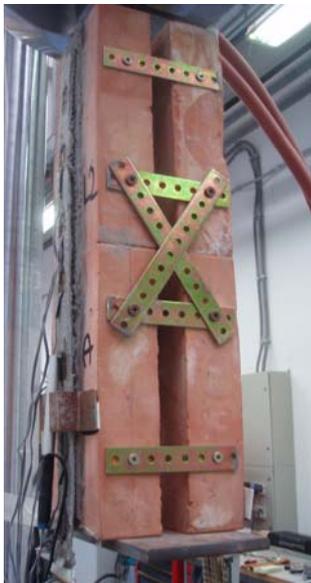
Figura 4.2 delaminazione C) per ancoraggi di 55 mm e D) per ancoraggi 220 mm tra mattone e SRG



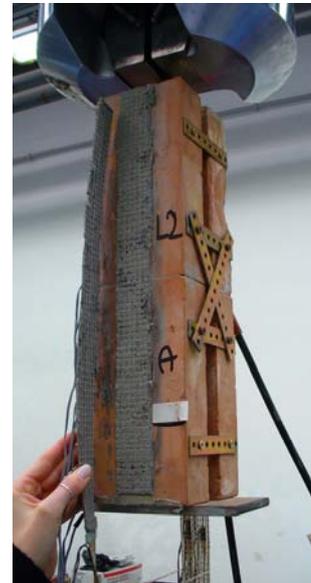
Si osserva una fessura verticale nello spessore del rinforzo a partire da un carico di 9 KN in entrambe le facce



All'aumentare del carico la fessura si allunga nel rinforzo



Per un carico di 11 KN, nella faccia A, la fessura coinvolge improvvisamente tutto il rinforzo comportando una brusca caduta di carico



Segue rapidamente il collasso

Figura 4.3 modalità di delaminazione D) per ancoraggi 440mm tra mattone e SRG



Figura 4.4 delaminazione mista C) D) tra muratura e SRG

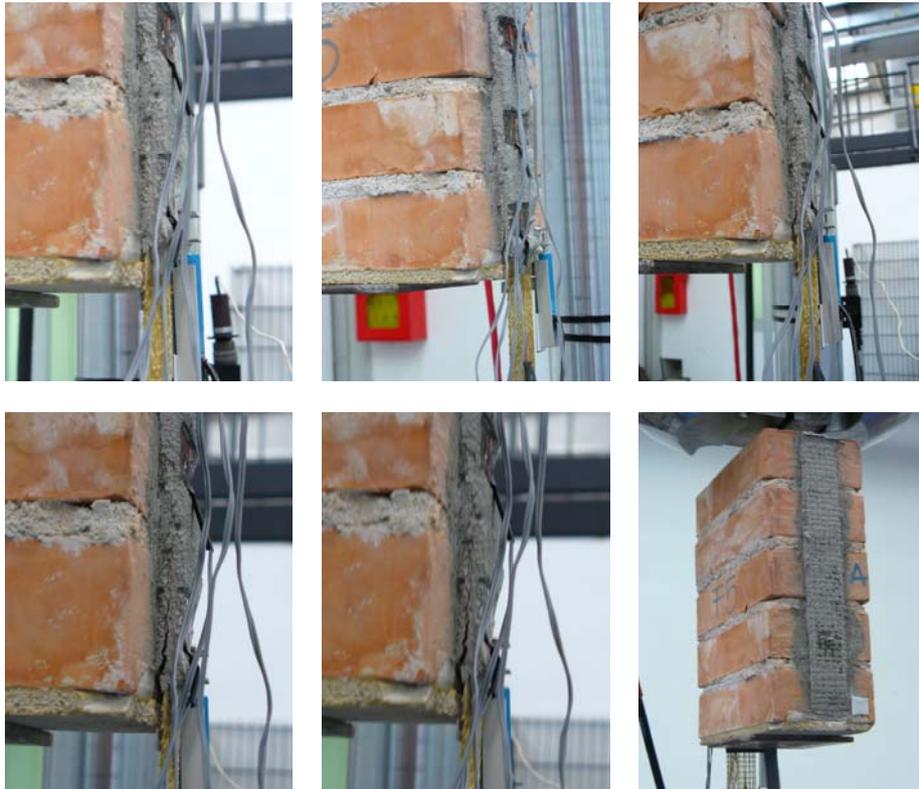


Figura 4.5 delaminazione D) tra muratura e SRG: si osserva la formazione di una fessura nello spessore del rinforzo che progressivamente raggiunge il primo giunto di malta, segue improvvisamente il collasso

Nelle prove su supporto in muratura si osserva una delaminazione simile a quella precedentemente descritta e un collasso quasi sempre di tipo D che a volte si combina con il tipo C sul mattone più lontano dall'estremità caricata, anche per effetto dello spessore della matrice e quindi dell'eccentricità tra la risultante delle tensioni di trazione nella fibra e della reazione di taglio sulla superficie del supporto. Il momento flettente indotto da questa eccentricità comporta, nel tratto terminale del rinforzo, la nascita di tensioni normali di trazione che tendono a scollare la matrice dal supporto.

I provini in muratura documentano l'effetto del giunto di malta che rappresenta un elemento di discontinuità nella trasmissione delle tensioni tangenziali. Al crescere del carico la fessurazione progredisce nello spessore della matrice fino all'altezza corrispondente al giunto di malta più vicino e, una volta raggiunto, si innesca improvvisamente la delaminazione con il completo distacco del rinforzo. La presenza della curvatura modifica l'evolversi della prova: il rinforzo delamina progressivamente a tratti. Inizialmente si ha lo scollamento del tratto di rinforzo centrale con una conseguente perdita di carico dovuta al cambiamento della configurazione del rinforzo staccato; all'aumentare dell'allontanamento tra le parti di campione il rinforzo raggiunge nuovamente il carico di delaminazione e si ha lo scollamento di un ulteriore tratto. Tale comportamento si ripete alcune volte fino al completo distacco. In queste prove la superficie di delaminazione, inizialmente prossima alla fibra nel tratto di rinforzo vicino all'azione di carico (collasso tipo C), si sposta verso la superficie del supporto (collasso tipo D) per effetto della componente di trazione normale all'interfaccia che deriva dalla presenza della curvatura.

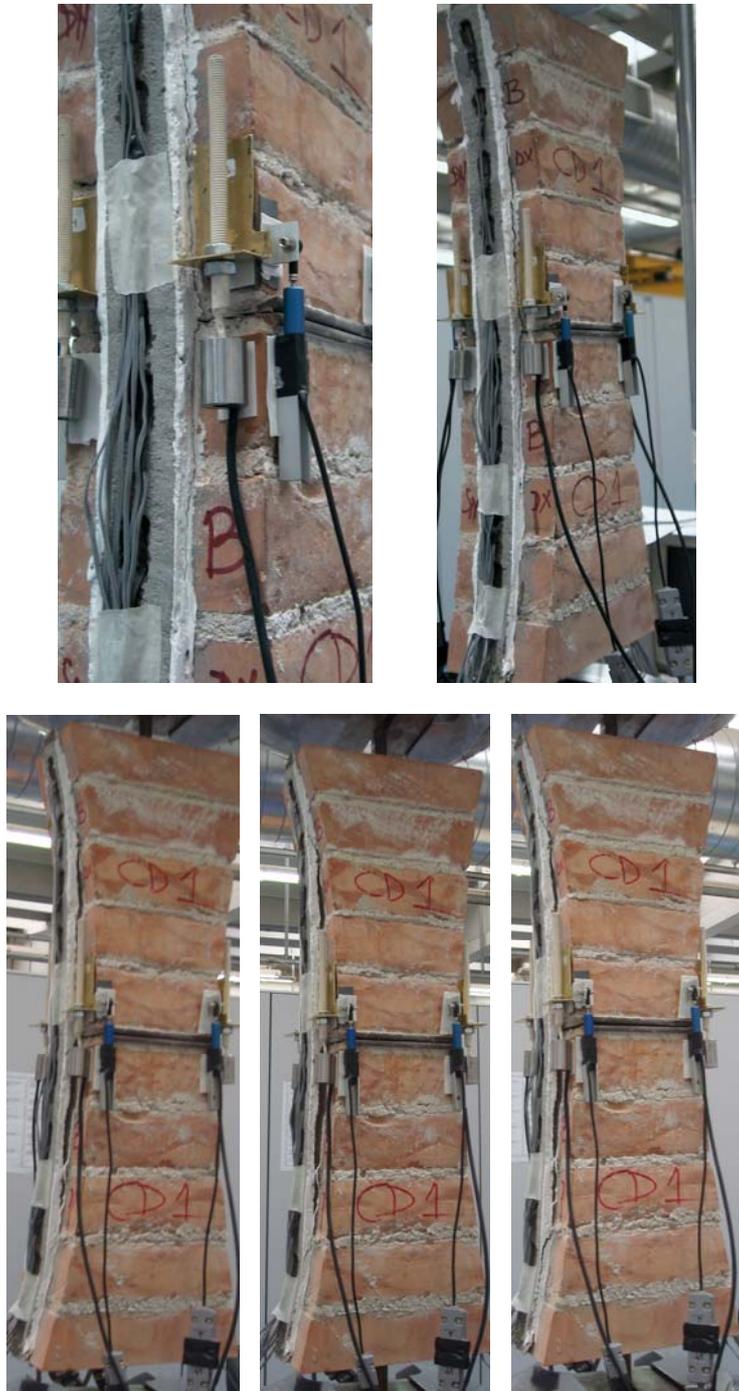


Figura 4.7 delaminazione mista C) D) tra SRG e muratura curva

4.3 CFRCM

I campioni con lunghezze di ancoraggio inferiori raggiungono la crisi per sfilamento delle fibre all'intero della matrice. Si ha la formazione di un'ampia fessura ortogonale rispetto alla direzione di carico nella matrice in prossimità della zona di applicazione del carico, al procedere della prova la fessura aumenta di dimensioni per effetto dello scorrimento delle fibre all'interno. (Modalità di collasso E)

Per lunghezze di ancoraggio maggiori si presentano modalità di collasso di tipo C e D combinate comunque allo sfilamento della fibra nella matrice (tipo E). Solo per lunghezze di ancoraggio di 220 mm, nonostante la formazione di alcune piccole fessure trasversali nel rinforzo, queste non si allargano al progredire della prova e la crisi si manifesta per delaminazione (tipo D).

Lo sfilamento delle fibre si osserva nuovamente, combinato con il collasso per delaminazione di tipo C o D, nelle prove effettuate sui campioni in muratura, pur essendo il rinforzo ancorato per una lunghezza superiore rispetto ai campioni a supporto omogeneo. I giunti di malta, ancora una volta rappresentano degli elementi di discontinuità. Infatti, durante la prova la fessurazione si propaga nello spessore del rinforzo a gradini da un giunto all'altro finché in corrispondenza di un giunto di malta si forma una fessura nella matrice ortogonale alla direzione di sollecitazione per effetto dello sfilamento delle fibre all'interno di essa. In alcuni casi il rinforzo rimane adeso sulla superficie del mattone più lontano dall'applicazione del carico e le fibre scivolano dall'interno della malta come nelle prove con ancoraggio 55 mm su supporto in laterizio.

Nei campioni curvi il comportamento durante la prova è simile a quello osservato negli analoghi campioni rinforzati con SRG. Il collasso è sempre di tipo C) e D) con l'interfaccia di delaminazione che si sposta dalla superficie adiacente la fibra verso il supporto. In alcuni campioni soprattutto in prossimità degli ultimi mattoni si osserva anche un collasso di tipo B).



Figura 4.8 delaminazione E) per ancoraggi 55 mm tra CFRCM e mattone



Figura 4.9 delaminazione E) per ancoraggi 110 mm tra CFRCM e mattone

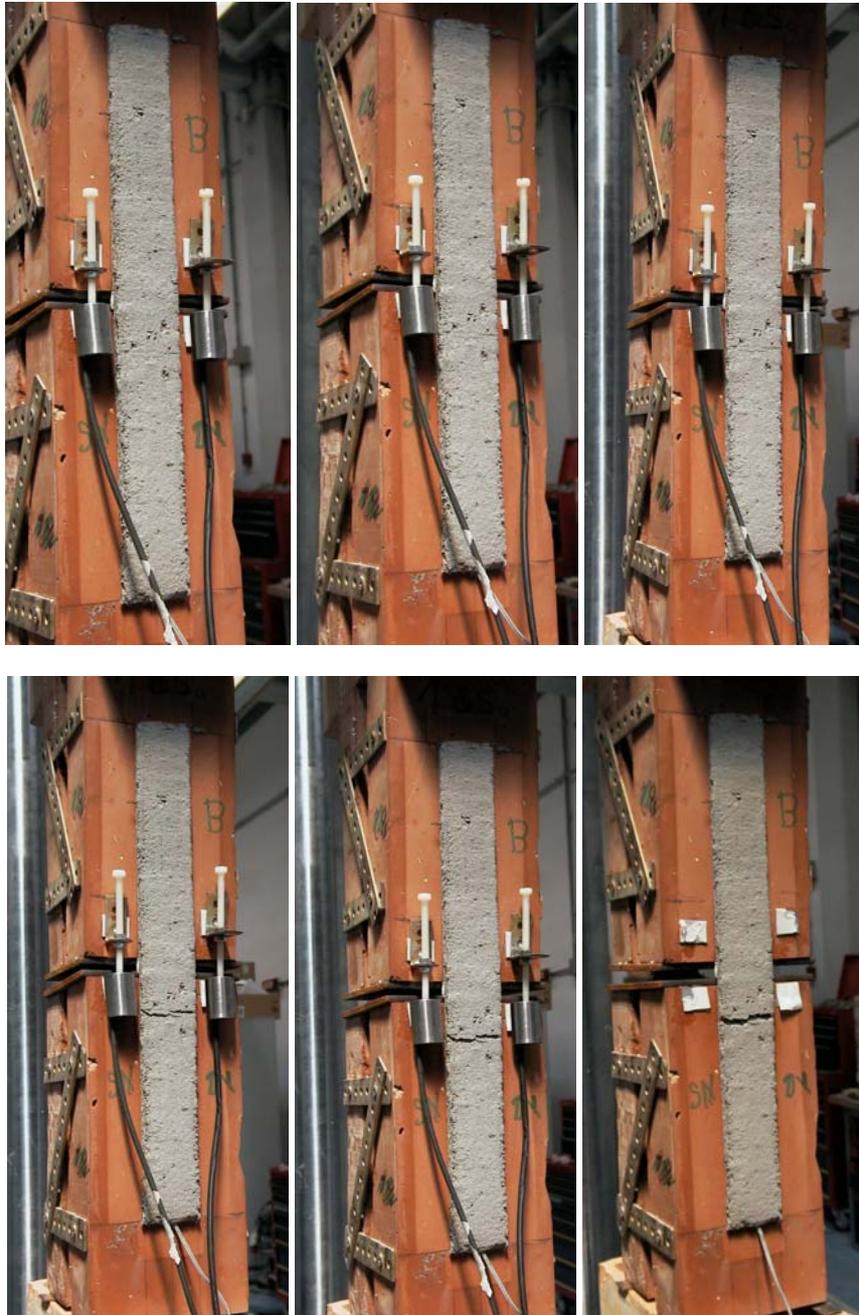


Figura 4.10 delaminazione E) per ancoraggio 165 mm tra CFRM e mattone

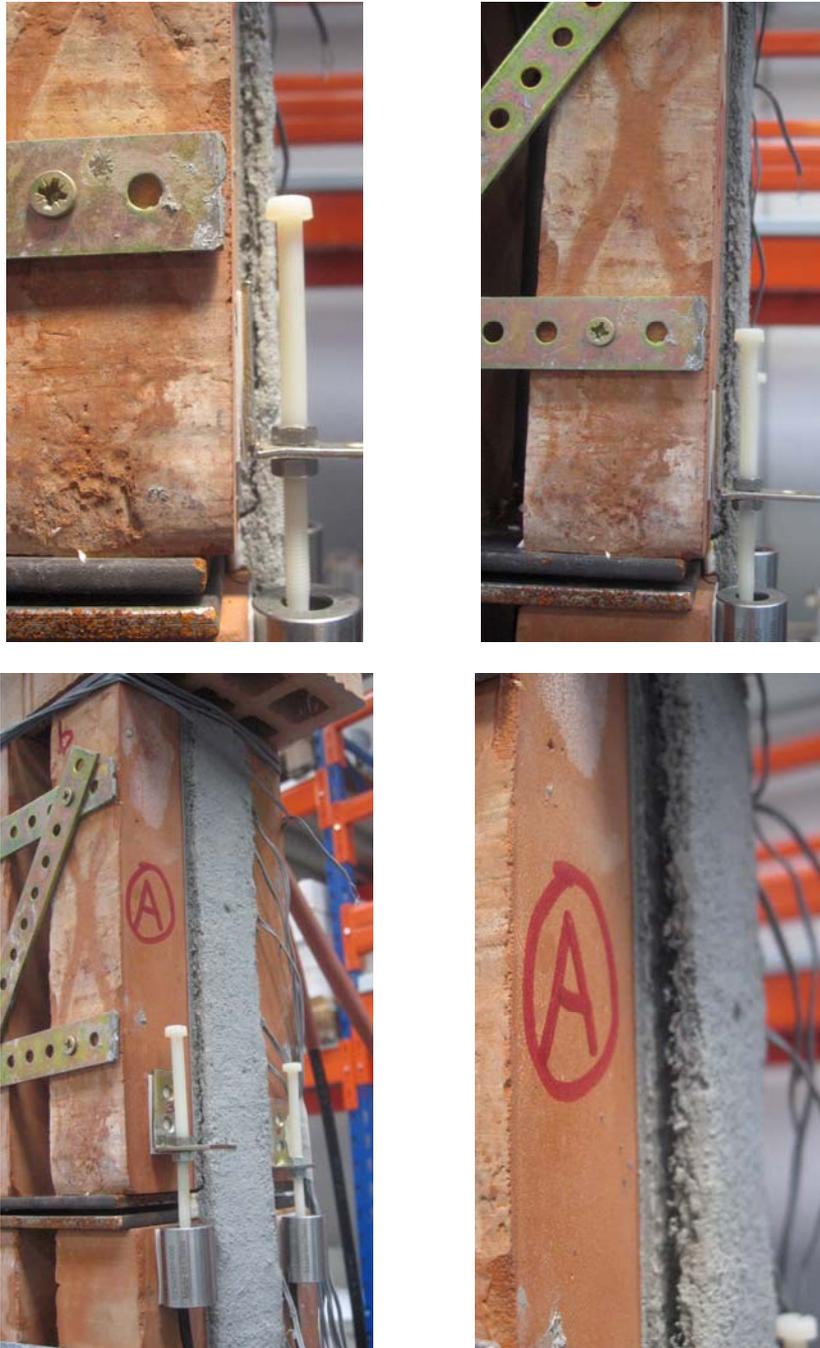


Figura 4.11 delaminazione D) per ancoraggi 220 mm tra CFRCM e mattone



Figura 4.12 dettaglio della fessurazione sulla malta per ancoraggi 220 mm tra CFRCM e mattone



Figura 4.13 dettaglio della delaminazione E) per ancoraggi 315 mm tra CFRCM e muratura



Figura 4.14 dettaglio dell'interfaccia di delaminazione tra CFRCM e muratura



Figura 4.15 delaminazione mista C) D) E) tra CFRCM e muratura



Figura 4.16 delaminazione tra CFRCM e muratura su supporti curvilinei



Figura 4.17 delaminazione mista B) C) D) tra CFRCM e muratura curva

4.4 Commenti e confronti

I risultati sperimentali mostrano la tendenza, nei rinforzi a matrice cementizia, alla localizzazione del collasso nel rinforzo piuttosto che nel primo strato di supporto. La possibilità di collasso delle fibre può essere esclusa con una attenta progettazione che tenga conto della tendenza ad una ripartizione non uniforme delle tensioni in tutta la larghezza del tessuto e che tenga conto anche della possibilità di sfilamento di alcuni elementi in tessuti troppo radi. Fenomeno che si è osservato anche in alcune prove su SRG con densità 4 trefoli per pollice (Cancelli et al. 2007).



Figura 4.18 delaminazione SRG-calcestruzzo in a) (Matana et al 2005) e b) (Cancelli et al. 2007)

Generalmente nei rinforzi in SRG si è osservato che la rottura per delaminazione si manifesta all'interno della matrice nel piano individuato dalle fibre. Lo strato di malta di incollaggio si suddivide in due fogli sovrapposti, il primo rimane adeso al supporto, mentre il secondo viene asportato dal rinforzo. Questo tipo di rottura è da imputarsi al superamento della resistenza a taglio della malta ed è analogo a quello osservato nelle sperimentazioni riportate in (Cancelli et al. 2007), (Castori 2007) e (Matana et al 2005). Ciò induce da un lato a ritenere non necessari trattamenti superficiali sul supporto atti ad aumentare la scabrezza al fine di migliorarne l'adesione con la matrice, poiché non è quello l'elemento critico della resistenza alla delaminazione (Figura 4.19) e, d'altra parte, a suggerire maggiore accortezza nella progettazione del tessuto di rinforzo in modo che non vi sia un eccessivo indebolimento all'interfaccia con la matrice.

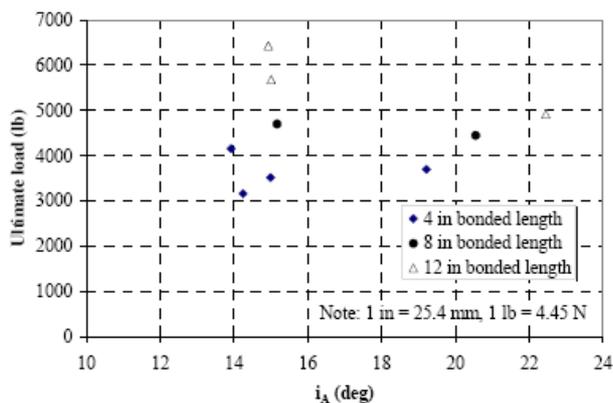


Figura 4.19 influenza della scabrezza del supporto sul carico di delaminazione (Matana et al. 2005)

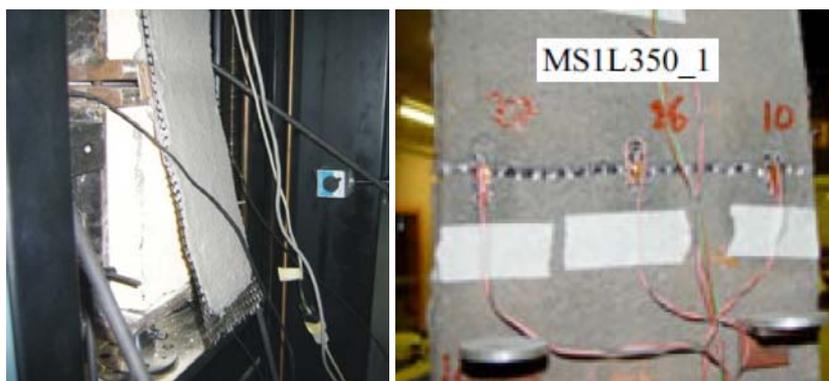


Figura 4.20 delaminazione CFRCM-muratura: perdita di aderenza col supporto (Faella 2009) e sfilamento della fibra nella matrice (Focacci Mantegazza 2009)

Per quanto riguarda il CFRCM l'interfaccia tra fibra e matrice si è mostrata generalmente l'elemento debole come già osservato in precedenti lavori sperimentali (Briccoli Bati et al. 2004; Focacci e Mantegazza 2009).

Nella presente sperimentazione si è potuto osservare che la presenza di più strati di tessuto e una maggiore lunghezza di ancoraggio migliorano le prestazioni di aderenza ostacolando la tendenza allo sfilamento delle fibre e spostando il collasso dalle fibre alla delaminazione nella matrice.

Seppure non si osservi un comportamento sostanzialmente differente tra supporti in laterizio omogeneo e supporti in muratura, la presenza del giunto di malta influenza l'evoluzione della delaminazione rappresentando la zona in cui si

innesca la delaminazione completa o si localizza la fessurazione trasversale della lamina con lo scorrimento delle fibre in carbonio.

L. anc	prova	collasso	prova	collasso
55	S_Au1	C	C_A1	E
55	S_Au2	C	C_A2	-
55	S_Au3	C	-	
110		-	C_B2	E
110		-	C_B1	E
165		-	C_D1	E
165		-	C_D2	C-E
220	S_Eu1	D	C_E1	C
220	S_Eu2	D	C_E2	D
220	S_Eu3	D	-	
220	S_Eu4	D	-	
220	S_Eu5	D	-	
220	S_Eu6	D	-	
440	S_Lu1	D	-	
440	S_Lu2	D-C	-	

Tabella 4.1 modalità di collasso su laterizio

L. anc	prova	collasso	prova	collasso
315	S_F1	D-C	C_F1	C-D
315	S_F2	D-C	C_F2	D-E
315	S_F3	C	C_Fu3	C-D-E
315	S_F4	D	C_Fu4	C-D
315	S_F5	D	-	
315	S_F6	D	-	
315	S_Fu7	D	-	
315	S_Fu8	D	-	

Tabella 4.2 modalità di collasso di provini in muratura su supporto rettilineo

R	prova	collasso	prova	collasso
5000	S_Ca1	D	-	
5000	S_Ca2	D	-	
5000	S_Ca3	D	-	
2650	S_Cb1	D	S-Cb1	D
2650	S_Cb2	D	C_Cb2	D-E
260	S_Cb3	C-D	C_Cb3	C-D-E
1800	S_Cc1	D	C_Cc1	C-D
1800	S_Cc2	C-D	C_Cc2	B-C-D
1800	-		C_Cc3	C-D
1300	S_Cd1	C	-	
1300	S_Cd2	C	-	

Tabella 4.3 modalità di collasso di provini in muratura su supporto curvilineo

5. Risultati sperimentali: comportamento globale

Una delle problematiche che derivano dalla modalità di prova adottata consiste nella corretta ripartizione del carico impresso tra le due facce a cui è applicato il rinforzo. D'altra parte nonostante la simmetria del provino, il carico non si ripartisce sempre al 50% sulle due facce; si è osservato che nella maggior parte delle prove sia le deformazioni che gli scorrimenti sono risultati maggiori sulla faccia di rottura. La ripartizione della forza è influenzata da molti fattori, tra i quali le inevitabili asimmetrie tra le due facce del provino, gli adattamenti degli elementi metallici, il non perfetto allineamento dei mattoni che costituiscono il supporto, o ancora l'attrito tra il rinforzo nella parte curva e il profilo metallico che lo tiene in tensione. Il dato misurato nella sperimentazione è la forza totale sulle due applicazioni di rinforzo in funzione del tempo di prova registrato dalla cella di carico della macchina universale MTS. Inoltre, per mezzo degli strain-gauges collocati sulla fibra libera di ciascuna faccia si ottiene una misura locale della deformazione sul tessuto caricato da cui, assumendo un comportamento lineare delle fibre, si risale alla tensione e quindi alla forza. Il dato è stato quindi controllato confrontando la forza complessiva così calcolata con la lettura della cella di carico. Tale sistema di ripartizione è risultato attendibile per le prove con setup di tipo B in cui anche il tratto di fibra libera è immersa nella matrice. L'applicazione dello strain-gauge sul tessuto libero invece comporta una lettura non attendibile della deformazione sia perché localizzata su due trefoli di acciaio o una fascia di carbonio rispettivamente, sia perché lo strain-gauge non è sempre perfettamente adeso alla fibra. Al fine di scongiurare queste evenienze, gli strain-gauges sul tessuto libero sono stati applicati dopo aver impregnato localmente le fibre con resine polimeriche, inoltre, le misure di deformazione ricavate sono state poste a confronto con quelle misurate negli strain-gauges successivi e, infine, si è verificato che la modalità di ripartizione del carico ricavata fosse tale che, a parità di carico sui due lati del provino, corrispondesse una deformazione analoga misurata dagli strain-gauges corrispondenti disposti sui due lati.

