



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE ED AMBIENTALE

Corso di Laurea specialistica in Ingegneria Edile

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

Analisi sperimentale dell'aderenza di compositi FRP applicati a murature in laterizio

Candidato:

Daniele Fontana

Matricola 589186

Relatore:

Prof.ssa Maria Rosa Valluzzi

Correlatori:

Ing. Enrico Garbin

Ing. Matteo Panizza

A mia madre

Indice

Introduzione	i
1 La muratura	1
1.1 Premessa	1
1.2 Tipologie delle murature	2
1.3 Proprietà meccaniche della muratura	5
1.3.1 Resistenza a compressione semplice	5
1.3.1.1 Indagini sperimentali	6
1.3.1.2 Studi teorici	9
1.3.2 Resistenza a taglio	12
1.3.3 Resistenza a trazione e flessione	14
1.3.4 Proprietà deformative della muratura	14
2 I materiali FRP e il problema dell'aderenza	17
2.1 Premessa	17
2.2 Principali caratteristiche dei materiali compositi	17
2.3 Fibre utilizzate	19
2.3.1 Fibre di vetro	19
2.3.2 Fibre di carbonio	20
2.3.3 Fibre di basalto	21
2.3.4 Fibre in acciaio	22
2.4 Matrici: resine epossidiche	22
2.5 La perdita di aderenza (<i>Debonding</i>)	22
2.5.1 Prove di adesione tangenziale <i>Shear Test</i> : stato dell'arte	23
2.6 Modellazione del legame di aderenza	27
2.6.1 Modellazione del legame di aderenza tra rinforzo e muratura (<i>CNR-DT R1 200/2013</i> 2013)	28
3 Programma sperimentale e preparazione provini	35
3.1 Programma sperimentale	35
3.2 Realizzazione dei provini	39
3.2.1 Blocchi di malta	39
3.2.2 Prismi in muratura	40
3.3 Applicazione del sistema di rinforzo	41
3.4 Strumentazione dei campioni	43
4 Caratterizzazione dei materiali	49
4.1 Mattoni A6R55W	49
4.1.1 Flessione su tre punti	49

4.1.2	Compressione semplice	50
4.1.3	Trazione indiretta (splitting)	52
4.1.4	Pull-off	53
4.1.5	Modulo elastico	56
4.2	Malta T30V	58
4.2.1	Flessione su tre punti	58
4.2.2	Compressione semplice	58
4.2.3	Compressione strumentata	60
4.2.4	Trazione indiretta (splitting)	62
4.2.5	Modulo elastico	64
4.3	Prismi in muratura	66
4.3.1	Trazione indiretta (splitting)	66
4.3.2	Compressione strumentata	67
4.4	Compositi impregnati	70
4.5	Resine	72
5	Esecuzione delle prove di adesione e analisi dei dati	75
5.1	Tipologia di prova e dati raccolti	75
5.2	Set-up di prova	76
5.3	Prove di adesione su mattone	78
5.3.1	Descrizione di alcune prove significative	79
5.3.1.1	SL-Glass-02	79
5.3.1.2	SL-Glass-04	80
5.3.1.3	SL-Carbon-02	82
5.3.1.4	SL-Basalt-03	84
5.3.1.5	SL-Steel-01	86
5.3.2	Modalità di rottura	90
5.3.3	Resistenze e spostamenti	90
5.3.4	Deformazioni e rigidezze	96
5.3.5	Energia di frattura	99
5.4	Prove di adesione su blocchi di malta	102
5.4.1	Descrizione di alcune prove significative	103
5.4.1.1	Malta-G-02f	103
5.4.1.2	Malta-C-03	106
5.4.2	Modalità di rottura	108
5.4.3	Resistenze e spostamenti	108
5.4.4	Deformazioni e rigidezze	110
5.4.5	Energia di frattura	112
5.5	Prove di adesione su prismi murari	115
5.5.1	Descrizione di alcune prove significative	117
5.5.1.1	M-GFRP-065-01f	117
5.5.1.2	M-GFRP-130-06r	119
5.5.1.3	M-GFRP-195-02r	121
5.5.1.4	M-GFRP-anc-06f	123
5.5.1.5	M-CFRP-anc-08r	125
5.5.1.6	M-BFRP-anc-09f	127
5.5.1.7	M-SRP-anc-13r	129
5.5.2	Modalità di rottura	131
5.5.3	Resistenze e spostamenti	132

5.5.3.1	Campioni rinforzati con fibre di vetro	134
5.5.3.2	Campioni rinforzati con fibre di carbonio	138
5.5.3.3	Campioni rinforzati con fibre di basalto	140
5.5.3.4	Campioni rinforzati con fibre di acciaio	142
5.5.4	Energia di frattura	144
6	Analisi globale dei dati sperimentali	145
6.1	Modalità di rottura	145
6.2	Resistenze e spostamenti	146
6.2.1	Confronto tra differenti rinforzi	146
6.2.2	Confronto tra differenti rinforzi nei prismi murari	149
6.2.3	Confronto tra differenti substrati	151
6.2.4	La lunghezza di adesione nella muratura	154
6.2.5	Influenza del giunto di malta nella muratura	158
	Conclusioni	159
	Bibliografia	163
	Appendice A - Caratterizzazione meccanica dei materiali	165
.1	Risultati delle prove di trazione assiale sui compositi	165
.2	Risultati delle prove di trazione assiale sulle resine	170
	Appendice B - Esecuzione delle prove di adesione	175
.3	Prove di adesione su mattone	176
.4	Prove di adesione su blocchi di malta	206
.5	Prove di adesione su prismi murari	214
	Appendice C - Schede tecniche di prodotto	261

Introduzione

La sempre crescente sensibilità nei confronti della conservazione del patrimonio edilizio e monumentale, patrimonio che in Italia si presenta particolarmente variegato e di elevato valore sia storico che architettonico, ha favorito negli ultimi decenni lo studio di nuove metodologie e di nuovi materiali da impiegare nel recupero e nel restauro dei beni architettonici. Fra questi materiali, i compositi fibrorinforzati (FRP - *Fibre Reinforced Polymer*, SRP - *Steel Reinforced Polymer*), ed in particolare i tessuti impregnati in opera e applicati esternamente (EB FRP - *Externally Bonded FRP*), hanno suscitato un notevole interesse sia nel campo del rinforzo che nella riparazione strutturale, e in particolare negli interventi in zona sismica dove l'applicazione di questi materiali può sopperire alla carenza di resistenza a trazione delle murature e aumentare le capacità deformative mantenendo le parti collegate, seppure in presenza di quadri fessurativi importanti, impedendo così meccanismi di collasso fragile.

La leggerezza, l'elevata resistenza specifica, la ridotta invasività e reversibilità degli interventi, la velocità e la facilità di impiego sono alcune delle caratteristiche per le quali questi materiali vengono sovente preferiti a quelli tradizionali negli interventi sull'edilizia storica, buona parte della quale vede nella muratura il materiale costitutivo prevalente, pure con grandi differenze sia tipologiche che materiche. Tuttavia, i primi studi rigorosi sull'applicazione di materiali compositi a superfici murarie sono stati svolti solo nel recente passato e le normative esistenti non sono ancora esaustive nell'indicare procedure di prova standardizzate e chiare modalità di progetto.

L'impiego di questi materiali, seppur con gli indubbi vantaggi appena accennati, comporta però l'introduzione di nuovi possibili meccanismi di cedimento che vanno debitamente considerati, quali, ad esempio, la rottura a trazione delle fibre, la rottura per compressione della muratura, le modificazioni nel comportamento a taglio o la perdita di aderenza fra supporto e composito. Proprio quest'ultimo aspetto, la crisi dovuta al distacco per perdita di aderenza, riveste un'importanza cruciale per l'efficacia dell'intervento stesso, innanzitutto perché solo con una completa adesione alla superficie da rinforzare è possibile il massimo trasferimento degli sforzi tra i due materiali e poi perché la perdita di aderenza si manifesta con una rottura di tipo fragile e quindi assolutamente indesiderata. Si aggiunga inoltre che nel caso specifico di applicazione su murature il fenomeno dell'adesione è da considerarsi non ancora sufficientemente indagato, anche in ragione, come già detto, dell'estrema variabilità di tipologie murarie esistenti, così come non è ancora perfettamente chiaro il ruolo dei giunti di malta, i quali rappresentano una discontinuità geometrica e meccanica che potrebbe condizionare il fenomeno dell'adesione.

Presso il Dipartimento ICEA dell'Università di Padova sono state effettuate, nel corso degli ultimi anni, numerose campagne sperimentali mirate allo studio di vari aspetti connessi al rinforzo della muratura mediante FRP, una di queste ha visto l'avvio tra il 2009 e il 2010 per opera del comitato internazionale Rilem 223-MSc (*Masonry Strengthening with Composite materials*) coinvolgendo 12 laboratori europei, e sotto la coordinazione di questa

Università, con la finalità di caratterizzare il fenomeno dell'aderenza dei materiali compositi applicati a mattoni in laterizio, impiegando e confrontando varie metodologie di prova.

Proprio da questa estesa campagna sperimentale prende l'avvio il presente lavoro di tesi, con il proposito di studiare il fenomeno dell'aderenza non solo nei materiali costituenti la muratura presi singolarmente, ma considerando la muratura nel suo insieme (elemento resistente e giunto), mettendo in luce le possibili relazioni e cercando quindi di indagare quale sia il ruolo e l'influenza dei giunti di malta, oltre che a fornire utili considerazioni sulla metodologia di studio che verrà utilizzata.

A questo scopo sono state effettuate e analizzate 56 prove di *Shear-Test* condotte secondo la tipologia di prova nota in letteratura con il nome di *Single-Lap*, ossia una configurazione asimmetrica che prevede una singola striscia di rinforzo sollecitata a trazione e il supporto sottoposto a compressione. Delle 56 prove totali, 20 sono state effettuate su supporti costituiti da singoli mattoni in laterizio, suddivise a loro volta in gruppi da 5 differenziati per tipologia di rinforzo utilizzato (tessuti unidirezionali in fibra di carbonio, di vetro, di basalto e trefoli sottili in acciaio), 6 su supporti costituiti da blocchi di malta appositamente confezionati e su cui sono state applicate strisce di rinforzo in fibre di vetro e di carbonio, e per finire 30 prove sono state effettuate su prismi in muratura su cui sono state applicate tutte e quattro le tipologie di rinforzo e, nel caso delle fibre di vetro, sono state adottate diverse lunghezze di adesione.

L'esposizione è organizzata nel modo seguente:

- Capitoli 1 e 2, aspetti generali sulla muratura, sui materiali compositi fibrorinforzati e sul fenomeno dell'aderenza;
- Capitolo 3, esposizione del programma sperimentale e descrizione della fase di preparazione, confezionamento e strumentazione dei provini;
- Capitolo 4, caratterizzazione meccanica dei materiali impiegati nella sperimentazione;
- Capitolo 5, esecuzione delle prove di *Shear-Test* e analisi dei dati;
- Capitolo 6, analisi globale dei risultati sperimentali.

Capitolo 1

La muratura

1.1 Premessa



Figura 1.1: La ziqqurat di Ur (c. 2125 a.C.), esempio di antica opera in muratura (Watkin 1990).

La muratura è stata, ed è ancora oggi, uno degli elementi costruttivi di maggiore utilizzo nel mondo e l'inizio del suo impiego risale a epoche molto antiche (Fig. 1.1). Essa nasce dall'accostamento di elementi di varia natura, siano essi naturali o artificiali, collegati fra di loro tramite malte e/o graffe metalliche in modo da ottenere elementi strutturali monolitici (Carbone et al. 2001). Le caratteristiche che rendono ancora attuale l'impiego di questo sistema costruttivo sono molteplici: gli elementi in muratura, siano essi pareti, pilastri, archi, sistemi voltati, ecc. . . , sono in grado di fornire contemporaneamente funzione strutturale, suddivisione degli spazi, un buon isolamento sia termico che acustico e buone caratteristiche di longevità e resistenza, inoltre il loro aspetto è generalmente gradevole e molto apprezzato (Hendry 1986). Fino a tempi recenti le costruzioni in muratura sono state realizzate secondo regole empiriche ed escludendo le grandi opere monumentali del passato l'utilizzo della muratura si è limitato per lo più ad edifici di modeste dimensioni. Nel ventesimo secolo l'introduzione di nuovi materiali da costruzione ha portato ad un parziale accantonamento di questa tipologia costruttiva a favore, prevalentemente, di acciaio e calcestruzzo, materiali considerati rivoluzionari e indistruttibili. Il degrado e i conseguenti alti costi di manutenzione che questi nuovi materiali hanno dimostrato nel lungo periodo hanno portato ad una rivalutazione della muratura, in particolare in laterizio, supportata inoltre dall'applicazione della tecnica delle costruzioni nella sua progettazione (Hendry 1986).

1.2 Tipologie delle murature

I criteri di classificazione delle tipologie murarie presenti in letteratura sono molteplici, nel seguito si adotta quello proposto da Carbone (Carbone et al. 2001) che classifica le murature in relazione agli elementi utilizzati nel confezionamento (Tab. 1.1), alla tipologia strutturale (Tab. 1.2) e all'apparecchiatura muraria (Tab. 1.3) (Fig. 1.3).

Tabella 1.1: Classificazione delle murature in base agli elementi utilizzati (Carbone et al. 2001).

TIPOLOGIA	ELEMENTI UTILIZZATI	DISPOSIZIONE
Murature in laterizio	elementi in laterizio (mattoni o blocchi)	corsi continui di altezza costante opportunamente sfalsati, legati da giunti di malta. Lo sfalsamento dei giunti verticali si realizza ricorrendo a dei sottomultipli dell'elemento base di laterizio.
Murature ordinarie in pietra	elementi in pietra irregolari	conci disposti il più possibile per piano in modo da ridurre al minimo gli spazi vuoti tra gli elementi.
Murature con pietra squadrata	conci di pietra di forma generalmente parallelepipedica	conci giustapposti interponendo un sottile strato di malta a ripartire i carichi verticali ed eventualmente collegati fra loro da zanche metalliche.
Murature in tufo	blocchi di tufo	i blocchi vengono disposti a filari orizzontali paralleli.
Murature in blocchi di cls o cls leggero	blocchi di calcestruzzo	corsi continui di altezza costante opportunamente sfalsati, adatti a tamponamenti o a muri portanti di piccoli edifici.
Murature miste di pietrame e mattoni (Fig. 1.2)	conci di pietra e elementi in laterizio	due metodologie di impiego del laterizio: la prima, dove viene utilizzato quale elemento di riempimento o livellamento locale dei piani di muratura; la seconda dove vengono realizzati ricorsi orizzontali estesi a tutto lo spessore del muro e interposti tra la muratura di pietrame a interasse variabile.
Murature di pietrame e cordoli di cls (Fig. 1.2)	conci di pietra e cordoli di calcestruzzo debolmente armato di spessore $\geq 12\text{cm}$	il cordolo, in genere debolmente armato, viene usato per la realizzazione di ricorsi orizzontali estesi a tutto lo spessore del muro e interposti fra la muratura di pietrame a interassi variabili (da 60 a 160 cm).
Murature armate	blocchi di diverso materiale più barre o reti metalliche	murature al cui interno sono posti elementi di rinforzo con preciso ruolo strutturale. La distribuzione delle armature può essere diffusa e/o concentrata.
Murature a pannelli prefabbricati	pannelli armati	utilizzo subordinato al rispetto dei requisiti di progetto e di calcolo contenuti nei certificati di idoneità.

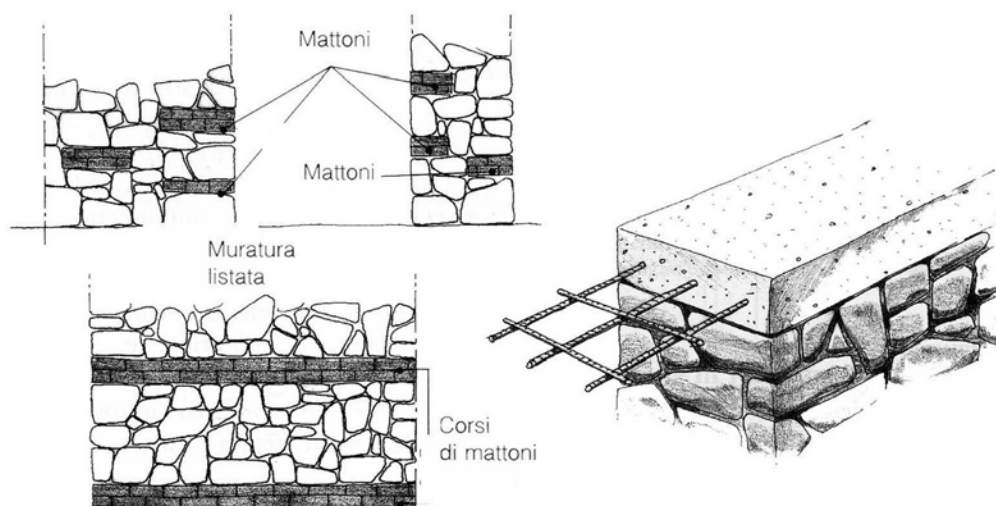


Figura 1.2: Murature miste in pietrame e mattoni e muratura con cordolo in cls (Carbone et al. 2001)

Tabella 1.2: Classificazione delle murature in base alla tipologia strutturale (Carbone et al. 2001).

TIPOLOGIA	UTILIZZO	CARATTERISTICHE
Murature di fondazione	quando la portanza del terreno o l'entità dei carichi non richiedano soluzioni strutturali complesse	occorre proteggere la muratura da infiltrazioni d'acqua e da fenomeni igrotermici.
Setti e muri portanti	destinati a sostenere carichi verticali e a costituire elementi di appoggio per solai di piano e coperture. Talvolta hanno funzione di controventamento	oltre alle dimensioni, al materiale e alle malte utilizzate, influiscono sulla capacità portante anche le modalità di esecuzione, l'articolazione dei singoli elementi e l'eventuale presenza di rinforzi.
Pilastrini in muratura	pilastrini in muratura a due o più teste, pilastrini in muratura con pilastrino in c.a. all'interno, pilastrini armati in muratura	elementi monodimensionali verticali, sollecitati prevalentemente a forza assiale; le dimensioni della sezione devono essere tali da garantire la capacità portante richiesta con particolare riguardo alla stabilità dell'equilibrio.
Elementi ad arco	arco a sesto ribassato, a tutto sesto, a sesto rialzato, ecc...	elementi a linea d'asse curvilinea, sottoposti prevalentemente a sforzi di compressione (strutture spingenti).
Strutture voltate	volta cilindrica, volta a crociera, a vela, a padiglione, ecc...	strutture spingenti bidimensionali la cui forma influenza fortemente il comportamento statico.
Piattabande in muratura	usati nel caso in cui le frecce siano tendenti a zero (da 1/30 a 1/100 della luce) e luci modeste	archi anomali, in quanto lavorano con lo stesso principio.

Tabella 1.3: Classificazione delle murature in base all'apparecchiatura muraria (Carbone et al. 2001).

TIPOLOGIA	DISPOSIZIONE
Disposizione in foglio o di costa	elementi appoggiati di lista o di costa (secondo il lato maggiore). Le murature ottenute hanno dimensioni trasversali di sezione pari allo spessore dell'elemento.
Disposizione in spessore o a una testa	elementi aventi giacitura in spessore e disposti di fascia; i giunti verticali sono in genere sfalsati in modo da trovarsi al terzo o quinto corso.
Disposizione in chiave o di punta	elementi con giacitura in spessore e disposti di punta; consente la rapida soluzione di strutture ad andamento curvilineo. Le murature ottenute (a due teste) hanno sezione uguale alla dimensione massima dell'elemento.
Disposizione a blocco	elementi aventi giacitura in spessore e disposizione, a corsi alterni, di fascia e di punta. Le murature ottenute sono a due o più teste.
Disposizione gotica	elementi aventi giacitura in spessore e, per ogni corso, disposizione alternata di fascia e di punta. Le murature ottenute sono a due o più teste.
Disposizione fiamminga	elementi aventi giacitura in spessore e disposti, a corsi alterni, con un corso di fascia e punta e un altro solo di punta. Le murature ottenute sono a due o più teste.

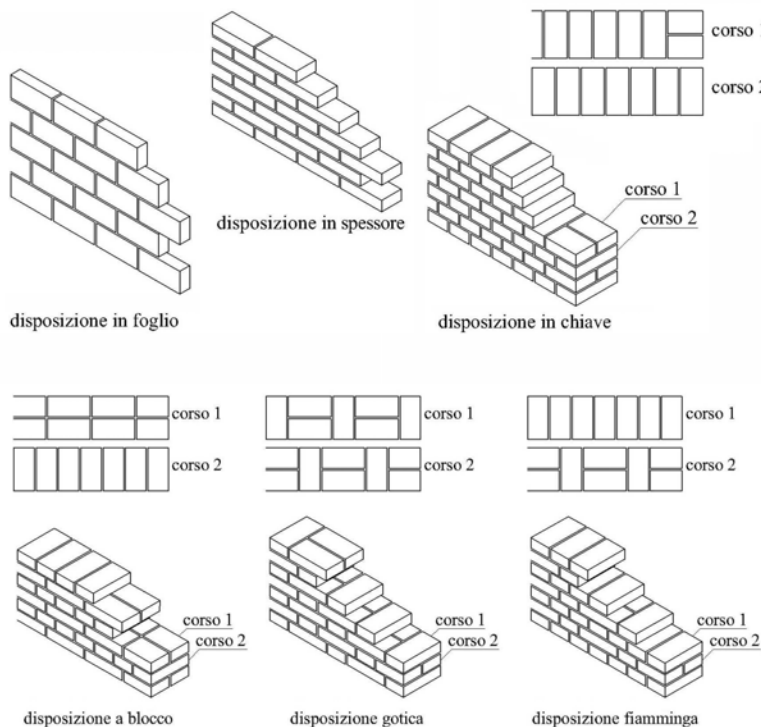


Figura 1.3: Classificazione delle murature in base all'apparecchiatura muraria (Carbone et al. 2001).

1.3 Proprietà meccaniche della muratura

1.3.1 Resistenza a compressione semplice

La sollecitazione prevalente a cui le murature sono sottoposte è quella di compressione, la resistenza a questo tipo di sforzo dipende da molteplici fattori, alcuni di questi sono (Hendry 1986):

- resistenza del mattone, da cui dipende soprattutto la sua resistenza a trazione;
- geometria del mattone;
- resistenza della malta;
- caratteristiche deformative di malta e mattone;
- spessore dei giunti;
- capacità di assorbimento d'acqua dei mattoni;
- capacità di ritenzione d'acqua della malta;
- aderenza tra malta e mattone;
- lavorazione della muratura.

questi fattori governano il fenomeno in misura diversa e sono più o meno influenti sulla resistenza finale della muratura e più o meno controllabili in fase di progettazione. Quasi tutti gli studiosi sono però concordi nell'attribuire alla differente deformabilità fra malta e mattoni la causa di gran lunga preminente nella rottura. In particolare i giunti di malta orizzontali, più deformabili, all'interno di una muratura caricata assialmente, vengono a trovarsi in uno stato di confinamento triassiale di compressione fra gli strati di mattoni, mentre, per reazione, sulle facce dei mattoni nasce uno stato di trazione biassiale. Questo fenomeno comporta per la malta una condizione di equilibrio e stabilità mentre i mattoni si trovano a dover subire una sollecitazione di trazione che, al crescere del carico, li porta a rottura.