5.1 SRG

Nei provini di laterizio con lunghezze di applicazione del rinforzo pari a 55 mm si raggiungono carichi inferiori a quelli raggiunti nelle altre prove e pertanto la lunghezza efficace di ancoraggio è certamente superiore a 55 mm. Le deformazioni registrate dagli strain-gauges raggiungono valori al più del 3 per mille e la delaminazione avviene nell'interfaccia tra rinforzo e mattone non coinvolgendo la matrice. La ripartizione del carico sulle due facce del provino è illustrata in figura 5.1. Le altre prove con setup A sono state processate in modo analogo ed i valori del carico di delaminazione dei rinforzi in SRG su laterizio è rappresentato in tabella 5.1.

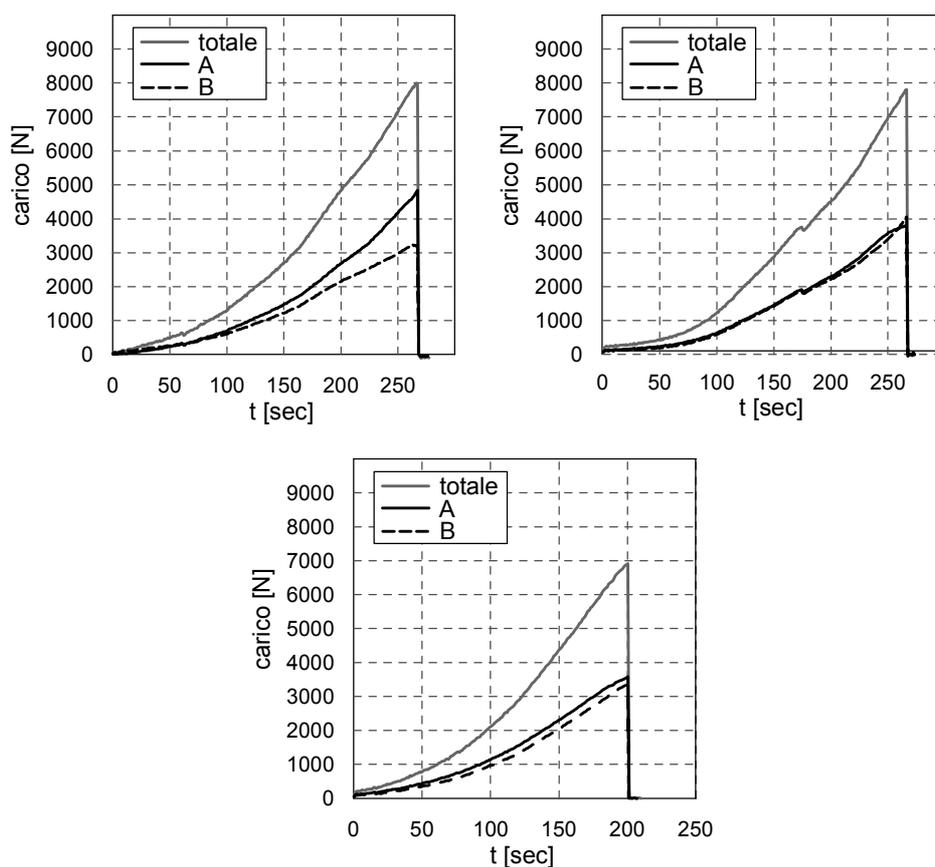


Figura 5.1 ripartizione del carico nei campioni in SRG su laterizio con ancoraggio 55 mm

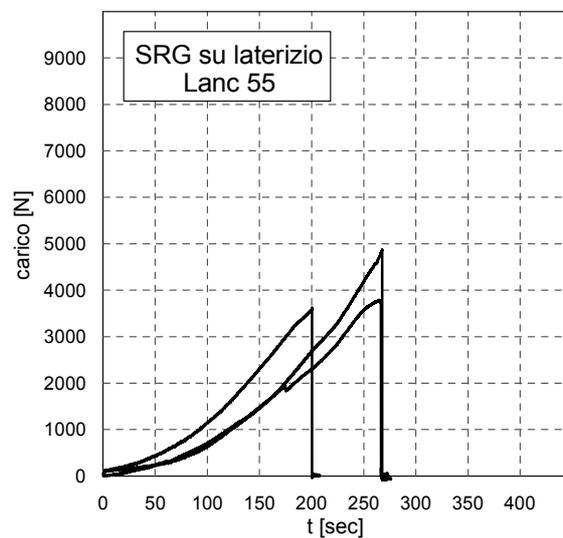


Figura 5.2 andamento del carico nelle prove con SRG su laterizio e ancoraggio 55 mm

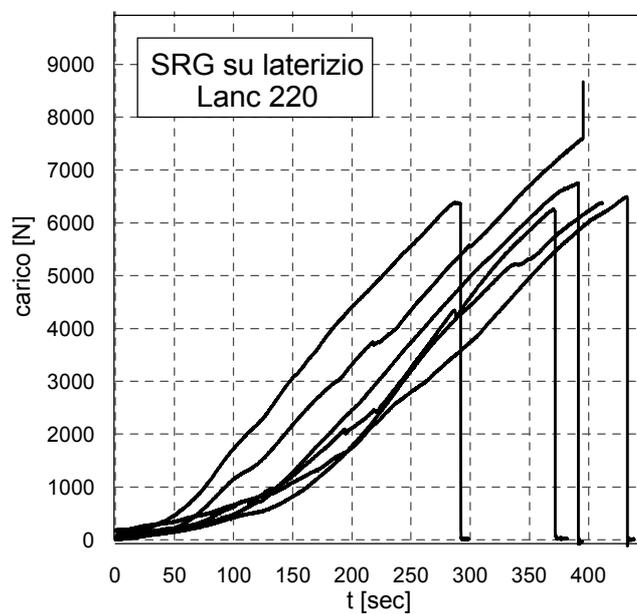


Figura 5.3 andamento del carico nelle prove con SRG su laterizio e lunghezza di ancoraggio 220 mm

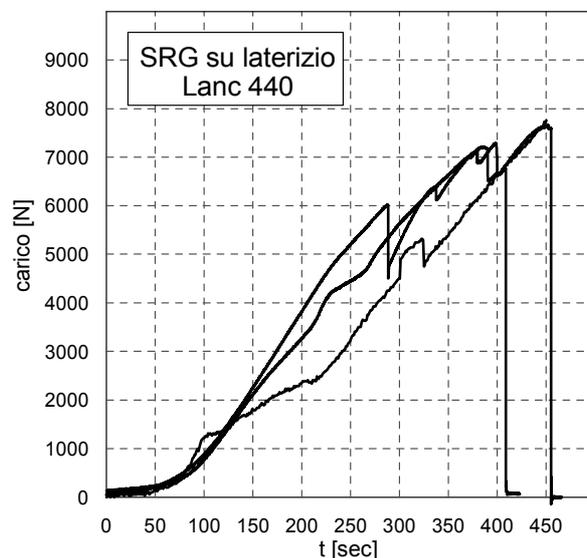


Figura 5.4 andamento del carico nelle prove con SRG su laterizio e lunghezza di ancoraggio 440 mm

L anc 55 mm		L anc 220 mm		L anc 440 mm	
Setup A					
S_Au1	4868 N	S_Eu1	7611 N	S_Lu1	7779 N
S_Au2	4075 N	S_Eu2	6755 N	S_Lu2	7028 N
S_Au3	3627 N	S_Eu3	6272 N	S_Lu3	7588 N
		S_E1	6368		
		S_E2	6358		
		S_E3	6463		

Tabella 5.1 carico di delaminazione prove SRG-mattone

Analogamente sono riportati i grafici di ripartizione del carico e i valori del carico di delaminazione per le prove su muratura alcune delle quali sono state eseguite con setup B. Le prove condotte con tale setup hanno consentito di continuare la prova dopo il raggiungimento della delaminazione sulla prima faccia del provino, portando successivamente fino al collasso anche la lamina di rinforzo adesiva sull'altra faccia e registrando la forza direttamente dalla cella di carico. Nel seguito si riportano i grafici delle prove e una tabella riassuntiva dei valori di carico di delaminazione. I risultati sono poi commentati nel paragrafo seguente e posti a confronto con le altre sperimentazioni disponibili di letteratura.

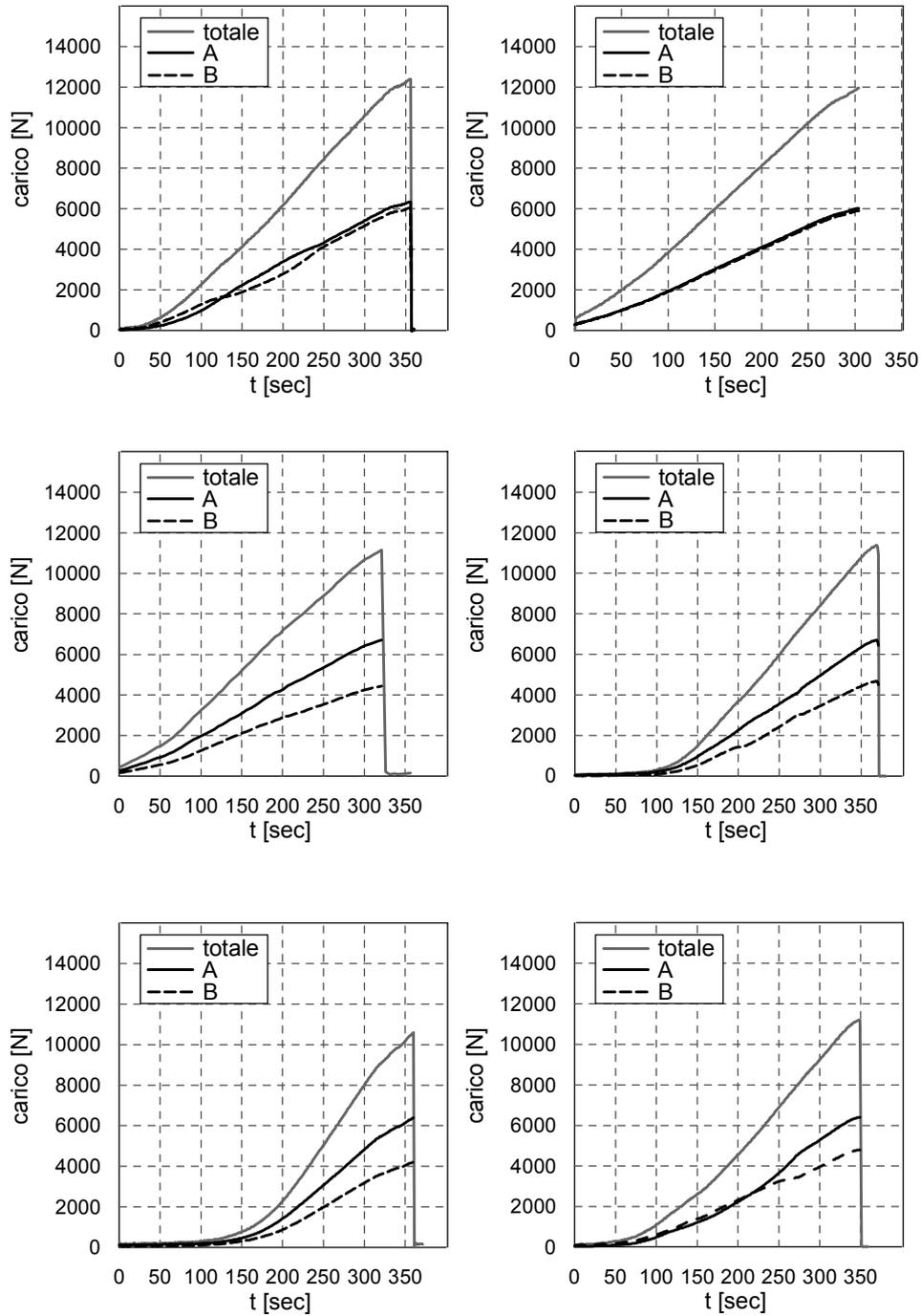


Figura 5.6 ripartizione del carico nelle prove con SRG su muratura (setupA)

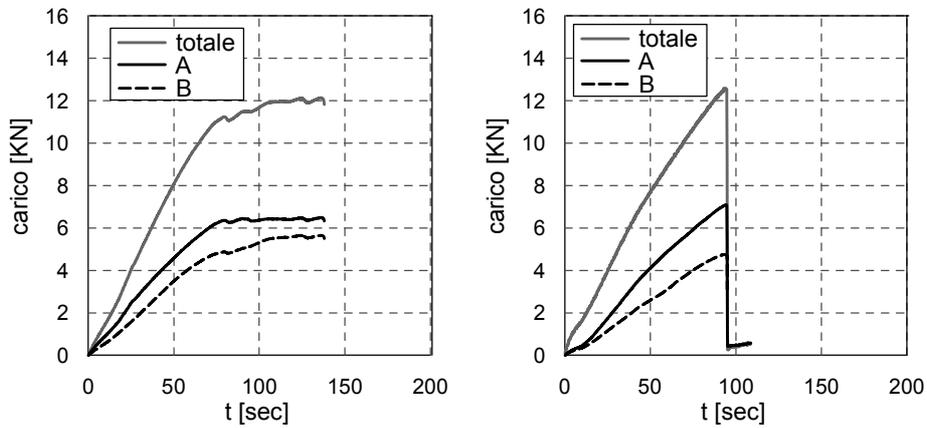


Figura 5.5 ripartizione del carico nelle prove con SRG su muratura (setupB)

L anc 315			
Setup A		Setup B	
S_Fu1	6311	S_F7	6492
S_Fu2	5977	S_F8	7088
S_Fu3	6740	S_F7 2	5859
S_Fu4	6720	S_F7 8	6680
S_Fu5	6409		
S_Fu6	6411		

Tabella 5.2 carico di delaminazione SRG-muratura

L anc 315							
Setup B							
Raggio curvatura 5000 mm		Raggio curvatura 2650 mm		Raggio curvatura 1800 mm		Raggio curvatura 1300 mm	
S_Ca1	4810 N	S_Cb1	3762 N	S_Cc1	2946 N	S_Cd1	1430 N
S_Ca2	4370 N	S_Cb2	3764 N	S_Cc2	2944 N	S_Cd2	-
S_Ca3	4294 N	S_Cb3	3631 N	S_Cc3			

Tabella 5.3 carico di delaminazione SRG-muratura curva

5.2 CFRCM

Tutte le prove sono state eseguite con il setup B. I diagrammi in figura 5.5 illustrano la ripartizione del carico tra le due facce del provino e, in tabella 5.4, sono raggruppati i valori del carico di delaminazione, per le quattro lunghezze di applicazione del rinforzo testate.

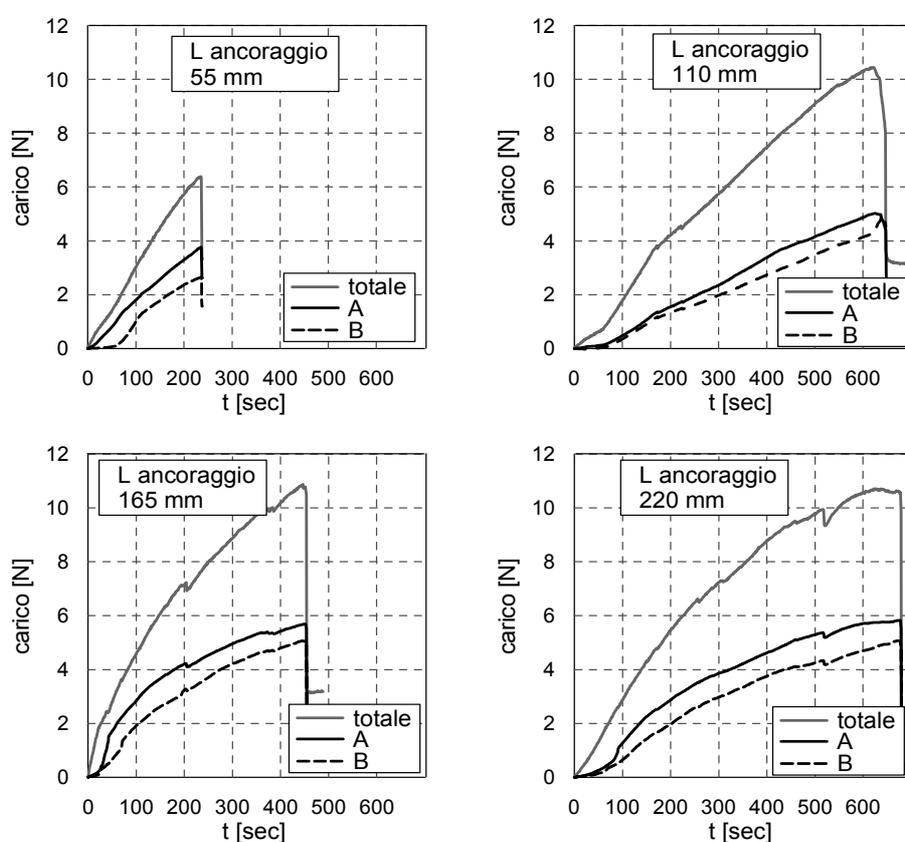


Figura 5.5 ripartizione del carico nelle prove con CFRCM su laterizio (setupB)

L anc 55	L anc 110	L anc 165	L anc 220				
Setup B							
C_A1	3884 N	C_B1	5023 N	C_D1	5189	C_E1	6592 N
		C_B2	4613 N	C_D2	5695	C_E2	5828 N
				C_D2 2	5491	C_E2 2	5499

Tabella 5.4 carico di delaminazione CFRCM-mattone

Analogamente, per le prove con supporto in muratura, i diagrammi in figura 5.6 illustrano la ripartizione del carico tra le due facce del provino e, in tabella 5.5, 5.6 sono raggruppati i valori del carico di delaminazione per superficie rettilinea e curvilinea, rispettivamente.

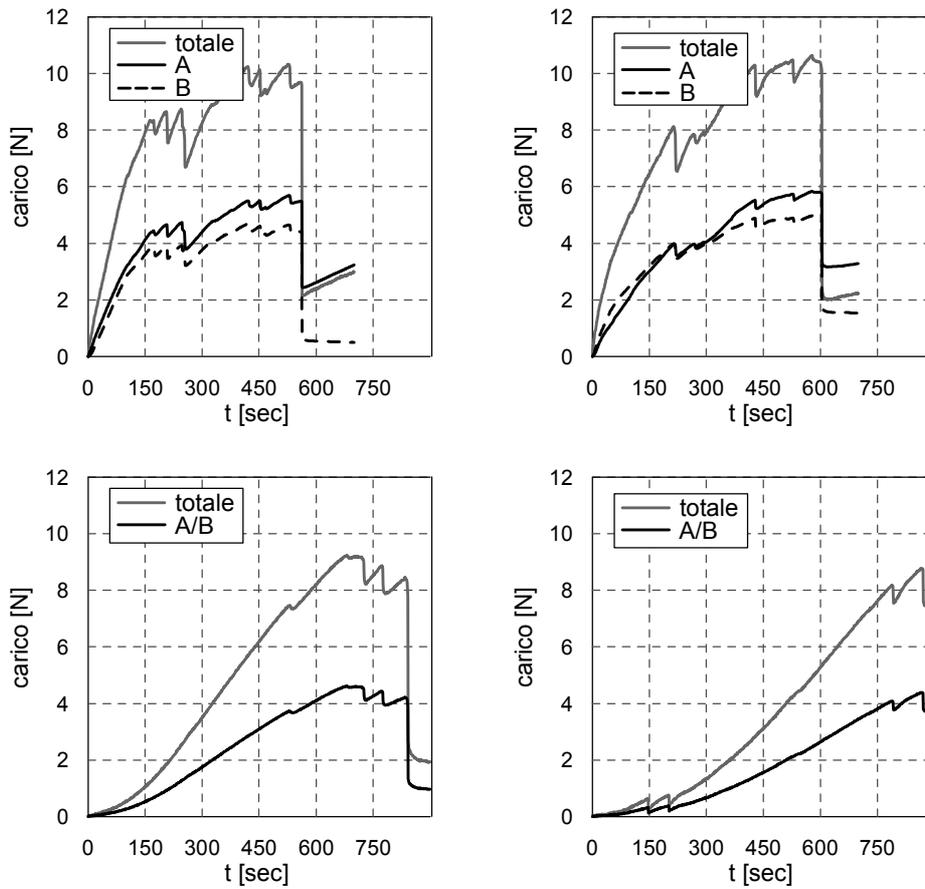


Figura 5.6 ripartizione del carico CFRCM-muratura: setup B sopra e setup A sotto

L anc 315			
Setup A		Setup B	
C_Fu1	4622	C_F1	5686
C_Fu2	4385	C_F2	5835

Tabella 5.5 carico di delaminazione CFRCM-muratura

L anc 315			
Setup B			
Raggio di curvatura 2650 mm		Raggio di curvatura 1800 mm	
C_Cb1	5756 N	C_Cc1	3318 N
C_Cb2	6056 N	C_Cc2	5483 N
C_Cb3	5183 N	C_Cc3	3946 N

Tabella 5.6 carico di delaminazione CFRCM-muratura curva

5.3 Confronti

In figura 5.7 sono rappresentati i valori del carico di delaminazione ottenuti in funzione della lunghezza di ancoraggio per le diverse tipologie di prova eseguite. Nel complesso si rileva che:

- i rinforzi in fibre di acciaio hanno prestazioni migliori di quelli in fibre di carbonio, con un incremento medio della forza di delaminazione di circa il 15%, sebbene, dai risultati sperimentali, sembra che il tessuto in carbonio garantisca una migliore aderenza sui supporti curvi;
- la forza di delaminazione cresce all'aumentare della lunghezza di ancoraggio; persino per ancoraggi tra 220 mm e 440 mm si rileva un, sia pur modesto, incremento di resistenza;
- la resistenza alla delaminazione si riduce passando da supporti omogenei in laterizio a supporti in muratura;
- l'effetto della curvatura è molto rilevante, come si rileva più chiaramente nelle prove con fibre in acciaio, che mostrano una costante diminuzione del carico di delaminazione all'aumentare della curvatura.

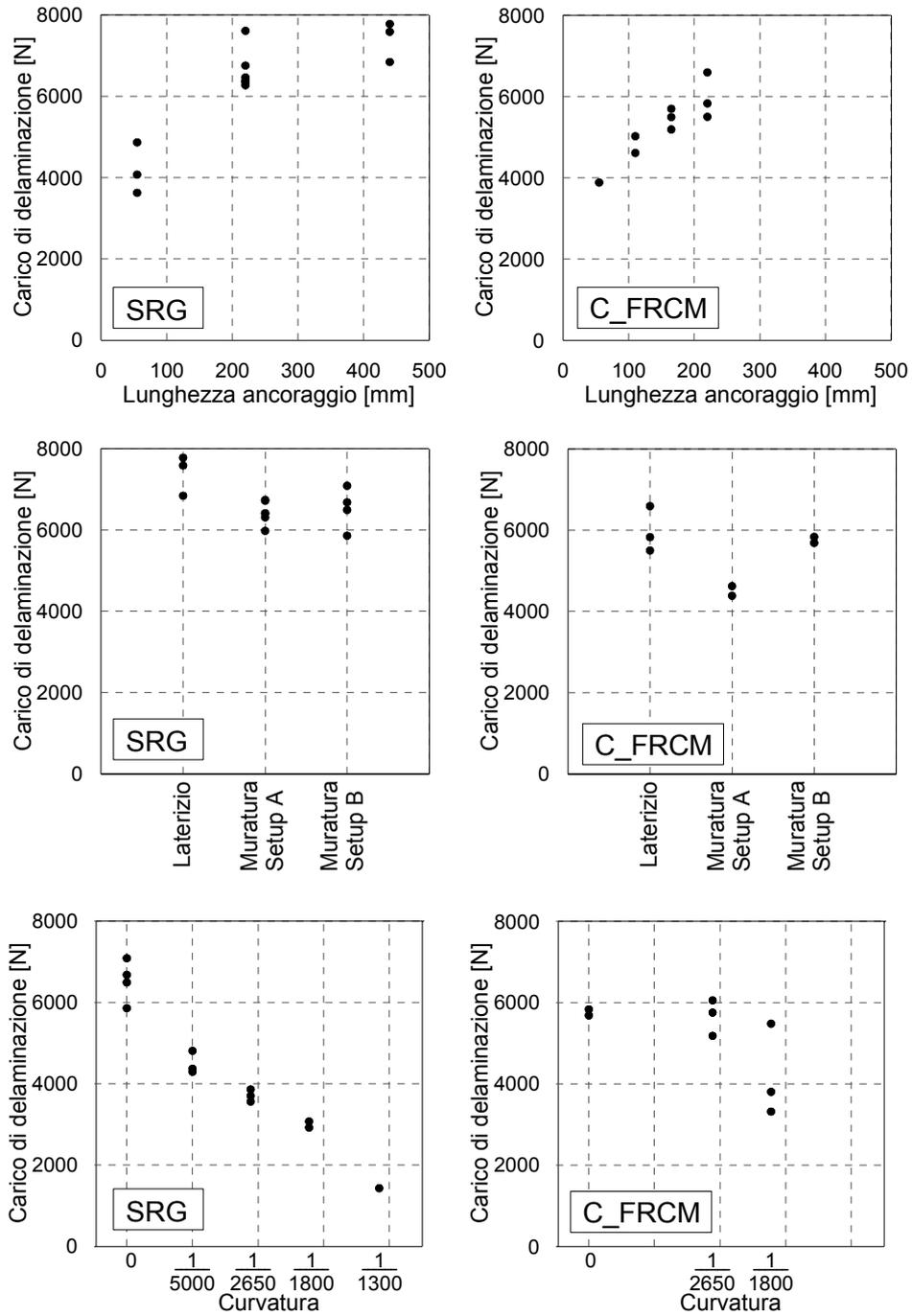


Figura 5.7 carichi di delaminazione

In figura 5.8, i risultati delle prove con rinforzo in SRG sono posti a confronto con i risultati di prove analoghe disponibili in letteratura (Matana et al. 2005; Cancelli et al. 2007). In entrambe queste pubblicazioni vengono utilizzate larghezze di rinforzo differenti da quella usata nella presente sperimentazione: 2 pollici nel primo lavoro e 75 mm nel secondo; per il confronto, i valori di carico massimo sono stati scalati assumendo una dipendenza lineare del carico ultimo con la larghezza della lamina di rinforzo. I risultati in (Matana et al. 2005) evidenziano un aumento della capacità portante fino a una lunghezza di ancoraggio pari a 300 mm, Nella presente sperimentazione si è osservata una lunghezza di ancoraggio compresa tra i 220 mm e i 440 mm che verrà determinata più precisamente dall'osservazione del profilo delle deformazioni nel successivo capitolo.