Dall'osservazione di campioni di muratura portati al collasso per compressione assiale si può notare come le lesioni siano verticali e parallele all'asse di carico e come portino alla formazione di "pilastrini" indipendenti (Fig. 1.4), i quali collassano per instabilità, pressoflessione o taglio in corrispondenza di parti inclinate più deboli. A conferma di tali ipotesi si può osservare che:

- muretti costituiti da malte particolarmente deboli si rompono a valori di tensione assai superiori alla resistenza della malta;
- mattoni molto resistenti, e quindi con ottimo comportamento a trazione, migliorano le prestazioni della muratura.

Questa modalità di rottura, ampiamente comprovata dall'esperienza, riguarda in particolare le murature storiche, dove le prestazioni meccaniche dei leganti sono in genere inferiori a quelle degli elementi, ma non tutte le tipologie: in murature costituite da ciotoli tondi o, per esempio, quelle a "sacco" il collasso per compressione è governato in misura diversa da più fattori (Carbone et al. 2001).

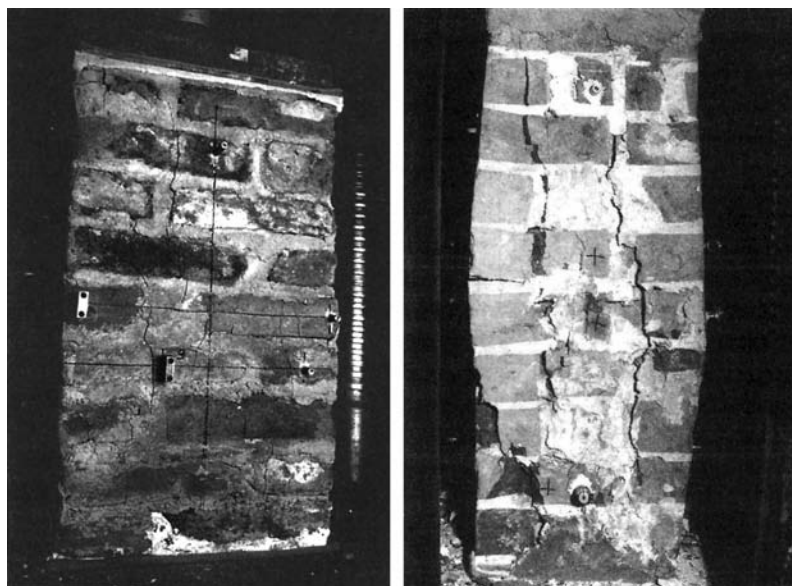


Figura 1.4: Andamento delle fessurazioni in un elemento di muratura (a sinistra) e formazione di pilastri indipendenti (a destra) (Carbone et al. 2001).

1.3.1.1 Indagini sperimentali

I primi studi sperimentali sul comportamento a rottura delle murature sono abbastanza recenti, risalgono infatti al secondo dopoguerra. L'interesse dei ricercatori si è da subito concentrato sull'influenza che i vari tipi di mattoni o blocchi, uniti da diverse miscele di legante, avevano sulla resistenza finale della muratura. I principali fattori che determinano la resistenza globale sono i seguenti:

- resistenza del mattone;
- resistenza della malta;
- densità del mattone;
- spessore dei giunti orizzontali.

I grafici delle Figure 1.5 e 1.6 mettono bene in evidenza la correlazione tra questi fattori e la resistenza finale di una muratura. Da queste indagini, condotte da diversi autori, risulta che la resistenza del mattone è uno dei parametri più significativi mentre la resistenza della malta influisce in maniera minore. Anche la densità del laterizio incide direttamente sulla resistenza in quanto indice di compattezza del materiale e, in secondo luogo, perché direttamente collegata alla capacità di assorbire acqua, nel senso che mattoni più densi assorbono minori quantità d'acqua dai giunti di malta, limitando quindi la formazione di cavità all'interno della stessa, e non compromettono le reazioni chimiche dei cementi e delle calci che la compongono. Si può inoltre osservare come l'aumento dello spessore della malta dei giunti faccia decrescere in modo sostanziale la resistenza nella muratura; alcuni autori hanno dimostrato che la resistenza a compressione di prismi in muratura costituiti da mattoni non collegati fra loro, con superfici di contatto rettificate, è quasi doppia di quella ottenuta da un normale provino in muratura (Carbone et al. 2001).

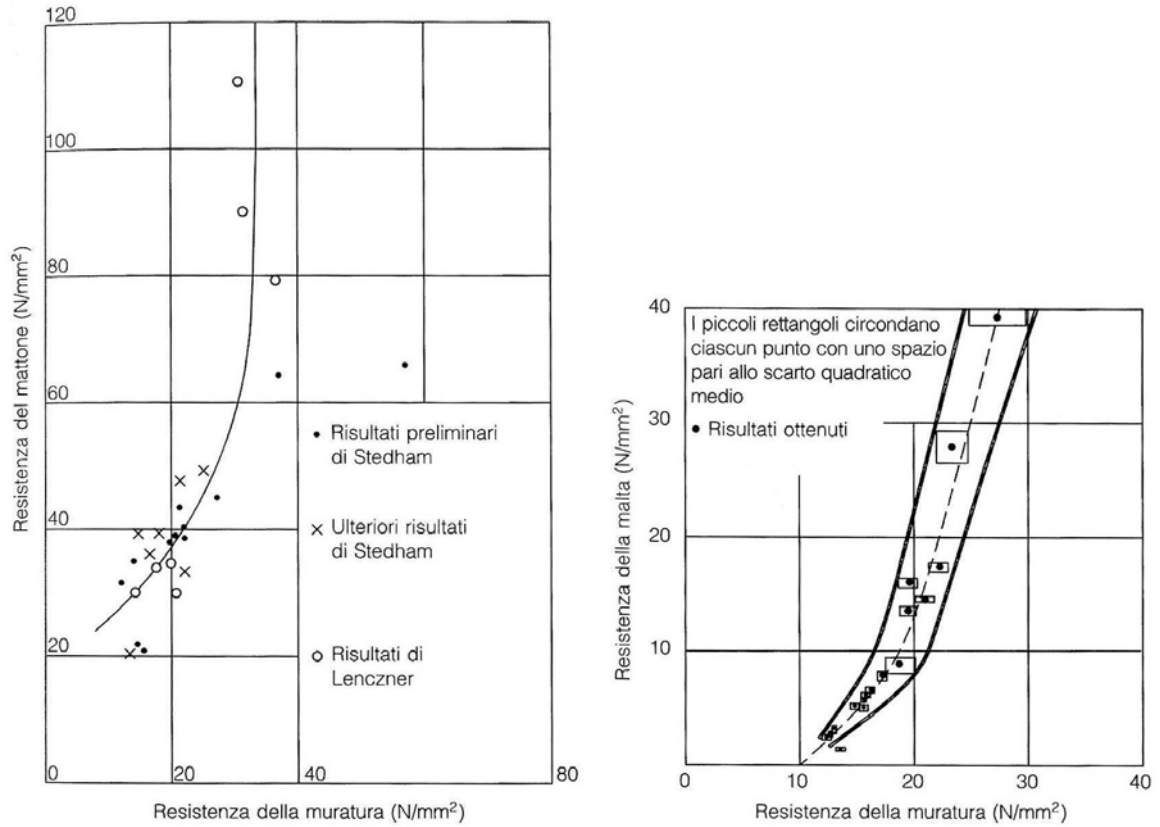


Figura 1.5: Resistenza della muratura in funzione della resistenza del mattone (a dx) e della malta (a sx) (Carbone et al. 2001).

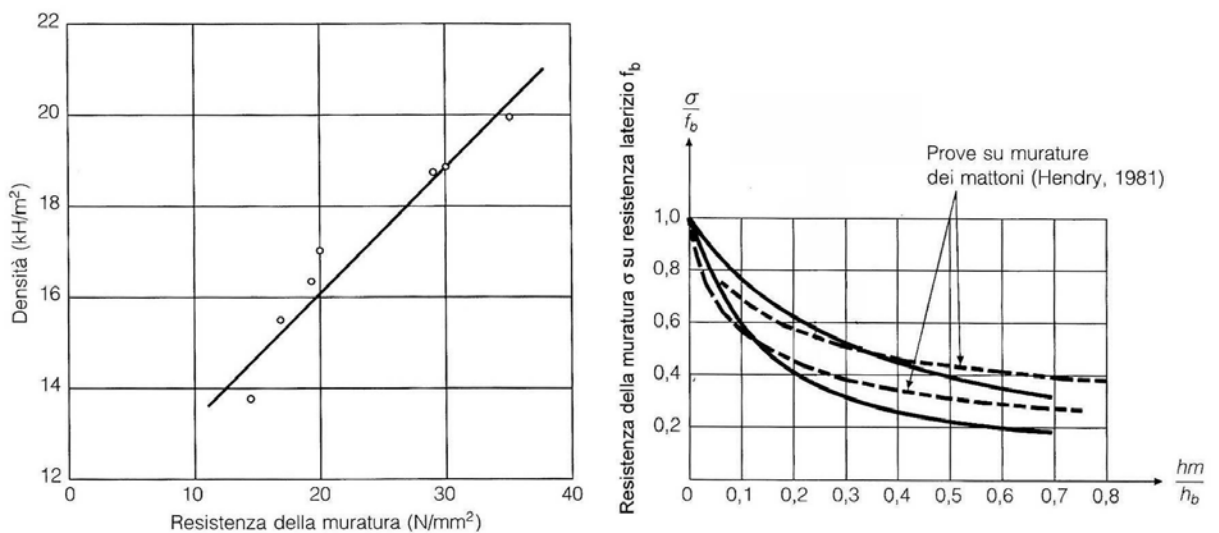


Figura 1.6: Resistenza della muratura in funzione della densità del mattone (a dx) e del rapporto tra spessore del giunto h_m e altezza del laterizio h_b (a sx) (Carbone et al. 2001).

Questi studi hanno inoltre permesso di ricavare formule di derivazione empirica che, anche se non compiutamente rappresentative della meccanica delle murature, trovano largo impiego in fase di progettazione e costruzione e all'interno di regolamenti e linee guida. In Tabella 1.4 sono raccolte alcune di queste formule per la determinazione della resistenza.

Tabella 1.4: Formule di derivazione empirica per la determinazione della resistenza della muratura (Carbone et al. 2001).

Drogsler $f = 0.736f_{xb} - \frac{221.5}{f_m} + 28.6$	Nylander $f = f_m + k \sqrt[3]{f_b^2}$
Oniszezyk $f = f_b \left(0.33 + \frac{1}{f_b} \right) \left(1 - \frac{0.2}{0.3 + \frac{f_m}{f_b}} \right)$	Suenson e Duhrkop $f = 3.61 \sqrt[4]{f_m} \frac{f_b - 0.15(\max f_b - \min f_b)}{9.71 + \sqrt{f_b}}$
Voellmy $f = \frac{f_b}{2} - \frac{180}{\sqrt{f_b}} \left[\frac{\max f_b}{\min f_b} + \left(\frac{f_b - f_m}{100} \right)^2 \right]$	Haller $f = (\sqrt{1 + 0.15f_b} - 1)(8 + 0.057f_m)$
Hermann $f = 0.45 \sqrt[3]{f_m f_b^2}$	Hansson $f = 2\sqrt{f_b} + 3\sqrt{f_m}$
Graf $f = \frac{f_b(4+0.1f_m)}{1+3\frac{h}{t}} h_b + e$ $e = 10kg_f cm^{-2}$ per eccellente esecuzione	Kreuger $f = \left(\frac{f_b}{\lambda^3} + 3.5\lambda^2 \right) \frac{6+0.1f_m}{8+2.5\frac{h}{t}} \sqrt{h_b}$ $h_b = 6.5cm$, $f_m \leq 60kg_f cm^{-2}$
Ekblad $f = \left(14 + \frac{f_b}{5.9} - \frac{f_b^2}{5200} \right) \frac{\sqrt{f_m} + 0.5}{\sqrt{h} + 12.7} h_b$ con malta di calce, $f_m \leq 350kg_f cm^{-2}$ $f = \left(23 + \frac{f_b}{13} \right) \frac{\sqrt{f_m} + 0.5}{\sqrt{h} + 12.7} h_b$ con malta di calce, $f_m > 350kg_f cm^{-2}$ $f = \left(12 + \frac{f_b}{6.5} \right) \frac{\sqrt{f_m}}{\sqrt{h} + 12.7} h_b$ con malta di calce-cemento $f = \left(6 + \frac{f_b}{6.5} \right) \frac{\sqrt{f_m}}{\sqrt{h} + 12.7} h_b$ con malta di cemento	Monk $f = 0.297f_b$ con malta di cemento:sabbia = 1:3 $f = 0.177f_b$ con malta di cemento:calce:sabbia = 1:1:6 $f = 0.138f_b$ con malta di calce:sabbia = 1:3 $f = -409 + 0.8719f_b - 0.3009f_b^2 10^{-4} psi$ con malta di tipo S-Laboratorio SCPRF
EC.6 $f_k = K f_b^{0.65} f_m^{0.25} Nmm^{-2}$	DM 20-11-87 propone una tabulazione di valori
f = resistenza della muratura in $kg_f cm^{-2}$; f_k = resistenza caratteristica della muratura; f_b = resistenza del laterizio a compressione in $kg_f cm^{-2}$; f_m = resistenza della malta a compressione in $kg_f cm^{-2}$; f_{xb} = resistenza del laterizio a compressione in $kg_f cm^{-2}$;	h_b = altezza del mattone in cm ; h = altezza della parete in muratura in cm ; t = spessore della muratura in cm ; λ = densità del mattone.

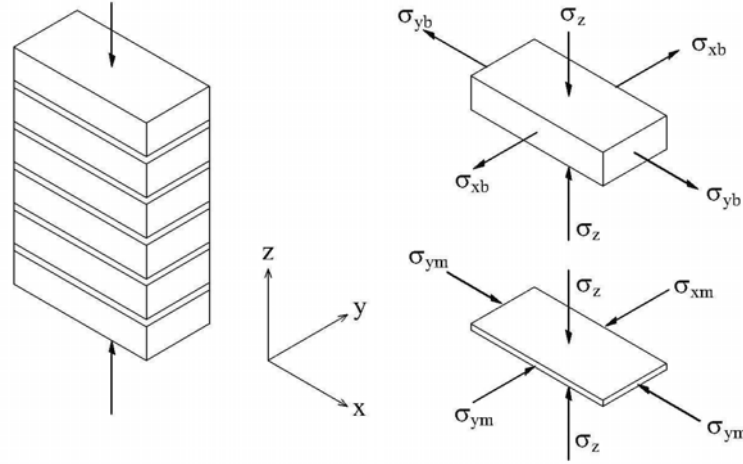


Figura 1.7: Tensioni nel complesso mattoni-malta (Carbone et al. 2001).

1.3.1.2 Studi teorici

Gli approcci teorici per l'interpretazione del comportamento delle murature si basano tutte sull'assunto che la malta, sottoposta a uno stato di compressione triassiale, esercita sui mattoni una sollecitazione di trazione biassiale nel piano orizzontale (Carbone et al. 2001). Nel seguito vengono descritte due fra le principali teorie.

Teoria elastica Si consideri un prisma di muratura soggetto ad una tensione assiale di compressione σ_z (Figura 1.7). La dilatazione unitaria del mattone, secondo le direzioni x e y , vale:

$$(1.1) \quad \epsilon_{xb} = \frac{1}{E_b} \left(\sigma_{xb} - \frac{\sigma_{yb} - \sigma_z}{m_b} \right) \quad \epsilon_{yb} = \frac{1}{E_b} \left(\sigma_{yb} - \frac{\sigma_{xb} - \sigma_z}{m_b} \right)$$

mentre per la malta:

$$(1.2) \quad \epsilon_{xm} = \frac{1}{E_m} \left(-\sigma_{xm} + \frac{\sigma_{ym} + \sigma_z}{m_m} \right) \quad \epsilon_{ym} = \frac{1}{E_m} \left(-\sigma_{ym} + \frac{\sigma_{xm} + \sigma_z}{m_m} \right)$$

dove:

E_b = modulo di elasticità del mattone;

E_m = modulo di elasticità della malta;

m_b = coefficiente di Poisson del mattone;

m_m = coefficiente di Poisson della malta.

Le tensioni vengono indicate in valore assoluto e il segno che le precede indica il tipo di sollecitazione: segno positivo per la trazione e negativo per la compressione.

L'equilibrio è garantito da equazioni di congruenza:

$$(1.3) \quad \epsilon_{xb} = \epsilon_{xm} \quad \epsilon_{yb} = \epsilon_{ym}$$

e di equilibrio:

$$(1.4) \quad \sigma_{xb}h_b = \sigma_{xm}h_m \quad \sigma_{yb}h_b = \sigma_{ym}h_m$$

dove:

h_b = altezza del mattone;

h_m = altezza del giunto di malta.

Le equazioni (1.3) e (1.4) possono essere riscritte nel seguente modo:

$$(1.5) \quad \sigma_{xm} = \frac{h_b}{h_m}\sigma_{xb} = \alpha\sigma_{xb} \quad \sigma_{ym} = \frac{h_b}{h_m}\sigma_{yb} = \alpha\sigma_{yb}$$

E' possibile dimostrare che:

$$(1.6) \quad \sigma_{xb} = \sigma_{yb} = \sigma_0$$

cioè che le due componenti orizzontali hanno lo stesso valore assoluto (Carbone et al. 2001).

Ponendo: $\beta = \frac{E_b}{E_m}$, $\nu_m = \frac{1}{m_m}$ e $\nu_b = \frac{1}{m_b}$ si ottiene:

$$(1.7) \quad \sigma_0 = \frac{\sigma_z(\beta\nu_m - \nu_b)}{1 + \alpha\beta - \nu_b - \alpha\beta\nu_m}$$

Questa formulazione basata sull'analisi elastica può essere utilizzata per controllare i risultati ottenuti in campagne sperimentali. Considerando il comportamento di un singolo mattone sottoposto contemporaneamente a compressione verticale e trazione orizzontale, il dominio di sicurezza può essere rappresentato in modo soddisfacente come la porzione di piano limitata da una retta di equazione: $\sigma = f_b - \phi\sigma_0$, dove $\phi = \frac{f_b}{f_{bt}}$, ovvero:

$$(1.8) \quad \sigma_0 = \frac{f_b - \sigma}{\phi}$$

Per i punti della retta, σ_0 rappresenta la tensione orizzontale di trazione che provoca la rottura del mattone in presenza di una compressione verticale. La rottura deve avvenire in coerenza con la legge rappresentata dalla Figura 1.8, ossia, fissata una certa configurazione geometrica e certe caratteristiche meccaniche, le due tensioni σ_0 e σ_z al momento della rottura devono rappresentare un punto di tale retta (Carbone et al. 2001).

Teoria di Hilsdorf Per spiegare la crisi finale Hilsdorf sviluppa una teoria composita in cui il collasso viene descritto come prodotto dall'interazione che mattoni e giunti di malta si scambiano nei vari passi successivi che portano alla rottura. Date le irregolarità della superficie del mattone e il comportamento non uniforme del giunto di malta, Hilsdorf ammette che si possano verificare fessure del mattone per trazione biassiale ma non tali da pregiudicare la resistenza del provino. Il collasso avviene quando il contenimento trasversale, assicurato dai mattoni alla malta, diventa insufficiente a garantire la resistenza a fronte dei carichi verticali o, in alternativa, la rottura del provino può avvenire per raggiunti limiti di resistenza del mattone, cioè quando il mattone si sgretola per effetto dei carichi. Con riferimento alla Figura 1.9, la linea *A* rappresenta il criterio di rottura del mattone; al crescere del carico lo sforzo di trazione segue localmente una linea del tipo *B*₁, fino a provocare la prima fessurazione. Dopo una redistribuzione di tensione, la trazione segue le

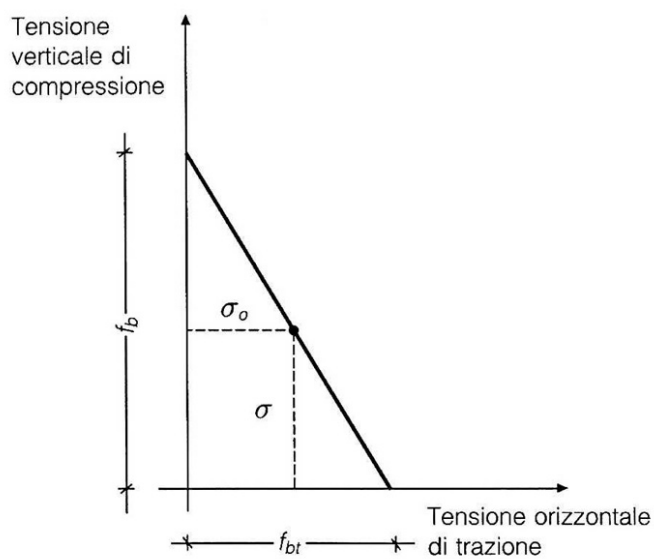


Figura 1.8: Dominio di sicurezza di un mattone sottoposto a compressione verticale e trazione orizzontale (Carbone et al. 2001).

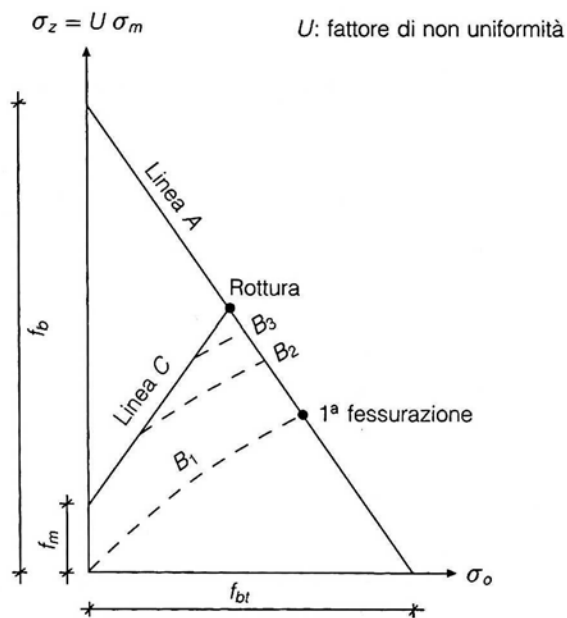


Figura 1.9: Criterio di rottura di Hilsdorf per la muratura in compressione semplice (Carbone et al. 2001).

linee B_2 , B_3 e così via provocando successive fessurazioni. Quando la curva C , relativa alla resistenza triassiale della malta, interseca la curva A , lo stato di sollecitazione non è più tollerabile né dalla malta né dal mattone, giungendo così al collasso (Carbone et al. 2001).

Fissate le seguenti grandezze:

$\sigma_{xm} = \sigma_{ym} = \sigma_{mo}$ = tensioni di confinamento laterale della malta, secondo le direzioni x e y ;

σ_{mu} = resistenza a compressione locale della malta, perpendicolarmente al giunto, in stato di confinamento;

f_m = resistenza a compressione monoassiale della malta;

σ_{xb} = tensione di trazione orizzontale nel mattone;

σ_{xm} = tensione di trazione orizzontale nel giunto di malta;

h_b = altezza del mattone;

h_m = altezza del giunto di malta.

Hilsdorf assume per la resistenza a compressione della malta la seguente legge:

$$(1.9) \quad \sigma_{mu} = f_m + 4.1\sigma_{mo}$$

ottiene l'equazione della linea C nella seguente forma:

$$(1.10) \quad \sigma_{xb} = \frac{h_m}{4.1h_b}(\sigma_{mu} - f_m) = \alpha'(\sigma_{mu} - f_m)$$

Per l'ipotesi di rottura avanzata, il collasso avviene nel punto di intersezione delle rette A e C , ossia quando $\sigma_{xb} = \sigma_o$ e $\sigma_{mu} = \sigma = f_{max}$. La tensione verticale che provoca la rottura della muratura risulta:

$$(1.11) \quad f_{max} = f_b \frac{f_{bt} + \alpha' f_m}{f_{bt} + \alpha' f_b}$$

Introducendo il coefficiente di non uniformità alla rottura U_m , si ottiene il valore medio della resistenza a compressione assiale della muratura:

$$(1.12) \quad f = \frac{f_b}{U_m} \frac{f_{bt} + \alpha' f_m}{f_{bt} + \alpha' f_b}$$

Le prove eseguite da Hilsdorf indicano per il fattore U_m valori compresi tra 1,1 e 2,5. Esso è funzione della qualità della manodopera, della resistenza a compressione della malta, del tipo di mattone, del modello della muratura e dei fori del mattone (Carbone et al. 2001).

1.3.2 Resistenza a taglio

La resistenza a taglio delle murature riveste particolare importanza in presenza di azioni sismiche, e più in generale per tutte le azioni orizzontali. La capacità di sopportare questo tipo di azioni è affidata prevalentemente alle pareti di controvento, le quali si configurano come elementi tozzi sottoposti prevalentemente a taglio. La realtà si presenta tuttavia in modo complesso, i principali aspetti che caratterizzano il comportamento di una parete soggetta a forze orizzontali possono essere così riassunte (Carbone et al. 2001):

- oltre all'azione orizzontale è sempre presente una componente verticale di compressione, data dal peso proprio, dal carico di solai e murature soprastanti;

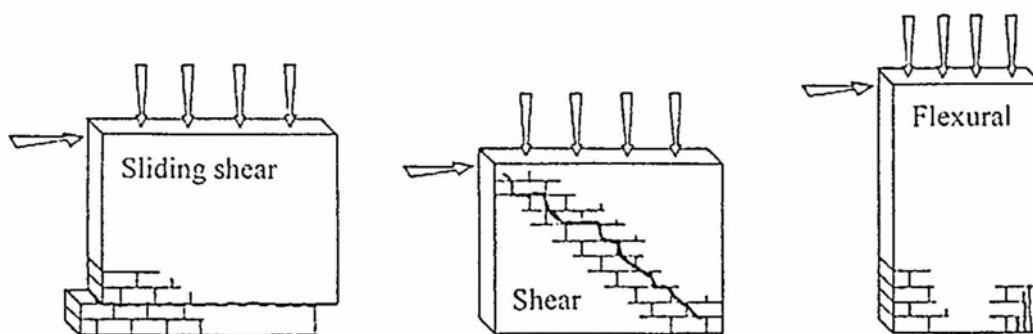


Figura 1.10: Modalità di rottura di un pannello murario (Tomazevic 2000).

- a causa dell'incapacità della muratura di resistere alla trazione, l'azione orizzontale in sommità tende a far ruotare la parete;
- pareti molto alte non possono più essere considerate tozze, e l'effetto del momento flettente dovuto all'azione orizzontale diventa prevalente;
- anche nell'ipotesi di pareti tozze la rottura attribuibile al taglio può manifestarsi in diversi modi.

Nell'ipotesi di parete tozza, cioè con rapporto altezza/larghezza minore di 2, incastrata alla base, non armata e senza aperture, i modi di rottura risultano, in sintesi, i seguenti (Figura 1.10) (Carbone et al. 2001):

- scorrimento per taglio nei giunti orizzontali, la sconnessione può interessare un solo giunto orizzontale o contemporaneamente giunti orizzontali e verticali; questa modalità di rottura caratterizza murature con scadenti qualità di malta e carichi verticali moderatamente bassi;
- rottura per taglio-trazione nella zona centrale della parete; caratterizza murature con buona adesione tra malta e mattone e carichi verticali bassi o medi;
- rottura per compressione in prossimità di un angolo basso del pannello; caratterizza murature con basse e medie resistenze a compressione e può verificarsi in due distinte ipotesi: per carichi verticali bassi, avviene un distacco della parete su di un lato, e lo schiacciamento interessa una zona limitata sul lato opposto, mentre, per carichi verticali elevati, il contatto alla base rimane per quasi tutta l'estensione del pannello e lo schiacciamento interessa una zona più ampia della precedente.

Appare chiaro come non sia possibile individuare un unico criterio di rottura: nel primo caso, responsabile del cedimento è la resistenza a scorrimento dei giunti; nel secondo, la tensione principale di trazione; nel terzo, la resistenza a schiacciamento della muratura in una zona in cui la tensione verticale raggiunge il valore massimo.

Una prima formulazione analitica per la determinazione della resistenza a taglio della muratura discende da un criterio di rottura che prende in considerazione lo scollamento dei giunti di malta; in tale ipotesi il criterio può utilizzare una legge sul tipo di quella enunciata da Coulomb per i terreni (Carbone et al. 2001):

$$(1.13) \quad f_v = f_{v0} - \mu\sigma$$

dove:

f_v = resistenza a taglio in presenza di tensioni verticali σ di precompressione;

f_{v0} = resistenza a taglio in assenza di precompressione;

μ = coefficiente dipendente da proprietà dei materiali usati ed, eventualmente, da forma delle pareti e altri fattori;

σ = tensione di precompressione dei provini.

A rigore, questo criterio dovrebbe riguardare solo i casi di malte deboli, che assicurino pertanto il cedimento del giunto. Inoltre ammette, in modo semplificativo, che la resistenza a taglio aumenti linearmente secondo l'aumento della precompressione. In sostanza, questa resistenza viene attribuita all'attrito, inteso come attrito apparente quando la muratura non ha ancora subito lesioni, e, successivamente, come attrito reale fra le superfici in qualche modo ormai sconnesse. Si può comunque affermare che l'assunzione di una legge di questo tipo ricopra, in molti casi, anche rotture non attribuibili a fenomeni di scorrimento. La comparsa di lesioni diagonali, in particolare, richiama la seconda modalità di rottura: anche quando la comparsa di lesioni diagonali non corrisponde alla resistenza ultima del pannello, la causa delle fessurazioni iniziali va ricercata nel raggiungimento del valore critico da parte della tensione principale di trazione nella muratura. E' questo il caso più frequente, riguardante murature con buona aderenza fra giunti e mattoni: il pannello si può quindi, in prima istanza, assimilare a un elemento costituito da un materiale continuo, anche se non isotropo (Carbone et al. 2001).

La relazione (Figura 1.11) che meglio lega la resistenza media di taglio alla resistenza a trazione della muratura e alla tensione di compressione è la seguente (Carbone et al. 2001):

$$(1.14) \quad \frac{f_v}{f_t} = \sqrt{1 + \frac{\sigma}{f_t}}$$

dove:

f_v = valore medio della resistenza a taglio della muratura;

f_t = resistenza a trazione della muratura nella direzione della tensione principale;

σ = tensione di compressione applicata sul provino.

1.3.3 Resistenza a trazione e flessione

La resistenza a trazione della muratura in mattoni è molto bassa, tanto che molti autori ne evidenziano la non affidabilità e per questo viene di sovente considerata pari a zero. Essa dipende essenzialmente dall'aderenza fra mattoni e malta, a sua volta determinata da fattori quali le tipologie di materiali, lo spessore dei giunti, il contenuto d'acqua del mattone al momento della posa e la bontà dell'esecuzione (Carbone et al. 2001).

La resistenza a flessione viene affrontata solo nell'Eurocodice 6, il quale rimanda a test da svolgersi in accordo con la normativa europea.

1.3.4 Proprietà deformative della muratura

Le deformazioni di un pannello in muratura possono essere causate dall'applicazione di carichi, da variazioni di temperatura o da assorbimento di umidità. Per quanto riguarda il primo aspetto si richiama il comportamento in campo elastico e oltre il campo elastico del materiale, per gli altri due si considerano proprietà più propriamente fisiche. Le curve

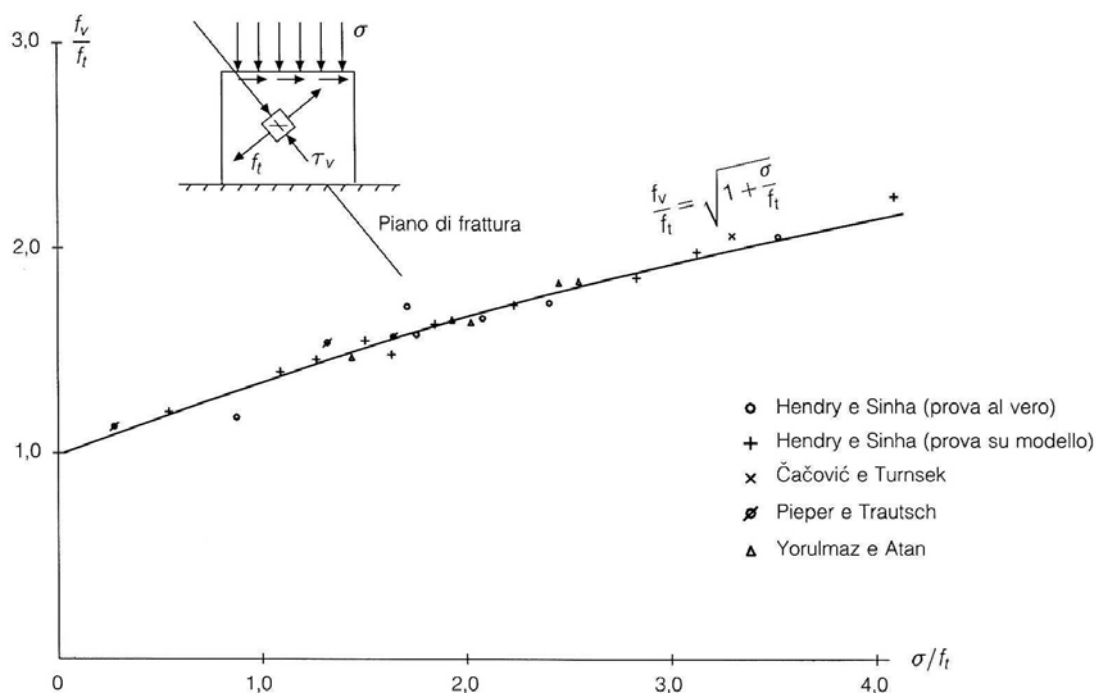


Figura 1.11: Criterio di crisi per trazione di un pannello murario (Hendry 1986).

sfuerzo-deformazione si avvicinano alla linearità solamente per valori bassi o moderati di tensione e solo nel caso di presenza di malte cementizie; spesso, inoltre, alla rimozione del carico si registrano deformazioni residue. Infine, anche le deformazioni sotto carico costante (deformazioni viscosi) hanno notevole importanza (Carbone et al. 2001).

S. Sahlin propone un'interpretazione dei fenomeni deformativi valida per murature con malte ad elevato modulo elastico e soggette a carichi medio-bassi, nelle quali lo stato di confinamento della malta è poco sensibile. Dette h_b e h_m rispettivamente l'altezza del mattone e lo spessore del giunto di malta, la deformazione totale vale (Carbone et al. 2001):

$$(1.15) \quad \Delta h = \Delta h_b + \Delta h_m$$

dove i valori indicati con Δ sono nell'ordine: la deformazione totale della muratura, quella del mattone e quella della malta.

Utilizzando la legge di Hooke, la relazione può essere riscritta come:

$$(1.16) \quad \frac{\sigma h}{E} = \frac{\sigma h_b}{E_b} + \frac{\sigma h_m}{E_m}$$

dalla quale si può ricavare il modulo elastico della muratura E e di conseguenza le sue deformazioni in funzione degli spessori e dei moduli elastici dei componenti.

$$(1.17) \quad E = E_b \frac{\frac{h_b}{h_m} + 1}{\frac{h_b}{h_m} + \frac{E_b}{E_m}} \quad \frac{E}{E_b} = \frac{\alpha + 1}{\alpha + \beta}$$

dove:

$$(1.18) \quad \alpha = \frac{h_b}{h_m} \quad \beta = \frac{E_b}{E_m}$$

Sono stati effettuati ripetuti controlli di deformabilità delle murature, tracciando in particolare curve sforzo-deformazione e tentando di correlare il modulo elastico, almeno per il livello di tensione di esercizio, alla resistenza.

Per quanto riguarda le murature di nuova costruzione, il modulo elastico è variabile in funzione del livello di carico: per le malte di calce, bastarde o cementizie, si osserva una diminuzione del suo valore all'aumentare del carico applicato. Le curve sforzo-deformazione presentano un tratto iniziale in cui la variabilità è modesta, a cui fa seguito un tratto in cui la muratura entra in fase plastica, con rapido abbattimento del modulo elastico. Sulla base di alcune campagne sperimentali, Hendry propone una curva rappresentativa a parabola di equazione (Carbone et al. 2001):

$$(1.19) \quad \frac{\sigma}{\sigma'} = 2\left(\frac{\epsilon}{\epsilon'}\right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon'}\right)^2$$

Con σ' e ϵ' rispettivamente tensione e deformazione del punto massimo della curva. Il modulo tangente vale:

$$(1.20) \quad E = 2\frac{\sigma'}{\epsilon'}$$

Nel caso di murature storiche invece, il modulo elastico risulta basso in tutte le fasi di carico: per malte di calce aerea, la diminuzione è di circa il 50% nella fase finale, per malte rigide la diminuzione è invece più contenuta (29%).

Prove di compressione ciclica su provini di muratura antica hanno messo in evidenza un aspetto caratteristico della stessa: superati gli assestamenti anelastici iniziali, la muratura diventa suscettibile di “accomodamento”, cioè dopo una prima fase anelastica essa assume un comportamento tendenzialmente elastico. Il fenomeno è tipico di murature meno regolari, mentre in quelle che presentano omogeneità di tessitura, diventa meno evidente nei cicli a carico più elevato: in queste ultime infatti l'accomodamento, che è riferibile alla sola malta dei giunti orizzontali, avviene del tutto già a cicli bassi di tensione; all'aumentare del carico la malta, confinata ormai in uno stato di elevate sollecitazioni triassiali, tende a seguire il comportamento elastico dei mattoni fino a quando non si presentano le prime fessurazioni (Carbone et al. 2001).

Capitolo 2

I materiali FRP e il problema dell'aderenza

2.1 Premessa

I materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) rivestono, ormai da molti anni, particolare interesse nel campo dell'ingegneria civile. Caratteristiche come le elevate proprietà meccaniche, la leggerezza, la bassa invasività e la reversibilità degli interventi di rinforzo ne fanno un materiale ideale negli interventi di ripristino e rinforzo del patrimonio edilizio esistente. Un aspetto importante nell'utilizzo di questi materiali è lo studio del fenomeno dell'aderenza, ossia il trasferimento degli sforzi dal materiale di rinforzo al supporto. Questo fenomeno riveste particolare importanza in quanto la crisi dovuta alla perdita di aderenza del rinforzo (*Debonding*) si manifesta come una rottura di tipo fragile, e per questo assolutamente indesiderabile.

2.2 Principali caratteristiche dei materiali compositi

I materiali compositi presentano le seguenti caratteristiche (Scarinci 2002):

- sono costituiti da due o più materiali (fasi) di natura diversa e “macroscopicamente” distinguibili;
- almeno due delle fasi presentano proprietà fisiche e meccaniche sufficientemente diverse tra loro, in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti.

Fra i materiali compositi i fibrorinforzati sono i più interessanti dal punto di vista tecnologico e solitamente raggiungono il maggior incremento di prestazioni meccaniche. Essi possono essere:

- continui (con fibre lunghe e allineate);
- discontinui (a fibre corte), suddivisi ulteriormente in allineati e orientati a caso.

La resistenza di un composito a fibre allineate discontinue è sempre minore di quella di un composito a fibre allineate continue, a parità di frazione volumetrica di fibre. La matrice può essere considerata, almeno nei casi più comuni, come un continuo isotropo. Essa deve possedere determinate proprietà ed adempiere a specifiche funzioni (Scarinci 2002):

- deve legare insieme le fibre e agire come mezzo che trasmette ad esse il carico applicato (per far ciò occorre che il modulo elastico della matrice sia molto minore di quello delle fibre e che il legame interfacciale tra fibre e matrice sia molto forte);
- deve proteggere le fibre dall'abrasione e da reazioni chimiche con l'ambiente, che le danneggerebbero introducendo in esse microcricche, che faciliterebbero la loro frattura;
- deve essere duttile e tenera, per agire da barriera contro la propagazione della frattura da una fibra all'altra;
- deve possedere un forte legame di adesione all'interfaccia con le fibre, così da rendere minimo lo sfilamento delle fibre dalla matrice stessa.

Risulta, inoltre, di fondamentale importanza la scelta dell'accoppiamento fra matrice e fibra (Scarinci 2002):

- la resistenza tangenziale dell'interfaccia deve essere sufficiente a far raggiungere alla fibra il limite di rottura al fine di sfruttarne a pieno le potenzialità, evitando fenomeni di scollamento che farebbero decadere notevolmente le prestazioni;
- i due materiali devono avere completa compatibilità chimica al fine di non dare origine a reazioni che comprometterebbero le prestazioni; è inoltre necessario evitare la scelta di materiali con coefficienti di dilatazione termica troppo diversi tra loro per evitare la nascita di stati di coazione;
- la viscosità della matrice deve essere tale da impregnare in modo adeguato le fibre e di occupare tutti gli spazi interstiziali del manufatto; in caso di carenza in questo particolare aspetto, si possono creare dei vuoti all'interno del materiale che provocano una concentrazione di sollecitazione con conseguente rottura precoce del materiale; inoltre, anche la durabilità del composito può esserne compromessa dato che eventuali sostanze aggressive hanno maggior probabilità di raggiungere le fibre.

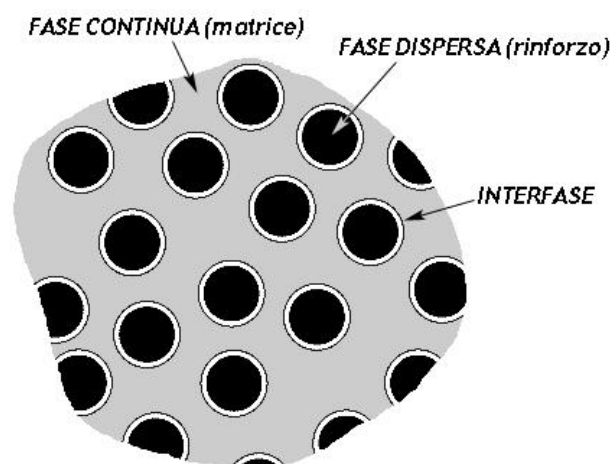


Figura 2.1: Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito (CNR-DT 200/2004 2008).

L'adesione fra matrice e rinforzo viene di solito promossa mediante l'impiego di un terzo componente che, applicato in strato molto sottile sulla superficie delle fibre, la rende

compatibile con la matrice organica. Tale trattamento superficiale del rinforzo comporta la presenza di una terza fase intermedia tra la matrice e le fibre, detta interfaccia o interfase (Fig. 2.1). L'interfaccia consiste normalmente in uno strato molto sottile (spesso monoatomico), localizzato alla superficie del rinforzo, le cui caratteristiche, pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali, sono tuttavia fondamentali per il successo del sistema complessivo nelle applicazioni strutturali.

Tabella 2.1: Confronto tra le proprietà delle fibre e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione (valori indicativi) (*CNR-DT 200/2004* 2008)

	Modulo di elasticità normale E	Resistenza a trazione σ_r	Deformazione a rottura ϵ_r	Coefficiente di dilatazione termica α	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	[%]	[$10^{-6} C^{-1}$]	[g/cm ³]
Fibre di vetro E	70–80	2000–3500	3.5–4.5	5–5.4	2.5–2.6
Fibre di vetro S	85–90	3500–4800	4.5–5.5	1.6–2.9	2.46–2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390–760	2400–3400	0.5–0.8	-1.45	1.85–1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240–280	4100–5100	1.6–1.73	-0.6– -0.9	1.75
Fibre aramidiche	62–180	3600–3800	1.9–5.5	-2	1.44–1.47
Matrice polimerica	2.7–3.6	40–82	1.4–5.2	30–54	1.10–1.25
Acciaio da costruzione	206	250–400 (snervamento) 350–600 (rottura)	20–30	10.4	7.8

Ciò che rende i compositi materiali interessanti sono le proprietà specifiche, soprattutto la resistenza specifica, che può essere anche quattro volte superiore a quella dei materiali tradizionali, e il modulo elastico normale specifico, che arriva fino al doppio (*CNR-DT 200/2004* 2008).

2.3 Fibre utilizzate

Nella campagna sperimentale oggetto del presente lavoro di tesi sono state utilizzate fibre di vetro, carbonio, basalto e acciaio. Nel seguito di questo paragrafo si darà una breve descrizione di ognuna di esse.

2.3.1 Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono prodotte per fusione, trafilatura e veloce raffreddamento di particolari vetri. Le possibili variazioni e combinazioni dei componenti della miscela di base rendono possibile la produzione di fibre con differenti proprietà, le più utilizzate sono quelle contrassegnate con le lettere E ed S (Tab. 2.2).

Tabella 2.2: Proprietà fisiche e meccaniche di due tipi di fibra di vetro (Minguzzi 1998)

Proprietà	Unità di misura	Vetro E	Vetro S
Densità	kg/m^3	2560	2490
Resistenza a trazione:	N/mm^2		
a 22C		3500	4700
a 370C		2600	3760
a 540C		1720	2410
Modulo el. a traz.	N/mm^2	75000	87000
Allungamento a rott.	%	3.8	5.5
Coeff. dil. termica	$10^{-6}C^{-1}$	2.8	5
Temp. max eserc.	C	550	650

Le fibre di vetro sono tra i rinforzi più utilizzati grazie al vantaggioso rapporto fra prestazioni e costo, alla facilità di lavorazione e alla loro compatibilità con la maggior parte delle resine. Le caratteristiche principali sono (Minguzzi 1998):

- buona resistenza meccanica;
- modesta resistenza a fatica;
- basso modulo elastico;
- stabilità dimensionale;
- discreta resistenza al calore;
- elevata resistenza alla corrosione;
- scarsa resistenza all'abrasione;
- pronunciata propensione allo scorrimento viscoso.

Gli FRP a base di fibre di vetro si denotano usualmente con l'acronimo GFRP.

2.3.2 Fibre di carbonio

Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per il loro alto modulo di elasticità normale e per la loro elevata resistenza. Sono ottenute a partire da sostanze di natura organica e si trovano in commercio in diversi tipi, anche con forti escursioni di valori delle loro proprietà meccaniche (Tab. 2.3). Le principali caratteristiche sono (Minguzzi 1998):

- ottima resistenza a trazione;
- elevato modulo di elasticità normale;
- bassa densità;
- elevata resistenza alle alte temperature;
- coefficiente di dilatazione termica praticamente nullo;

Tabella 2.3: Proprietà fisiche e meccaniche delle fibre di carbonio (Minguzzi 1998)

Proprietà	Unità di misura	Fibre di carbonio
Densità	kg/m^3	1750–1900
Resistenza a trazione:	N/mm^2	1750–5500
Modulo el. a traz.	N/mm^2	230000–550000
Allungamento a rott.	%	0.35–2.5
Coeff. dil. termica	$10^{-6}C^{-1}$	trascurabile
Temp. max eserc.	C	316

- basso allungamento a rottura.