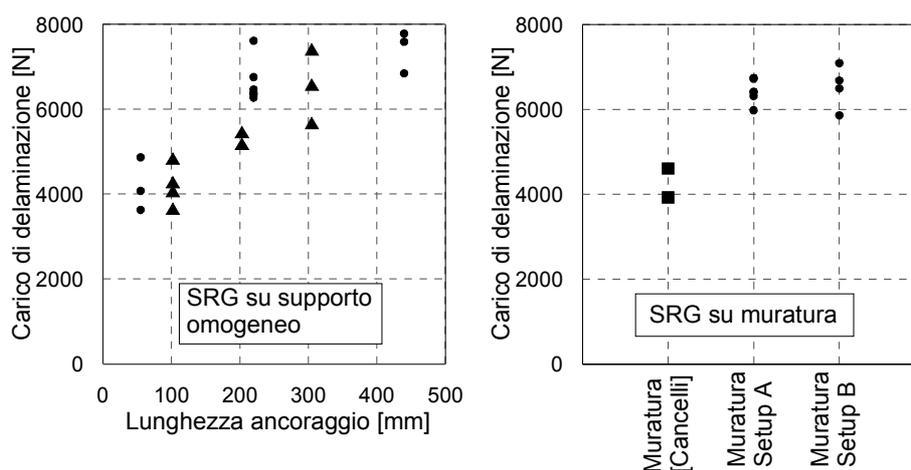


Figura 5.8 confronto con altre sperimentazioni con composito SRG :
 (● presente sperimentazione, ▲ sperimentazione in Matana et al. 2005,
 ■ sperimentazione in Cancelli et al. 2007)

Per quanto riguarda il composito CFRCM, nelle prove su supporto in laterizio osserviamo che il carico di delaminazione aumenta all'aumentare della lunghezza di ancoraggio fino al valore di 220 mm. Tuttavia ad eccezione di un test i valori medi di carico ultimo per le lunghezze 165 e 220 mm sono molto prossimi. Si deve ritenere che la lunghezza di ancoraggio efficace sia compresa in questo intervallo di valori.

Per quanto riguarda le prove su supporto in muratura si osserva una diminuzione del carico ultimo meno significativa di quella registrata nelle analoghe prove con il rinforzo SRG. Per rinforzi in CFRCM, il setup di tipo B appare non adeguato,

come già detto precedentemente, a causa delle concentrazioni di tensione che si verificano all'interno del tessuto e portano a sottostimare l'effettiva resistenza alla delaminazione.

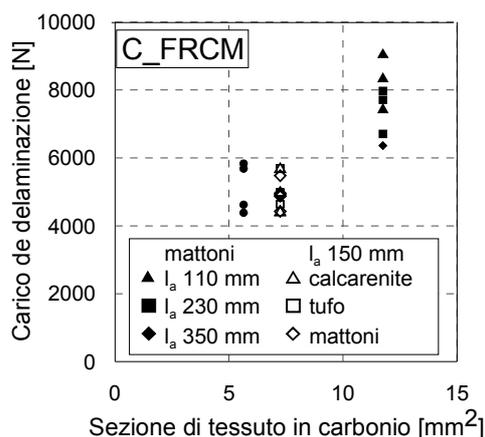


Figura 5.9 confronto con altre sperimentazioni con composito CFRMCM su muratura: ● presente sperimentazione, △□◇ sperimentazione in (Faella et al. 2009), ▲■◆ sperimentazione in (Focacci e Mantegazza 2009)

In figura 5.9. i dati ottenuti su supporto in muratura per il rinforzo CFRMCM sono posti a confronto con i risultati ottenuti in (Faella et al. 2009) con diversi supporti in muratura di calcarenite, tufo giallo e mattoni ed in (Focacci e Mantegazza 2009). Il confronto è condotto a parità di sezione trasversale del rinforzo che, nei lavori sopra citati, è applicato un unico strato di tessuto per la larghezza dell'intero campione mentre nella presente sperimentazione è applicato in 3 strati sovrapposti.

5.4 Legame forza scorrimento

Nelle figure che seguono sono rappresentati i grafici che descrivono l'andamento globale della prova e precisamente del carico, come misurato dalla cella di carico e poi ripartito tra le due facce, e dello scorrimento, direttamente misurato dai trasduttori LVDT.

Si osservano scorrimenti generalmente maggiori per il composito CFRMCM e, in entrambi i compositi, per i supporti in muratura. Si rileva, inoltre, la presenza di scorrimenti maggiori nelle prove su supporto curvilineo.

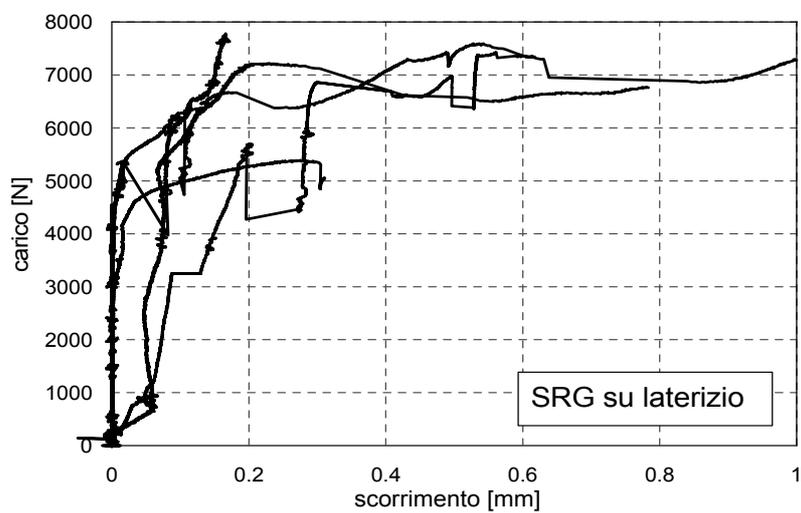


Figura 5.10 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in SRG su supporti in laterizio

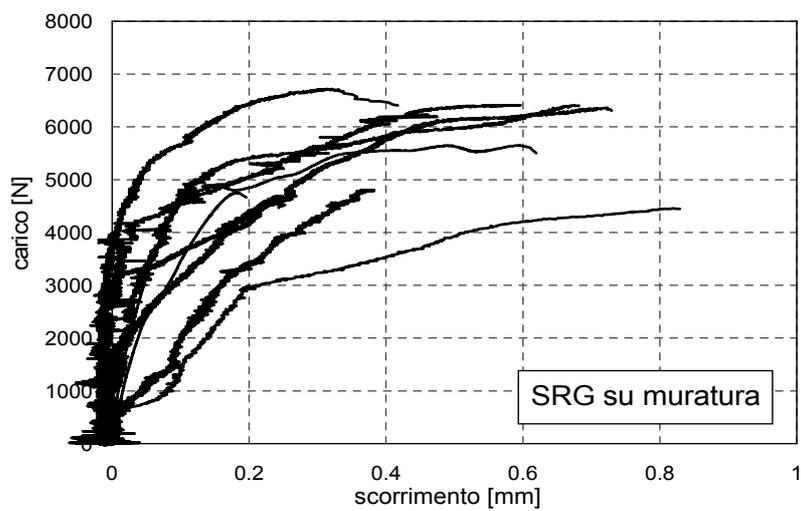


Figura 5.11 diagramma carico-scorrimento di rinforzi in SRG su supporti in muratura

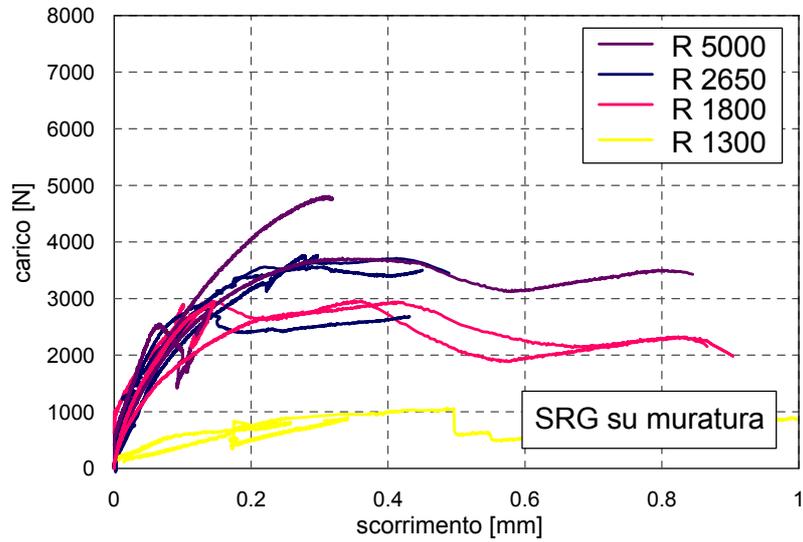


Figura 5.12 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in SRG su supporti in muratura con superficie curva

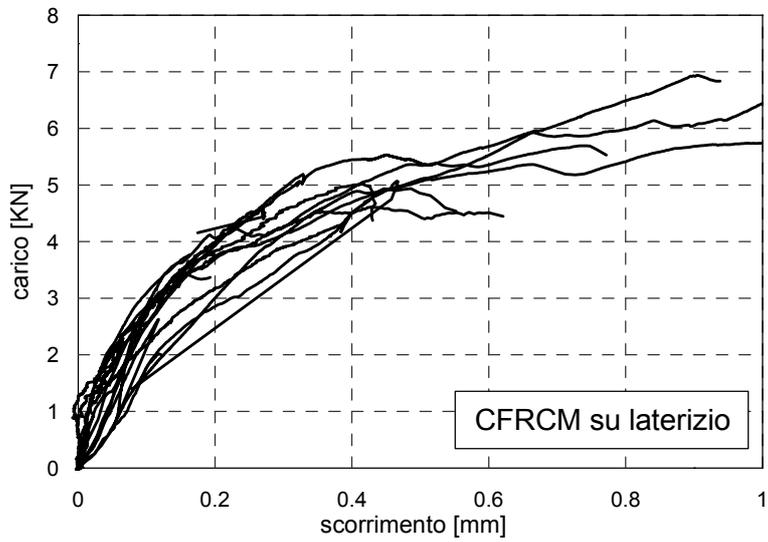


Figura 5.13 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in CFRCM su supporti in laterizio

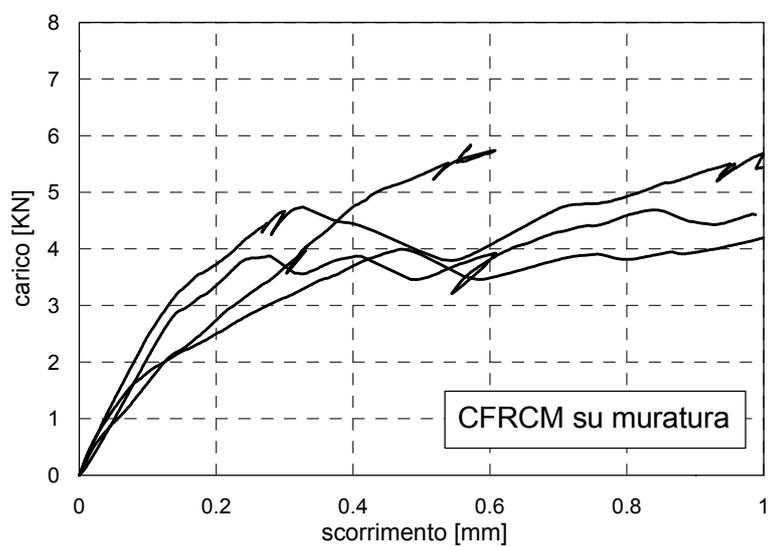


Figura 5.14 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in CFRCM su supporti in muratura

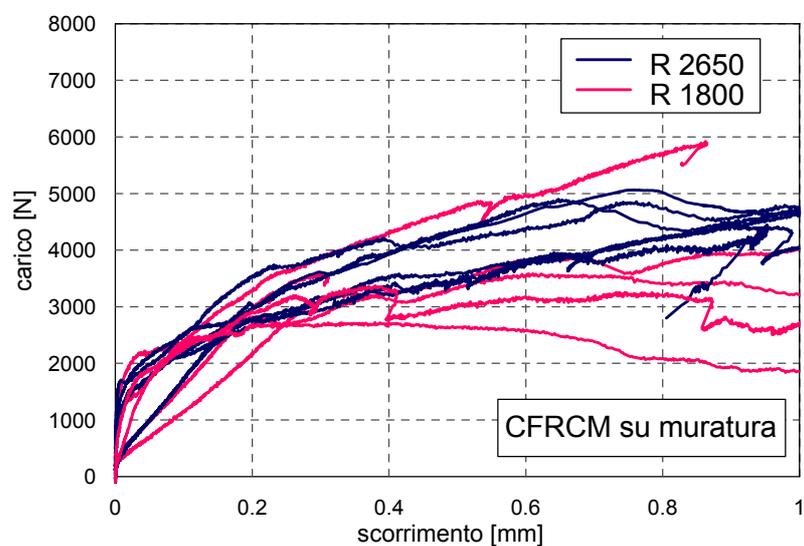


Figura 5.15 diagramma forza-scorrimento di rinforzi in CFRCM su supporti in muratura con superficie curva

6. Risultati sperimentali: comportamento locale

Per ricostruire il comportamento locale, la gran parte delle prove sperimentali sono state strumentate con strain-gauges applicati lungo la striscia del rinforzo adesivo, atti a ricostruire il profilo delle deformazioni del rinforzo durante il procedere della prova.

Le figure che seguono mostrano il profilo delle deformazioni al crescere della forza impressa. Inizialmente si rileva una distribuzione delle deformazioni limitatamente al primo tratto del rinforzo più prossimo all'estremo caricato; solo all'aumentare del carico aumenta progressivamente la lunghezza di rinforzo coinvolto e il tratto in cui si registrano deformazioni si estende. Tale comportamento è analogo a quello dei tradizionali FRP, mentre le lunghezze di rinforzo coinvolte al procedere della prova variano a seconda della combinazione supporto-rinforzo. Si deve rilevare che, nelle prove con SRG su muratura, è stata omessa la lettura dello strain-gauge collocato sul laterizio più prossimo all'applicazione del carico, poiché la lettura diventa inattendibile a causa della fessurazione nell'interfaccia fibra-matrice.

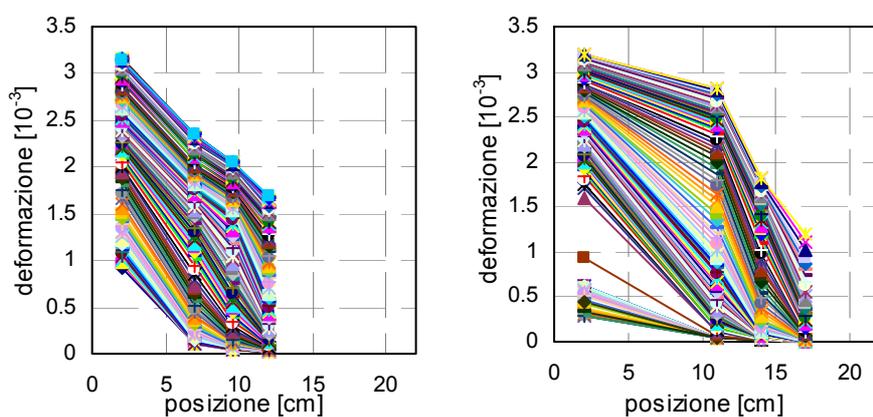


Figura 6.1 andamento della deformazioni lungo il rinforzo adesivo nei campioni con SRG su Laterizio con ancoraggio 220 mm

Esiste una lunghezza di ancoraggio cosiddetta efficace, oltre la quale non si registra nessun incremento della forza trasferibile per aderenza. Un prolungamento della zona ancorata oltre questa lunghezza non comporta dei benefici in termini di forza massima; al contrario lunghezze di ancoraggio inferiori alla lunghezza efficace comportano l'impossibilità per il rinforzo di raggiungere la massima forza di aderenza, e causano la delaminazione per valori ridotti della forza. La lunghezza efficace è influenzata, oltre che dai parametri locali del legame di aderenza, dalle rigidità reciproche del rinforzo e della malta.

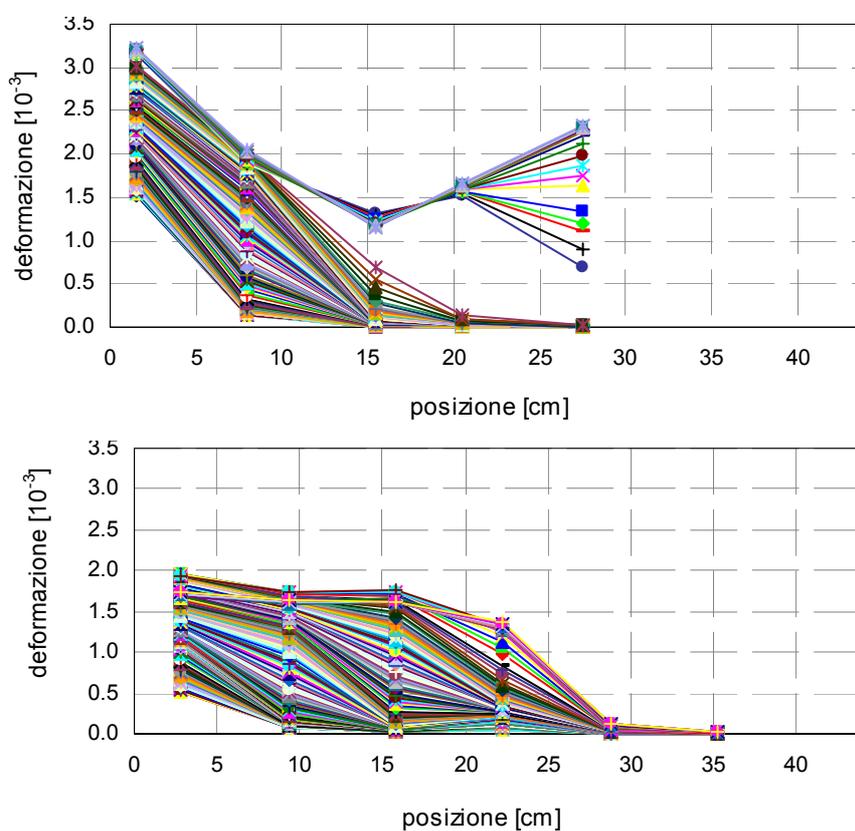


Figura 6.2 andamento delle deformazioni lungo il rinforzo adesivo nei campioni con SRG su laterizio con ancoraggio 440 mm

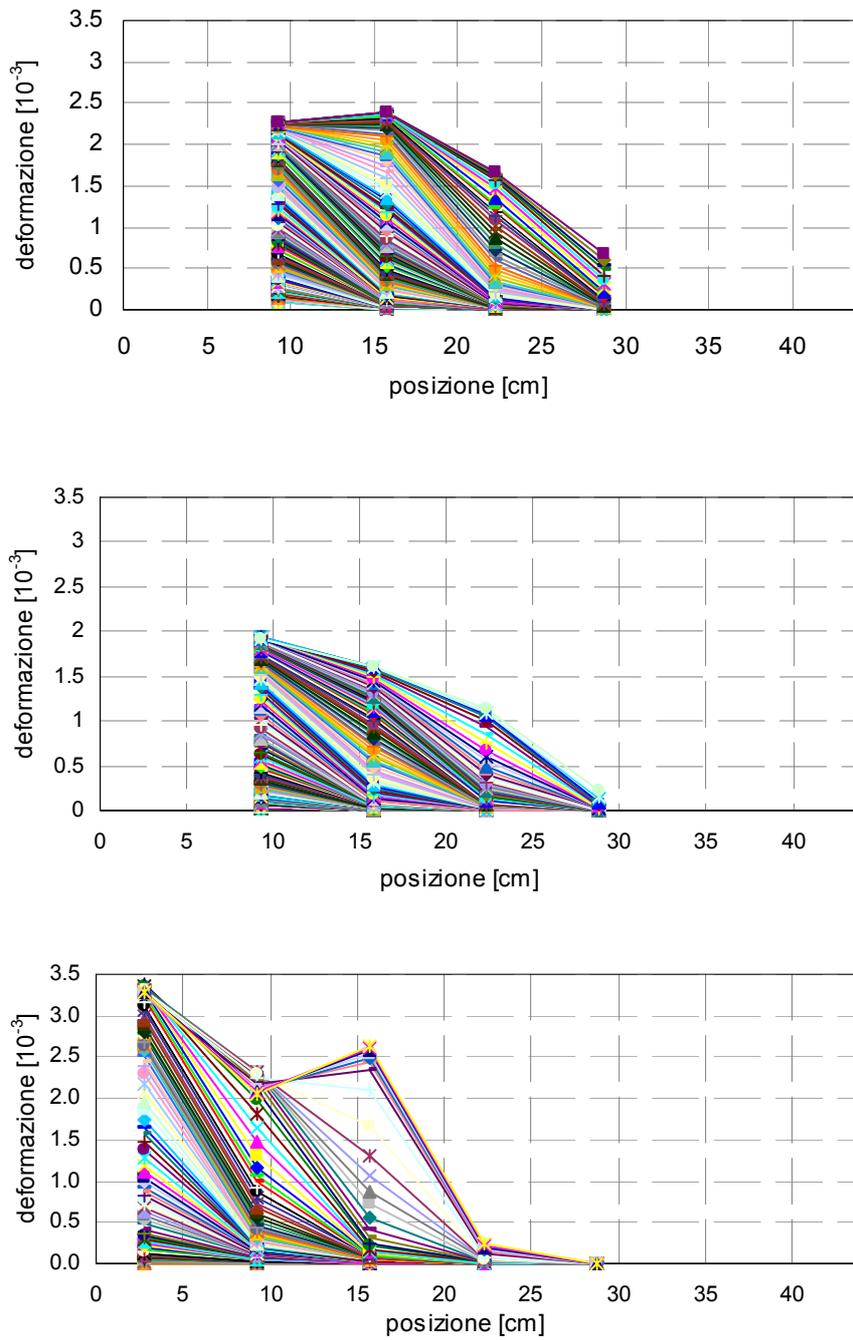


Figura 6.3 andamento delle deformazioni lungo il rinforzo adesivo nei campioni con SRG su muratura

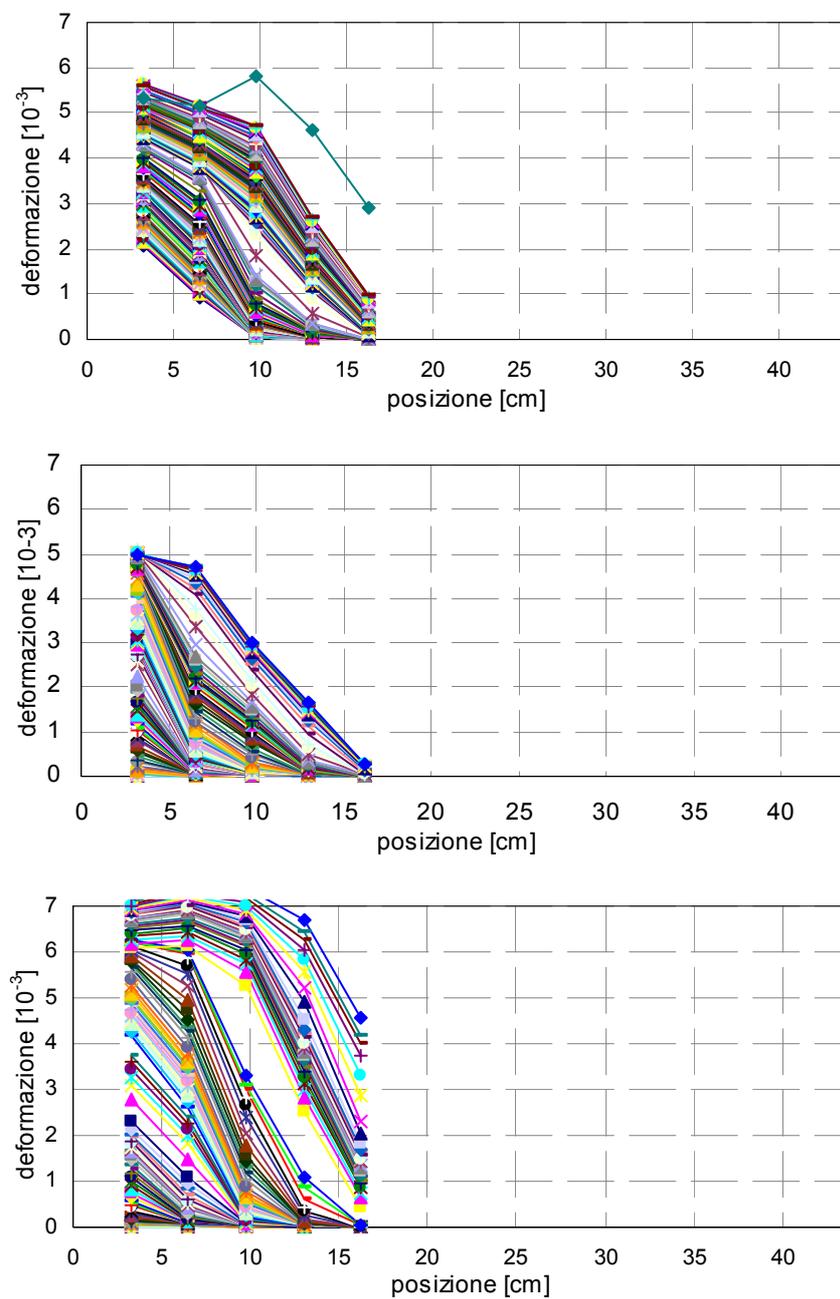


Figura 6.4 andamento delle deformazioni lungo il rinforzo adesivo nelle prove con CFRCM su laterizio con ancoraggio 220 mm

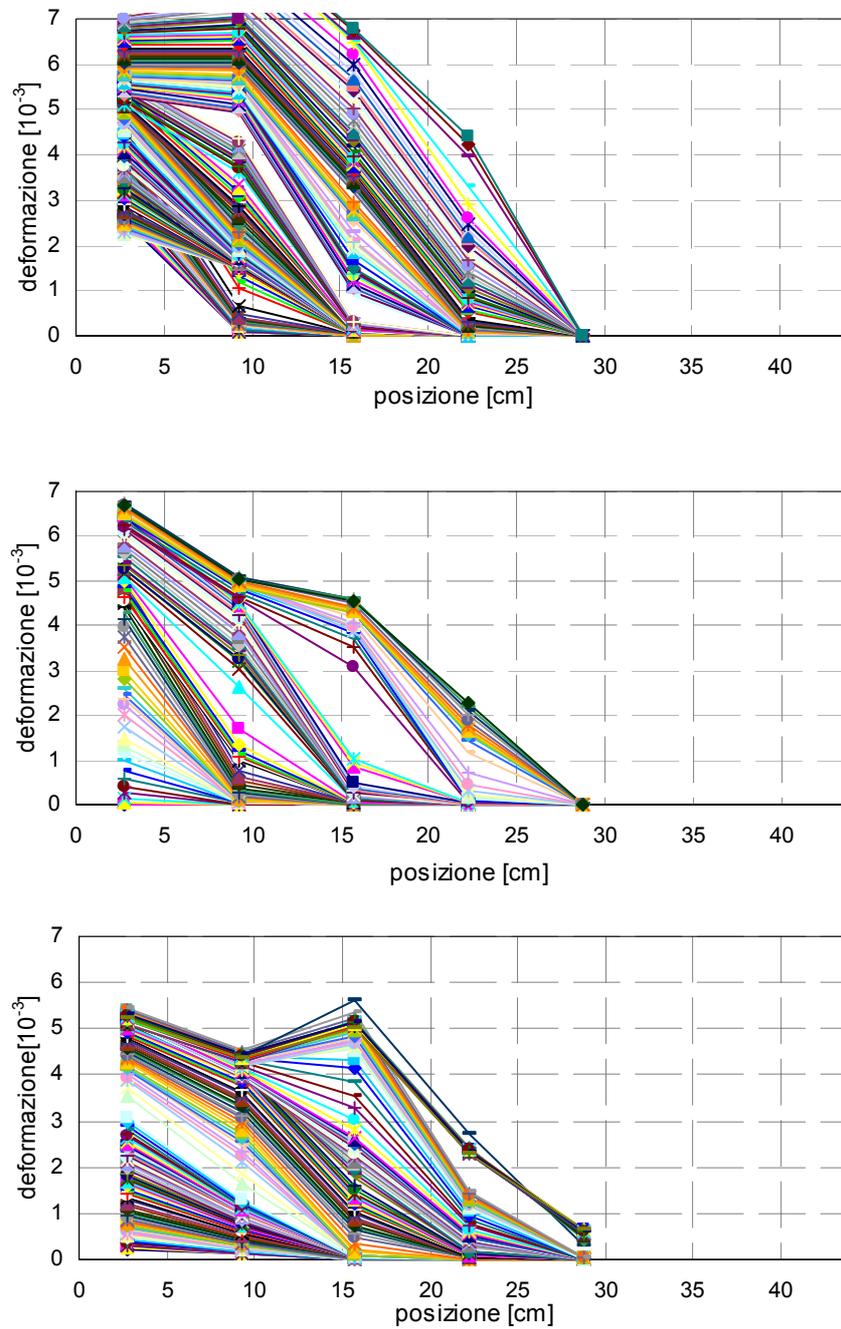


Figura 6.5 andamento delle deformazioni lungo il rinforzo adesivo nelle prove con CFRCM su muratura

6.1 Lunghezza efficace di ancoraggio

Dalla ricostruzione dei profili delle deformazioni per livelli di carico crescenti, si osserva che:

- fino al 40% della forza di delaminazione viene interessato un tratto di rinforzo della lunghezza di circa 50-80 mm e i livelli di deformazione sono simili in tutte le prove con valori inferiori a 10^{-3} . Tale valore viene superato solo nelle murature rinforzate con CFRCM dove la zona interessata da deformazione si estende fino a 100 mm raggiungendo valori di $1,5 \cdot 10^{-3}$.
- al 60% del carico si ha un aumento delle deformazioni massime fino a valori pari a $1,5 \cdot 10^{-3}$ per fibre in acciaio, superiori a $2 \cdot 10^{-3}$ per fibre in carbonio su laterizio, e pari a $3 \cdot 10^{-3}$ nell'applicazione su supporto murario.
- tra il 60% e l'80% della forza di delaminazione, nei rinforzi in acciaio la lunghezza coinvolta aumenta da 100 a 200 mm e le deformazioni, nelle prove su supporto omogeneo, raggiungono valori massimi superiori al $2 \cdot 10^{-3}$, mentre, in quelle su muratura, raggiungono valori pari all' $1,5 \cdot 10^{-3}$. Nei rinforzi in carbonio, la lunghezza coinvolta non supera i 160 mm per prove su supporto omogeneo in laterizio, mentre risulta di poco superiore a tale valore in quelle su muratura. Le deformazioni crescono fino a valori massimi di circa $3-3,5 \cdot 10^{-3}$.

In generale possiamo osservare che sul supporto omogeneo i rinforzi in acciaio trasmettono le tensioni su una lunghezza maggiore rispetto a quanto accade per il composito in carbonio, e che le deformazioni massime registrate nel rinforzo in acciaio sono su entrambi i supporti prossime al $3 \cdot 10^{-3}$, mentre nel carbonio sono superiori al $5 \cdot 10^{-3}$.

L'osservazione delle deformazioni sul profilo del rinforzo permette di individuare la lunghezza di rinforzo massima coinvolta nel fenomeno della delaminazione. A partire quindi dai profili di deformazione e sulla base dei risultati esposti nel precedente capitolo, riguardanti i valori di carico di delaminazione in funzione della lunghezza di ancoraggio, è possibile stimare la lunghezza efficace di ancoraggio oltre la quale non si hanno benefici in termini di resistenza alla delaminazione.

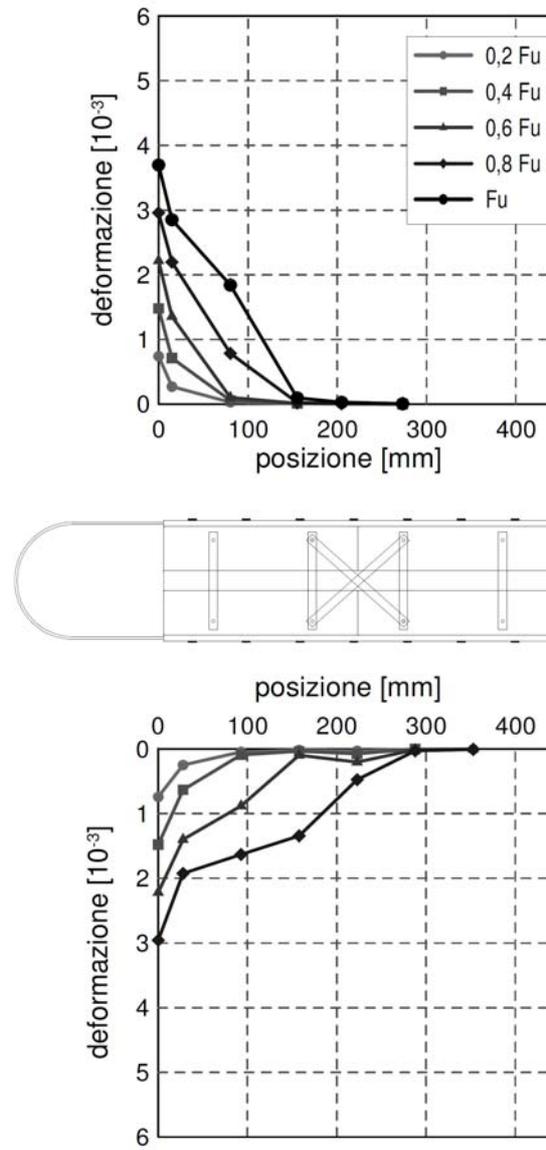


Figura 6.6 profili di deformazione per livelli di carico SRG-laterizio con L ancoraggio 440 mm (setup A)

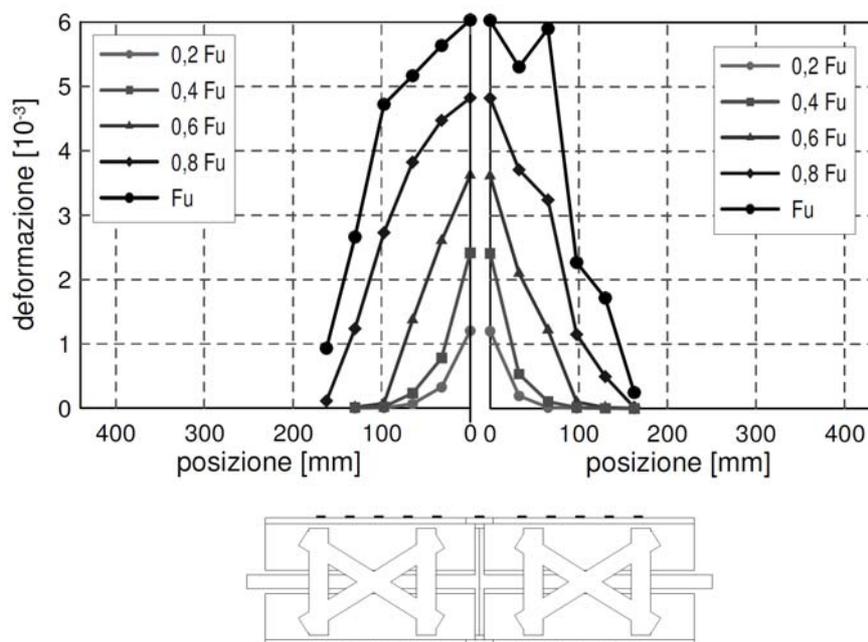


Figura 6.7 profili di deformazione per livelli di carico CFRCM-mattone con L ancoraggio 220 mm (setup B)

Per quanto riguarda il composito SRG applicato su laterizio, dall'analisi dei carichi di delaminazione si era stimata una lunghezza efficace di ancoraggio compresa tra i 220 mm e i 440 mm. Dal momento che lo strain-gauge collocato a 280 mm non registra deformazioni si può ritenere che la lunghezza di rinforzo coinvolta nel processo di delaminazione sia inferiore a 280 mm. Quindi la lunghezza di ancoraggio efficace sarà compresa tra 220 e 280 mm senza sostanziale differenza tra supporto in laterizio omogeneo e muratura di mattoni. Per quanto riguarda i rinforzi CFRCM, dall'osservazione dei carichi di delaminazione sui campioni con supporto omogeneo, l'ancoraggio efficace è risultato compreso tra 165 mm e i 220 mm. Si osserva che lo strain-gauge posto a 162 mm registra deformazioni nulle anche in corrispondenza di valori di carico pari all'80%, quindi, possiamo ipotizzare che l'ancoraggio efficace sia di poco superiore a questa lunghezza. Sulla muratura viene coinvolta una lunghezza di rinforzo maggiore in quanto lo strain-gauge collocato a 162 mm registra deformazioni ben prima della delaminazione mentre quello posto a 220 mm non ne registra deformazioni fino all'innescio della delaminazione, pertanto possiamo dedurre che la lunghezza efficace di ancoraggio sia prossima a 220 mm.

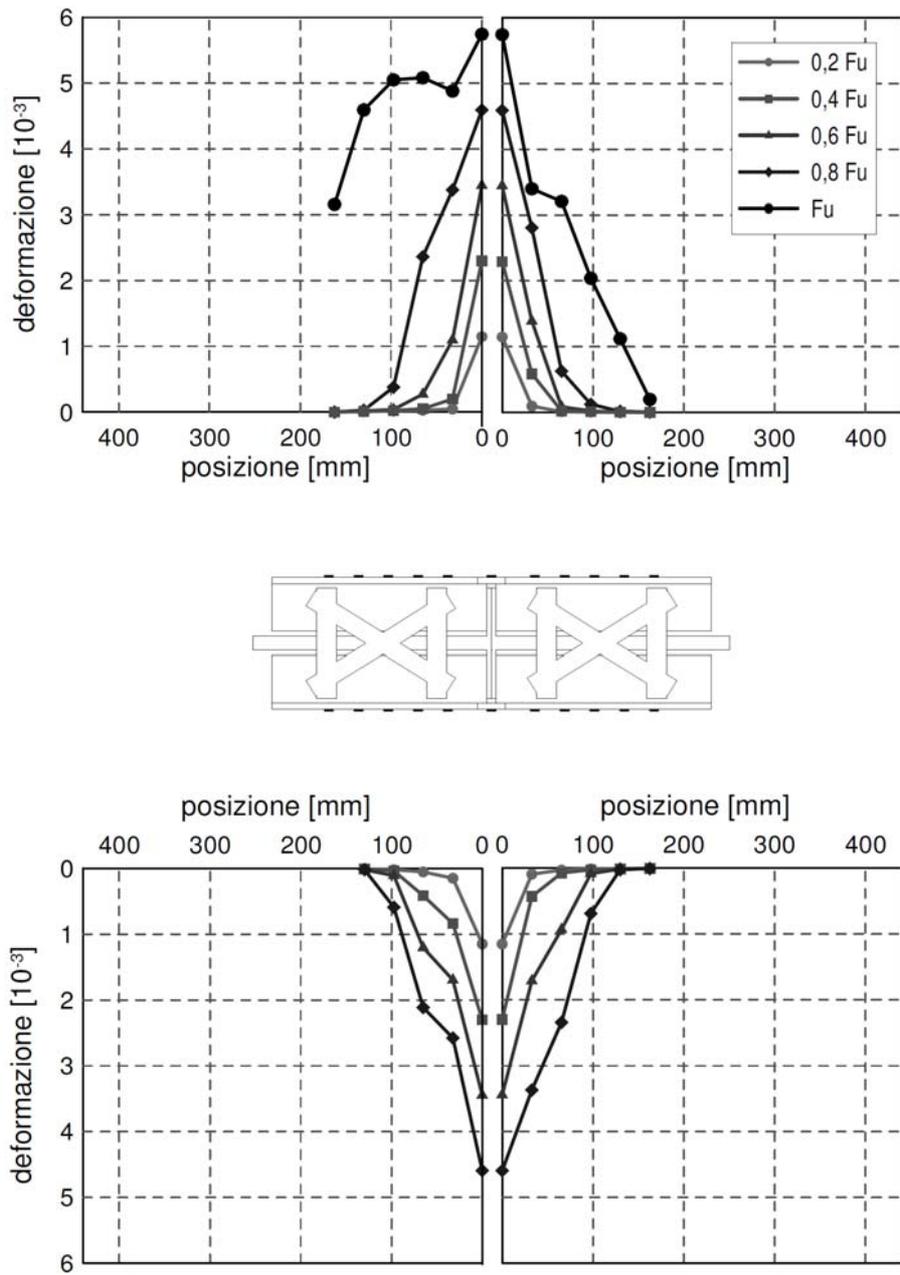


Figura 6.8 profili di deformazione per livello di carico CFRCM su laterizio con L ancoraggio 220 (setup B)

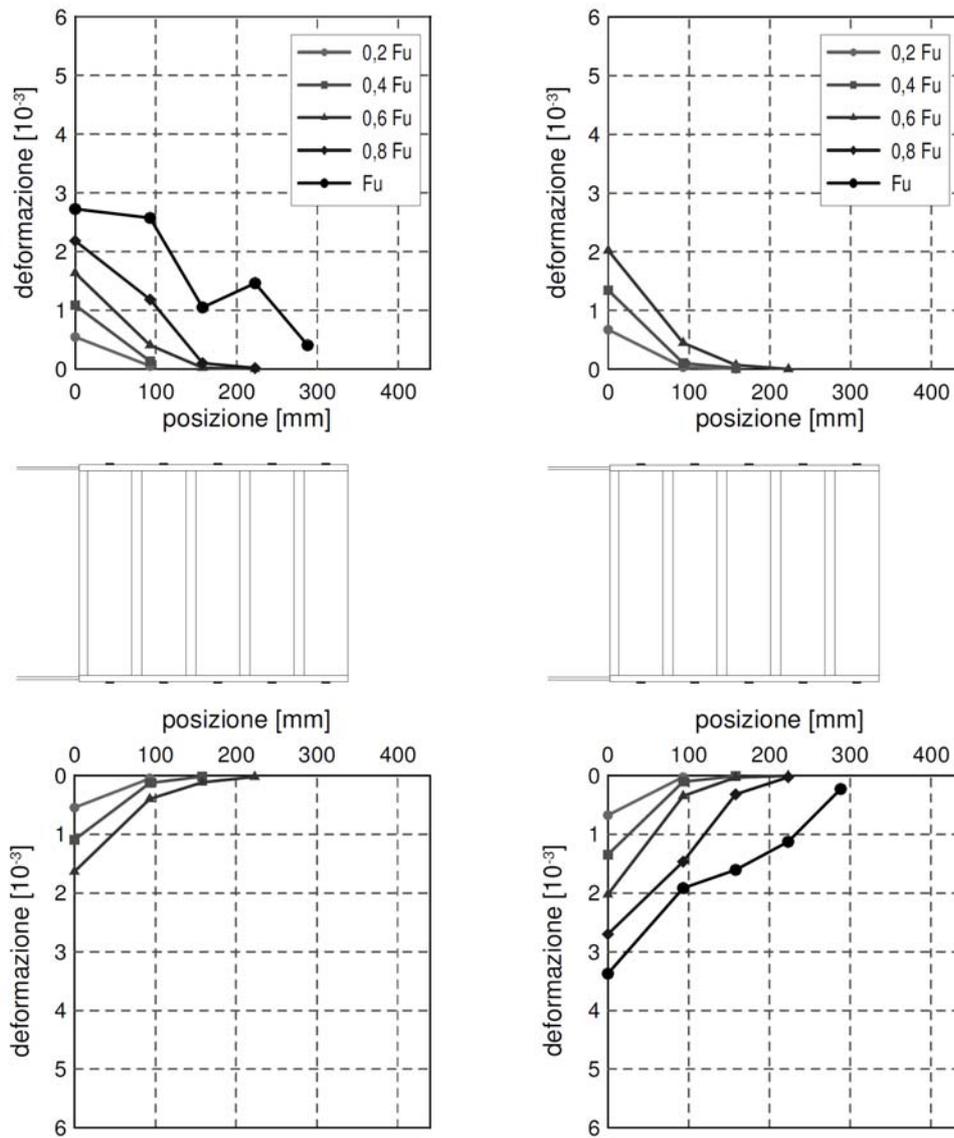


Figura 6.9 profili di deformazioni per livello di carico SRG su muratura con L ancoraggio 315 mm (setup A)

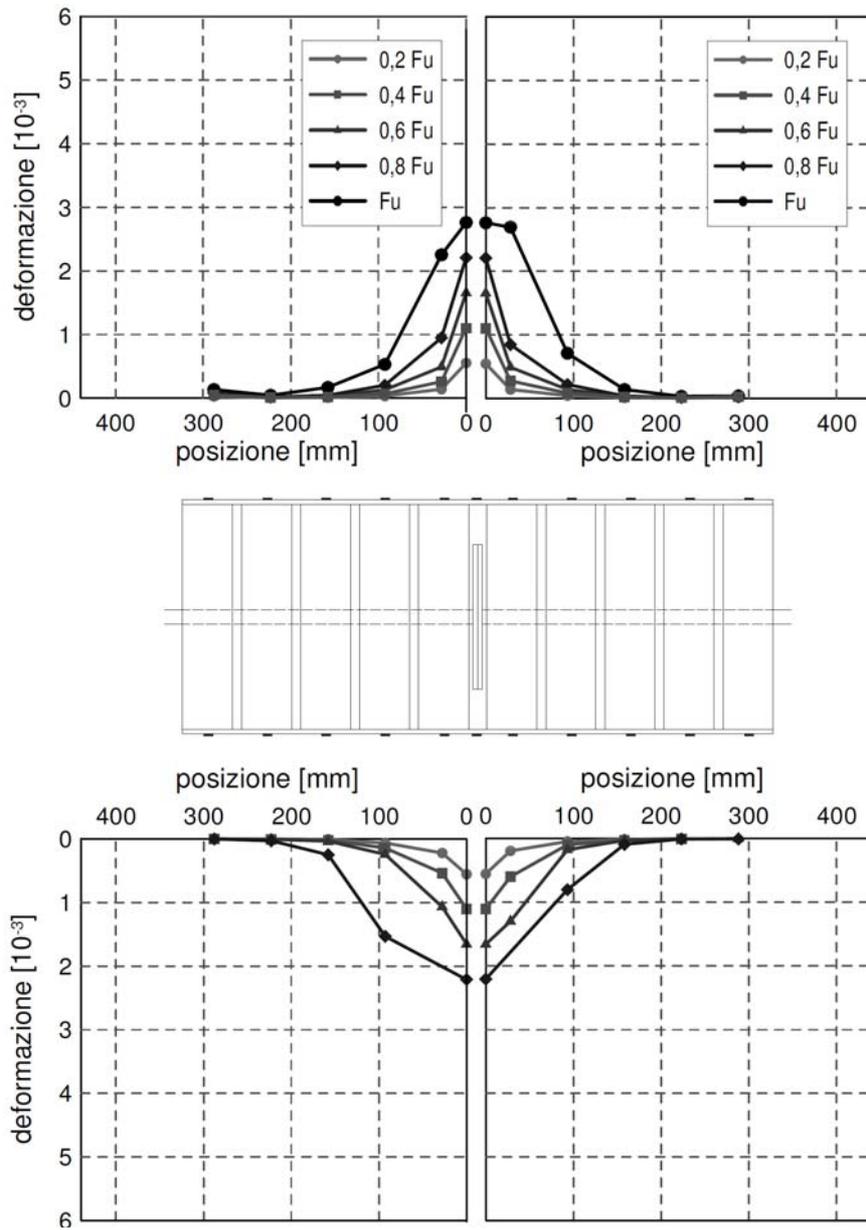


Figura 6.10 profili di deformazione per livelli di carico SRG su muratura con L ancoraggio 315 mm (setup B)

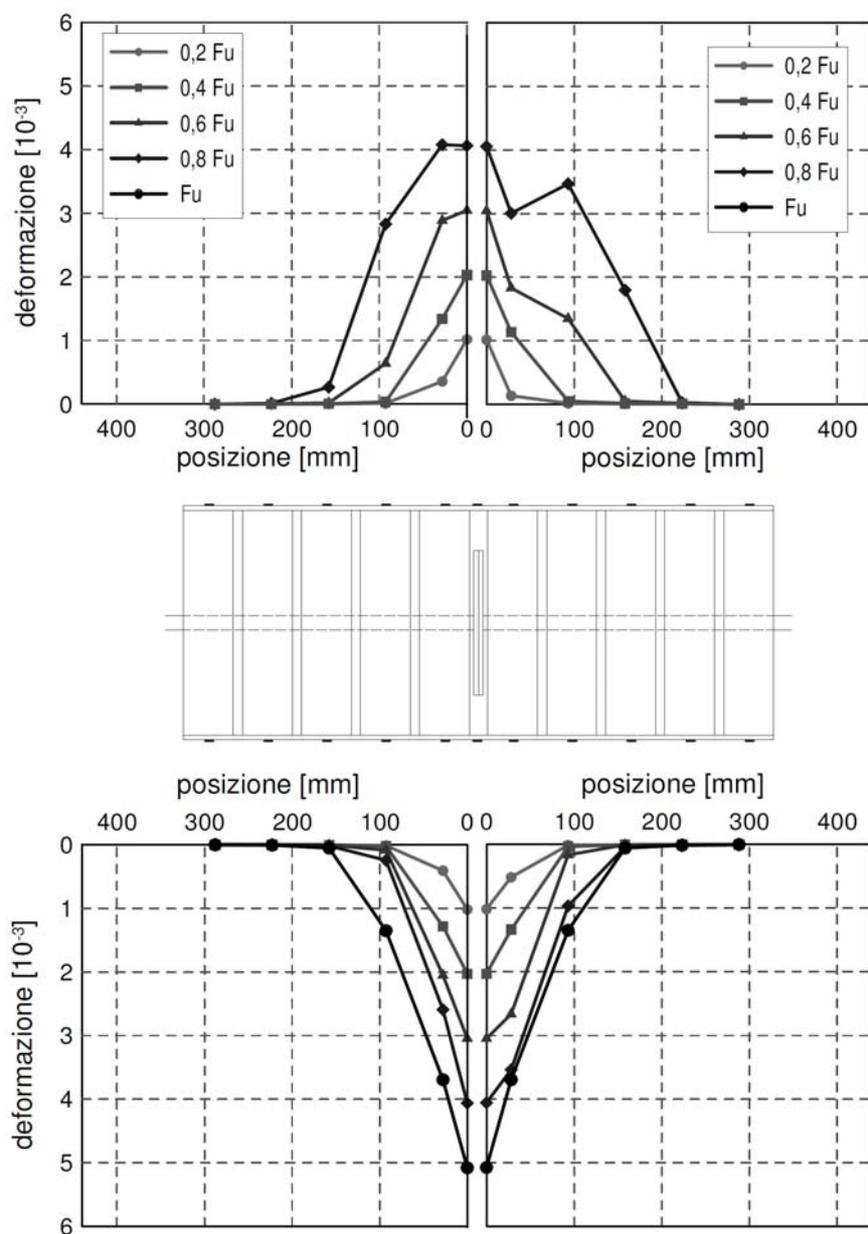


Figura 6.11 profili di deformazioni per livelli di carico CFRCM su muratura con L ancoraggio 315 mm (setup B)

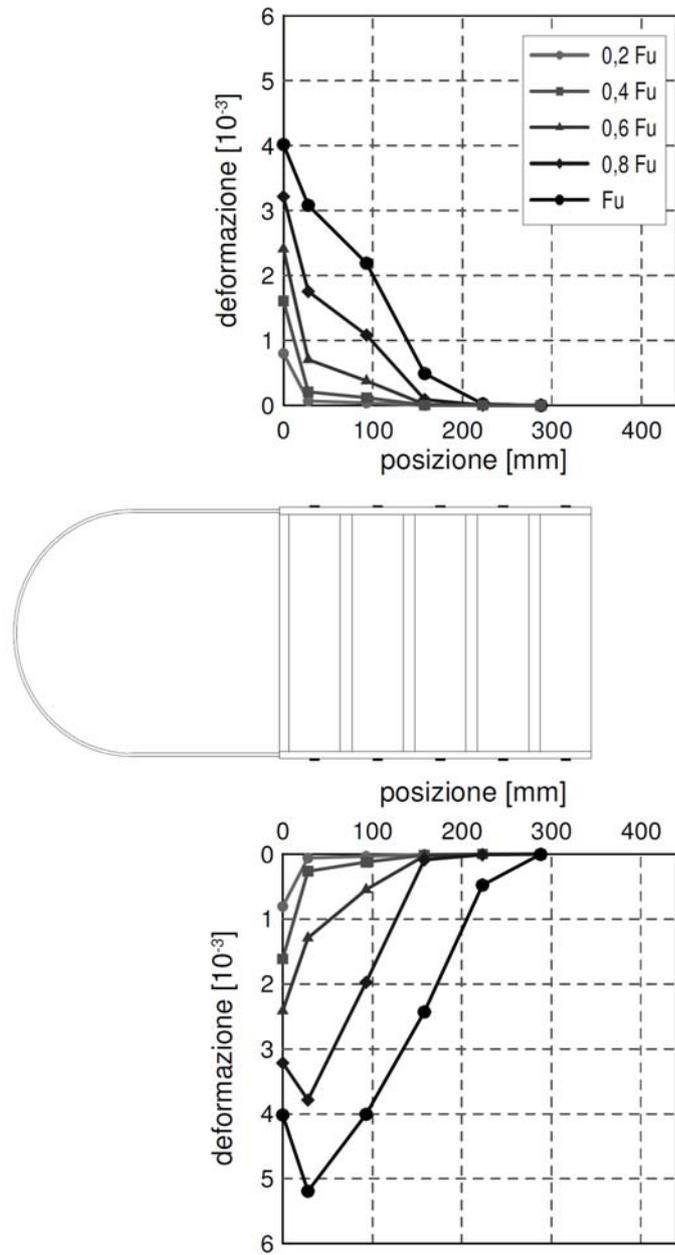


Figura 6.12 profili di deformazione per livelli di carico CFRMC su muratura con L ancoraggio 315 mm (setup A)

7. Modellazione delle prove

Come illustrato nei capitoli precedenti, il processo di delaminazione si manifesta generalmente con la formazione di una fessura e la successiva propagazione di questa tra il supporto ed il rinforzo. La forza di trazione impressa al tessuto genera delle deformazioni estensionali che comportano la formazione di tensioni tangenziali all'interfaccia tra rinforzo e supporto. Inizialmente soltanto il tratto adeso in prossimità dell'applicazione della forza è sollecitato, ma al crescere della forza impressa, la zona sollecitata si estende, in modo da interessare una maggiore lunghezza del rinforzo. Non appena la tensione tangenziale all'estremità del rinforzo adeso raggiunge il picco di resistenza, un ulteriore incremento di forza comporta una diminuzione della tensione locale in quel punto, e richiede che una porzione di rinforzo più lontana venga a sopperire alla diminuzione della tensione di scorrimento. All'aumentare della forza si raggiunge infine la condizione in cui lo scorrimento all'estremità del rinforzo adeso è pari al valore ultimo, che corrisponde al rilascio della tensione tangenziale. E' qui che inizia il processo di delaminazione del rinforzo, in cui il profilo delle tensioni tangenziali trasla lungo il rinforzo al procedere della delaminazione, mantenendosi sostanzialmente inalterato. Durante questo processo la forza totale, pari all'integrale della curva delle tensioni tangenziali lungo il rinforzo, rimane sostanzialmente costante. La rottura per distacco completo si manifesta non appena la sollecitazione raggiunge la zona terminale della lamina di rinforzo, e la forza non può più essere equilibrata. Le tensioni tangenziali, che si trasferiscono localmente tra supporto e rinforzo dipendono dallo spostamento relativo tra i due materiali, cioè dallo scorrimento δ , detto anche slip, attraverso un legame τ - δ che rappresenta il comportamento costitutivo dell'interfaccia. Tale legame ha un andamento tipico in cui si possono distinguere tre diverse zone. Una prima zona in cui si ha un andamento crescente della tensione tangenziale al crescere dello scorrimento fino ad un valore massimo. Si può assumere che l'interfaccia del rinforzo soggetta agli scorrimenti di questo primo tratto non sia danneggiata. Una seconda zona in cui le tensioni tangenziali sono rappresentate da una funzione decrescente dello scorrimento. Questa fase, rappresenta il comportamento post-picco, dove si verificano delle micro-fessure che permettono ancora il trasferimento di tensioni tangenziali, fino ad una soglia massima dello scorrimento, a partire dal quale si

può assumere che si apra una macrofessura e quindi le tensioni tangenziali siano nulle.