Manifestano un comportamento a rottura intrinsecamente fragile, caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto; risultano essere meno sensibili, rispetto ad altri tipi di fibre, a fenomeni di scorrimento viscoso e di fatica e presentano una modesta riduzione della resistenza a lungo termine (CNR-DT 200/2004 2008). Gli FRP a base di fibre di carbonio si denotano usualmente con l'acronimo CFRP.

2.3.3 Fibre di basalto

Le fibre di basalto vengono prodotte da rocce di origine vulcanica composte prevalentemente da alluminio-silicati, ossido di titanio e ossido di calcio. Grazie alla loro composizione e al processo di filatura queste fibre acquisiscono eccellenti proprietà meccaniche e chimico fisiche, le principali sono:

- alta tensione e deformazione di rottura;
- elevata temperatura di fusione;
- resistenza all'abrasione;
- bassa conducibilità termica, elettrica e acustica
- eccellente resistenza ad agenti chimici.

Tabella 2.4: Proprietà fisiche e meccaniche delle fibre di basalto (dati ricavati da scheda tecnica di prodotto "Fidia srl")

Proprietà	Unità di misura	Fibre di carbonio
Densità	kg/m^3	2800
Resistenza a trazione:	N/mm^2	3080
Modulo el. a traz.	N/mm^2	100000
Allungamento a rott.	%	3.15
Temp. max eserc.	C	650

Le ottime proprietà meccaniche e fisiche, ed il minor prezzo, ne fanno un valido sostituto alle fibre di carbonio. Gli FRP a base di fibre di basalto si denotano usualmente con l'acronimo BFRP.

2.3.4 Fibre in acciaio

I compositi basati sull'impiego di fibre di acciaio vengono comunemente chiamati SRP (*Steel Reinforced Polymer*) e SRG (*Steel Reinforced Grout*); rappresentano una famiglia particolarmente estesa di materiali che, pur avendo i medesimi elementi costituenti, ovvero sottili fili di acciaio ad alta resistenza impregnati a mezzo di una matrice polimerica (SRP) o cementizia (SRG), presentano caratteristiche diversificate (Borri et al. 2006). I principali fattori che influenzano la risposta meccanica di questo tipo di compositi sono: la classe di resistenza del filamento, il diametro del filo, la tipologia di trefolo (differente per quantità di fili impiegati e loro intreccio) e infine la densità del "tessuto" (ossia il numero di trefoli presenti per unità di lunghezza). I trefoli in acciaio presentano un'alta compatibilità con qualsiasi tipologia di matrice e non richiedono quindi particolari tipologie di resine. Nel caso di tessuti con densità medio-bassa è possibile, come già detto, realizzare la matrice con malta cementizia, con notevoli benefici in termini di costo, resistenza al fuoco e semplicità operativa (Borri et al. 2006).

2.4 Matrici: resine epossidiche

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente. Miscelate con un opportuno reagente esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido. Sono caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido, permettendo così una facile impregnazione delle fibre, hanno ottime proprietà adesive e una buona resistenza agli agenti chimici. Di contro presentano un'ampiezza limitata del campo di temperature di esercizio e un comportamento fragile a rottura. Le resine termoindurenti più diffuse sono le epossidiche e le poliestere ma le più utilizzate nel settore civile sono le epossidiche. Queste ultime presentano proprietà meccaniche e adesive superiori, un limitato ritiro durante la fase di indurimento e una buona resistenza all'umidità (CNR-DT 200/2004 2008).

Tabella 2.5: Proprietà fisiche e meccaniche delle resine epossidiche (Minguzzi 1998)

Proprietà	Unità di misura	Resina epossidica generica
Densità	kg/m^3	1100–1400
Resistenza a trazione:	N/mm^2	28–91
Modulo el. a traz.	N/mm^2	2300–4000
Resistenza a flessione	N/mm^2	106–129
Modulo el. a fless.	N/mm^2	3500–4000
Allungamento a rott.	%	2.1
Temp. max eserc.	C	175–225

2.5 La perdita di aderenza (*Debonding*)

L'aderenza fra substrato e materiale di rinforzo si manifesta tramite legami chimici e aggrappaggio meccanico (*mechanical interlocking*) fra adesivo e aderendo, permettendo quindi

il trasferimento degli sforzi attraverso l'instaurarsi di un campo di tensioni tangenziali all'interfaccia dei materiali. Come già accennato all'inizio del capitolo l'importanza dello studio del fenomeno di delaminazione, ossia la perdita di aderenza, risiede nel fatto che esso si manifesta con una rottura di tipo fragile e in un dimensionamento strutturale che segua il criterio di gerarchia delle resistenze questo meccanismo non dovrebbe mai precedere l'entrata in campo inelastico per compressione della muratura (CNR-DT 200/2004 2008). Il distacco del composito dal substrato può verificarsi, in sostanza, in quattro modi (Fig. 2.2): può prodursi all'interno dell'adesivo, all'interfaccia tra substrato e adesivo, per rottura del composito o, infine, all'interno del substrato, con l'asportazione di uno strato di materiale di spessore variabile. Quest'ultima tipologia di rottura è, fra quelle menzionate, quella ottimale in quanto avviene all'interno del materiale da rinforzare, che in una corretta progettazione dovrebbe presentare una resistenza a taglio molto minore rispetto all'adesivo. Se la rottura avviene nell'adesivo, o all'interfaccia fra questo e il substrato, le cause sono solitamente da ricercare nella non perfetta posa in opera dei materiali; mentre la rottura del rinforzo è assolutamente da evitare in quanto renderebbe nulla la sua efficacia.

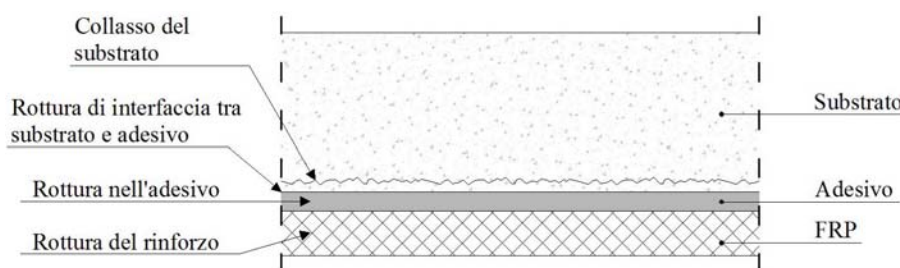


Figura 2.2: Perdita di aderenza tra rinforzo e substrato.

Vista l'importanza dell'argomento il fenomeno dell'aderenza è stato attentamente studiato dalla comunità scientifica; in particolare per compositi applicati su supporti in calcestruzzo le sperimentazioni sono numerose, per quanto riguarda l'applicazione su murature la letteratura non è ancora così completa ma l'attenzione dei ricercatori si sta rivolgendo sempre più anche a questo caso.

2.5.1 Prove di adesione tangenziale *Shear Test*: stato dell'arte

Le sperimentazioni reperibili in letteratura prevedono diverse configurazioni di test in cui il materiale di rinforzo viene sottoposto ad una pura sollecitazione assiale, in modo da generare uno stato di tensioni tangenziali assimilabile ad uno sforzo di taglio. Le configurazioni di prova adottate a tale scopo dai ricercatori sono varie, ma si possono individuare tre principali categorie (Fig: 2.3; 2.4):

- Single-Lap Shear Test: asimmetrico, prevede la sollecitazione di un singolo rinforzo applicato al supporto (Bizindavyi e Neale 1999; Chajes et al. 1996; Mazzotti, Savoia e Ferracuti 2009; Täljsten 1997);
- Double-Lap Shear Test: simmetrico, consiste nel sollecitare contemporaneamente due rinforzi applicati al provino, il quale può essere sollecitato a trazione (*Pull-Pull*) (Lee et al. 1999; Nakaba et al. 2001), oppure a compressione (*Push-Pull*) (Camli e Binici 2007);

- Beam Test o Bending-Type Test: consiste in una trazione indiretta del rinforzo, solitamente applicato all'intradosso di una trave soggetta a flessione su tre punti (De Lorenzis, Miller e Nanni 2001).

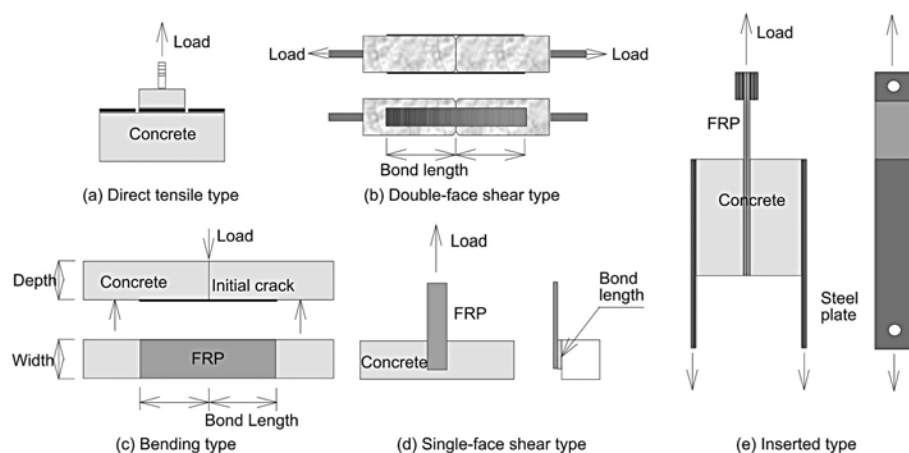


Figura 2.3: Different bond specimens (Nakaba et al. 2001)

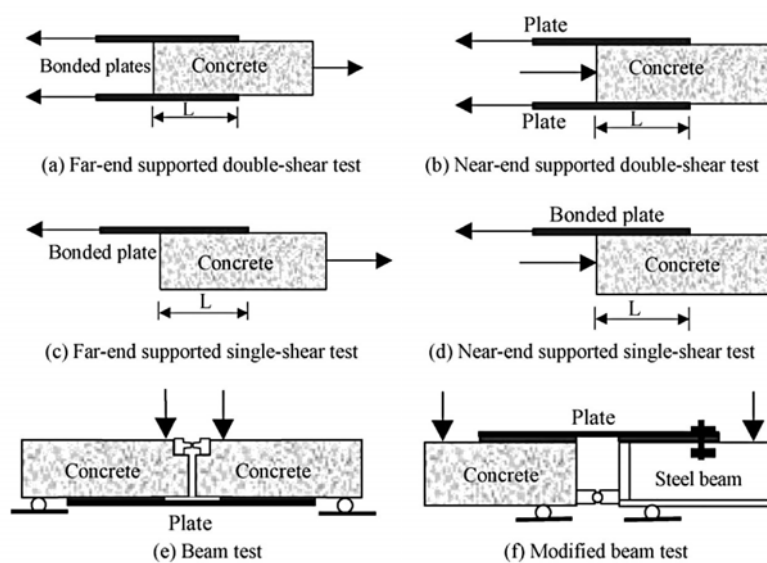


Figura 2.4: Classification of bond tests (Yao, Teng e Chen 2005)

Gli aspetti che caratterizzano le varie sperimentazioni disponibili in letteratura sono, in sostanza, i seguenti:

- scelta del set-up di prova;
- substrato rinforzato;
- geometria e tipo di rinforzo.

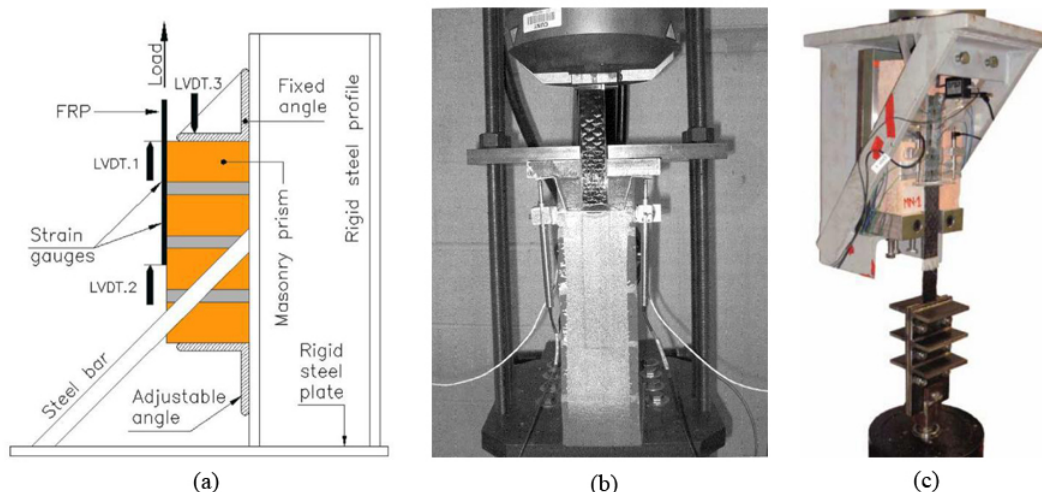


Figura 2.5: Alcuni esempi di prove di aderenza eseguite su prismi in muratura: (a) Basilio 2007, (b) Carloni e Subramaniam 2009, (c) Carrara, Ferretti e Freddi 2013

Set-Up di prova Come già accennato i set-up di prova utilizzati in letteratura sono sostanzialmente tre (Single-Lap, Double-Lap e Beam Test). Improntati inizialmente per indagare l'aderenza dei materiali compositi sul calcestruzzo sono utilizzati, con i dovuti accorgimenti e ad esclusione delle prove di tipo Beam, anche per la muratura. Nel caso di prove del tipo Double lap uno dei problemi maggiori è la realizzazione di provini il più possibile simmetrici, in grado, quindi, di garantire un'equa distribuzione del carico ad entrambe le strisce di composito (Panizza 2010a). Le prove di tipo Single-lap, essendo asimmetriche, non presentano questo tipo di inconveniente ma richiedono più tempo in quanto un'estremità del composito deve essere collegata alla macchina di prova tramite un'ulteriore incollaggio, inoltre deve essere posta particolare attenzione all'allineamento del provino alla macchina per evitare l'insorgere di tensioni che non siano riconducibili ad uno sforzo di taglio.

La scelta del set-up di prova riveste, in definitiva, una notevole importanza, si è osservato infatti (Savoia et al. 2009) che diverse metodologie di prova possono condurre a valori di forza di distacco tangenziale significativamente diversi, anche a parità di materiali impiegati e di geometria dei campioni. Per tale motivo, molti dati sperimentali disponibili in letteratura non sono fra loro direttamente confrontabili.

Substrato La natura del substrato, le caratteristiche e la preparazione della superficie su cui viene applicato il rinforzo influenzano un po' tutti gli aspetti dell'adesione, come: il tipo di rottura, il carico massimo trasmissibile, la distribuzione delle deformazioni, le tensioni all'interfaccia, l'energia di frattura e la lunghezza ottimale di aderenza (Grande, Imbimbo e Sacco 2008).

Nella quasi totalità dei casi, se il rinforzo è stato applicato in modo corretto, la rottura per perdita di aderenza avviene con il danneggiamento del substrato, con l'asportazione di uno strato, più o meno sottile, di materiale; questo fenomeno si presenta con aspetti differenti in funzione delle proprietà meccaniche e delle caratteristiche fisiche del substrato stesso, la loro conoscenza riveste quindi una notevole importanza. Ad esempio, nelle pietre di tufo, caratterizzate da un'elevata porosità, o nei mattoni faccia a vista, molto ruvidi nelle facce posteriori, i valori di carico ed energia di frattura diminuiscono lievemente ma

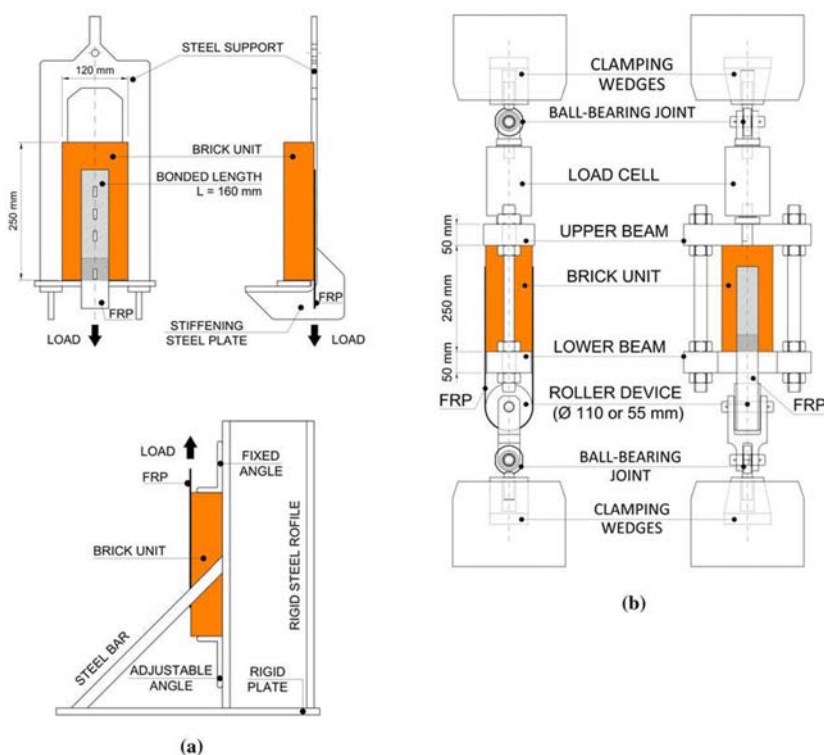


Figura 2.6: Esempi di set-up per prove di tipo SL (a) e DL (b) (Valluzzi et al. 2012)

lo strato interessato dal distacco aumenta perché, nel primo caso la resina penetra più in profondità e nel secondo caso aumenta l'aggrappaggio meccanico tra adesivo e aderendo (Panizza et al. 2010b). Altro aspetto che influisce negativamente sulle prestazioni del sistema di rinforzo sono le condizioni ambientali a cui lo stesso è stato sottoposto; in particolare: temperatura, umidità ed esposizione agli agenti atmosferici, quindi lo stato di degrado, hanno un effetto negativo sulle prestazioni del rinforzo (Aiello e Sciolti 2007; Capozucca 2010; Grande, Imbimbo e Sacco 2011).

Molti studi, comprese le istruzioni del CNR (*CNR-DT R1 200/2012* 2012), analizzano il fenomeno dell'adesione nella muratura considerando singolarmente gli elementi che la costituiscono. Interessanti, al fine del presente lavoro di tesi, sono gli studi che analizzano il materiale "muratura" nella sua "totalità", prendendo quindi in considerazione sia l'eterogeneità dei materiali che la costituiscono e sia la tessitura che la contraddistingue. A tale proposito, fin dai primi test eseguiti su prismi di muratura (Carloni e Subramaniam 2008), costituiti da mattoni di laterizio e giunti di malta, è parso subito chiaro come la presenza del giunto avesse un ruolo fondamentale nel distacco del rinforzo; si è osservato infatti (Carloni e Subramaniam 2009) che in corrispondenza del giunto di malta il valore delle tensioni è più elevato rispetto a quello del mattone e il distacco del rinforzo avviene in modo più improvviso e prima che il fronte di adesione lo abbia attraversato completamente. Lo strato di supporto coinvolto nella perdita di adesione è più sottile nel mattone rispetto a quello del giunto (Oliveira, Basilio e Lourenco 2011); il carico è caratterizzato da una fase crescente, da un salto (*drop*) in corrispondenza del primo giunto con caduta di carico e aumento degli spostamenti e da una successiva fase di carico fino ad un nuovo salto, e così via per tutta la lunghezza di adesione (Panizza et al. 2010c). Questi salti sono associati alla presenza ed allo spessore dello strato di malta e non alle sue caratteristiche meccaniche (Carloni e Subramaniam 2012), come se questo fosse una discontinuità. In

definitiva, come già detto, il giunto ha una forte influenza sul comportamento di aderenza, sembra che l'aumento di lunghezza di adesione non accresca la resistenza del rinforzo, come se questo dividesse l'area di incollaggio (Panizza et al. 2010c).

Geometria e tipo di rinforzo Il parametro geometrico più analizzato nelle sperimentazioni disponibili in letteratura è sicuramente la lunghezza di adesione (l_b); questa grandezza, assieme alla posizione del rinforzo rispetto al supporto, sono i parametri di ricerca più mutati, e restituiscono risultati molto utili per comprendere la corretta realizzazione e approfondire la conoscenza sull'efficacia del rinforzo.

La letteratura sull'argomento consiglia di evitare lunghezze di adesione molto piccole, in quanto potrebbero assumere valori simili alla lunghezza ottimale di ancoraggio, causando rotture improvvise caratterizzate dal distacco di porzioni considerevoli di substrato nella zona vicina all'estremo non caricato (Aiello e Sciolti 2003; Panizza et al. 2010b). Aumentando di poco questa lunghezza si è osservato che non ci sono rilevanti differenze, ossia il carico massimo e il tipo di rottura restano pressoché invariati, mentre variandola notevolmente il distacco interessa uno strato molto sottile di substrato ed il carico massimo aumenta anche di percentuali notevoli (Grande, Imbimbo e Sacco 2010). Alcuni studiosi hanno inoltre osservato (Aiello e Sciolti 2003; Grande, Imbimbo e Sacco 2008) che lasciando delle zone di non adesione prima del tratto finale di ancoraggio porta ad una distribuzione più uniforme di carico e di tensioni all'interfaccia, evitando rotture a dente che interessano una notevole porzione di materiale.

Altri autori hanno adottato, oltre a lunghezze di adesione sufficientemente grandi, dei sistemi di ancoraggio della parte terminale del rinforzo, sia di tipo meccanico (piastre metalliche trasversali) sia di tipo geometrico (arrotondando il provino in una zona non caricata e risvoltando il rinforzo). Questi accorgimenti consentono di ottenere una distribuzione uniforme delle deformazioni lungo il rinforzo, di evitare rotture improvvise con possibili danni alle strumentazioni (Panizza et al. 2010b) e aumentare i valori di carico massimo (Oliveira, Basilio e Lourenco 2011).

Per quanto riguarda il tipo di rinforzo la proprietà che influisce maggiormente sul comportamento all'interfaccia è la rigidità, più alto è il suo valore maggiore sarà il carico massimo trasmissibile.

Il comportamento a rottura dipende fortemente dal tipo di fibra utilizzato: nel caso di fibre sintetiche con matrici in resina le rotture sono più improvvise e solitamente avvengono con il distacco di uno strato sottile di supporto, solo raramente si verifica la rottura della fibra; nel caso di fibre in acciaio e malte cementizie il comportamento è più duttile perché avviene un vero e proprio scorrimento della corda in acciaio all'interno della matrice cementizia (Cancelli, Aiello e Casadei 2007).

2.6 Modellazione del legame di aderenza

Come già accennato in precedenza, l'aderenza tra compositi e supporto è stata investigata sperimentalmente per la prima volta su travi in calcestruzzo armato rinforzate con FRP. Dai primi risultati si è evidenziato come non fosse possibile sfruttare appieno l'incremento di resistenza fornita dal composito per il prematuro distacco di quest'ultimo dal substrato.

Con riferimento ad una tipica prova di aderenza (Fig. 2.7) possiamo notare come la forza massima sopportabile dal rinforzo, prima che avvenga il distacco, è condizionata dalle sue proprietà meccaniche e geometriche (spessore t_f , larghezza b_f e lunghezza di adesione l_b).