L'area sottesa dalla curva $\tau-\delta$ rappresenta l'energia di deformazione immagazzinata per unità di area aderente. Nel momento in cui si apre una fessura l'energia immagazzinata viene rilasciata. L'energia rilasciata, individuata dall'area sottesa alla curva $\tau-\delta$, viene chiamata energia di frattura G_F (per unità di area aderente) ed è definita come l'energia specifica necessaria per il completo distacco tra le due parti. La propagazione della frattura è causata da un valore critico della forza applicata F_{max} , che genera un rilascio dell'energia di deformazione (energia di frattura) e che per il bilancio energetico comporta un uguale aumento dell'energia di deformazione nella lamina di rinforzo. Discretizzando l'interfaccia in tratti sufficientemente piccoli da poter considerare le grandezze in esame costanti all'interno di ogni tratto, la relazione $\tau-\delta$ è facilmente integrata per fornire la relazione Forza-Scorrimento globale.

D'altra parte, per una stima delle relazioni globali, la relazione locale di interfaccia può essere notevolmente semplificata, come proposto da diversi autori. Ad esempio, in (Lu et al. 2005) è raccolto uno stato dell'arte delle sperimentazioni e delle modellazioni del fenomeno di delaminazione tra FRP e calcestruzzo; gli autori prendono in considerazione diciotto modelli, dodici dei quali stimano la resistenza alla delaminazione a partire dai risultati sperimentali e i restanti sei attraverso l'integrazione di legami costitutivi di interfaccia (tabella 7.1). Nella tesi è stato adottato questo secondo approccio, basato sulla determinazione di un legame di interfaccia, che è stato ricostruito a partire dai dati sperimentali. In particolare, al fine di ottenere una formulazione analitica della forza di delaminazione, le curve che descrivono il legame $\tau-\delta$ ottenute dalle prove sono state schematizzate attraverso un legame costitutivo bilineare come illustrato nel seguito.

Nel presente capitolo, dopo aver introdotto la formulazione del problema di delaminazione (§ 7.1) ed aver confrontato i risultati sperimentali con le previsioni delle linee guida CNR DT 200 (§ 7.2) viene ripresa la formulazione proposta in (Yuan et al. 2004) e implementata in Mathcad (§ 7.3). Quindi si ricostruiscono i legami di interfaccia a partire dalle prove sperimentali secondo la procedura proposta in (Ferracuti 2005) (§ 7.4) e, attraverso l'integrazione dei diagrammi bilineari equivalenti si ricavano le curve di comportamento globale (§ 7.5). Per modellare le prove su supporto curvilineo, viene adottata la formulazione proposta in De Lorenzis e Zavarise (2009) (§ 7.6) a partire dalla

quale viene inizialmente proposto un diverso criterio di collasso di modo misto (§ 7.7) per poi introdurre nella formulazione del modello un termine che tenga conto dell'accoppiamento indotto dalla curvatura atto a rappresentare il decadimento di resistenza osservato sperimentalmente (§ 7.8).

Modelli di resistenza		Modelli di interfaccia
Tanaka 1996		Neubauer and Rostasy 1999
Hitoyuki e Wu 1997		Nakaba et al. 2001
Van Gemert 1980		Monti et al. 2003
Maeda 1997		Savoia et al. 2003
Neubauer e Rostasy 1997		Dai and Ueda 2003
Khalifa 1998		Ueda et al. 2003
Chaallal 1998		
Chen e Teng 2001		
Izumo 2003		
Sato 2003		
Iso 2003		
Yang et al 2001		

Tabella 7.1 modelli per la resistenza alla delaminazione

7.1 Formulazione del problema

Si consideri una lamina di rinforzo con lunghezza d'adesione L maggiore della lunghezza efficace di ancoraggio. La forza di delaminazione F_{max} può essere ricavata come segue. Con riferimento alla figura 7.1, in un generico istante del processo, sia a il tratto del rinforzo distaccato dal supporto e si consideri che la frattura si propaghi per una lunghezza infinitesima da .

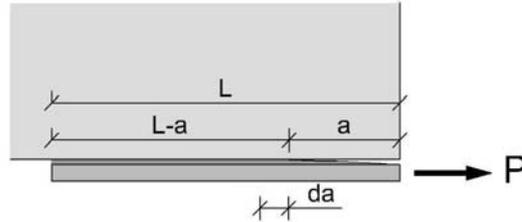


Figura 7.1 propagazione della frattura

Il rilascio di energia indotto dalla propagazione della fessura comporta un incremento di energia nel tratto di lamina adesiva, che stante le ipotesi fatte, non dipende dalla sua lunghezza $L-a$, è può scriversi come:

$$dU_L = dU_{L,a} + dU_{L,L-a} = \frac{1}{2} \frac{F^2}{E_r t_r b_r} da + 0 \quad (1)$$

dove E_r, t_r, b_r sono rispettivamente il modulo elastico, lo spessore e la larghezza della lamina. D'altra parte l'energia di frattura rilasciata è data da:

$$dW = G_f b_r da \quad (2)$$

Per quanto suddetto, eguagliando la (1) e la (2) si ottiene:

$$G_f b_r da = \frac{1}{2} \frac{F^2}{E_r t_r b_r} da + 0$$

$$F_{\max} = b_r \sqrt{2G_f E_r t_r} \quad (3)$$

L'espressione della forza massima trasferibile non dipende quindi dalla forma del legame $\tau-\delta$ ma solo dall'area sottesa G_f .

Per descrivere lo stato tensionale nel giunto si fanno le seguenti ipotesi:

- L'interfaccia tra supporto e rinforzo è soggetta solo a tensioni tangenziali τ .
- La sezione della lamina di rinforzo è costante lungo la direzione di sollecitazione.
- Gli effetti flessionali possono essere trascurati.
- La rigidità assiale del supporto è molto più grande di quella del rinforzo e pertanto la deformazione assiale del supporto può essere trascurata.
- La tensione normale σ_r nella sezione del rinforzo può considerarsi uniformemente distribuita nella sezione.

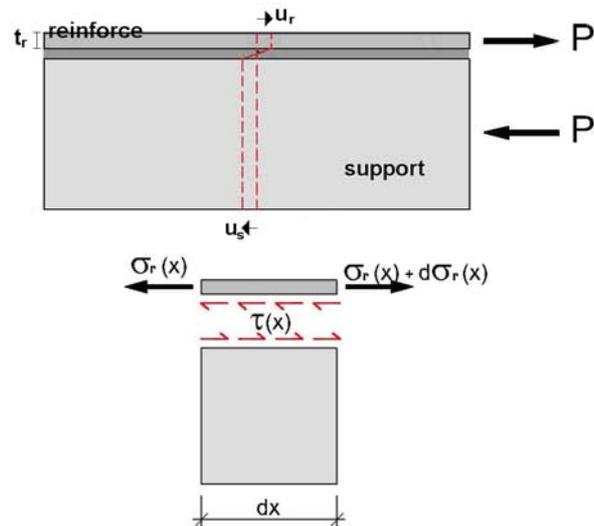


Figura 7.2 schematizzazione dello stato tensionale

Dall'equilibrio dell'elemento mostrato in figura 7.2 di lunghezza ds si ottiene:

$$\frac{d\sigma_r}{ds} - \frac{\tau}{t_r} = 0 \quad (4)$$

definito $\delta(s) = u_r(s) - u_s(s)$ lo scorrimento, u_r lo spostamento del rinforzo e u_s lo spostamento del supporto che è nullo in conseguenza alle ipotesi sopra fatte, la deformazione assiale del rinforzo ε_r si ottiene come:

$$\frac{d\delta}{ds} = \frac{du_r}{ds} = \varepsilon_r \quad (5)$$

Le relazioni costitutive di interfaccia e del rinforzo sono:

$$\tau = f(\delta) \quad (6)$$

$$\sigma_r = E_r \varepsilon_r \quad (7)$$

in cui $f(\delta)$ è la legge che descrive il legame di interfaccia. Dalle (4), (5), (6) e (7) è possibile ottenere l'equazione differenziale di secondo ordine, già introdotta in (Volkersen 1938), che descrive il comportamento dell'interfaccia supporto-rinforzo adeso.

$$\frac{d^2\delta}{ds^2} - \frac{1}{E_r t_r} f(\delta) = 0 \quad (8)$$

7.2 Confronto con le linee guida CNR DT-200

Prima di procedere con la modellazione delle prove sperimentali è opportuno effettuare un confronto con le espressioni fornite dalle linee guida CNR-DT 200/2004, che rappresentano allo stato attuale il riferimento normativo italiano relativo ai rinforzi in compositi.

Per quanto riguarda le applicazioni su strutture murarie, le linee guida valutano la resistenza alla delaminazione del rinforzo e la lunghezza efficace di ancoraggio a partire dalla rigidità assiale della lamina di rinforzo e dalle proprietà meccaniche del supporto.

L'espressione fornita per la valutazione della lunghezza efficace di ancoraggio l_e (nei rinforzi FRP) è data da:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_r \cdot t_r}{2 \cdot f_{mt}}} \quad (9)$$

dove E_r, t_r sono rispettivamente il modulo elastico e lo spessore del rinforzo, f_{mt} è la resistenza a trazione della muratura.

L'energia specifica di frattura G_f è espressa in funzione delle caratteristiche meccaniche del supporto come:

$$G_f = c_1 \sqrt{f_m \cdot f_{mt}} \quad (10)$$

dove f_m è la resistenza a compressione della muratura e c_1 è un coefficiente da determinare su base sperimentale, che in assenza di dati è assunto pari a 0,015.

La tensione massima nel rinforzo prima dell'innescò della delaminazione f_{fd} è data dalla seguente espressione:

$$f_{fd} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_r \cdot G_f}{t_r}} \quad (11)$$

Nel caso di supporto curvilineo le linee guida suggeriscono di adottare un valore ridotto della tensione massima pari a:

$$f_{fp} = f_{fd} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{sd}}{f_{mt}}\right), \quad \sigma_{sd} = \sigma_r \cdot t_r \cdot \frac{1}{r} \quad (12)$$

in cui σ_{sd} è la tensione normale alla superficie di delaminazione che nasce per effetto della curvatura ed r è il raggio di curvatura. Nelle espressioni sopra riportate sono omessi i coefficienti parziali.

	E_r [MPa]	t_r [mm]	b_r [mm]	$A_{normale}$ [mm ²]	f_m [MPa]	f_{mt} [MPa]	F_{max} [KN]
SRG-mat	7000	7	38.1	266.7	45	4.5	6.8
SRG-mur	7000	7	38.1	266.7	28	2.8	6.3
CFRCM-mat	3827	7	40	280	45	4.5	5.7
CFRCM-mur	3827	7	40	280	28	2.8	5.2

Tabella 7.2 valori assunti per il confronto

	$l_{e_{CNR}}$	$l_{e_{spe}}$	$G_{f_{CNR}}$	$G_{f_{spe}}$	$f_{fd_{CNR}}$	$f_{fd_{spe}}$
SRG-mat	74	220-280	0.213	0.319	20.66	25.49
SRG-mur	94	220-280	0.132	0.273	16.30	23.62
CFRCM-mat	55	>162	0.213	0.435	15.27	20.35
CFRCM-mur	69	220	0.132	0.362	12.05	18.57

Tabella 7.3 confronto tra risultati sperimentali e valori da normativa

R [mm]	SRG			CFRCM		
	F_{max} [KN]	σ_f [MPa]	σ_{Sd} [10 ⁻² MPA]	F_{max} [KN]	σ_f [MPa]	σ_{Sd} [10 ⁻² MPA]
5000	4.4	16.50	2.31	-		
2650	3.6	13.50	3.56	5.2	18.57	4.90
1800	2.9	10.87	4.22	3.5	12.50	4.86
1300	1.4	5.24	2.82	-		

Tabella 7.4 valori assunti per il confronto

R [m]	SRG		CFRCM	
	$f_{fp_{CNR}}$ [MPa]	σ_i [MPa]	$f_{fp_{CNR}}$ [MPa]	σ_i [MPa]
5000	16.16	16.50		
2650	16.05	13.50	11.91	18.57
1800	15.94	10.87	11.85	12.50
1300	15.80	5.24		

Tabella 7.5 confronto tra risultati sperimentali e valori di normativa

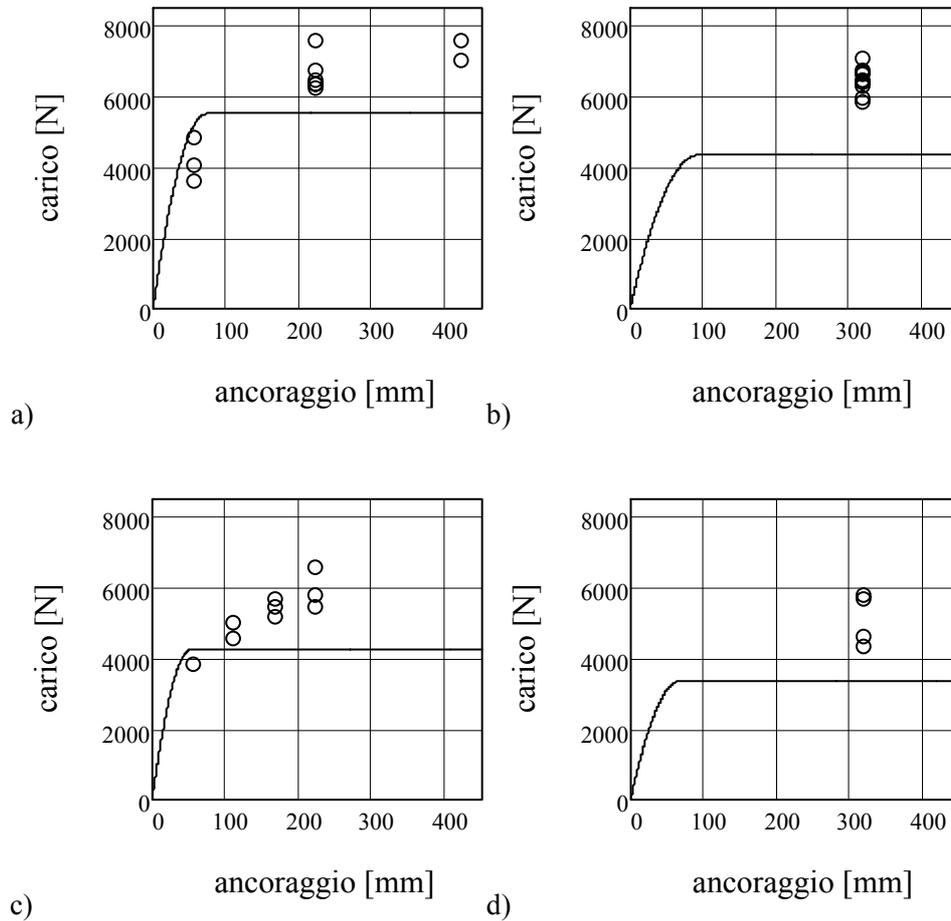


Figura 7.3 Stima del carico di delaminazione in funzione della lunghezza di ancoraggio suggerita in DT 200 e confronto con la sperimentazione: a) SRG su laterizio; b) SRG su muratura; c) CFRCM su laterizio; d) CFRCM su muratura

Per effettuare il confronto, in tabella 7.2 sono riportati i valori medi delle caratteristiche geometriche e meccaniche relative alle quattro tipologie di rinforzo/supporto indagate.

In tabella 7.3 sono riportati quindi i valori medi delle grandezze che governano il fenomeno (l_e, G_f, f_{fd}, f_{pd}) rilevate dalle sperimentazioni, con i corrispondenti valori che si ottengono dalle linee guida, in assenza di coefficienti parziali ed assumendo i valori medi delle proprietà dei materiali.

Analogamente nelle tabelle 7.4 e 7.5 sono riassunti i risultati forniti dalle linee guida e dalle prove sperimentali per le prove su supporto curvilineo.

I risultati mostrano una significativa sottostima della lunghezza di ancoraggio efficace e dell'energia di frattura, soprattutto per il rinforzo FRCM e per il supporto in muratura. Ne consegue una sottostima della tensione di delaminazione molto penalizzante soprattutto per la muratura. D'altra parte la formulazione delle linee guida riferita a compositi con matrice polimerica, non tiene conto dello spessore rilevante della matrice cementizia e della modalità di delaminazione che si manifesta all'interno della matrice piuttosto che nel supporto.

7.3 Richiami del modello in (Yuan et al. 2004)

In questo paragrafo si richiama la formulazione proposta in (Yuan et al. 2004) dove viene presentata una soluzione analitica del problema della delaminazione, adottando un legame di interfaccia di tipo bilineare. Tale formulazione è stata implementata nel programma di calcolo mathcad per riprodurre le prove sperimentali.

L'equazione governante è derivata dalle seguenti equazioni di equilibrio nelle quali non viene trascurata la deformabilità del supporto.

$$\begin{aligned}\frac{d\sigma_r}{ds} - \frac{\tau}{t_r} &= 0 \\ \sigma_r t_r b_r &= \sigma_s t_s b_s = 0\end{aligned}\quad (13)$$

Si assume per supporto e rinforzo un comportamento lineare elastico

$$\sigma_r = E_r \frac{du_r}{ds}, \sigma_s = E_s \frac{du_s}{ds}\quad (14)$$

Dalle (13) e (14) si ottiene un'equazione differenziale di secondo ordine nella variabile scorrimento:

$$\frac{d^2\delta}{ds^2} - \frac{2G_f}{\tau_f^2} \lambda^2 f(\delta) = 0\quad (15)$$

In cui

$$\lambda^2 = \frac{\tau_f^2}{G_f} \left(\frac{1}{E_r t_r} + \frac{b_r}{b_s E_s t_s} \right)\quad (16)$$

La funzione $f(\delta)$ esprime il legame di interfaccia che nel lavoro è assunto bilineare e descritto dalle seguenti espressioni:

$$f(\delta) = \begin{cases} \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta & \text{per } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta) & \text{per } \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f \\ 0 & \text{per } \delta \geq \delta_f \end{cases} \quad (17)$$

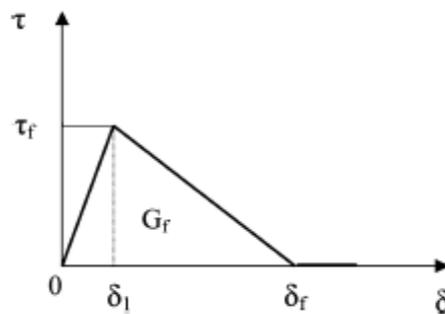


Figura 7.4 legame di interfaccia bilineare

Definita s la variabile che descrive la posizione sul rinforzo adeso posta nulla all'estremo non caricato e pari a L nell'estremo caricato per un rinforzo con lunghezza di ancoraggio L , il problema viene risolto in tre fasi.

Nella prima fase, definita elastica, il rinforzo è soggetto a piccoli carichi e gli scorrimenti raggiunti in $s=L$ sono inferiori a δ_1

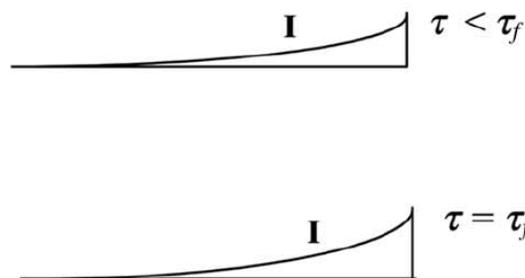


Figura 7.5 profilo delle tensioni tangenziali di interfaccia nella fase elastica

L'equazione che descrive il problema in questa fase è:

$$\frac{d^2\delta}{ds^2} - \lambda_1^2\delta = 0 \quad (18)$$

Dove

$$\lambda_1^2 = \lambda^2 \frac{2G_f}{\delta_1 \tau_f} = \frac{\tau_f}{\delta_1} \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right) \quad (19)$$

ed è risolta imponendo le seguenti condizioni al contorno:

$$\begin{aligned} \sigma(0) &= 0 \\ \sigma(L) &= \frac{F}{b_r t_r} \end{aligned} \quad (20)$$

Definito lo scorrimento all'estremo caricato $\delta(L) = \Delta$ è possibile ricavare il carico applicato direttamente in funzione di Δ :

$$F = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_1} \frac{\Delta}{\delta_1} \tanh(\lambda_1 L) \quad (21)$$

La funzione è rappresentata in figura 7.8 come tratto OA.

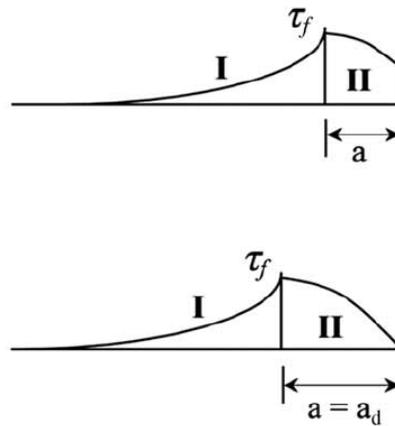


Figura 7.6 profilo delle tensioni tangenziali nella seconda fase

Raggiunto lo scorrimento δ_1 nella sezione $s=L$, e quindi la tensione τ_f , si entra nella seconda fase in cui il rinforzo adeso è diviso in due zone: una zona in cui il legame di interfaccia è entrato nel tratto lineare decrescente in cui le tensioni tangenziali diminuiscono e si verificano micro fessurazioni; la zona più lontana dall'applicazione del carico è ancora soggetta a scorrimenti inferiori a δ_1 e il legame di interfaccia corrispondente è ancora il tratto lineare crescente. Il

fenomeno è quindi governato dalle seguenti equazioni ciascuna valida nel tratto corrispondente.

$$\begin{aligned} \frac{d^2\delta}{ds^2} - \lambda_1^2 \delta &= 0, \text{ per } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ \frac{d^2\delta}{ds^2} + \lambda_2^2 \delta &= \lambda_2^2 \delta_f \text{ per } \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f \end{aligned} \quad (22)$$

dove

$$\lambda_2^2 = \lambda^2 \frac{2G_f}{(\delta_f - \delta_1)\tau_f} = \frac{\tau_f}{(\delta_f - \delta_1)} \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right) \quad (23)$$

Le equazioni vengono risolte imponendo le seguenti condizioni al contorno e di continuità:

$$\begin{aligned} \sigma(0) &= 0 \\ \tau(L-a) &= \tau_f \\ \sigma^-_{L-a}(L-a) &= \sigma^+_{L-a}(L-a) \\ \sigma(L) &= \frac{F}{t_r b_r} \end{aligned} \quad (24)$$

Durante questa fase possiamo esprimere il carico in funzione dello scorrimento all'estremo caricato tramite il parametro a che rappresenta la lunghezza del tratto di rinforzo coinvolto nella seconda fase (tratto AB di figura 7.8) e possiamo determinare il carico massimo imponendo

$$\frac{dF(a)}{da} = 0$$

La lunghezza efficace di ancoraggio, definita come la lunghezza su cui le tensioni tangenziali equiparano il 97% del carico ultimo, è descritta dalla seguente formula:

$$l_e = a + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{\lambda_1 + \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)}{\lambda_1 - \lambda_2 \tan(\lambda_2 a)} \quad (25)$$

In cui:

$$a = \frac{1}{\lambda_2} \arcsin \left[0.97 \sqrt{\frac{\delta_f - \delta_1}{\delta_f}} \right] \quad (26)$$

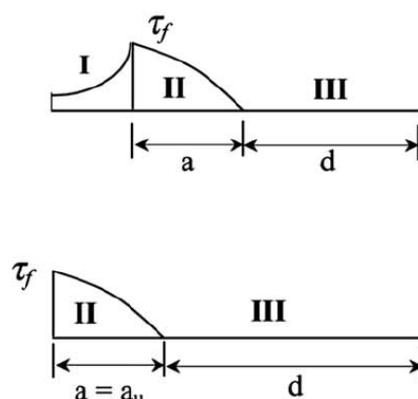


Figura 7.7 profilo delle tensioni tangenziali nella fase di delaminazione

Quando l'estremo caricato di ascissa $s=L$ raggiunge lo scorrimento δ_f , si innesca la delaminazione del rinforzo (terza fase) e la distribuzione di tensioni del rinforzo trasla verso la zona lontana dal carico, mentre si propaga la fessura lungo l'interfaccia. (tratto BCD). Il punto C in cui inizia la riduzione del carico corrisponde all'istante in cui la distribuzione di tensioni tangenziali è troncata alla fine dell'ancoraggio. Il ramo di equilibrio in cui il carico diminuisce non è stato qui preso in considerazione in quanto di poco interesse per il confronto tra modello e sperimentazione.

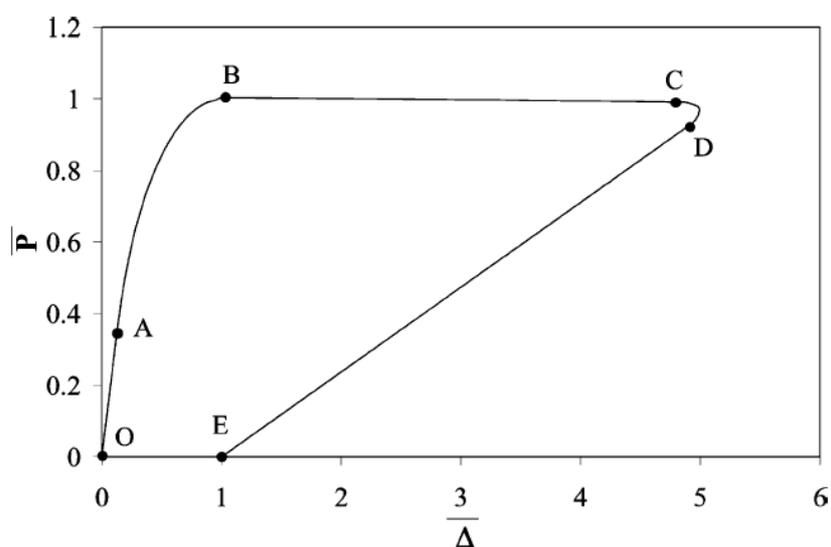


Figura 7.8 andamento globale carico scorrimento

7.4 Determinazione dei legami di interfaccia

Al fine di ricostruire il legame costitutivo di interfaccia è stata adottata la procedura presentata in (Ferracuti 2005).

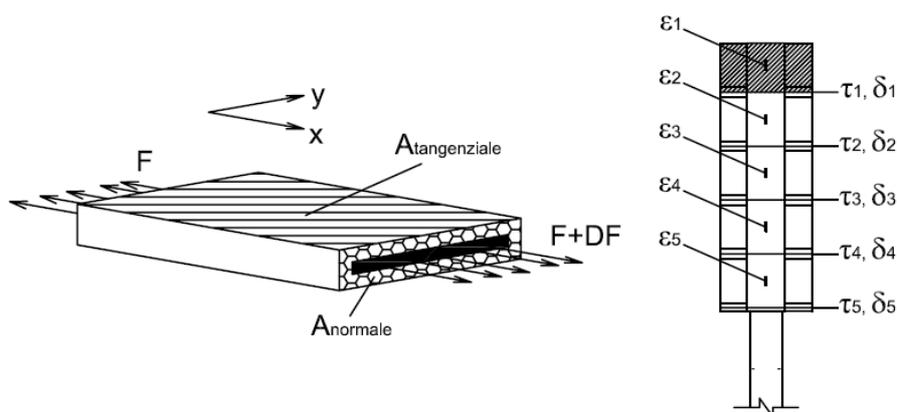


Figura 7.9 schema del setup sperimentale con il posizionamento degli strain-gauges

Nella figura 7.9 è rappresentata la posizione di n estensimetri elettrici (strain-gauges) che misurano la deformazione assiale lungo la lamina durante la prova. La posizione dello i -esimo strain-gauge viene indicata con x_i (con $i = 0, \dots, n$) e l'origine dell'asse di riferimento è localizzato nella posizione dello strain-gauge più lontano rispetto al punto di applicazione del carico ($x_0 = 0$). Per un dato livello di carico applicato ε_i indica la deformazione misurata nella posizione x_i . Per poter ricavare l'andamento degli scorrimenti lungo la lamina di rinforzo si fanno le seguenti ipotesi:

- Perfetta aderenza (scorrimento nullo) tra lamina di rinforzo e supporto nella posizione dell'ultimo strain-gauge, $\delta(x_0) = 0$.
- La deformazione assiale del supporto trascurabile rispetto a quella del rinforzo
- Variazione lineare della deformazione nella lamina di rinforzo tra due strain-gauges successivi (figura 7.11)..
- Tensioni tangenziali costanti tra due strain-gauges successivi (figura 7.12).

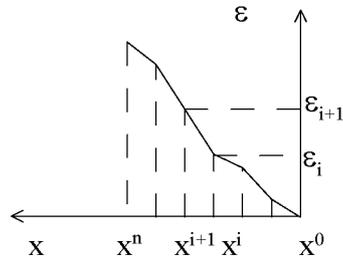


Figura 7.10 profilo delle deformazione assunte lungo il rinforzo

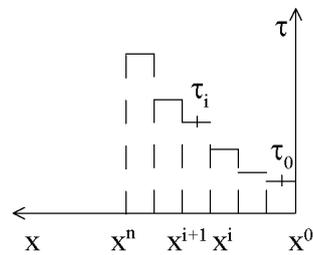


Figura 7.11 profilo delle tensioni tangenziali assunte lungo il rinforzo

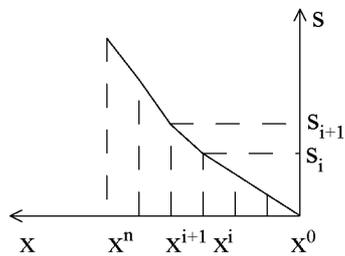


Figura 7.12 profilo degli scorrimenti assunte lungo il rinforzo

Considerando un comportamento elastico della lamina di rinforzo, il valor medio della tensione tangenziale tra due strain-gauges successivi può essere espresso in funzione della differenza delle deformazioni misurate, ε_i , ε_{i+1} , come segue:

$$\tau_{i+1/2} = \frac{E_r A_r (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{b_r (x_{i+1} - x_i)} \quad (27)$$

dove A_r , E_r e b_r indicano rispettivamente l'area, il modulo elastico e la larghezza della lamina di rinforzo.

L'integrazione del profilo di deformazione a partire dallo strain-gauge nella posizione $x_0=0$, fornisce la seguente espressione per lo scorrimento nella posizione generica x compresa tra due strain-gauges successivi ($x_i \leq x \leq x_{i+1}$):

$$\delta(x) = \delta(x_{i+1}) + \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)(x_{i+1} - x)^2}{(x_{i+1} - x_i) \cdot 2} + \varepsilon_i(x_{i+1} - x) \quad (28)$$

Lo scorrimento medio tra le posizioni x_i e x_{i+1} risulta:

$$\delta_{i+1/2} = \frac{\delta(x_{i+1}) + \delta(x_i)}{2} \quad (29)$$

In questo modo, per ogni livello di carico, si ottengono $n-1$ coppie di valori medi tensione tangenziale – scorrimento ($\tau_{i+1/2}/\delta_{i+1/2}$), e quindi le curve τ - δ locali.

7.5 Applicazione e confronto con i risultati sperimentali

Adottando la procedura sopra descritta, alle letture delle deformazioni ottenute sperimentalmente, sono state determinate le curve τ - δ per ciascuna delle quattro combinazioni supporto-rinforzo prese in esame.

Quindi, al fine di modellare il comportamento sperimentale, le curve τ - δ sono state approssimate da legami di interfaccia di tipo bilineare definiti come segue. La rigidezza del ramo iniziale è assunta pari alla media delle rigidezze iniziali del ramo ascendente della curva τ - δ ; la tensione di picco τ_{\max} è pari alla media della corrispondente tensione di picco misurata; il valore dello scorrimento ultimo δ_f è ottenuto imponendo che l'energia di frattura risultante sia pari alla media dei valori sperimentali. Tuttavia, stante la difficoltà di ricavare sperimentalmente il tratto decrescente delle curve τ - δ la pendenza del ramo decrescente è stata determinata anche sulla base della forza massima trasmissibile osservata sperimentalmente. Si riportano in tabella 7.4 i valori che descrivono i legami proposti e nelle figure 7.13-7.16 il confronto tra questi e le curve sperimentali.

	G_f	τ_{\max}	δ_i	δ_f
SRG-lat	0.320	1.54	0.0069	0.415
SRG-mur	0.273	0.98	0.0089	0.483
CFRCM-lat	0.435	1.36	0.0252	0.640
CFRCM-mur	0.362	1.04	0.0518	0.698

Tabella 7.6 definizione dei legami di interfaccia bilineari

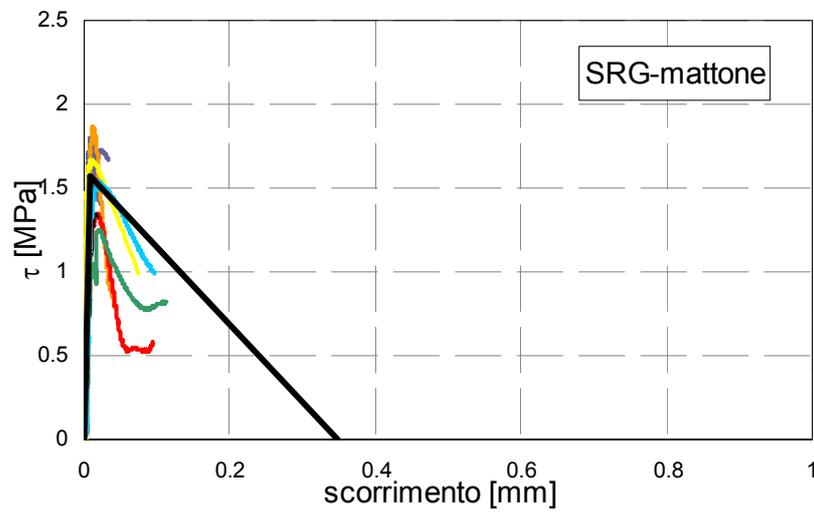


Figura 7.13 legame di interfaccia SRG-mattone

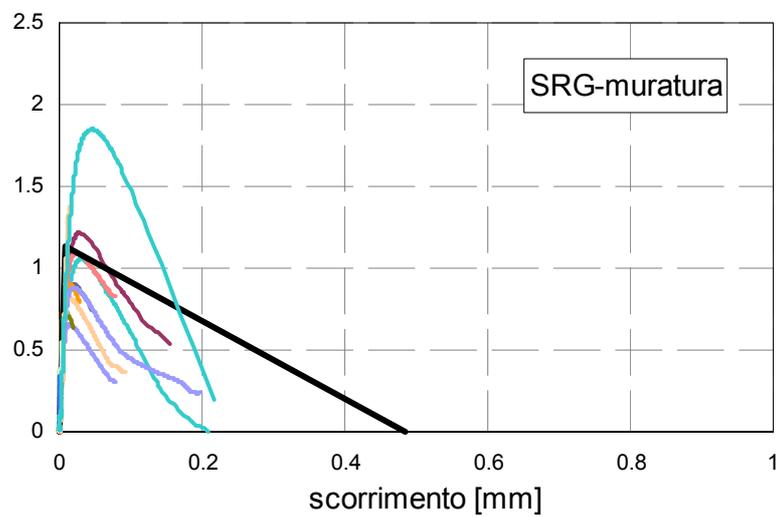


Figura 7.14 legame di interfaccia SRG-muratura

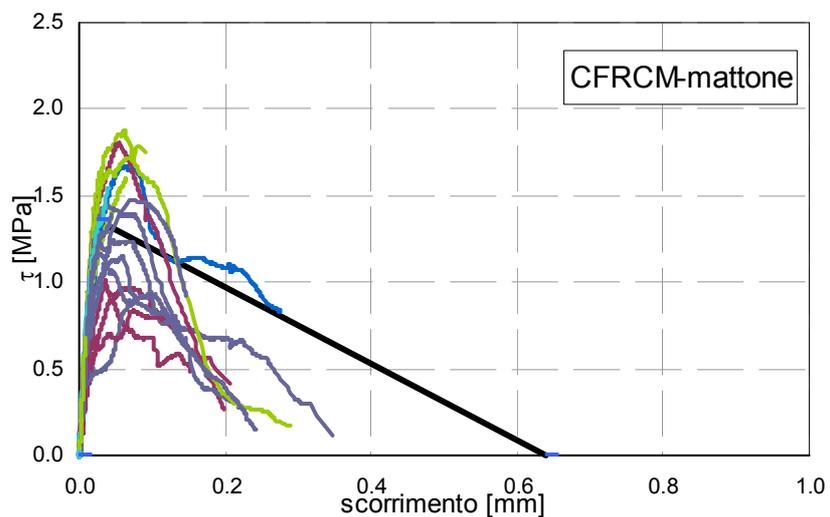


Figura 7.15 legame di interfaccia CFRCM-mattone

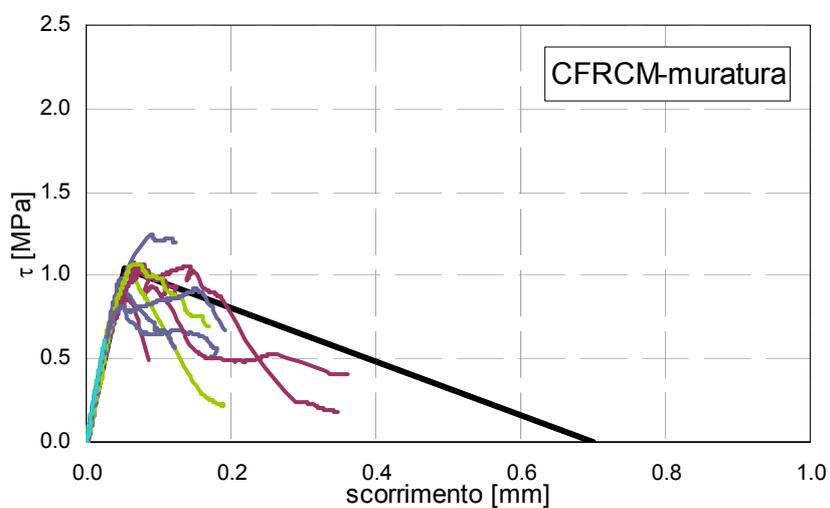


Figura 7.16 legame di interfaccia CFRCM-muratura

Integrando il legame bilineare si ottengono le curve forza-scorrimento globale come rappresentate nelle figure 7.17-7.20 a confronto con quelle sperimentali. Infine, nelle figure 7.21 e 7.22 sono rappresentati i profili delle deformazioni assiali del rinforzo per livelli di carico crescenti a confronto con le misure locali

degli strain-gauges disposti lungo il rinforzo e nelle figure 7.24 e 7.25 i profili della tensione tangenziale per le diverse tipologie di composito prese in esame. Infine nella tabella 7.7 sono riportate le lunghezze di ancoraggio efficaci previste da modello a confronto con quelle sperimentali.

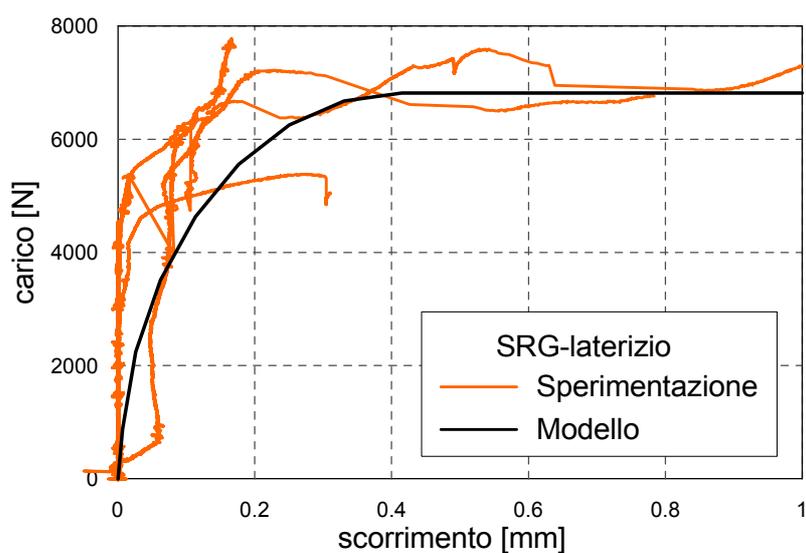


Figura 7.17 legame forza scorrimento SRG-mattone

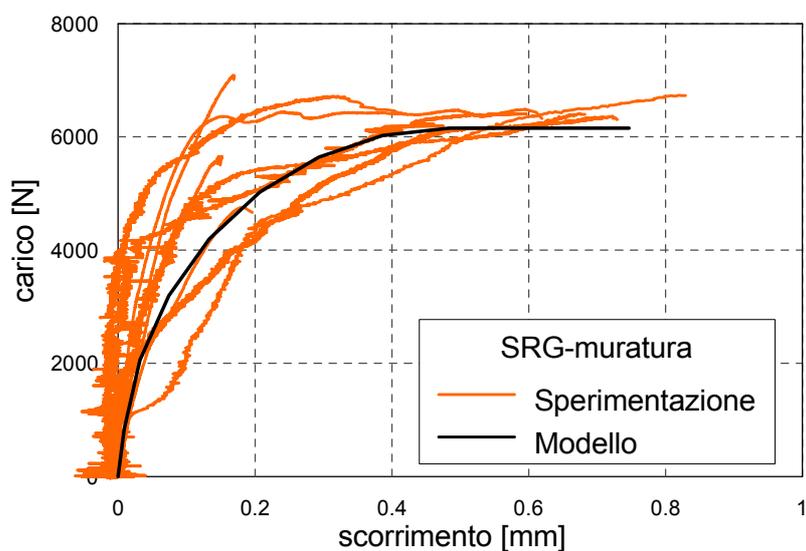


Figura 7.18 legame forza scorrimento SRG-muratura

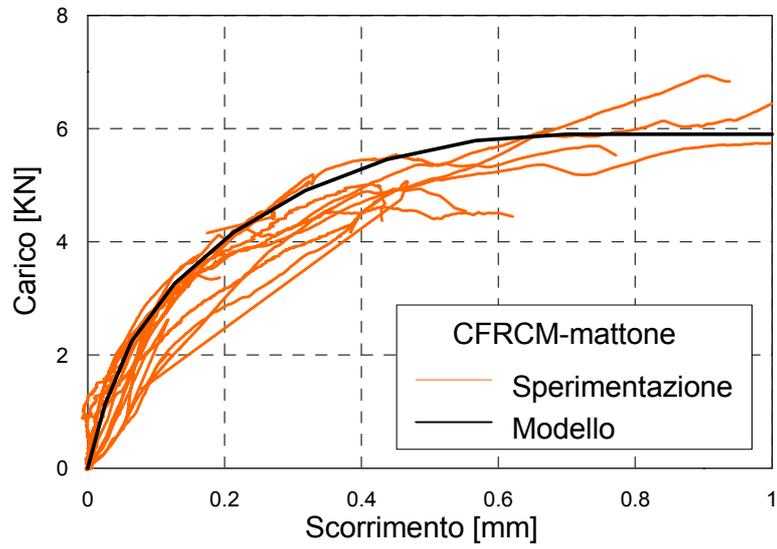


Figura 7.19 legame forza scorrimento CFRCM-mattone

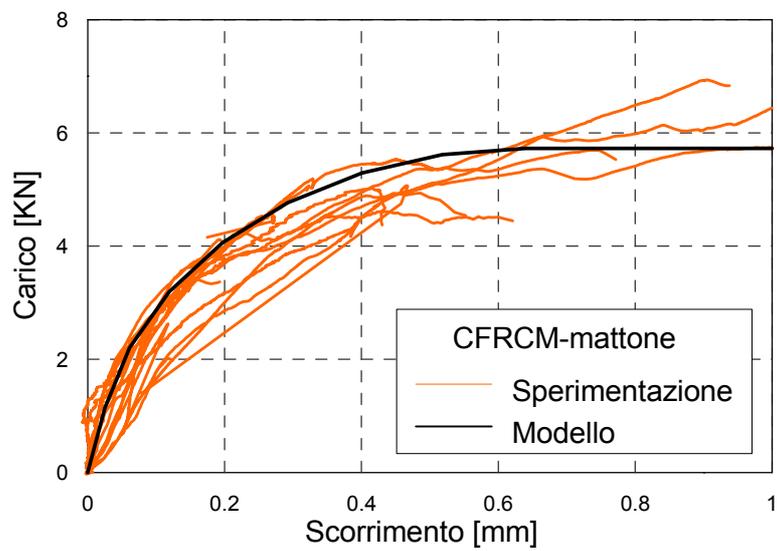


Figura 7.20 legame forza scorrimento CFRCM-muratura

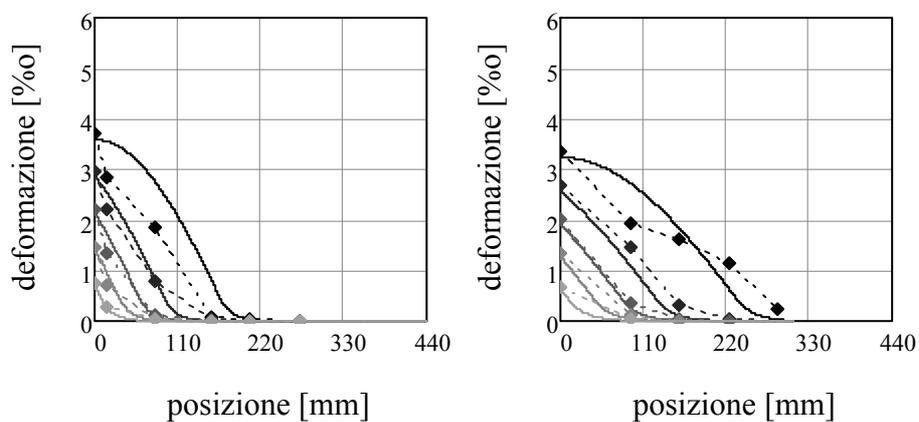


Figura 7.21 profilo delle deformazioni del rinforzo SRG su mattone (sinistra) e muratura (destra)

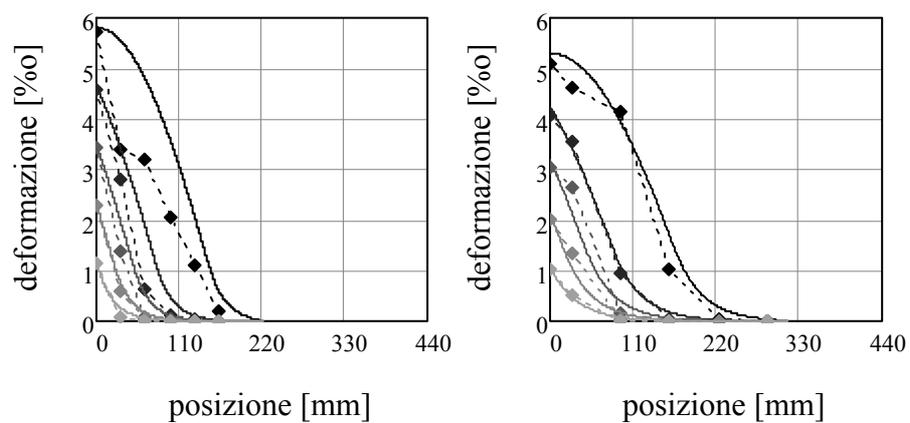


Figura 7.22 profilo delle deformazioni del rinforzo CFRCM su mattone (sinistra) e su muratura (destra)

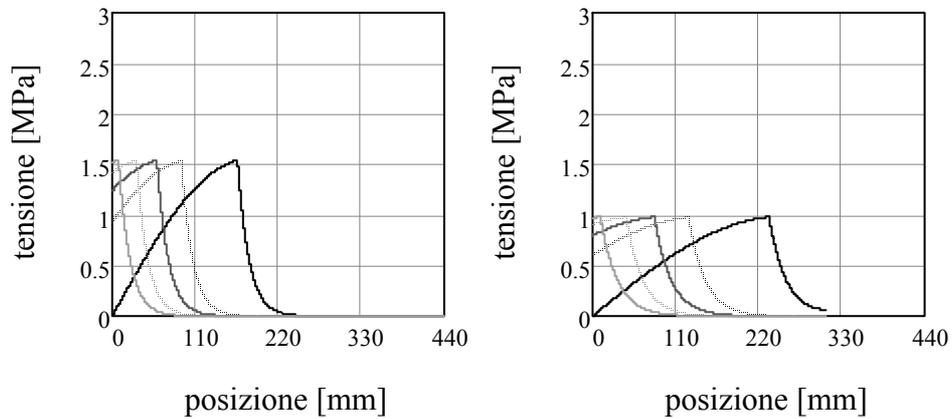


Figura 7.23 profilo delle tensioni di interfaccia del rinforzo SRG su mattone (sinistra) e su muratura (destra)

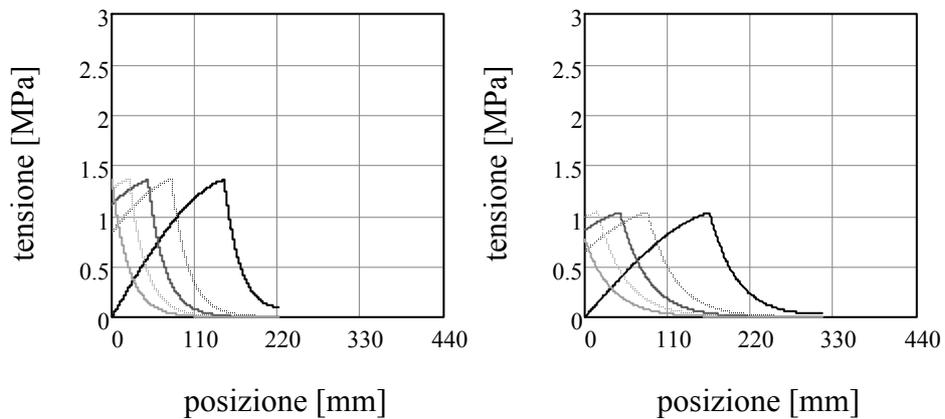


Figura 7.24 profilo delle tensioni di interfaccia del rinforzo CFRCM su mattone (sinistra) e su muratura (destra)

	$l_{e \text{ mod}}$	$l_{e \text{ spe}}$
SRG-mat	156	220-280
SRG-mur	222	220-280
CFRCM-mat	152	>162
CFRCM-mur	187	220

Tabella 7.7 valori delle lunghezza di ancoraggio ricavate dal modello e sperimentalmente

7.6 Richiami del modello in (De Lorenzis e Zavarise 2009)

In questo paragrafo viene sinteticamente richiamato il modello proposto in (De Lorenzis e Zavarise 2009) per descrivere il comportamento di lamine applicata a un supporto rigido con geometria curva. Il comportamento di interfaccia viene modellato attraverso due legami di interfaccia disaccoppiati, entrambi bilineari, che descrivono il comportamento rispettivamente in direzione normale e tangenziale. L'accoppiamento viene inserito nell'istante della delaminazione utilizzando un criterio di collasso misto.