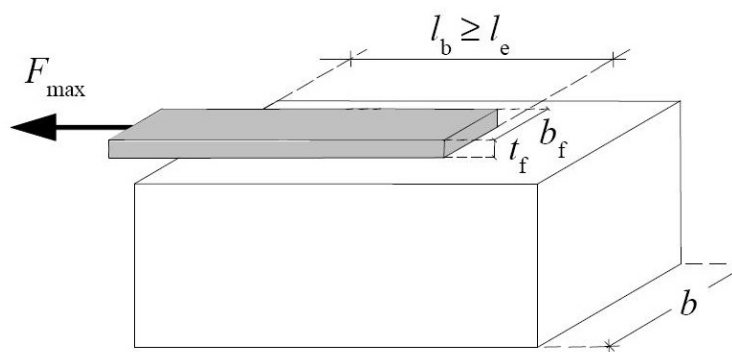


Figura 2.7: Forza massima trasmissibile da un rinforzo di FRP (*CNR-DT R1 200/2013* 2013)

Il valore della forza cresce con l'aumentare della lunghezza l_b fino ad un massimo corrispondente ad l_e , oltre il quale ulteriori allungamenti di l_b non comportano incrementi di forza trasmessa al rinforzo. La lunghezza l_e , definita come ottimale di ancoraggio, corrisponde a quella che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza. Per mettere in relazione questi parametri geometrici al carico massimo di adesione sostenibile dal sistema di rinforzo sono stati elaborati numerosi modelli predittivi che si possono suddividere sostanzialmente in tre gruppi:

- stime basate sulla definizione di una tensione tangenziale media da moltiplicare per la larghezza del rinforzo e per la lunghezza ottimale (Tab. 2.6);
- espressioni dirette per il carico ultimo (Tab. 2.7);
- stime sull'energia di frattura (Tab. 2.8 e 2.9).

Nel seguito riporteremo la descrizione del modello adottato dalle istruzioni CNR (*CNR-DT R1 200/2013* 2013) che si basa sulla stima dell'energia di frattura.

2.6.1 Modellazione del legame di aderenza tra rinforzo e muratura (*CNR-DT R1 200/2013* 2013)

Energia specifica di frattura Con riferimento alla Figura 2.7, la massima intensità, F_{max} , della forza trasmissibile ad un rinforzo di lunghezza infinita è fornita dalla (2.1), che, nel caso di rigidità dell'elemento di muratura molto più elevata di quella del rinforzo, si specializza nella (2.2).

$$(2.1) \quad F_{max} = b_f \int_0^{\infty} \tau_b(x) dx$$

$$(2.2) \quad F_{max} = b_f \sqrt{2E_f t_f \Gamma_F}$$

In quest'ultima relazione, l'energia specifica di frattura ha la seguente espressione:

$$(2.3) \quad \Gamma_F = k_b k_G \sqrt{f_{cm} f_{ctm}}$$

dove:

Tabella 2.6: Modelli predittivi basati sulla definizione di una tensione tangenziale media

$\tau_u = 5.88(0.1L_b)^{-0.669}$ $P_u = b_f L_b \tau_u$	Hiroyuki e Wu 1997
$\tau_u = 110.6 \cdot 10^{-6} E_f t_f$ $L_e = e^{6.13 - 0.580 \ln 10^{-3} E_f t_f}$ $P_u = b_f L_e \tau_u$	Maeda 1997
$\tau_u = 110.2 \cdot 10^{-6} \sqrt[3]{\left(\frac{f'_c}{42}\right)^2} E_f t_f$ $L_e = e^{6.13 - 0.580 \ln 10^{-3} E_f t_f}$ $P_u = b_f L_e \tau_u$	Khalifa 1998
$\tau_u = 0.5 f_t$ $L_e = 100 \text{mm}$ $P_u = \left(0.5 + 0.8 \sqrt{\frac{E_f t_f}{100 f_t}}\right) b_f L_e \tau_u$	Yang 2001
$\tau_u = 2.68 f'_c{}^{0.2} E_f t_f \cdot 10^{-5}$ $L_e = 1.89 (E_f t_f)^{0.4}$ $P_u = (b_f + 2\Delta b_f) L_e \tau_u$	Sato 2003
	$\Delta b_f = 3.7 \text{mm}$
$\tau_u = 0.93 f'_c{}^{0.44}$ $L_e = 0.125 (E_f t_f)^{0.57}$ $P_u = \begin{cases} b_f L_e \tau_u & \text{se } L_b \geq L_e \\ b_f L_b \tau_u & \text{negli altri casi} \end{cases}$	Iso 2003

Tabella 2.7: Modelli predittivi basati sull'espressione diretta del carico ultimo

$P_u = \begin{cases} \left(3.8 f'_c{}^{2/3} + 15.2\right) b_f L_b E_f t_f \cdot 10^{-6} & \text{(carbonio)} \\ \left(3.4 f'_c{}^{2/3} + 69\right) b_f L_b E_f t_f \cdot 10^{-6} & \text{(aramide)} \end{cases}$	Izumo 2003
$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{f'_c}}$ $P_u = \begin{cases} 0.64 \beta_w b_f \sqrt{E_f t_f f_t} & \text{se } L_b \geq L_e \\ 0.64 \beta_w b_f \sqrt{E_f t_f f_t} \frac{L_b}{L_e} \left(2 - \frac{L_b}{L_e}\right) & \text{negli altri casi} \end{cases}$ $G_f = c_f f_t c_f = 0.204 \pm 0.053$ $\beta_w = 1.125 \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/400}}$	Neubauer e Rostásy 1997
$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{f'_c}}$ $P_u = 0.427 \beta_w \beta_l b_f L_e \sqrt{f'_c}$ $\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/b_c}}$ $\beta_l = \begin{cases} 1 & \text{se } L_b > L_e \\ \sin \frac{\pi L_b}{2 L_e} & \text{negli altri casi} \end{cases}$	Chen e Teng 2001

Tabella 2.8: Modelli predittivi basati sulla stima dell'energia di frattura. Parte 1

$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{\max} \left(\frac{s}{s_0} \right) & \text{se } s \leq s_0 \\ \tau_{\max} \left(\frac{s_f - s}{s_f - s_0} \right) & \text{se } s_0 < s \leq s_f \\ 0 & \text{negli altri casi} \end{cases}$	Modelli bilineari
$\begin{aligned} \tau_{\max} &= 1.8\beta_w f_t \\ s_0 &= 2.5\tau_{\max} \left(\frac{t_a}{E_a} + \frac{50}{E_c} \right) \\ s_f &= 0.33\beta_w \\ \beta_w &= \sqrt{1.5 \frac{2-b_f/b_c}{1+b_f/100}} \end{aligned}$	Monti 2003
$\begin{aligned} \tau_{\max} &= 1.5\beta_w f_t \\ s_0 &= 0.0195\beta_w f_t \\ s_f &= \frac{2G_f}{\tau_{\max}} \\ \beta_w &= \sqrt{\frac{2.25-b_f/b_c}{1.25+b_f/b_c}} \\ G_f &= 0.308\beta_w^2 \sqrt{f_c} f(K_a); \quad f(K_a) = 1 \text{ se non specificato} \end{aligned}$	Lu et al. bilineare 2004
$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \sqrt{\frac{1.47(2-b_f/b_c)}{1+b_f/85}} \frac{f_c f_t}{f_c + f_t} \\ s_0 &= \tau_{\max} \left(2.4 \frac{t_{\text{ref}}}{E_c} + 2.5 \frac{t_m}{E_m} + n \frac{t_a}{E_a} \right) \\ s_f &= \frac{2G_f}{\tau_{\max}} \\ G_f &= \frac{0.588(2-b_f/b_c)}{1+b_f/85} f_c \\ L_e &= \frac{2\lambda + a \tan(\tanh(2)/\lambda)}{\lambda \omega} \\ \lambda &= \sqrt{\frac{s_0}{s_f - s_0}} \\ \omega &= \sqrt{\frac{\tau_{\max} \left(1 + \left(\frac{E_f A_f}{E_c A_c} \right) \right)}{s_0 E_f t_f}} \end{aligned}$	Brosens et al. 2001
$\tau(s) = \tau_{\max} \frac{s}{s_0} \frac{n}{n-1 + \left(\frac{s}{s_0} \right)^n}$	curve di Popovics
$\tau_{\max} = 3.5 f_c'^0 .19 s_0 = 0.065 n = 3$	Nakaba 2001
$\tau_{\max} = 3.5 f_c'^0 .19 s_0 = 0.051 n = 2.86$	Savoia 2002

Tabella 2.9: Modelli predittivi basati sulla stima dell'energia di frattura. Parte 2

$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{\max} \left(\frac{s}{s_0} \right) & \text{se } s \leq s_0 \\ 0 & \text{negli altri casi} \end{cases}$ $\tau_{\max} = 1.8\beta_w f_t$ $s_0 = 0.202\beta_w$ $\beta_w = 1.125 \sqrt{\frac{2-b_f/b_c}{1+b_f/400}}$	Neubauer e Rostàs 1997-1999
$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{\max} \left(\frac{s}{s_0} \right)^{0.575} & \text{se } s \leq s_0 \\ \tau_{\max} e^{-\beta(s-s_0)} & \text{negli altri casi} \end{cases}$ $\tau_{\max} = \frac{-1.575\alpha K_a + \sqrt{2.481\alpha^2 K_a^2 + 6.3\alpha\beta^2 K_a G_f}}{2\beta}$ $s_0 = \frac{\tau_{\max}}{\alpha K_a}$ $K_a = \frac{G_a}{t_a}$ $G_f = 7.554 K_a^{-0.449} f_c^{0.343}$ $\alpha = 0.028 (10^{-3} E_f t_f)^{0.254}$ $\beta = 0.0035 K_a (10^{-3} E_f t_f)^{0.34}$	Dai e Ueda (1) 2003
$\tau(s) = 2UG_f (e^{-Us} - e^{-2Us})$ $\tau_{\max} = 0.5UG_f$ $s_0 = \frac{\ln(2)}{U}$ $U = 6.846 (10^{-3} E_f t_f)^{0.108} \left(10^{-3} \frac{G_a}{t_a} \right)^{0.833}$ $G_f = 0.446 (10^{-3} E_f t_f)^{0.023} \left(10^{-3} \frac{G_a}{t_a} \right)^{-0.352} f_c^{0.236}$	Dai e Ueda (2) 2003
$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{\max} \left(\sqrt{\frac{s}{s_0 A}} - B \right) & \text{se } s \leq s_0 \\ \tau_{\max} e^{-\alpha \left(\frac{s}{s_0} - 1 \right)} & \text{negli altri casi} \end{cases}$ $\tau_{\max} = 1.5\beta_w f_t$ $s_0 = 0.0195\beta_w f_t + s_e$ $\alpha = \frac{\tau_{\max} s_0}{G_f - G_f^a}$ $\beta_w = \sqrt{\frac{2.25 - b_f/b_c}{1.25 + b_f/b_c}}$ $A = \frac{s_0 - s_e}{s_0}$ $B = \frac{s_e}{2(s_0 - s_e)}$ $s_e = \frac{\tau_{\max}}{K_0}$ $K_0 = \frac{K_a K_c}{K_a + K_c}$ $K_a = \frac{G_a}{t_a}$ $K_c = \frac{G_c}{t_c}$ $G_f = 0.308\beta_w^2 \sqrt{f_t f} ((K_a))$ $G_f^a = \int_0^{s_0} \tau ds = \tau_{\max} s_0 \left(\frac{2A}{3} \left(\frac{1+B^2 A}{A} \right)^{\frac{2}{3}} - B - \frac{2}{3} B^3 A \right)$	Lu et al. 2004

- k_b è un coefficiente correttivo adimensionale, di tipo geometrico, fornito dalla relazione:

$$(2.4) \quad k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f/b}{1 + b_f/b}}$$

con b larghezza dell'elemento rinforzato;

- k_G è un ulteriore coefficiente correttivo di natura sperimentale, avente le dimensioni di una lunghezza.

Il coefficiente k_G è stato calibrato sulla base di un'estesa popolazione di risultati sperimentali disponibili nella bibliografia nazionale ed internazionale. La calibrazione dei valori medi e caratteristici del coefficiente k_G è stata eseguita considerando come variabili aleatorie anche le caratteristiche meccaniche dei materiali, la procedura di calibrazione è stata condotta separatamente per compositi impregnati "in situ" applicati su murature in laterizio e per quelli installati su murature di pietra naturale. Le classi di resistenza dei blocchi, i cui risultati delle prove di distacco FRP-muratura sono stati impiegati nella calibrazione sono:

- per blocchi di laterizio 7,0-42,0 *MPa*;
- per il tufo 2,7-5,0 *MPa*;
- per murature di calcarenite o pietra leccese 2,0-24,0 *MPa*.

La calibrazione ha fornito:

- per murature di laterizio, un valore medio di 0,093 *mm* ed un frattile al 5% di 0,031 *mm*;
- per murature di tufo, un valore medio di 0,157 *mm* ed un frattile al 5% di 0,048 *mm*;
- per murature di calcarenite o pietra leccese, un valore medio di 0,022 *mm* ed un frattile al 5% di 0,012 *mm*.

Utilizzando i valori medi e caratteristici di k_G l'Eq. (2.3) restituisce, rispettivamente, il valore medio, Γ_{Fm} , dell'energia specifica di frattura e il valore caratteristico, Γ_{Fk} , di tale energia. Utilizzando la relazione (2.2), attraverso semplici passaggi, è possibile calcolare il valore di progetto della tensione di distacco del rinforzo, f_{fdd} , mediante la (2.5):

$$(2.5) \quad f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}$$

dove $\Gamma_{Fd} = \Gamma_{Fk}/FC$, e $\gamma_{f,d}$ è un coefficiente parziale di sicurezza.

In Figura 2.8 sono riportati i valori sperimentali della forza di distacco desunti dalle prove di aderenza per la calibrazione di k_G e distinti per supporti murari di laterizio e di pietra naturale.

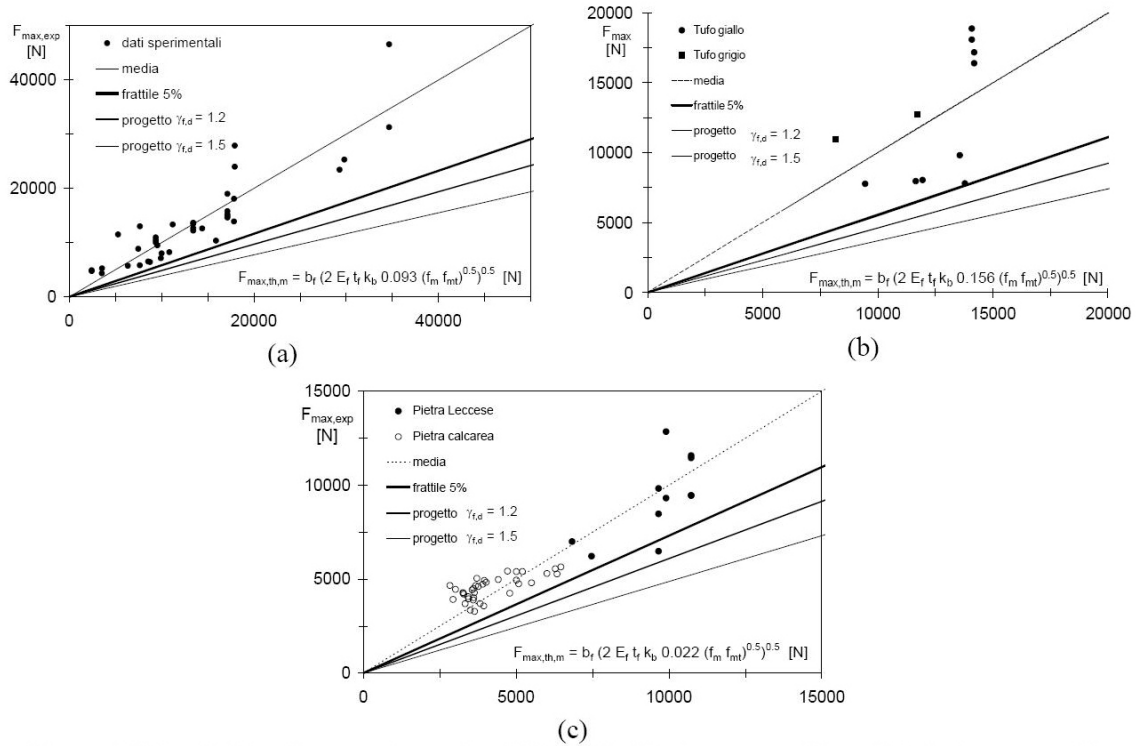


Figura 2.8: Calibrazione sperimentale: (a) laterizi, (b) pietre naturali-tufi, (c) pietre naturali-calcarenite e pietra leccese.

Legame di aderenza Il legame di aderenza tra rinforzo e muratura è modellato mediante una relazione tra la tensione tangenziale all’interfaccia e lo scorrimento corrispondente (relazione “ $\tau_b - s$ ”). Tale legame, tipicamente non lineare con un ramo discendente, può essere approssimato mediante una legge bilineare (Fig. 2.9).

Per definire il primo dei due rami è necessario tenere conto sia della deformabilità dello strato di adesivo, sia di quella di un opportuno strato superficiale di muratura. In assenza di risultati sperimentali specifici, i parametri meccanici che definiscono il legame di aderenza bilineare “ $\tau_b - s$ ” possono essere valutati con le modalità appresso descritte.

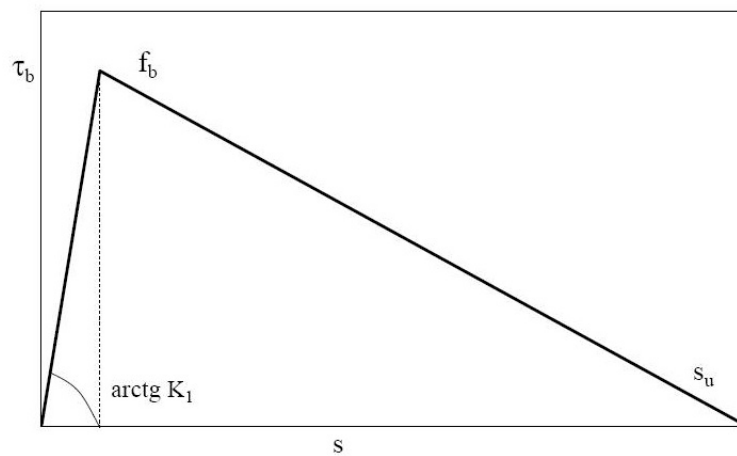


Figura 2.9: Esempio di legame di aderenza “ $\tau_b - s$ ” (CNR-DT R1 200/2013 2013)

Per lo scorrimento di interfaccia corrispondente al completo distacco si assume il seguente valore, ampiamente condiviso in letteratura:

- $s_u = 0.3 \text{ mm}$ per murature di calcareniti e di pietra leccese;
- $s_u = 0.4 \text{ mm}$ per murature di laterizio e di tufo.

A partire dal valore medio dell'energia specifica di frattura, Γ_{Fm} , il valore medio della massima tensione tangenziale di aderenza, nelle ipotesi di legame di aderenza bilineare, è esprimibile dalla 2.6:

$$(2.6) \quad f_b = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fm}}{s_u}$$

Infine, il coefficiente angolare del ramo lineare crescente, K_1 , può essere valutato come:

$$(2.7) \quad K_1 = \frac{c_1}{\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_m}{G_m}}$$

dove: G_a e G_m sono, rispettivamente, i moduli di elasticità tangenziale dell'adesivo e del blocco di muratura; t_a lo spessore nominale dell'adesivo e t_m lo spessore dello strato del blocco di muratura che partecipa alla deformabilità dell'interfaccia (in mancanza di dati sperimentali si può assumere $t_c = 20 \div 30 \text{ mm}$ e $c_1 = 0.5 \div 0.7$).

Lunghezza ottimale di ancoraggio L'espressione del valore di progetto della lunghezza ottimale di ancoraggio, l_{ed} , deriva dall'ipotesi di legame “ $\tau_b - s$ ” rigido-softening ($K_1 \rightarrow \infty$), lecita allo SLU dal momento che l'ampiezza del tratto elastico-lineare è del tutto trascurabile rispetto a quella del successivo tratto di softening: La lunghezza ottimale di ancoraggio di progetto può essere stimata mediante la seguente relazione:

$$(2.8) \quad l_{ed} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}} \geq 150 \text{ mm}$$

dove:

- $f_{bd} = \frac{2\Gamma_{Fd}}{s_u}$ è il valore di progetto della massima tensione tangenziale di aderenza, con $\Gamma_{Fd} = \Gamma_{Fk}/FC$;
- $s_u = 0.3 \text{ mm}$ per murature di calcareniti e di pietra leccese e $s_u = 0.4 \text{ mm}$ per murature di laterizio e di tufo;
- γ_{Rd} un coefficiente correttivo pari a 1,5 per murature di laterizio e tufi e pari a 1,25 per murature di calcareniti e di pietra leccese.

Capitolo 3

Programma sperimentale e preparazione provini

3.1 Programma sperimentale

Il presente lavoro di tesi si propone lo studio sperimentale dell'aderenza fra materiali compositi (FRP) e la muratura in laterizio. Il programma sperimentale si può suddividere essenzialmente in due fasi (Fig. 3.1): la prima comprende la scelta dei materiali, la realizzazione dei campioni da testare e la caratterizzazione meccanica dei materiali impiegati; la seconda fase prevede l'esecuzione degli shear test, indagando il fenomeno dell'aderenza al variare del tipo di substrato e del rinforzo utilizzato.

Fase 1

Scelta dei materiali e realizzazione dei campioni



Caratterizzazione meccanica dei materiali:

- mattoni in laterizio
- malta
- prismi in muratura
- fibre di rinforzo
- resine epossidiche



Fase 2

Prove di aderenza (single lap shear test):

- su singoli mattoni
- su blocchi di malta
- su prismi in muratura

Figura 3.1: Programma generale

Sulla scelta dei materiali e la preparazione dei provini si parlerà nel seguito di questo capitolo, la caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei materiali utilizzati sarà invece oggetto del prossimo capitolo, così come per la descrizione e l'analisi delle singole prove di aderenza. Nel seguito vengono proposte le tabelle riassuntive delle prove sperimentali svolte in laboratorio (Tab. 3.1 e 3.2).

Caratterizzazione meccanica dei materiali Come indicato nella Fig. 3.1 i materiali oggetto di caratterizzazione meccanica sono stati i singoli mattoni di laterizio e la malta utilizzati nel confezionamento dei prismi in muratura, le resine epossidiche utilizzate come primer per la preparazione del substrato e come resina di impregnazione dei tessuti rinforzanti ed infine i tessuti stessi.