Sia t_r lo spessore del rinforzo ed L la lunghezza di ancoraggio; si assuma il comportamento del rinforzo elastico lineare con modulo elastico E_r e il supporto rigido, con superficie concava e raggio di curvatura costante pari ad r . Al rinforzo sia applicata una forza F in direzione tangente alla superficie del supporto. Sia s la coordinata curvilinea con origine all'estremo libero del rinforzo e $\theta = s/r$ la corrispondente coordinata polare. Si consideri trascurabile la rigidezza flessionale della lastra, assumendo le forze assiali costanti sullo spessore. Siano σ_θ le tensioni dirette lungo la circonferenza e p_n e p_t rispettivamente le tensioni di interfaccia normali e tangenziali.

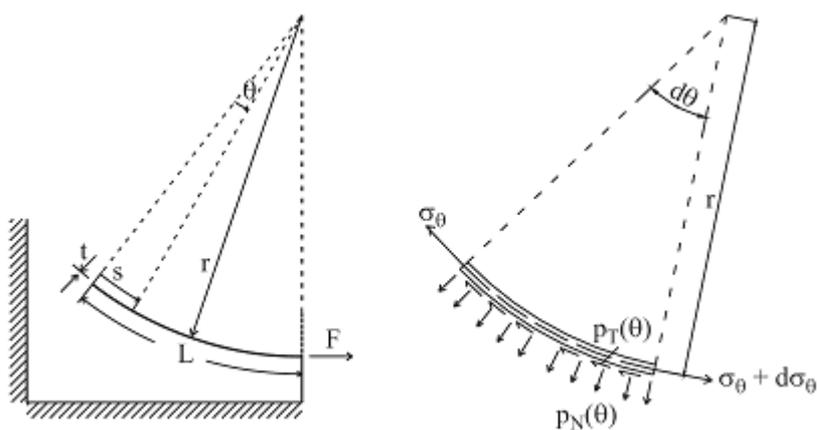


Figura 7.25 definizione del problema

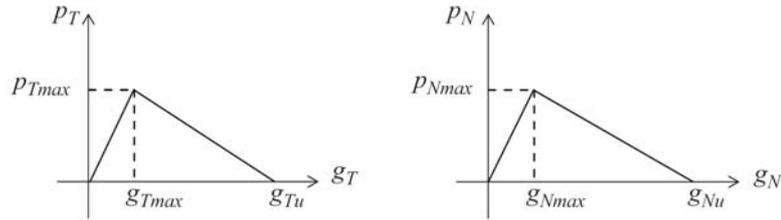


Figura 7.26 legami di interfaccia: in direzione tangenziale (sinistra) e in direzione normale (destra).

I legami di interfaccia sono descritti in figura e definiti dalle seguenti equazioni in cui g_T e g_N sono rispettivamente gli scorrimenti tangenziali e normali, in questo caso uguali agli spostamenti (u_g e u_r) del rinforzo per l'ipotesi di indeformabilità del supporto

$$\begin{cases} p_t = k_t g_T & 0 \leq g_T \leq g_{Tmax} \\ p_t = \frac{k_t}{\mu_t - 1} (g_{Tu} - g_T) & g_{Tmax} \leq g_T \leq g_{Tu} \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} p_n = k_n g_N & 0 \leq g_N \leq g_{Nmax} \\ p_n = \frac{k_n}{\mu_n - 1} (g_{Nu} - g_N) & g_{Nmax} \leq g_N \leq g_{Nu} \end{cases} \quad (31)$$

in cui

$$k_t = \frac{P_{Tmax}}{g_{Tmax}}, k_n = \frac{P_{Nmax}}{g_{Nmax}}, \mu_t = \frac{g_{Tu}}{g_{Tmax}}, \mu_n = \frac{g_{Nu}}{g_{Nmax}}$$

le equazioni governati sono scritte a partire dalle seguenti equazioni di equilibrio:

$$p_t = t_r \frac{d\sigma_g}{ds} \quad (32)$$

$$p_n = \frac{t_r}{r} \sigma_g \quad (33)$$

e dell'equazione di congruenza

$$\varepsilon_g = \frac{du_g}{ds} + \frac{u_r}{r} \quad (34)$$

Si ipotizza una lunghezza di ancoraggio sufficientemente lunga da garantire che l'interfaccia prossima al lato non caricato rimanga sempre nel tratto elastico crescente del legame di interfaccia in entrambe le direzioni. Analizzando la distribuzione di tensioni precedente alla delaminazione, si possono distinguere due fasi di comportamento ammissibili: la prima in cui entrambi i legami di

interfaccia rispondono nel ramo elastico e la seconda in cui la risposta tangenziale è caratterizzata dal ramo di softening mentre le tensioni normali rimane in campo elastico.

Nel modello viene assunto un criterio di collasso così descritto:

$$\frac{G_I}{G_{If}} + \frac{G_{II}}{G_{IIf}} = 1 \quad (35)$$

In cui

$$G_{IIf} = \frac{1}{2} P_{N \max} g_{Nu} \quad (36)$$

$$G_{IIf} = \frac{1}{2} P_{T \max} g_{Tu}$$

$$G_I = \frac{1}{2} k_n g_T^2(L) \quad (37)$$

$$G_{II} = G_{IIf} - \frac{1}{2} p_T(L) [g_{Tu} - g_N(L)]$$

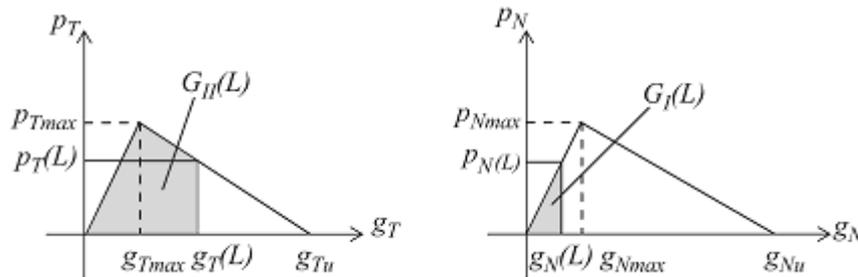


Figura 7.27 energia rilasciata nei due modi

Dalle (31), (33) e (34) si ottiene lo scorrimento normale in funzione di quello tangenziale.

$$u_r = \frac{Etr}{K_N r^2 - Et} \frac{du_\theta}{ds} \quad (38)$$

Quindi è possibile ottenere un'unica equazione in funzione dello scorrimento tangenziale che descrive il problema nella prima fase.

$$\frac{d^2 u_\theta}{ds^2} - \lambda_r^2 u_\theta = 0 \quad (39)$$

con

$$\lambda_r^2 = \frac{K_T}{Et} \left(1 - \frac{Et}{K_N r^2}\right) = \lambda^2 \left(1 - \frac{Et}{K_N r^2}\right) \quad (40)$$

La soluzione viene trovata imponendo le condizioni al contorno:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\vartheta}(0) = 0 \\ \varepsilon_{\vartheta}(L) = \frac{F}{Et} \end{cases} \quad (41)$$

La seconda fase è invece descritta a tratti dalle equazioni:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u_{\vartheta e}}{ds^2} - \lambda_r^2 u_{\vartheta e} &= 0 \quad \text{per } \bar{s} \leq s \leq L \\ \frac{d^2 u_{\vartheta s}}{ds^2} + \lambda_{rs,T}^2 u_{\vartheta s} &= \lambda_{rs,T}^2 g_{Tu} \quad 0 \leq s \leq \bar{s} \end{aligned} \quad (42)$$

In cui \bar{s} è l'ascissa in cui la tensione tangenziale raggiunge il valore $P_{T \max}$. Le equazioni (42) sono risolte imponendo le seguenti condizioni al contorno:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\vartheta,EE}(0) = 0 \\ u_{\vartheta,EE}(\bar{s}) = g_{T \max} \\ u_{\vartheta,SE}(\bar{s}) = g_{T \max} \\ \varepsilon_{\vartheta,EE}(\bar{s}) = \varepsilon_{\vartheta,SE}(\bar{s}) \end{cases} \quad (43)$$

Mentre l'ulteriore condizione

$$\varepsilon_{\vartheta,SE}(L) = \frac{F}{Et} \quad (44)$$

Permette di calcolare il carico in funzione dell'ascissa \bar{s} :

$$F = \frac{P_{T \max}}{\lambda_{rs,T}} \left\{ \sin[\lambda_{rs,T}(L - \bar{s})] + \frac{\lambda_{rs,T}}{\lambda_r} \tanh(\lambda_r \bar{s}) \cos[\lambda_{rs,T}(L - \bar{s})] \right\} \quad (45)$$

Nel modello così come formulato, la curvatura ha un effetto significativo sul comportamento in direzione normale ma pressoché trascurabile in direzione tangenziale, perlomeno nel range di valori in esame come illustrato nel paragrafo seguente.

7.7 Applicazione alle prove sperimentali e adozione di un criterio esponenziale di collasso

Il modello precedentemente descritto è stato implementato in Mathcad per simulare il comportamento delle prove sperimentali su supporto curvilineo. I risultati ottenuti in termini di diagramma forza-scorrimento sono rappresentati in figura 7.28 e 7.29 a confronto con le curve sperimentali.

Il confronto mostra una sostanziale indipendenza del modello al variare del raggio di curvatura a fronte di una sensibile riduzione della resistenza rilevata dalle prove sperimentali e una sottostima dello scorrimento globale che si verifica in presenza di curvature non nulle.

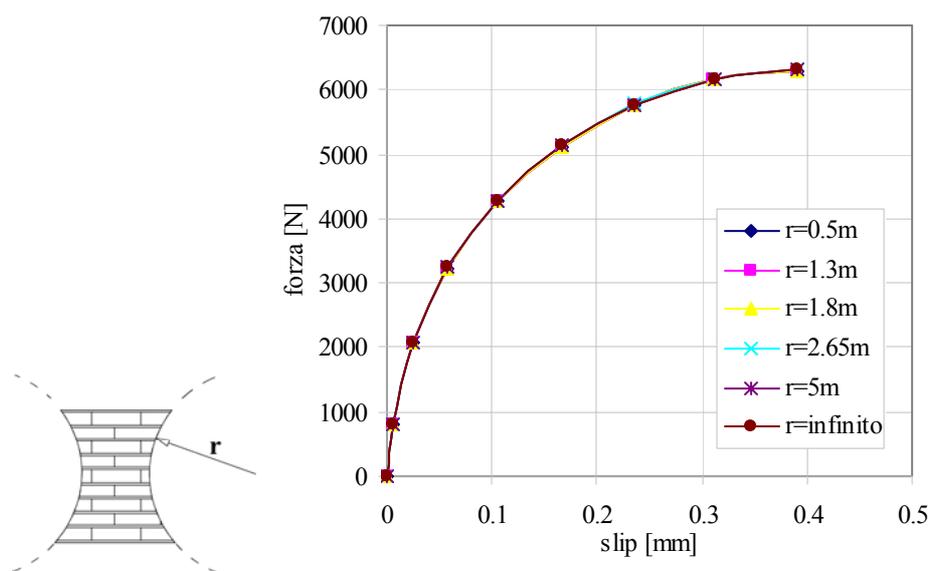


Figura 7.28 Andamento forza-scorrimento al variare del raggio di curvatura.

Raggio di curvatura	Carico ultimo sperimentale	Carico ultimo modellazione
5000 mm	4810-4370-4294 N	6185 N
2650 mm	3762-3764-3631 N	6029 N
1800 mm	2946-2944 N	5831 N
1300 mm	1430 N	5522 N

Tabella 7.8 confronto fra le prove sperimentali e il modello.

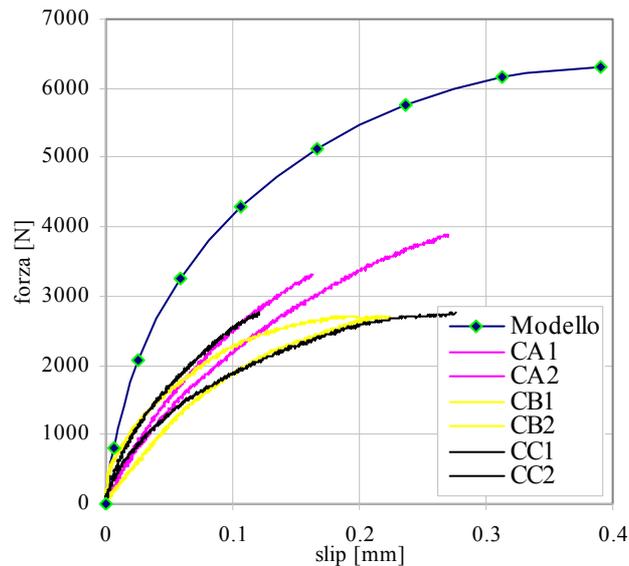


Figura 7.29 andamento forza-scorrimento: confronto tra modello e sperimentazione.

Al fine di riprodurre meglio la riduzione di resistenza indotta dalla curvatura, e cioè introdurre nel modello un maggior effetto delle tensioni di interfaccia normali P_N , si è pensato di modificare il criterio di collasso espresso dall'equazione (35) adottando una funzione di tipo esponenziale. Più precisamente, è stato adottato il criterio di rottura misto definito dall'espressione:

$$G_{II} = ae^{-\beta G_I} + c \quad (46)$$

in cui i parametri incogniti sono stati determinati come:

$$a = \frac{G_{II_f}}{1 - e^{-\beta G_I_f}}$$

$$c = G_{II_f} - a \quad (47)$$

β è una costante da determinare empiricamente

L'andamento del nuovo criterio è mostrato in figura 7.30

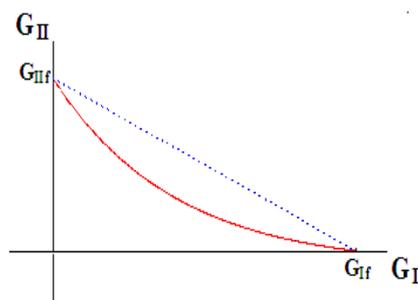


Figura 7.30 criterio di collasso esponenziale di modo misto.

Attraverso una opportuna taratura del coefficiente β sulla base dei risultati sperimentali, si ottiene una migliore stima del carico di delaminazione come riportato in tabella 7.9. Tuttavia, pur riuscendo a cogliere la diminuzione del carico di delaminazione al crescere della curvatura, il modello, così formulato, non è in grado di rappresentare la maggiore deformabilità che si rileva sperimentalmente. Il diagramma forza-scorrimento globale resta sostanzialmente invariato, con la sola anticipazione della condizione di collasso all'aumentare della curvatura.

Raggio di curvatura	Carico ultimo sperimentale	Carico ultimo modellazione
5000 mm	4810-4370-4294 N	4857 N
2650 mm	3762-3764-3631 N	3636 N
1800 mm	2946-2944 N	2828 N
1300 mm	1430 N	2185 N

Tabella 7.9 confronto fra carico di delaminazione sperimentale e modellato.

7.8 Formulazione proposta

In questo paragrafo viene presentata una nuova formulazione per descrivere la delaminazione su supporto curvo, in cui le tensioni di interfaccia normali, che si generano per effetto della curvatura, influenzano in maniera più significativa il comportamento globale. Il modello muove dalla formulazione proposta in (De Lorenzis e Zavarise 2009) conservando le ipotesi fatte dagli autori ed introducendo un termine costitutivo aggiuntivo come descritto nel seguito.

Le equazioni di equilibrio del modello sono:

$$p_t = t \frac{\partial \sigma_g}{\partial s} \quad (48)$$

$$p_n = \frac{t}{r} \sigma_g \quad (49)$$

L'equazione di congruenza è:

$$\varepsilon_g = \frac{\partial u_g}{\partial s} + \frac{u_r}{r} \quad (50)$$

I legami di interfaccia sono assunti descritti dalle seguenti equazioni in cui la tensione di interfaccia tangenziale è funzione sia dello scorrimento tangenziale che di quello normale:

$$p_t(u_g, u_r) = k_t u_g - \zeta u_r \quad \text{per } u_g \leq g_{T \max} \quad (51)$$

$$p_t(u_g, u_r) = \frac{k_t}{\mu_t - 1} (g_{Tu} - u_g) - \zeta u_r \quad \text{per } u_g > g_{T \max} \quad (52)$$

$$p_n(u_r) = k_n u_r \quad (53)$$

dove:

$$k_t = \frac{p_{T \max}}{g_{T \max}}, \mu_t = \frac{g_{Tu}}{g_{T \max}},$$

e k_n è la rigidità del legame di interfaccia in direzione normale. Nelle equazioni compare il coefficiente ζ attraverso il quale è introdotto un accoppiamento tra il comportamento normale e quello tangenziale.

Non è necessario introdurre un criterio di collasso, in quanto l'accoppiamento introdotto comporta, su superfici concave, un abbassamento della rigidità nel ramo crescente e una conseguente riduzione della tensione di picco. Pertanto, il tasso di rilascio di energia in modo II viene direttamente influenzato dalla curvatura.

Come nel modello presentato in (De Lorenzis e Zavarise 2009) si distinguono due fasi caratterizzate l'una dal comportamento elastico in direzione normale e tangenziale e l'altra dal comportamento di softening in direzione tangenziale, accoppiato ad un comportamento elastico in direzione normale. Di seguito sono descritte le due fasi.

FASE ELASTICA LINEARE

In questa fase gli scorrimenti in direzione tangenziale sono, per tutta la lunghezza del rinforzo, inferiori a $g_{T \max}$.

Dalle equazioni (48), (49), (50),(51) e (53) possiamo scrivere:

$$\begin{aligned} k_t u_g - \zeta u_g &= tE \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial u_g}{\partial s} + \frac{u_r}{r} \right) \\ k_n u_r &= \frac{t}{r} E \left(\frac{\partial u_g}{\partial s} + \frac{u_r}{r} \right) \end{aligned} \quad (54)$$

Sostituendo la seconda nella prima si ottiene l'equazione differenziale che descrive il problema in funzione dello scorrimento tangenziale:

$$\frac{\partial^2 u_g}{\partial s^2} + \left[\zeta \frac{1}{k_n r} \right] \frac{\partial u_g}{\partial s} + \left[\frac{k_t (Et - k_n r^2)}{E k_n t r^2} \right] u_g = 0 \quad (55)$$

Lo scorrimento normale è ad esso legato tramite l'equazione:

$$u_r = \frac{Etr}{k_n r^2 - Et} \frac{\partial u_g}{\partial s} \quad (56)$$

L'equazione differenziale viene risolta imponendo le seguenti condizioni al contorno:

$$\begin{aligned} \varepsilon_g(0) &= 0 \\ \varepsilon_g(L) &= \frac{F}{Et} \end{aligned} \quad (57)$$

La soluzione dell'equazione (55) viene di seguito riportata:

$$u_g(s, F) = A_1(F) \cdot e^{\alpha_1 s} + A_2(F) \cdot e^{\alpha_2 s} \quad (58)$$

con

$$\begin{aligned} A_1(F) &= \frac{F}{Et} \frac{1}{D(e^{L \cdot \alpha_1} \alpha_1 - e^{L \cdot \alpha_2} \alpha_1)} \\ A_2(F) &= \frac{F}{Et} \frac{1}{D(e^{L \cdot \alpha_2} \alpha_2 - e^{L \cdot \alpha_1} \alpha_2)} \\ D &= \frac{k_n r^2}{k_n r^2 - Et} \end{aligned} \quad (59)$$

ed α_1 e α_2 soluzioni dell'equazione caratteristica associata.

FASE DI SOFTENING IN DIREZIONE TANGENZIALE

In questa fase gli scorrimenti in direzione tangenziale sono superiori al valore $g_{T \max}$ in parte del rinforzo. Viene definita \bar{s} l'ascissa del rinforzo in cui lo scorrimento tangenziale assume il valore $g_{T \max}$.

Nel tratto di rinforzo in cui gli scorrimenti tangenziali sono inferiori a $g_{T \max}$ resta valida l'equazione (55):

$$\frac{\partial^2 u_{9e}}{\partial s} + \left[\zeta \frac{1}{k_n r} \right] \frac{\partial u_{9e}}{\partial s} - \left[\frac{k_t (Et - k_n r^2)}{E k_n t r^2} \right] u_{9e} = 0 \quad 0 \leq s \leq \bar{s} \quad (60)$$

Nel tratto successivo si ha invece:

$$\frac{k_t}{\mu_t - 1} (g_{Tu} - u_9) - \zeta u_r = tE \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial u_9}{\partial s} + \frac{u_r}{r} \right) \text{ per } \bar{s} \leq s \leq L \quad (61)$$

Sostituendo nella (60), l'espressione di u_r ricavata dalla (56) si ottiene l'equazione differenziale nel tratto anelastico:

$$\frac{\partial^2 u_{9s}}{\partial s} + \left[\zeta \frac{1}{k_n r} \right] \frac{\partial u_{9s}}{\partial s} + \left[\frac{k_t (Et - k_n r^2)}{E k_n t r^2 (\mu_t - 1)} \right] u_{9s} = \left[\frac{k_t (Et - k_n r^2)}{E k_n t r^2 (\mu_t - 1)} \right] g_{Tu} \quad (62)$$

per $\bar{s} \leq s \leq L$

Il problema viene risolto imponendo le seguenti condizioni al contorno e di continuità fra i due tratti di rinforzo:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{9e}(0) &= 0 \\ u_{9e}(\bar{s}) &= g_{T \max} \\ u_{9s}(\bar{s}) &= g_{T \max} \\ \varepsilon_{9e}(\bar{s}) &= \varepsilon_{9s}(\bar{s}) \end{aligned} \quad (63)$$

Le soluzioni delle equazioni (60) e (62) sono di seguito riportate:

$$u_{9e}(s, \bar{s}) = B_1(\bar{s}) \cdot e^{\alpha_1 s} + B_2(\bar{s}) \cdot e^{\alpha_2 s} \quad (64)$$

$$u_{9s}(\bar{s}, s) = g_{Tu} + C_1(\bar{s}) e^{\beta_1 s} \cos(\beta_2 s) + C_2(\bar{s}) e^{\beta_1 s} \sin(\beta_2 s) \quad (65)$$

dove β_1 e β_2 sono le soluzioni dell'equazione caratteristica associata all'equazione differenziale omogenea della (62), e $B_1(\bar{s}), B_2(\bar{s}), C_1(\bar{s}), C_2(\bar{s})$, sono calcolate imponendo le condizioni al contorno (63):

$$B_1(\bar{s}) = \frac{g_{T \max} \alpha_2}{e^{\bar{s} \cdot \alpha_1} \alpha_2 - e^{\bar{s} \cdot \alpha_2} \alpha_1} \quad (66)$$

$$B_2(\bar{s}) = \frac{g_{T \max} \alpha_1}{e^{\bar{s} \cdot \alpha_2} \alpha_2 - e^{\bar{s} \cdot \alpha_1} \alpha_1}$$

$$\begin{aligned} C_1(\bar{s}) &= \frac{e^{-\beta_1 \bar{s}}}{\beta_2} (\beta_2 (g_{T \max} - g_{Tu}) \cos(\bar{s} \beta_2) + \\ &+ \left(\frac{g_{T \max} \alpha_1 \alpha_2 (e^{\alpha_2 \bar{s}} - e^{\alpha_1 \bar{s}})}{e^{\alpha_1 \bar{s}} \alpha_2 - e^{\alpha_2 \bar{s}} \alpha_1} + \beta_1 (g_{T \max} - g_{Tu}) \right) \sin(\bar{s} \beta_2)) \end{aligned} \quad (67)$$

$$C_1(\bar{s}) = \frac{e^{-\beta_1 \bar{s}}}{\beta_2} (\beta_2 (g_{T \max} - g_{Tu}) \sin(\bar{s} \beta_2) + \left(\frac{g_{T \max} \alpha_1 \alpha_2 (e^{\alpha_2 \bar{s}} - e^{\alpha_1 \bar{s}})}{e^{\alpha_2 \bar{s}} \alpha_1 - e^{\alpha_1 \bar{s}} \alpha_2} - \beta_1 (g_{T \max} - g_{Tu}) \right) \cos(\bar{s} \beta_2))$$

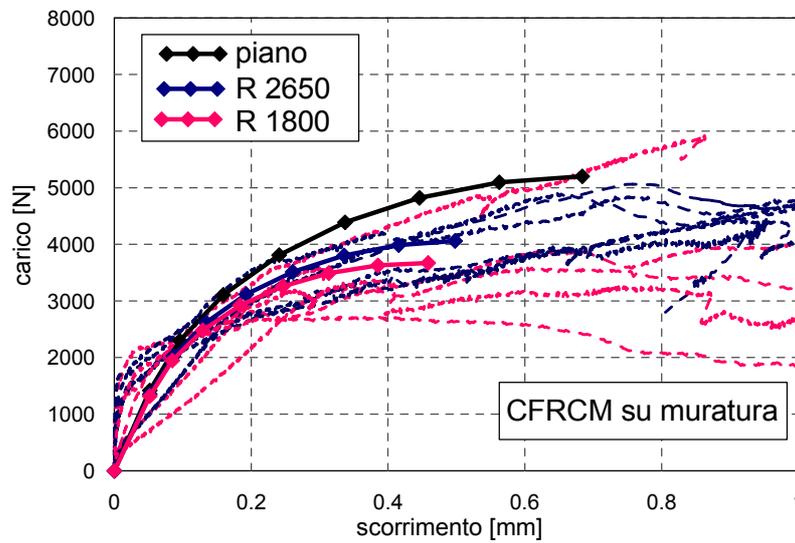
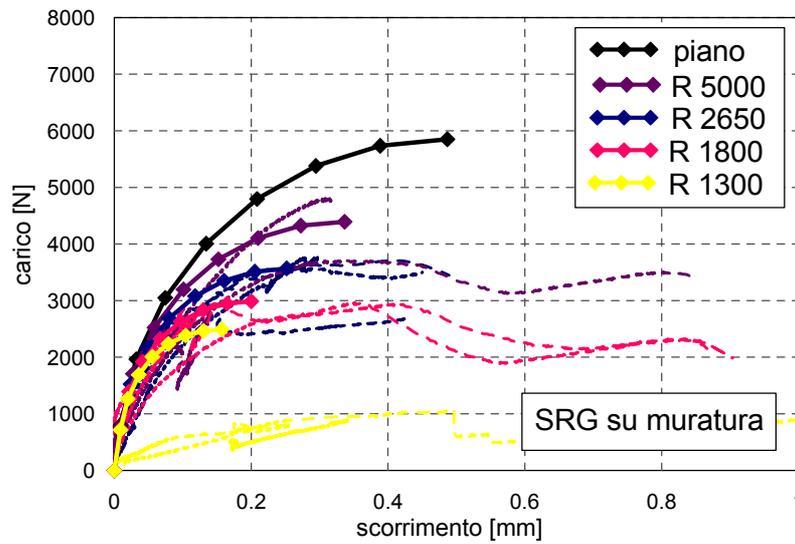


Figura 7.31 confronto fra modello e sperimentazione

E' facile osservare che per supporti rettilinei ($r \rightarrow \infty$) le equazioni (55) e (62) che descrivono il comportamento tangenziale del rinforzo si riducono alle equazioni (18) e (22) proposte in (Yuan et al 2004) (in assenza di deformabilità del supporto).