I blocchi in laterizio utilizzati nella campagna sperimentale sono dei mattoni “SanMarco Terreal Rosso Vivo A6R55W”, prodotti dalla SanMarco Laterizi di Noale (VE), su questi sono state eseguite prove di compressione, flessione, trazione indiretta (splitting test o prova brasiliana), pull-off e prove finalizzate alla determinazione del modulo elastico. La malta utilizzata nel confezionamento dei provini è la “Tassullo T30V”, una malta pronta a base di calce idraulica naturale, prodotta dalla Tassullo s.p.a di Tassullo (TN), sono state eseguite prove di compressione e flessione semplice, di compressione strumentata e prove per la determinazione del modulo elastico. Per caratterizzare il comportamento di una muratura sono stati confezionati sei prismi murari, costituiti ciascuno da cinque mattoni sovrapposti e collegati fra loro da quattro giunti di malta dello spessore di un centimetro; sui prismi così realizzati sono state effettuate prove di compressione strumentata e splitting. Nella sperimentazione sono stati utilizzati quattro tipi di tessuti rinforzanti: in fibra di vetro (GFRP), in fibra di carbonio (CFRP), fibra di basalto (BFRP) e in fibra di acciaio (SRP), tutti i tessuti sono stati forniti da Fidia srl, Perugia; ciascuna di queste fibre, opportunamente impregnate con resina epossidica, è stata sottoposta a prove di trazione strumentata. Per le resine epossidiche sono stati utilizzati i seguenti prodotti, tutti forniti da Fidia srl: “Fidprimer” per la preparazione del substrato, “Fidsaturant HM” per l'impregnazione dei tessuti in vetro, basalto e carbonio ed infine “Fidsaturant HM-T” per l'impregnazione dei tessuti di rinforzo in acciaio; campioni realizzati con queste resine sono stati sottoposti a prove di trazione strumentata.

Prove di aderenza All'interno di una più estesa campagna di sperimentazione si prendono qui ad esame 56 prove di shear test, tutte appartenenti alla tipologia di test nota in letteratura come “Single-Lap”, ossia una configurazione asimmetrica che prevede la sollecitazione di un singolo rinforzo applicato al supporto (Paragrafo 2.5.1). Venti prove sono state condotte su provini costituiti da singoli mattoni in laterizio, rinforzati con tutte e quattro le tipologie di rinforzo, sei prove sono state condotte su provini costituiti da blocchi di malta, rinforzati tre con fibre di vetro e tre con fibre di carbonio, questi ultimi provenienti da un'altra campagna di sperimentazione tesa ad indagare il fenomeno dell'aderenza fra materiali compositi e murature in pietra leccese, infine, 30 prove sono state condotte su provini in muratura, rinforzati con tutte le tipologie di rinforzo e varie lunghezze di adesione. In Tabella 3.2 sono schematizzate tutte le prove, con indicazione, per ognuna, del tipo di rinforzo utilizzato e della lunghezza di adesione adottata.

Riassumendo, le tipologie di substrato utilizzate sono state:

- mattoni in laterizio, reperiti in commercio e di dimensioni standard 55x120x250 mm;
- blocchi di malta, realizzati in laboratorio, di dimensioni 110x120x250 mm;

Tabella 3.1: Programma sperimentale di caratterizzazione dei materiali

Materiale	Tipo di prova	n° prove
mattone	flessione su 3 punti	14
	compressione	7
	splitting	7
	pull-off	28
	modulo elastico	6
malta	compressione sempl.	9
	compressione strum.	3
	flessione sempl.	6
	splitting	3
	modulo elastico	3
prismi muratura	compressione strum.	3
	splitting	3
compositi	trazione strumentata	6 GFRP
		6 CFRP
		6 BFRP
		6 SRP
resine	trazione strumentata	12 Fidprimer
		12 Fidsaturant HM
		12 Fidsaturant HM-T

- prismi di muratura, realizzati in laboratorio, con dimensioni medie 120x120x315 *mm*.

I tessuti di rinforzo utilizzati sono stati di quattro tipi:

- tessuto unidirezionale in fibra di vetro (GFRP);
- tessuto unidirezionale in fibra di carbonio (CFRP);
- tessuto unidirezionale in fibra di basalto (BFRP);
- tessuto unidirezionale in fibra di acciaio ad altissima resistenza rivestito in ottone (SRP).

Le lunghezze di ancoraggio, in base al tipo di supporto, sono state le seguenti:

- per i mattoni di laterizio si è adottata una lunghezza di 160 *mm* per tutti i provini;
- per i blocchi di malta una lunghezza di 210 *mm* per le fibre di vetro e 220 *mm* per le fibre di carbonio, tutti con ancoraggio finale;
- per i prismi in muratura lunghezze variabili di 65, 130, 195, 260 *mm*, quest'ultima con ancoraggio.

Tabella 3.2: Programma sperimentale delle prove di adesione

Substrato	Cod. campione	Rinforzo					Lunghezza di adesione [mm]						
		GFRP	CFRP	BFRP	SRP	65	130	160	195	210anc	220anc	260anc	
mattoni	SL-Glass01	*						*					
	SL-Glass02	*						*					
	SL-Glass03	*						*					
	SL-Glass04	*						*					
	SL-Glass05	*						*					
	SL-Carbon01		*					*					
	SL-Carbon02		*					*					
	SL-Carbon03		*					*					
	SL-Carbon04		*					*					
	SL-Carbon05		*					*					
	SL-Basalt01			*				*					
	SL-Basalt02			*				*					
	SL-Basalt03			*				*					
	SL-Basalt04			*				*					
	SL-Basalt05			*				*					
	SL-Steel01					*		*					
	SL-Steel02					*		*					
	SL-Steel03					*		*					
	SL-Steel04					*		*					
	SL-Steel05					*		*					
malta	malta-G-anc-01f	*								*			
	malta-G-anc-02f	*								*			
	malta-G-anc-03f	*								*			
	malta-C-anc-01		*								*		
	malta-C-anc-03		*								*		
	malta-C-anc-05		*								*		
muratura	M-GFRP-065-01f	*				*							
	M-GFRP-065-01r	*				*							
	M-GFRP-065-05r	*				*							
	M-GFRP-130-02f	*					*						
	M-GFRP-130-03r	*					*						
	M-GFRP-130-06r	*					*						
	M-GFRP-195-02r	*						*					
	M-GFRP-195-03f	*						*					
	M-GFRP-195-05f	*						*					
	M-GFRP-anc-04f	*										*	
	M-GFRP-anc-06f	*										*	
	M-GFRP-anc-10f	*										*	
	M-CFRP-195-02dx		*						*				
	M-CFRP-195-05dx		*						*				
	M-CFRP-195-13dx		*						*				
	M-CFRP-anc-07r		*									*	
	M-CFRP-anc-08r		*									*	
	M-CFRP-anc-13f		*									*	
	M-BFRP-195-01sx			*					*				
	M-BFRP-195-03dx			*					*				
	M-BFRP-195-06sx			*					*				
	M-BFRP-anc-07f			*								*	
	M-BFRP-anc-08f			*								*	
	M-BFRP-anc-09f			*								*	
	M-SRP-195-08dx					*			*				
	M-SRP-195-10r					*			*				
	M-SRP-195-14f					*			*				
	M-SRP-anc-10sx					*						*	
M-SRP-anc-13r					*						*		
M-SRP-anc-14r					*						*		

3.2 Realizzazione dei provini

Il confezionamento dei campioni utilizzati nella sperimentazione è avvenuto all'interno del "Laboratorio per le prove sui materiali da costruzione" con le modalità descritte nel seguito.

3.2.1 Blocchi di malta

Per la costruzione dei blocchi di malta è stata utilizzata una malta pronta a base di calce idraulica, denominazione commerciale T30V, della ditta Tassullo. Si tratta di una malta a basse prestazioni che ben si adatta a simulare una malta "storica", è adatta alla realizzazione di intonaci, rinzaffi, giunti in murature faccia a vista e allettamento di murature in mattoni, la granulometria massima degli inerti è pari a 4 mm e la preparazione dell'impasto avviene con la sola aggiunta di acqua in ragione di 5 litri ogni 30 kg di preparato. Sono stati realizzati in totale 21 provini, di cui 9 con dimensioni 40x40x160 mm, 9 con dimensioni 55x120x250 mm e 3 con dimensioni 110x120x250 mm, per i primi si è utilizzato uno stampo metallico costituito da un telaio con elementi rimovibili per facilitare l'estrazione del provino, per gli altri sono stati costruiti dei casseri con delle tavole in legno assemblate tramite viti così da permettere, anche in questo caso, un facile smontaggio per la rimozione del provino indurito.



Figura 3.2: Preparazione dei provini in malta: (a) malta utilizzata, (b) miscelatrice, (c)-(d) casseri utilizzati.

L'impasto è stato realizzato pesando ogni volta il composto e l'acqua in modo da mantenere invariato il rapporto indicato dal produttore e miscelando, con l'ausilio di una misce-

latrice elettrica, per 3 minuti; la malta così ottenuta è stata versata all'interno dei casseri, precedentemente oliati su tutte le superfici interne, e costipata tramite battitura manuale dei casseri stessi (Fig. 3.2). Lasciati indurire per qualche giorno sono stati poi tolti dagli stampi e messi a maturare in camera climatica per un periodo non inferiore a 28 giorni. Per sei dei provini di dimensione $55 \times 120 \times 250 \text{ mm}$, destinati agli shear test, si è poi provveduto ad un incollaggio a coppie utilizzando una resina vinilestere a presa rapida, ottenendo così tre provini con dimensioni di $110 \times 120 \times 250 \text{ mm}$ circa. Questa scelta si è rivelata subito poco pratica, quindi altri tre blocchi di malta, destinati a essere rinforzati con fibra di carbonio, sono stati confezionati direttamente delle dimensioni finali (Fig. 3.3d). Infine, per i campioni in cui era previsto l'ancoraggio del tessuto di rinforzo, si è proceduto ad arrotondare gli spigoli finali con un raggio di circa 20 mm (Fig. 3.3c).

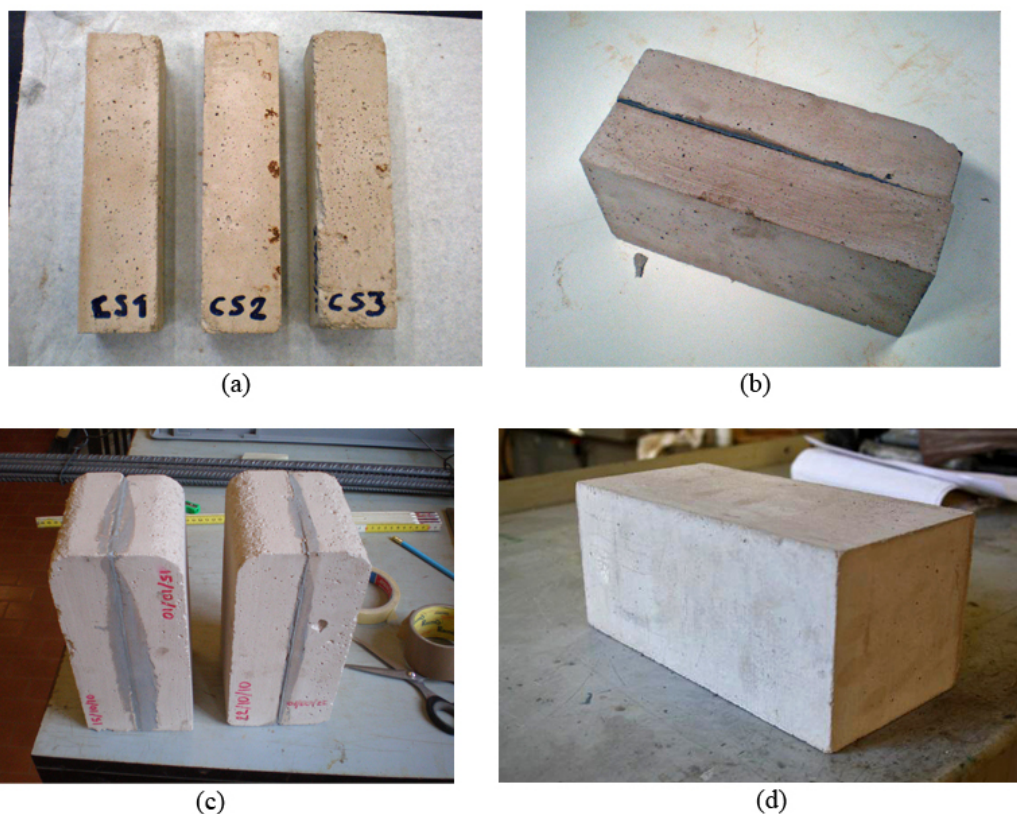


Figura 3.3: Provini in malta: (a) provini prismatici $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$, (b) incollaggio dei mattoni in malta, (c) particolare degli spigoli arrotondati, (d) blocchi unici $110 \times 120 \times 250 \text{ mm}$.

3.2.2 Prismi in muratura

I prismi murari sono stati confezionati sovrapponendo cinque mattoni, intervallati da quattro giunti di malta dello spessore di circa un centimetro. I mattoni in laterizio sono stati spazzolati e lavati con acqua corrente, in modo da togliere polvere e impurità varie; in seguito sono stati immersi in acqua per un minimo di 24 ore in modo che, al momento della posa, non assorbissero l'acqua dell'impasto (Fig. 3.4).

Per facilitarne la costruzione, e garantire una maggiore regolarità del manufatto, sono stati utilizzati dei casseri in legno all'interno dei quali sono stati posti prima i mattoni, regolarmente distanziati uno dall'altro, e poi sono stati realizzati i giunti in malta con



Figura 3.4: Confezionamento dei prismi murari.

l'ausilio di un cazzuolino, facendo attenzione a non lasciare vuoti interni al giunto. Dopo qualche giorno sono stati tolti dai casseri e messi a maturare in camera climatica. In questo modo sono stati realizzati dieci prismi tre dei quali sono stati utilizzati interi per la caratterizzazione meccanica e i rimanenti sono stati tagliati a metà, lungo il piano mediano ortogonale ai giunti, in modo da ottenere per ogni prisma due pilastri di dimensioni medie $315 \times 120 \times 120 \text{ mm}$. Come nel caso dei blocchi di malta anche nei pilastri in cui si era previsto l'ancoraggio del rinforzo sono stati arrotondati gli spigoli (Fig. 3.5).

3.3 Applicazione del sistema di rinforzo

L'applicazione dei tessuti di rinforzo ai campioni destinati agli shear tests è stata effettuata secondo le modalità descritte in seguito e in accordo al programma riassunto dalla Tabella 3.2. Le superfici dei provini, interessate dall'incollaggio dei rinforzi, sono state levigate tramite carta abrasiva a grana grossa al fine di eliminare eventuali imperfezioni e regolarizzare il piano di adesione che, soprattutto nel caso di alcuni pilastri in muratura, risultava abbastanza irregolare a causa della non uniformità dimensionale dei laterizi. La polvere prodotta da questa operazione è stata poi rimossa con l'ausilio di aria compressa. Le lunghezze di adesione sono state di 160 mm per i mattoni in laterizio, lasciando una distanza di 50 mm dallo spigolo vicino all'estremità caricata (LE) al fine di ridurre possibili interazioni di bordo, e di 210 mm con ancoraggio nei blocchi di malta, lasciando in questo caso una distanza di 40 mm dallo spigolo. Per i tre blocchi di malta rinforzati con fibre di carbonio, provenienti da un'altra campagna sperimentale, la lunghezza di adesione era di 220 mm e la distanza dallo spigolo vicino all'estremità caricata era di 30 mm (Fig. 3.6). Per i pilastri in muratura si è scelto di adottare quattro diverse lunghezze di ancoraggio: 65 , 130 , 195 e 260 mm , corrispondenti a un giunto e un mattone, due giunti e due mattoni, tre giunti e tre mattoni e, infine, quattro giunti e quattro mattoni, in quest'ultimo caso è stato previsto anche l'ancoraggio del rinforzo (Fig. 3.7).

L'ancoraggio, dove previsto, è stato ottenuto risvoltando il tessuto alla base del provino, arrotondando preventivamente gli spigoli come già accennato (Fig. 3.3c, 3.5c). Nel caso degli SRP, data la difficoltà di modellare i trefoli in acciaio costituenti il tessuto, per realizzare i risvolti di ancoraggio si è deciso di utilizzare una piastrina di acciaio fissata all'estremo non caricato del rinforzo tramite resina vinilestere a presa rapida (Fig. 3.9)

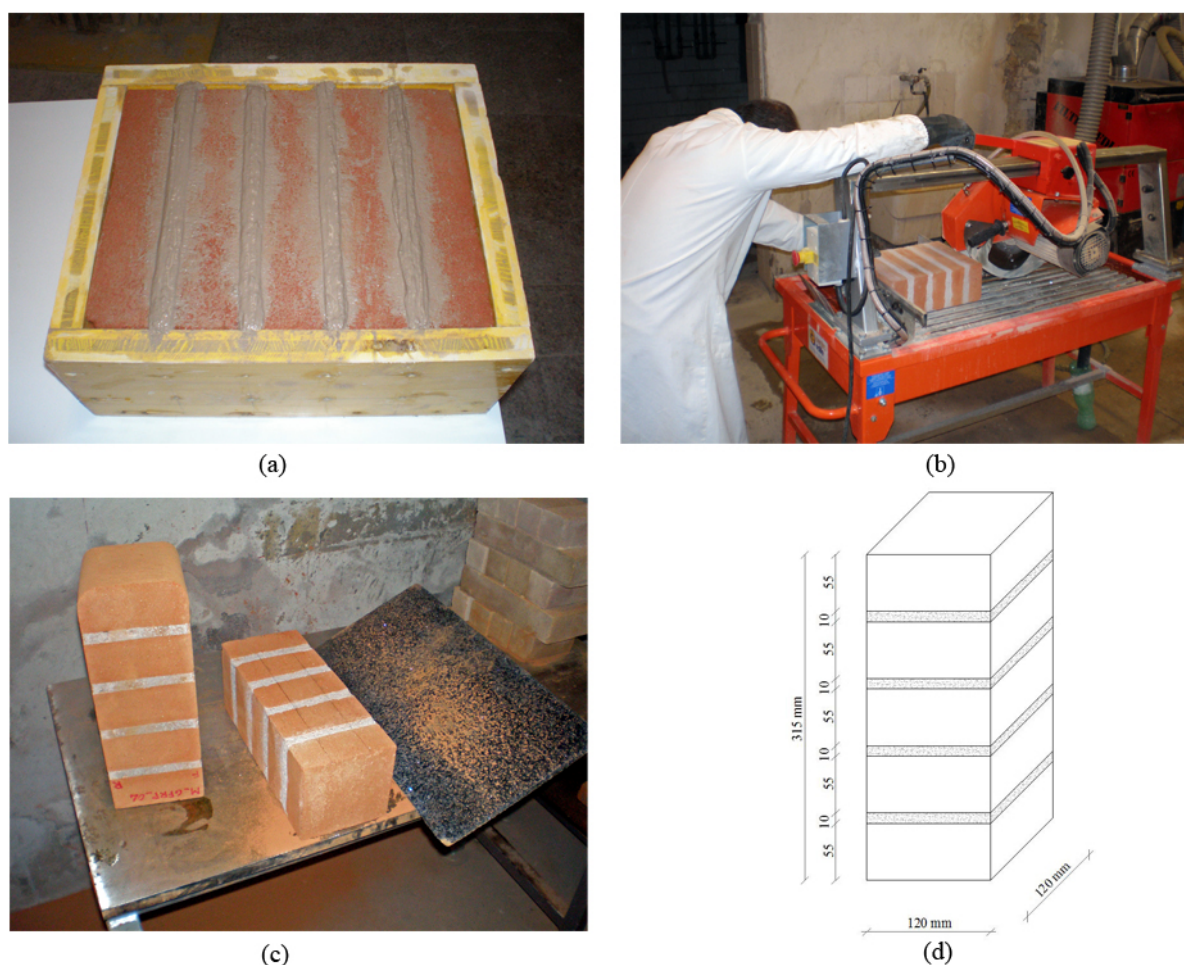


Figura 3.5: Confezionamento dei prismi murari: (a) prisma appena confezionato, (b) taglio dei prismi, (c) arrotondamento spigoli, (d) dimensioni medie di un pilastro.

Per delimitare l'area di incollaggio si è provveduto a mascherare i provini con del nastro adesivo (Fig. 3.8a) e successivamente, con l'ausilio di un rullo in spugna, è stato applicato il primer ("Fidprimer" dell'azienda Fidia srl), lasciandolo asciugare mediamente un giorno (Fig. 3.8b). Tutti i tessuti di rinforzo sono stati tagliati in laboratorio, o forniti direttamente dal produttore, alla larghezza di 50 mm e della lunghezza prevista per il provino e, una volta posizionati sulla superficie del campione, sono stati impregnati dalla superficie con resina epossidica bicomponente ("Fidsaturant HM", Fidia srl) tramite un rullo in spugna, facendo attenzione a far penetrare la resina in profondità (Fig. 3.8c, d). Nel caso dei tessuti in fibra di acciaio (SRP) si è utilizzata una specifica resina epossidica tissotropica (Fidsaturant HM-T) che, data l'elevata viscosità, non è stato possibile stendere tramite rullo ma con l'ausilio di una spatola. Le porzioni di tessuto libere sono state anch'esse impregnate distendendole su una piastra metallica, preventivamente trattata con della cera liquida che fungesse da agente distaccante, posta allo stesso piano della superficie di adesione. Per le fibre in acciaio quest'ultima operazione non si è resa necessaria.

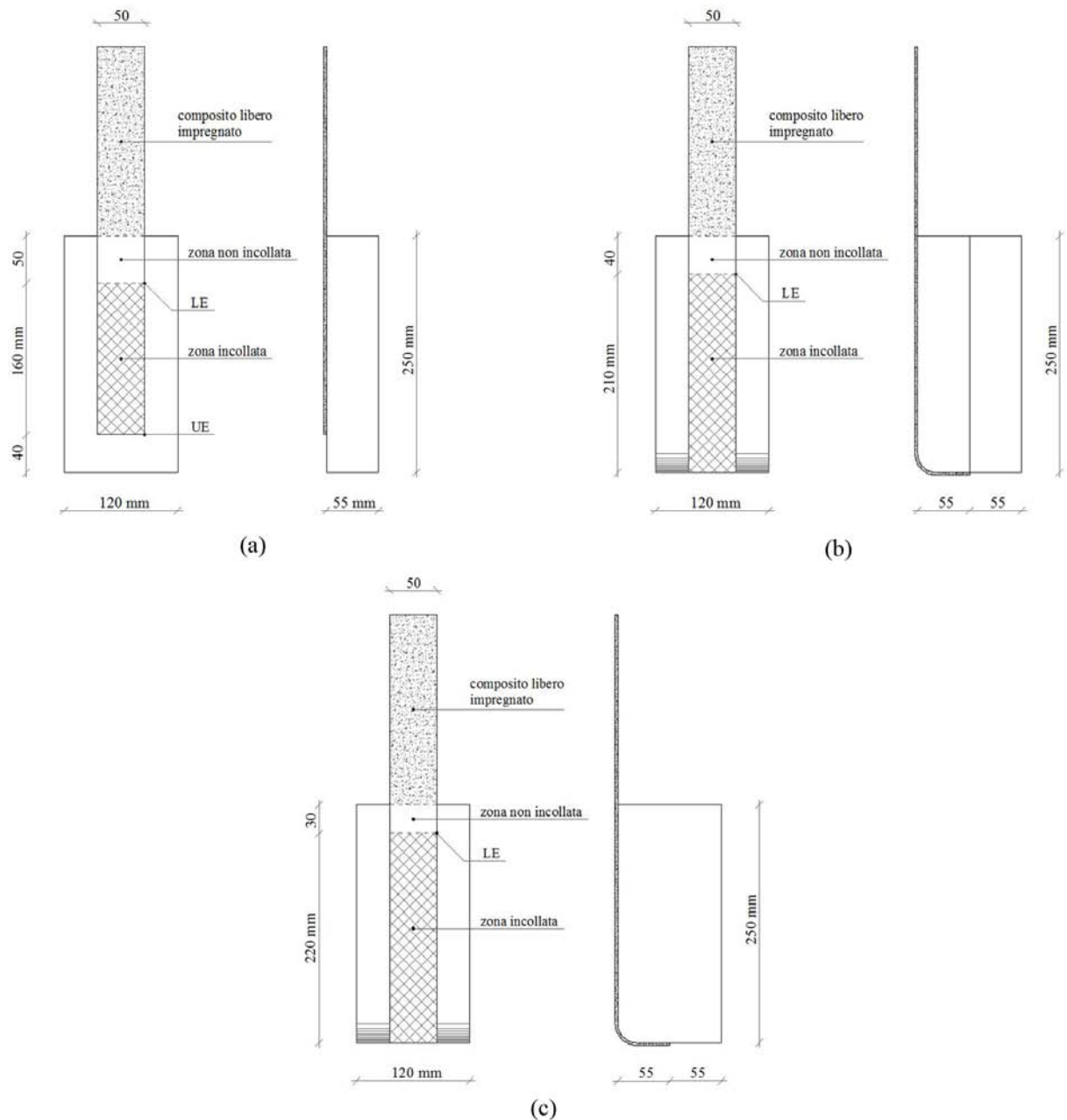


Figura 3.6: Configurazione dei provini: (a) SL mattone in laterizio, (b) SL blocco di malta con fibra di vetro, (c) SL blocco di malta con fibra di carbonio.