In figura 7.31 sono riportate le curve forza-scorrimento globale ottenute con il modello analitico proposto a confronto le curve sperimentali per ambedue i compositi SRG e CFRCM. I grafici mostrano la dipendenza del carico di delaminazione e dello scorrimento globale, dal raggio di curvatura del supporto.

Vengono di seguito riportati le grandezze che descrivono il problema per quanto riguarda la modellazione delle prove con il composito SRG su supporto curvo.

In figura 7.32 è rappresentato il legame di interfaccia in direzione tangenziale per supporti rettilinei e curvi, in cui quest'ultimo, dipende dallo scorrimento normale indotto dalla curvatura come descritto dalle equazioni (51) e (52). All'aumentare della curvatura corrisponde una progressiva diminuzione del valore dell'energia specifica di frattura e quindi del carico di collasso.

Le tensioni normali di interfaccia riportate in figura 7.33 aumentano per effetto della curvatura mentre quelle tangenziali (figura 7.34) si riducono, così come gli scorrimenti (figura 7.35 e 7.36).

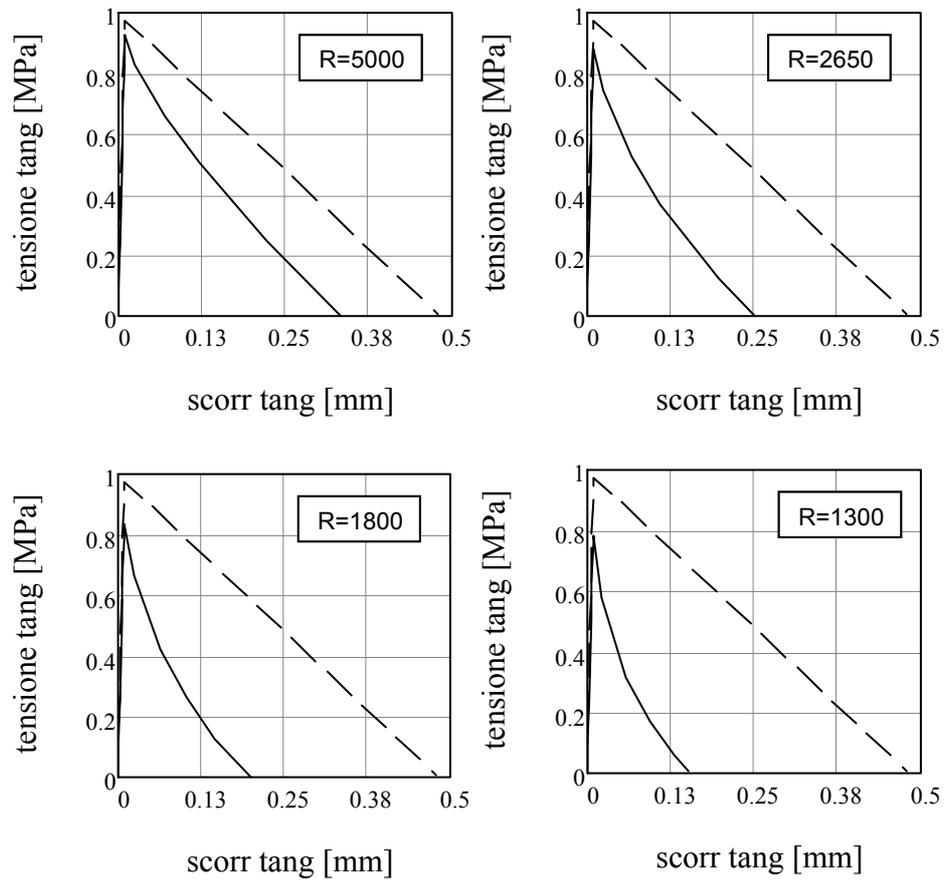


Figura 7.32 legami di interfaccia tangenziali modificati per effetto dello scorrimento normale

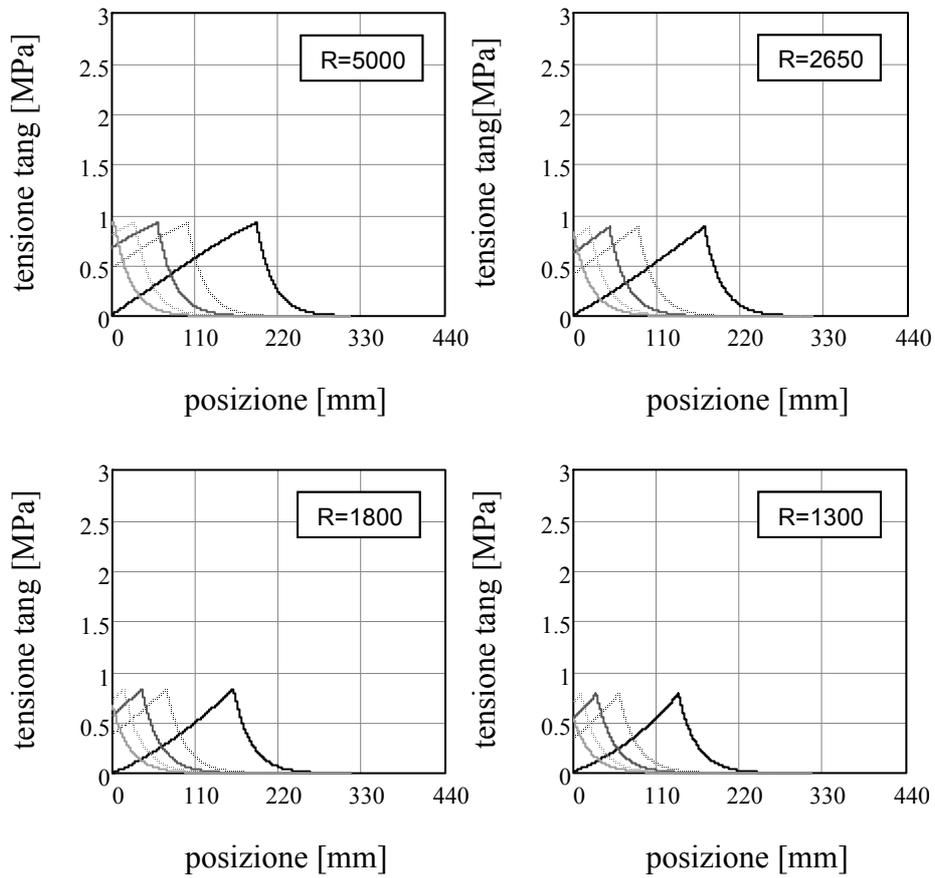


Figura 7.33 profilo delle tensioni tangenziali di interfaccia per livelli di carico

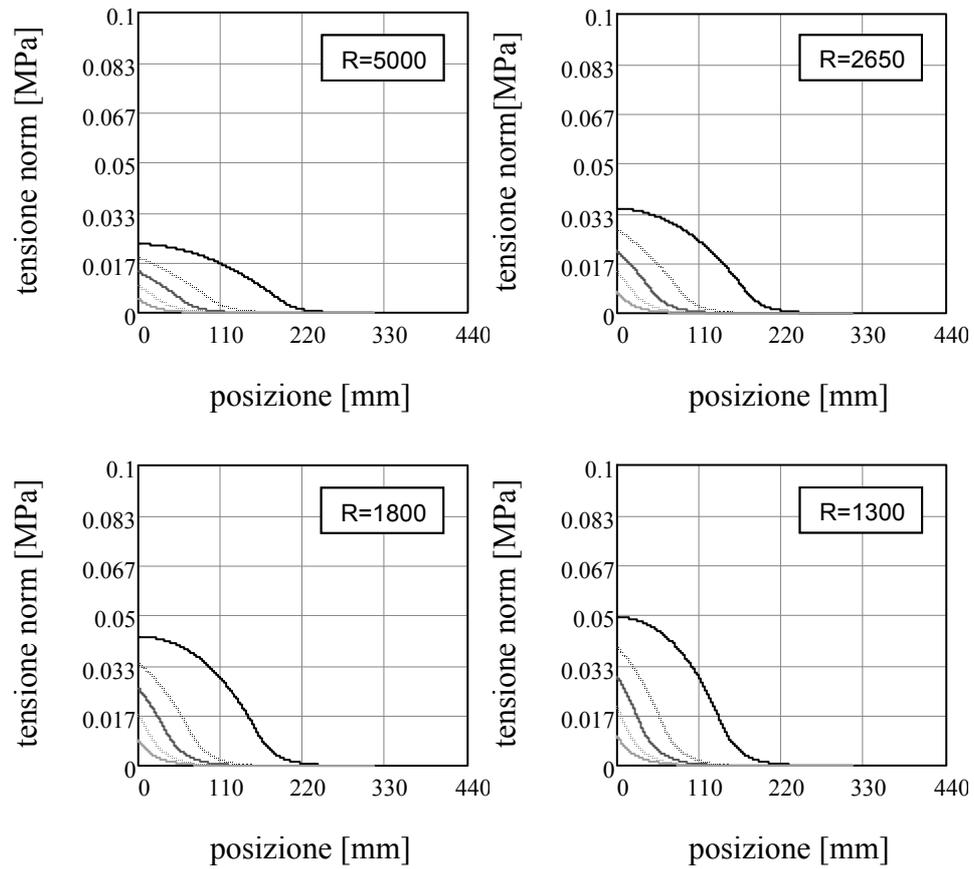


Figura 7.34 profilo delle tensioni di interfaccia normali per livelli di carico

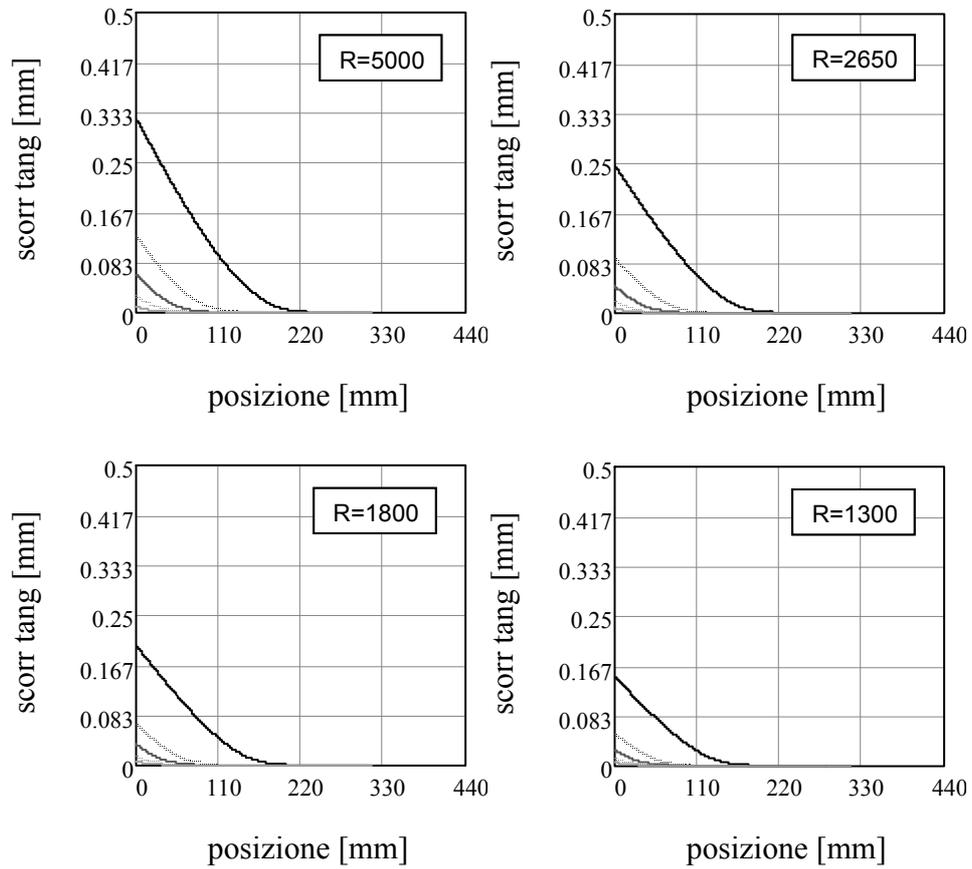


Figura 7.35 profilo degli scorrimenti tangenziali per livelli di carico

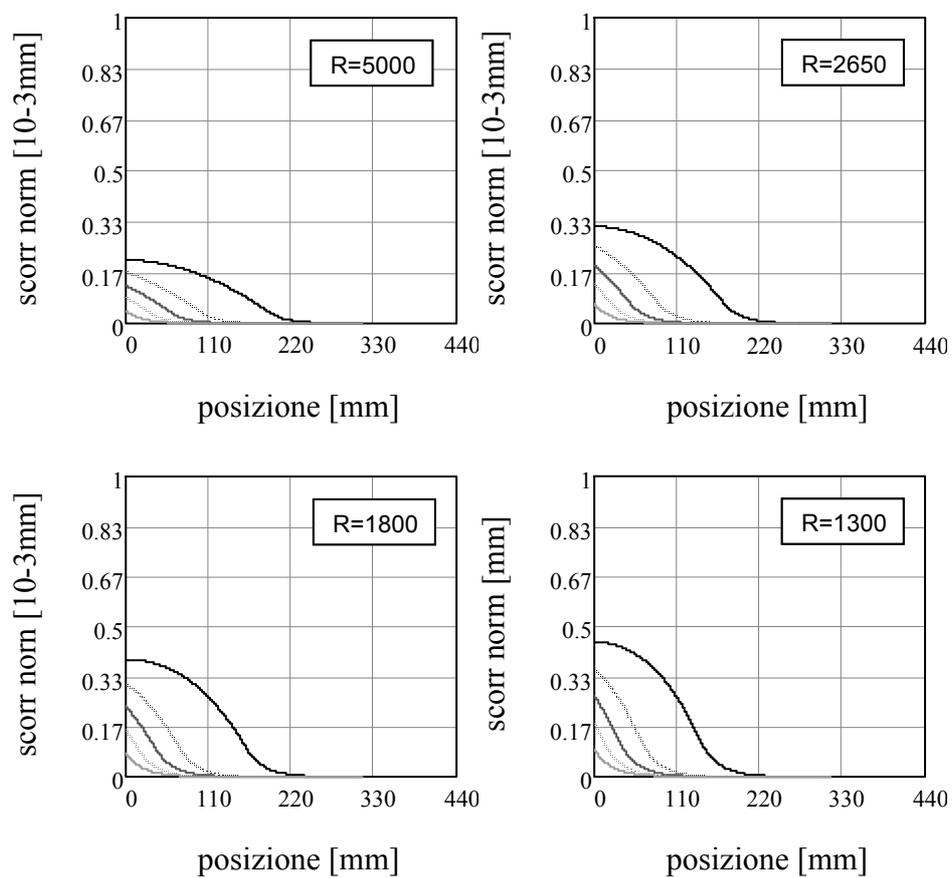


Figura 7.36 profilo degli scorrimenti normali per livelli di carico

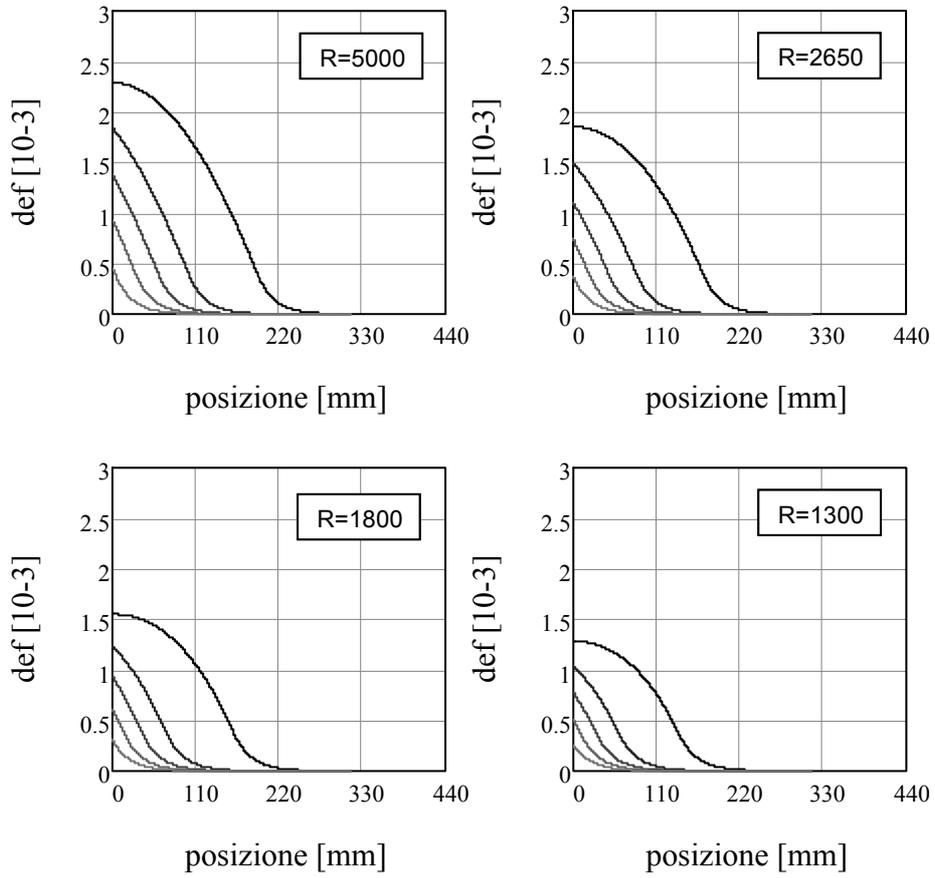


Figura 7.37 profilo delle deformazioni per livelli di carico

Bibliografia

Aiello MA. Sciolti MS. (2003). Masonry Structures Strengthened with FRP Sheets: Experimental Investigation of Bond between FRP Laminates and Ashlars. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, **9**(6), pp. 639-662.

Aiello MA. Sciolti MS. (2004). Influenza delle proprietà dei materiali e della geometria dei campioni sull'aderenza fra nastri FRP e pietra naturale. In: *Atti del 2° convegno nazionale Meccanica delle strutture in muratura rinforzate con FRP-materials AICO*. Venezia, 6-8 Dicembre, Italia.

Aiello MA. Sciolti SM. (2006). Bond analysis of masonry structures strengthened with CFRP sheets. *Journal of Construction and Building Materials*, **20**, pp. 90–100.

Basilio I. Oliveira DV. Lourenço PB. (2005). Experimental Characterization of FRP-masonry interface behaviour. In *5 ° International Conference AMCM*. Gliwice, Polonia.

Borri A. Castori G. Casadei P. Ebaugh S. (2007). Reserch on composite strengthening of masonry arches. In: *FRPRCS-8International Symposium Proceedings*. Patras, July 16-18, Greece.

Borri A. Castori G. Giannantoni A. Gori B. (2007). Intervento di rinforzo e messa in sicurezza di archi in muratura con nastri di SRG pretesi. *Anidis XII Convegno L'Ingegneria Sismica in Italia*. Pisa, 10-14 Giugno, Italia.

Briccoli Bati S. Fagone M. (2008). Lunghezza ottimale di ancoraggio per rinforzi in FRP su elementi in laterizio; In: *atti del convegno Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in c.a.* Roma, 29-30 maggio, Italia.

Briccoli Bati S. Marilli F. Rovero L. Tonietti U. (2004). Prove di trazione su placcaggi GFRCM e confronto con rinforzi in CFRCM. In: *Atti del 2° convegno nazionale Meccanica delle strutture in muratura rinforzate con FRP-materials AICO*. Venezia 6-8 Dicembre, Italia.

Briccoli Bati S. Rovero L. (2007). Modelli di arco rinforzati con materiali compositi. *Workshop: Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture* Consorzio ReLUIS. Salerno, 12-13 Febbraio, Italia.

Briccoli Bati S. Roveto L. Tonietti U. (2009). Prove di aderenza tra nastri di CFRP e elementi di laterizio. In: *Atti del 3° Convegno Nazionale MuRiCo3: Mechanics of masonry structures strngthened with composite materials*. Venezia, 22-24 Aprile, Italia.

Cancelli A.N. Aiello M.A. Casadei P. (2007). Experimental investigation on bond properties of SRP/SRG – masonry system. In: *FRPRCS-International Symposium Proceedings*. Patras, July 16-18, Greece.

Carlioni C. Subramaniam K.V. (2009). Investigation of the Interface Fracture during Debonding between FRP and Masonry. *Advances in Structural Engineering*, **12** (5), pp. 731-743

Casareto M. Olivieri A. Romelli A. Lagomarsino A. (2003). A Bond behaviour of FRP laminates adherent to masonry. In: *Proceedings of International Conference Advancing with Composites..* Milano, Italia

Castori G. (2007). Strengthening of masonry elements with innovative composite laminates. PhD thesis, University of Perugia, Department of Civil and Environmental Engineering.

Ceroni F. Pecce M. (2006). Bond tests on concrete and masonry blocks externally bonded with FRP. In: *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE)*. Miami Florida 13-15 December USA.

Ceroni F. Pecce M. (2006). Procedure per prove di aderenza su elementi in c.a. e muratura rinforzati con FRP, In: *Atti del Convegno Nazionale Convegno Nazionale Sperimentazione sui Materiali e sulle Strutture*. Venezia 6-7 Dicembre. pp. 408-418.

Ceroni F. Pecce MR. Manfredi G. Marcari G. (2003). Experimental bond behaviour in masonry elements externally reinforced with FRP laminates. In: *Proceedings of the international conference composites in constructions*. Rende Cosenza.

CNR-DT200 2006. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. C.N.R., National Research Council, Italy.

Dai J. Ueda T. Sato Y. (2005). Development of the nonlinear bond stress–slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method. *ASCE, Journal of Composites for Construction*, **9**(1), pp. 52–62.

De Lorenzis L. Zavarise G. (2009). Interfacial stress analysis and prediction of debonding for a thin plate bonded to a curved substrate. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **44**, pp.358-370.

Di Tommaso A. Focacci F Mantegazza G. Gatti A. (2007). FRCM vs. FRP composite to strengthen RC beams: a comparative analysis, In: *FRPRCS-8 international symposium proceedings*. Patras July 16-18 Greece.

Di Tommaso A. Focacci F. Mantegazza G. (2008) PBO-FRCM composites to strengthen R.C. beams: mechanics of adhesion and efficiency. In: *4th International Conference on FRP omposites in Civil Engineering CICE*. Zurich 22-24 July. Switzerland.

Faella C. Martinelli E. Nigro E. Paciello S. (2010). Shear capacity of masonry externally strengthened by a cement-based composite material: An experimental campaign. *Construction and Building Materials*. **24**. pp. 84-93.

Faella C. Martinelli E. Paciello S. Perri F. (2009) Composite materials for masonry structures: the adesion issue. In: *Atti del 3° Convegno Nazionale MuRiCo3: Mechanics of masonry structures strngthened with composite materials*, Venezia, 22-24 Aprile, Italia.

Ferracuti B. Savoia M. Mazzotti C. (2006). A numerical model for FRP-concrete delamination. *Composites Part B: Engineering*, **37**(4-5), pp. 356-364.

Focacci F. Mantegazza G. (2009). Compositi a matrice cementizia per il rinforzo delle murature: aderenza con il supporto. In: *Atti del 3° Convegno Nazionale MuRiCo3: Mechanics of masonry structures strngthened with composite materials*. Venezia, 22-24 Aprile, Italia.

Hardwire IIC (2002). What is Hardwire. www.hardwirellc.com. Pocomoke City MD.

Huang X. Birman V. Nanni A. Tunis G. (2004). Properties and potential for application of steel reinforced polymer (SRP) and steel reinforced grout (SRG) composites. *Compos Part B: Eng*, **36** (1), pp. 73–82.

Jasienko J. Di Tommaso A. Bednarz L. (2009). Experimental investigation into Collapse of Masonry Arches Reinforced Using Different Compatible Technologies. In: *Atti del 3° Convegno Nazionale MuRiCo3: Mechanics of masonry structures strengthened with composite materials*. Venezia, 22-24 Aprile, Italia.

Kolosh H. (1998). Carbon Fibre Cement Matrix (CFRCM) Overlay System for Masonry Strengthening, *Journal of Composites for Construction*, **2**(2), pp.105-109

La Mendola L. Failla A. Cucchiara C. Accardi M. (2009). Debonding Phenomena in CFRP Strengthened Calcarenite Masonry Walls and Vaults. *Advances in Structural Engineering*, **12** (5), pp. 745-760.

Lu XZ. Teng JG. Ye LP. Jiang JJ. (2005). Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Eng Struct*, **27**, pp 920–937.

Mantegazza G. Barbieri A. (2002). Composito fibroso a matrice cementizia (FRCM) per il recupero strutturale delle costruzioni, *SAIE 2002 Conferenza AICO*, Bologna, 16 Ottobre, Italia.

Matana M. Galecki G. Maerz N. Nanni A. (2005). Concrete substrate preparation and characterization prior to adhesion of externally bonded reinforcement. In: *Proceedings of International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures (BBFS)*. Hong Kong, China.

Monti M. Renzelli M. Luciani P.(2003). FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones. In: *Proceedings of 6th international symposium on FRP reinforcement for concrete structures*. Singapore: World Scientific Publications, p. 183–92.

Nakaba K. Toshiyuki K. Tomoki F. Hiroyuki Y. (2001) Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete. *ACI Structural Journal*, **98**(3), pp.359–67.

Neubauer U. Rostasy FS. (1999). Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks-experiments and fracture

mechanics model. In: *Proceedings of 4th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures, SP-188 ACI*. Farmington Hills (MI). pp. 369–82.

Savoia M. Ferracuti B. Vincenzi L. (2009). Inverse Analysis for the Calibration of FRP-Concrete Interface Law. *Advances in Structural Engineering*, **12** (5), pp. 613-625.

Savoia M, Ferracuti B, Mazzotti D. (2003). Non-linear bond–slip law for FRP-concrete interface. In: *Proceedings of 6th international symposium on FRP reinforcement for concrete structures*. Singapore: World Scientific Publications, pp. 163–72.

Tumialan J.G., Morbin A., Micelli F. and Nanni A., (2002). Flexural Strengthening of URM Walls with FRP Laminates. *ICCI*. San Francisco CA, June 10-12.

Ueda T. Dai JG. Sato YA.(2003). Nonlinear bond stress–slip relationship for FRP sheet–concrete interface. In: *Proceeding of international symposium on latest achievement of technology and research on retrofitting concrete structures*, pp. 113–20. Kyoto, 14-15 July, Japan.

Volkersen O. (1938). Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchenden Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, *Luftfahrtforschung*, **15**, pp. 41-47

Wobbe E. Silva P.F. Barton B.L. Dharani L.R. Birman V. Nanni A. Alkhrdaji T. Thomas J. Tunis T. (2004). Flexural Capacity of RC Beams Externally Bonded with SRP and SRG. In: *Proceedings of Society for the Advancement of Material and Process Engineering Symposium*. Long Beach, Ca, 16-20 May 2004.

Yuan H. Teng JG. Seracino R. Wu ZS. Yao J.(2004). Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints. *Eng Struct*, **26**(5), pp. 553–64.