3.4 Strumentazione dei campioni

Sui campioni sono stati applicati due tipologie di strumenti: degli strain gauges (estensimetri, nel testo indicati anche con la sigla SG), applicati lungo l'asse centrale della superficie esterna dei rinforzi per indagare le deformazioni assiali e dei potenziometri (trasduttori di spostamento), applicati per indagare gli scorrimenti, fra fibra e substrato, dell'estremità caricate (LE) e di quella non caricata (UE).

Gli strain gauges utilizzati sono degli HBM 6/120LY18 prodotti da H.B.M. Italia srl (MI), le caratteristiche dichiarate sono: resistenza $R = 120\Omega \pm 0.35\%$, gauge factor $k = 2.18 \pm 1\%$. Questi estensimetri sono stati applicati a tutti i campioni in mattone

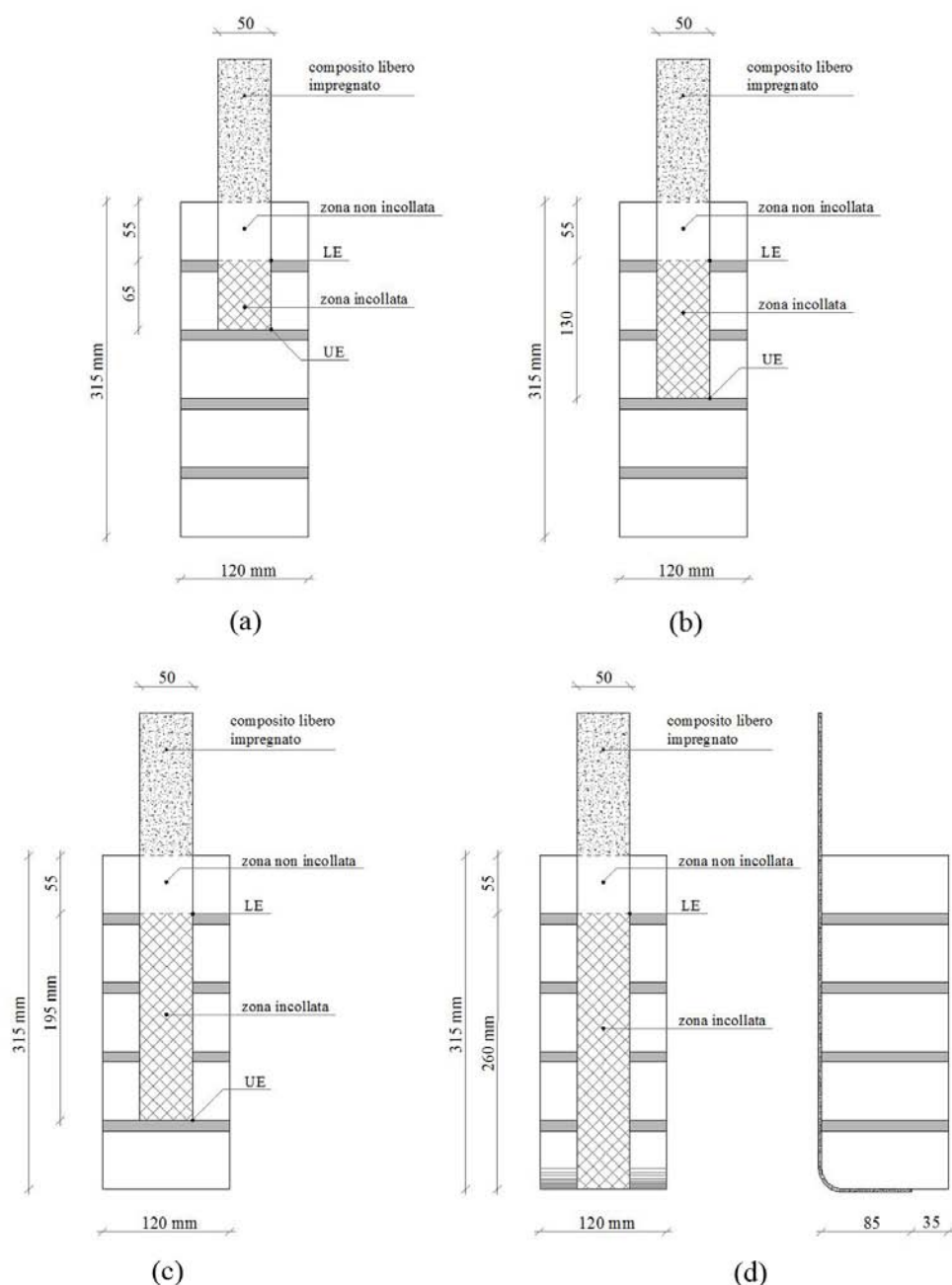


Figura 3.7: Configurazione dei pilastri in muratura con le diverse lunghezze di adesione: (a) 65 mm, (b) 130 mm, (c) 195 mm, (d) 260 mm con ancoraggio.

e a quelli in malta, mentre si è deciso di non utilizzarli per i campioni in muratura lasciando a future sperimentazioni questa possibilità. Nei provini in mattone sono stati applicati tre estensimetri lungo la zona incollata, spazati 40 mm l'uno dall'altro, mentre uno è stato applicato in zona non incollata in modo da poter osservare la deformazione impressa alla striscia libera (Fig. 3.10a); nei provini in malta ne sono stati utilizzati cinque, quattro in zona adesiva, anch'essi spazati di 40 mm l'uno dall'altro, e uno applicato sulla striscia libera (Fig. 3.10b); per i tre provini in malta rinforzati con fibre di carbonio gli estensimetri applicati sono stati sette, di cui due sulla striscia libera, applicati, simmetricamente, uno sulla faccia anteriore e l'altro su quella posteriore per rilevare eventuali differenze di deforma-

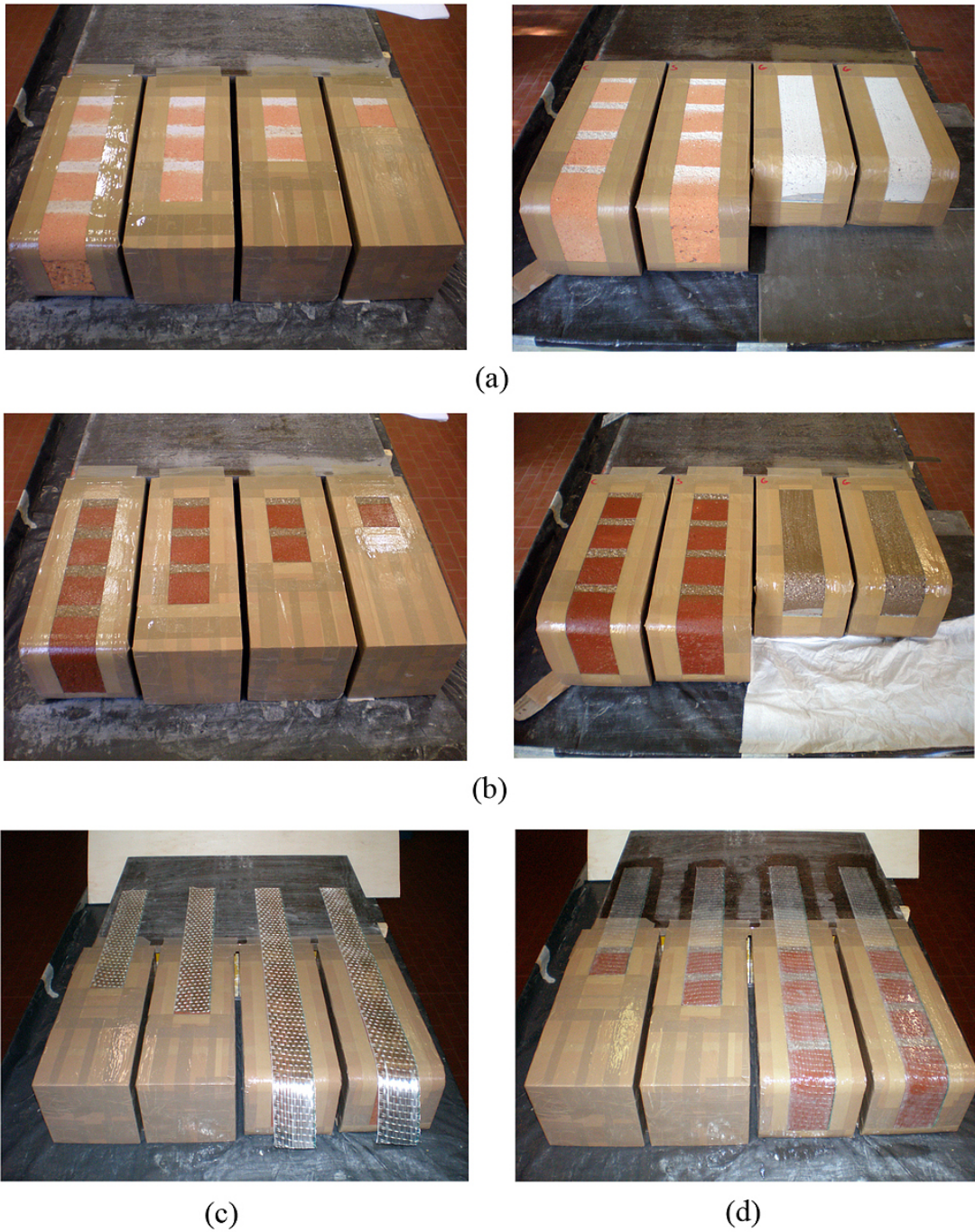


Figura 3.8: Fasi di applicazione del rinforzo al substrato: (a) mascheratura dei provini, (b) applicazione del primer, (c) posizionamento del tessuto, (d) impregnazione finale.

zione (Fig. 3.10c). Trattandosi di strumenti delicati e di piccole dimensioni l'applicazione ha richiesto una certa attenzione, la procedura si può riassumere nel modo seguente (Fig. 3.11):

- la superficie del rinforzo impregnato è stata leggermente levigata per eliminare eventuali piccole irregolarità e ottenere una superficie ruvida più adatta all'incollaggio;
- con dell'alcool denaturato è stata rimossa la polvere e ogni traccia di sporco e con un

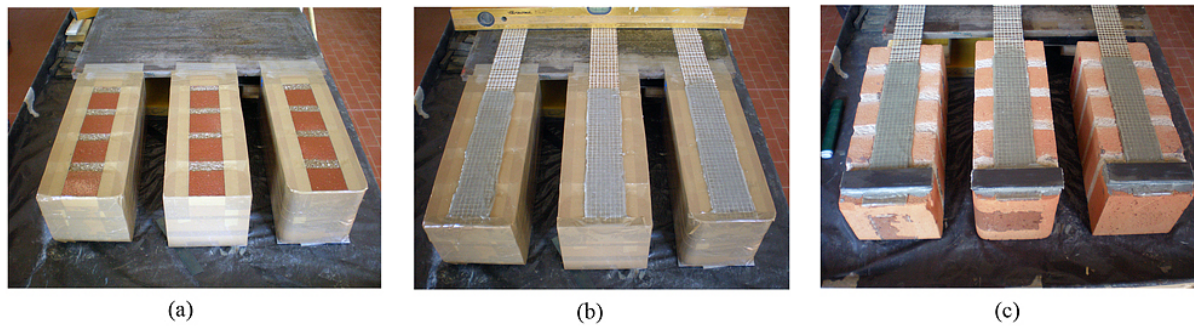


Figura 3.9: Fasi di applicazione del rinforzo in fibra di acciaio: (a) mascheratura e applicazione primer, (b) applicazione rinforzo e impregnazione, (c) applicazione dell'ancoraggio.

pennarello indelebile sono state tracciate delle linee utili al posizionamento;

- con un pezzo di nastro a bassa adesività è stato prelevato lo strain gauges dalla confezione e posizionato sulla striscia di composito;
- con una goccia di adesivo istantaneo monocomponente, deposta sulla faccia inferiore dello strumento, si è proceduto all'incollaggio definitivo (Fig. 3.11a);
- i due terminali sono stati saldati tramite stagnatura a dei cavetti elettrici e la continuità elettrica è stata testata con un multimetro digitale (Fig. 3.11e);
- con del nastro si è proceduto ad isolare i terminali per evitare possibili cortocircuiti fra gli stessi o con la striscia di composito nel caso delle fibre di carbonio.

I potenziometri, essendo strumenti riutilizzabili, sono stati installati prima di ogni prova su tutti i campioni testati. Sui mattoni e sui blocchi di malta ne sono stati impiegati due, fissati su dei ponticelli, a loro volta resi solidali al substrato tramite della colla a caldo, mentre sulla striscia di rinforzo erano fissate, sempre con colla a caldo, due piastrine di contrasto, una al livello dell'estremo caricato (LE) e una all'estremo non caricato (UE). Per i pilastri in muratura si è invece deciso di utilizzarne quattro, disposti a coppie come nella Figura 3.12b, in questo modo delle due letture registrate da ogni coppia è stato possibile ottenere una stima mediata; una configurazione di questo tipo ha permesso anche di osservare eventuali comportamenti non attesi, che si sono verificati solitamente nelle fasi iniziali dei tests, come letture discordanti nel valore o nel verso, sintomi probabilmente di assestamenti del campione o di disallineamenti con l'apparato di prova.

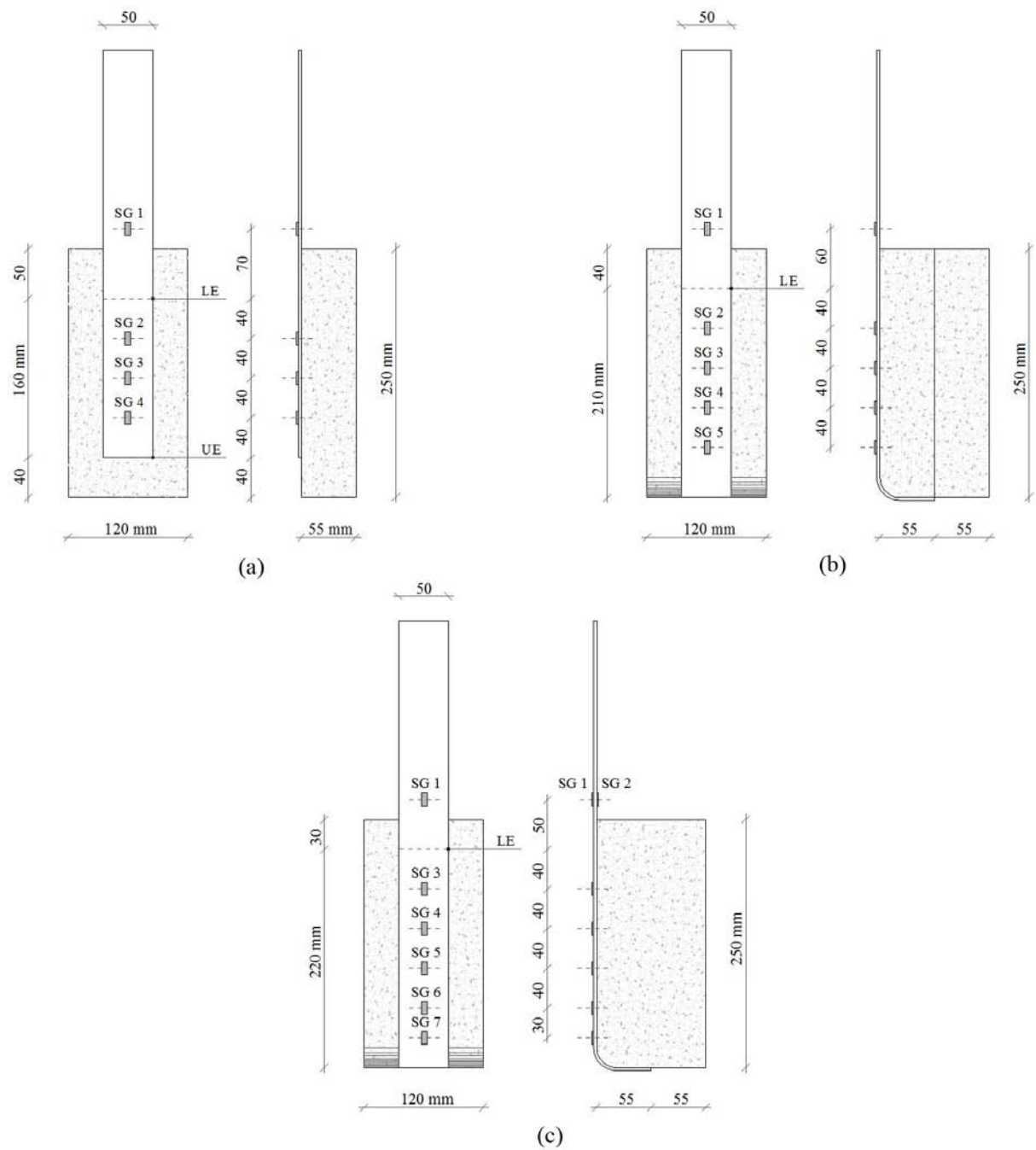


Figura 3.10: Configurazione estensimetri (strain gauges): (a) SL mattone in laterizio, (b) SL blocco di malta con fibra di vetro, (c) SL blocco di malta con fibra di carbonio.

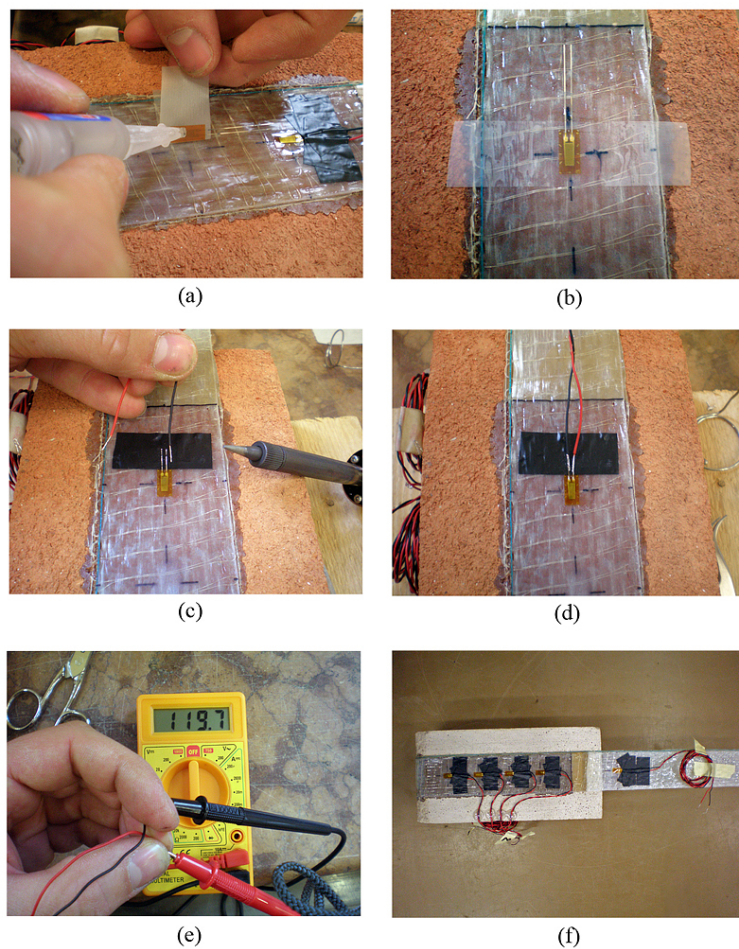


Figura 3.11: Applicazione degli estensimetri (strain gauges).

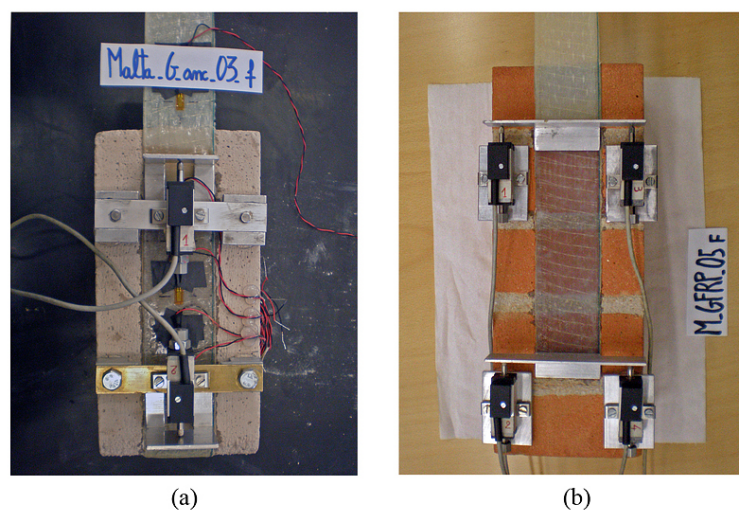


Figura 3.12: Configurazione potenziometri: (a) su blocco di malta, (b) su pilastro in muratura.

Capitolo 4

Caratterizzazione dei materiali

Nel presente capitolo si espongono i risultati e le procedure utilizzate nella caratterizzazione meccanica dei materiali impiegati nella sperimentazione. I materiali testati e le tipologie di prove effettuate sono riassunte dalla Tabella 3.1.

4.1 Mattoni A6R55W

Come già accennato nel capitolo precedente i laterizi utilizzati sono dei mattoni pieni faccia-vista, tipo Rosso Vivo A6R55W, prodotti dalla San Marco-Terreal (Noale, VE), con dimensioni $250 \times 120 \times 55$ mm. Per la caratterizzazione meccanica sono stati impiegati in totale 14 mattoni interi che sono stati sottoposti a prova di trazione indiretta per flessione, dei 28 pezzi risultanti da questa prima prova, con dimensioni di circa metà mattone, 7 sono stati sottoposti a compressione semplice, altri 7 sono stati sottoposti a prova di trazione indiretta (splitting) e i rimanenti 14 pezzi sono stati impiegati per delle prove di pull-off. Infine dai pezzi risultanti dalla prova di splitting sono stati ricavati ulteriori 6 campioni per la valutazione del modulo elastico.

In Tabella 4.1 sono riassunti i valori medi delle proprietà meccaniche misurate sui mattoni, nei paragrafi che seguono sono descritte nel dettaglio le modalità di esecuzione delle prove e i singoli risultati.

Tabella 4.1: Proprietà meccaniche misurate (CoV tra parentesi), mattoni A6R55W

Resistenza a compressione [N/mm ²]	Resist. a trazione per flessione [N/mm ²]	Resist. a trazione per splitting [N/mm ²]	Resistenza a pull-off [N/mm ²]	Modulo elastico [N/mm ²]
19.76 (2.5%)	3.66 (4.3%)	2.46 (11.4%)	1.03 (11.7%)	5756 (5.2%)

4.1.1 Flessione su tre punti

Le 14 prove di flessione sono state effettuate con una macchina elettromeccanica universale, modello Galdabini Sun 2500; il dispositivo di prova, in conformità alla norma UNI 11128, è costituito da tre cilindri metallici, dei quali due inferiori, con la funzione di appoggio e posti ad un interasse di 200 mm, e uno superiore, parallelo ai primi due, posto sopra il provino con la funzione di esercitare l'azione di carico (Fig. 4.1). La prova è stata condotta in controllo di spostamento e l'acquisizione dei dati è avvenuta tramite una postazione esterna collegata alla macchina.

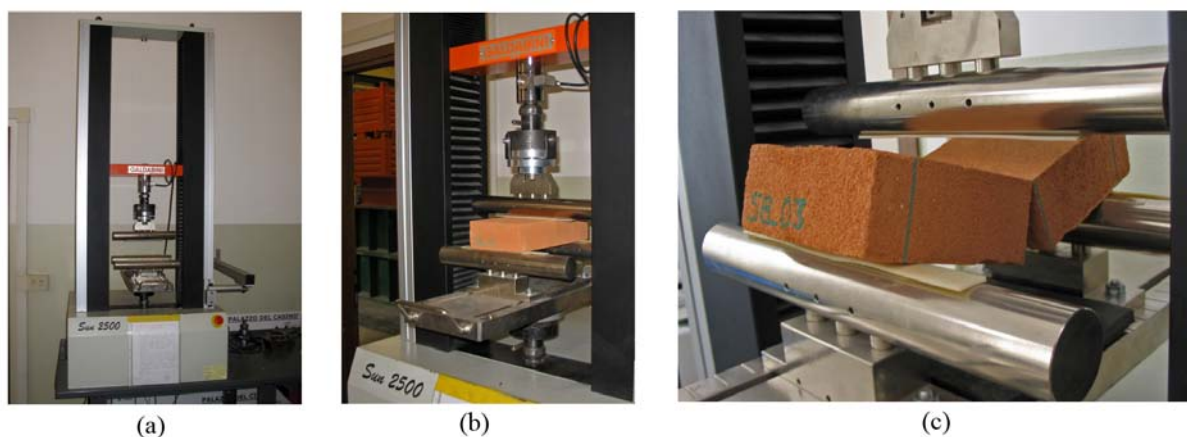


Figura 4.1: Prova a flessione: (a) macchina di prova, (b) posizionamento del provino, (c) rottura.

La resistenza a flessione $f_{bf,i}$ è stata calcolata nella sezione centrale del mattone, considerando una distribuzione triangolare delle tensioni (diagramma a farfalla), ed è espressa dall'equazione (4.1):

$$(4.1) \quad f_{bf,i} = \frac{3F_u \cdot i}{2bh^2}$$

dove: F_u è il carico ultimo a rottura, espresso in N ; b e h sono rispettivamente larghezza e altezza del mattone, espressi in mm ; i è l'interasse fra gli appoggi, nel nostro caso pari a 200 mm .

In Tabella 4.2 sono riassunte le caratteristiche di ogni provino e i risultati delle prove.

La Figura 4.2 mostra i 14 campioni dopo la prova, come si può vedere tutti hanno manifestato la tipica frattura in mezzzeria, con qualche leggero scostamento dal piano mediano per alcuni. La resistenza media è stata di $3,66\text{ N/mm}^2$, il coefficiente di variazione di $4,3\%$ indica una bassa dispersione dei valori delle singole prove.

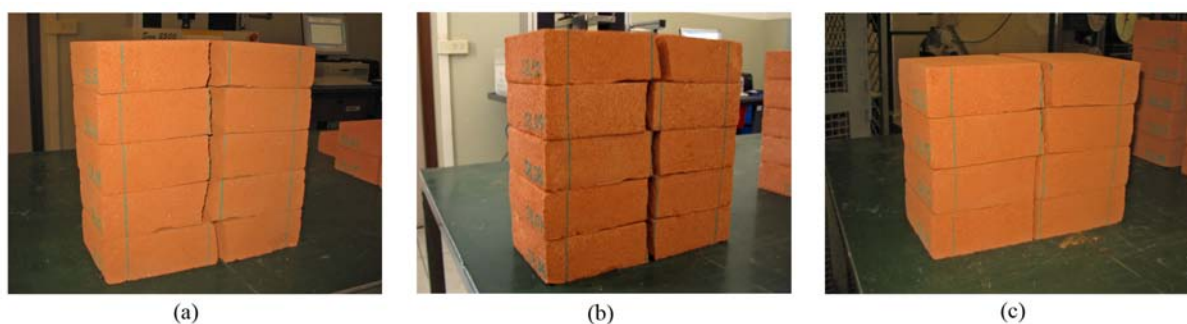


Figura 4.2: Prova a flessione: immagini dei campioni dopo la rottura.

4.1.2 Compressione semplice

La prova di compressione semplice è stata condotta su 7 provini, ricavati dalla rottura a flessione. La faccia generata dalla frattura della prova precedente è stata rettificata e si è

Tabella 4.2: Flessione su tre punti, mattoni A6R55W

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Altezza h [mm]	Peso M [g]	Carico di rottura F_u [N]	Tensione di rottura $f_{bf,i}$ [N/mm ²]
S8-01	251	120	53	2530	3953	3.53
S8-02	251	120	52	2500	3870	3.59
S8-03	251	120	52	2525	3605	3.30
S8-04	251	120	52	2495	3908	3.61
S8-05	250	120	51	2475	3972	3.76
S8-06	251	120	51	2490	3755	3.58
S8-07	250	120	51	2470	3969	3.74
S8-08	250	121	52	2500	4066	3.75
S8-09	251	120	53	2550	4222	3.77
S8-10	251	120	52	2520	3854	3.54
S8-11	251	120	52	2495	3996	3.76
S8-12	251	121	52	2495	3947	3.69
S8-13	251	120	52	2500	4232	3.97
S8-14	250	121	51	2455	3741	3.62
resistenza media [N/mm ²]						3.66
deviazione standard						0.16
coefficiente di variazione						4.3%

proceduto al rilievo delle dimensioni di ogni singolo provino. Per la prova è stata utilizzata una pressa idraulica “Galdabini” da 300 t. La norma EN772-1, utilizzata come riferimento normativo, prevede che il carico di rottura per compressione venga determinato posizionando ciascun provino tra le due piastre della pressa ed applicando un carico uniformemente distribuito, incrementandolo in modo continuo fino a rottura.



(a)



(b)

Figura 4.3: Prova a compressione semplice: (a) pressa utilizzata, (b) un provino dopo la prova.

La resistenza a compressione $f_{bc,i}$ è espressa dall'equazione (4.2):

$$(4.2) \quad f_{bc,i} = \frac{F_u}{lb}$$

dove: F_u è il carico ultimo a rottura, espresso in N ; l e b sono rispettivamente lunghezza e larghezza del provino, espressi in mm . In Tabella 4.3 sono riassunte le caratteristiche di ogni provino e i risultati delle prove.

Tabella 4.3: Compressione semplice, mattoni A6R55W

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Carico di rottura [kgf]	Carico di rottura F_u [kN]	Tensione di rottura $f_{bc,i}$ [N/mm ²]
S8-01	119	120	27800	272.7	19.22
S8-02	114	120	27900	273.7	20.09
S8-03	113	120	27400	268.8	19.99
S8-04	113	120	28100	275.5	20.41
S8-05	117	120	27100	265.9	19.01
S8-06	114	120	27600	270.8	19.79
S8-07	114	120	27400	268.8	19.82
resistenza media [N/mm ²]					19.76
deviazione standard					0.49
coefficiente di variazione					2.5%

La resistenza media è stata di 19,76 N/mm^2 , il coefficiente di variazione di 2,5% indica una bassa dispersione dei valori delle singole prove.

4.1.3 Trazione indiretta (splitting)

La prova di trazione indiretta, eseguita anch'essa su 7 provini risultanti dalle prove a flessione, è stata effettuata con una pressa idraulica "Losen Hausen Werk" da 60 t equipaggiata con due elementi semi-cilindrici in acciaio fissati alle piastre inferiori e superiori. La prova consiste nel sottoporre il provino ad una compressione distribuita lungo le due linee di mezzeria (superiore e inferiore), attraverso l'azione delle due piastre semi-cilindriche, e di aumentare il carico fino a rottura.

La resistenza a trazione indiretta, $f_{bs,i}$, calcolata nella sezione trasversale verticale, è espressa dall'equazione (4.3), in conformità alla norma UNI 8943-3:

$$(4.3) \quad f_{bs,i} = \frac{2F_u}{\pi bh}$$

dove: F_u è il carico ultimo a rottura, espresso in N ; b e h sono rispettivamente larghezza e altezza in mm .

In Tabella 4.4 sono riassunti i risultati delle prove.

Il valore della resistenza media è stato di 2,46 N/mm^2 con un coefficiente di variazione pari a 11,4%.

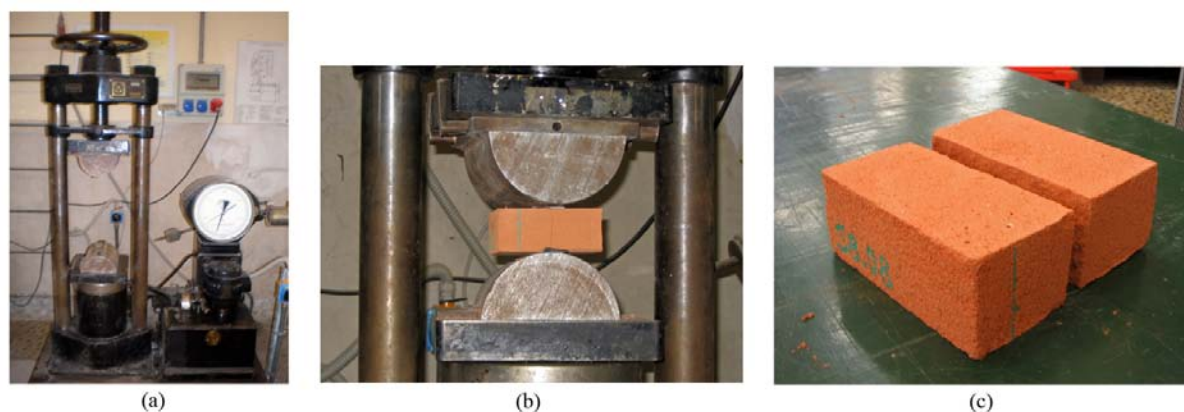


Figura 4.4: Prova di splitting su mattone: (a) pressa utilizzata, (b) esecuzione della prova, (c) campione dopo la prova.

Tabella 4.4: Splitting, mattoni A6R55W

Codice campione	Larghezza b [mm]	Altezza h [mm]	Carico di rottura [kgf]	Carico di rottura F_u [kN]	Tensione di rottura $f_{bs,i}$ [N/mm ²]
S8-08	121	52	2500	24.5	2.49
S8-09	120	53	2750	27.0	2.70
S8-10	120	52	2750	27.0	2.74
S8-11	120	52	2350	23.1	2.37
S8-12	121	52	1950	19.1	1.96
S8-13	120	52	2250	22.1	2.27
S8-14	121	51	2600	25.5	2.65
resistenza media [N/mm ²]					2.46
deviazione standard					0.28
coefficiente di variazione					11.4%

4.1.4 Pull-off

Il test di pull-off è una prova di trazione, utile a caratterizzare la forza di adesione tra composito e substrato sotto l'azione di una forza normale al piano rinforzato. Analizzando la superficie di rottura è possibile determinare se il legame all'interfaccia dei due materiali sia più o meno resistente dei due materiali considerati indipendentemente. Nella Figura 4.5b sono rappresentate le varie tipologie di rottura che si possono manifestare; la rottura di tipo (a), che interessa quindi il substrato, è considerata auspicabile.

Per le prove sono stati impiegati 14 campioni di dimensioni medie di 120x115x55 mm; alle due facce maggiori di ogni provino sono state applicate delle porzioni quadrate di tessuto di rinforzo, utilizzando le fibre di carbonio per la faccia superiore e le fibre di vetro per quella inferiore. In particolare l'applicazione è avvenuta nel seguente modo: ciascuna delle facce è stata preparata con una mano di primer, ad asciugatura avvenuta è stato steso, tramite una spatola, uno strato di resina epossidica "MBrace Adesivo", prodotto dalla BASF (TV), si è proceduto quindi a stendere il tessuto e a ricoprirlo con un ulteriore

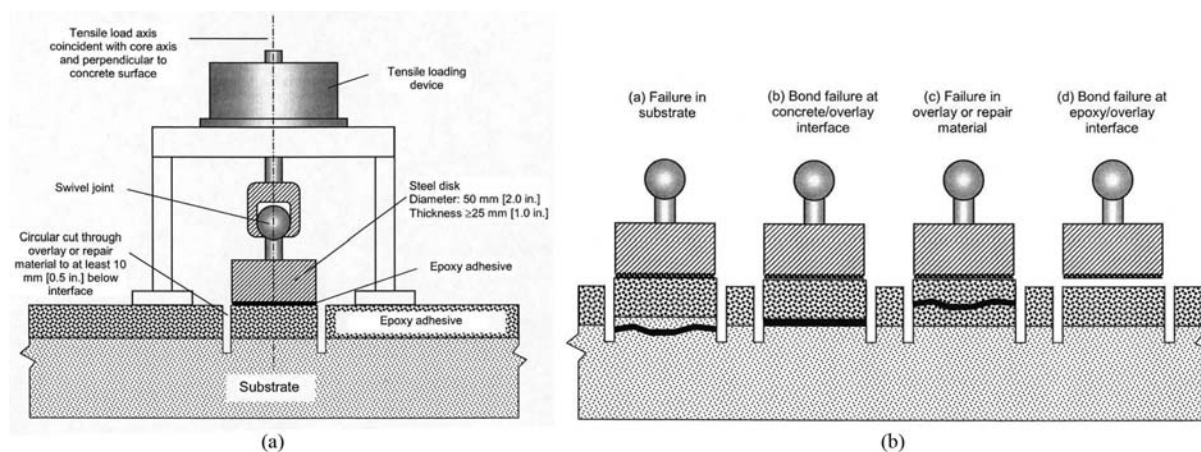


Figura 4.5: Prove di pull-off: (a) configurazione della prova, (b) tipologie di rottura (*ASTM C1583-04* 2004).

strato di resina (Fig. 4.6a); a resina indurita è stata effettuata, su ciascuna faccia rinforzata, una incisione circolare, mediante una fresa a bicchiere di 50 mm di diametro, la profondità del taglio è stata tale da raggiungere il substrato in mattone ad una profondità di 10 mm (Fig. 4.6b); sulle porzioni circolari così create sono stati incollati dei tasselli metallici, forniti in dotazione alla macchina di prova (Fig. 4.6c).

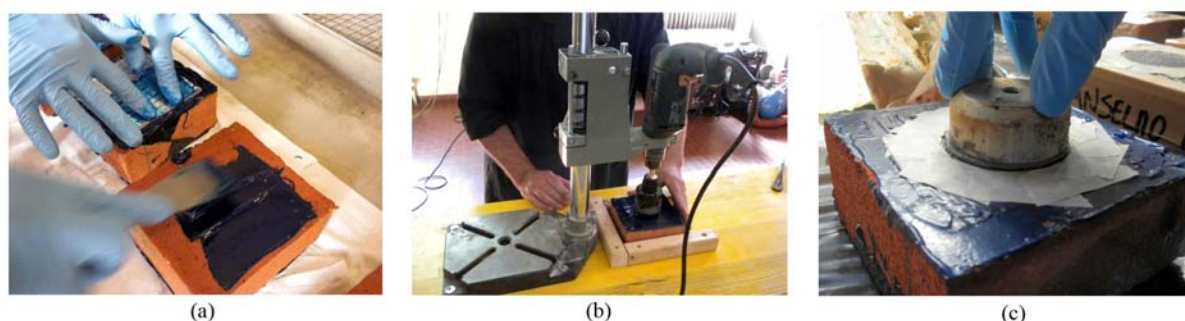


Figura 4.6: Prove di pull-off: (a) preparazione provini, (b) incisione tramite fresa, (c) incollaggio del tassello.

La Figura 4.7a mostra la macchina utilizzata per la prova, mentre in Figura 4.5a è possibile vedere una schematizzazione di una attrezzatura di questo tipo. La macchina è collegata al tassello e viene impressa una forza di trazione perpendicolare al piano di applicazione del rinforzo fino a rottura.

Per il calcolo delle tensioni massime a rottura è stato seguito quanto prescritto dalla norma ASTM C1583-04, che esprime la tensione normale di strappo σ_{p-0} secondo l'equazione (4.4):

$$(4.4) \quad \sigma_{p-0} = \frac{F_{rott}}{0.25\pi \cdot d^2}$$

dove F_{rott} è il carico massimo a rottura in N e d è il diametro del tassello in mm .

In Tabella 4.5 sono riassunti i risultati delle prove.

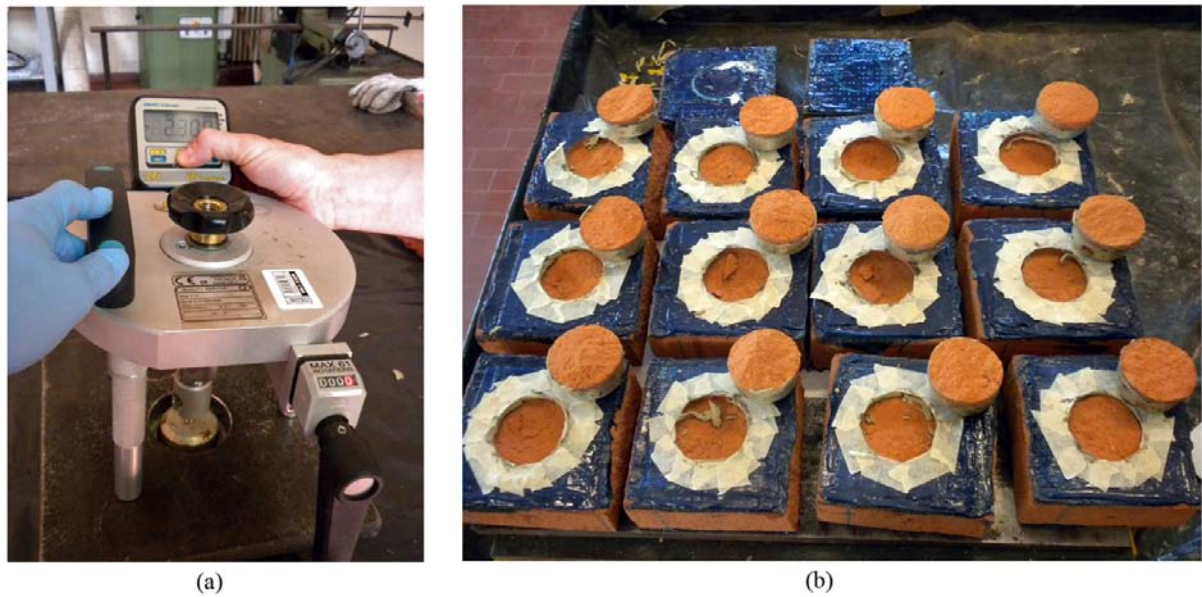


Figura 4.7: Prove di pull-off: (a) attrezzatura utilizzata, (b) campioni dopo la prova.

Tabella 4.5: Pull-off, mattoni A6R55W

Codice campione	Faccia sup. (fibre di carbonio)			Faccia inf. (fibre di vetro)		
	Modalità di rottura	Carico di rottura F_{rott} [N]	Tensione di rottura σ_{p-0} [N/mm^2]	Modalità di rottura	Carico di rottura F_{rott} [N]	Tensione di rottura σ_{p-0} [N/mm^2]
S8-01	(a) substrato	2375	1.02	(a) substrato	2744	1.18
S8-02	(a) substrato	2307	0.99	(a) substrato	2839	1.22
S8-03	(a) substrato	2479	1.07	(a) substrato	2305	0.99
S8-04	(a) substrato	2285	0.98	(a) substrato	2099	0.90
S8-05	(a) substrato	2167	0.93	(a) substrato	2758	1.19
S8-06	(a) substrato	2304	0.99	(a) substrato	2202	0.95
S8-07	(a) substrato	1926	0.83	(a) substrato	2858	1.23
S8-08	(a) substrato	2265	0.98	(a) substrato	2188	0.94
S8-09	(a) substrato	2504	1.08	(a) substrato	2606	1.12
S8-10	(a) substrato	2062	0.89	(a) substrato	2903	1.25
S8-11	(a) substrato	2208	0.95	(a) substrato	2058	0.89
S8-12	(a) substrato	2232	0.96	(a) substrato	2906	1.25
S8-13	(a) substrato	2197	0.95	(a) substrato	2273	0.98
S8-14	(a) substrato	2244	0.97	(a) substrato	2428	1.05
resistenza media complessiva [N/mm^2]						1.03
deviazione standard						0.12
coefficiente di variazione						11.7%

Come si può notare tutti e 28 i campioni hanno presentato una rottura di tipo (a), ossia un cedimento del substrato, che dimostra l'efficacia del legame di aderenza mattone-

rinforzo. La resistenza media compressiva, calcolata su tutte le prove, è di $1,03 \text{ N/mm}^2$ con un coefficiente di variazione pari a $11,7\%$.

4.1.5 Modulo elastico

Per il calcolo del modulo elastico a compressione si è adottato come riferimento normativo la norma UNI 6556. Tale norma prescrive quanto segue: il modulo elastico secante deve essere determinato fra due tensioni dopo un certo numero di cicli di carico, partendo da una tensione di base σ_0 diversa da zero; la tensione massima σ_1 non deve superare il valore di $1/3$ della resistenza a compressione del materiale e la tensione di base deve essere fissata a circa $1/10$ della tensione massima; l'intervallo tra la tensione massima e quella di base deve essere diviso in tre parti uguali, in modo da consentire letture a tensioni intermedie $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$; per la valutazione del modulo è opportuno fare riferimento alle letture di ritorno dei cicli; il modulo di elasticità secante a compressione E fra due valori di tensione σ_0 e σ_1 è dato dall'equazione 4.5:

$$(4.5) \quad E = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\Delta\epsilon}$$

dove: σ_1 è la tensione massima; σ_0 è la tensione di base; $\Delta\epsilon$ è la variazione unitaria di lunghezza corrispondente all'intervallo di tensione misurato.

La norma prevede quindi di calcolare il modulo elastico come la pendenza della retta secante ai punti corrispondenti a σ_1 e σ_0 nel ramo di scarico del terzo ciclo del diagramma tensione-deformazione. Durante l'analisi dei dati si è adottata una approssimazione ancora migliore e cioè quella di utilizzare la pendenza non della secante, ma della retta di regressione lineare che interpola i punti della curva fra σ_1 e σ_0 .

In base alle prescrizioni della norma si è fissata la tensione di base σ_0 pari a quella corrispondente ad un carico nominale di 900 N , quella massima σ_1 pari a quella corrispondente ad un carico nominale di 9000 N e i valori intermedi σ_2 e σ_3 rispettivamente ad un carico nominale di 6300 e 3600 N (Fig. 4.8).

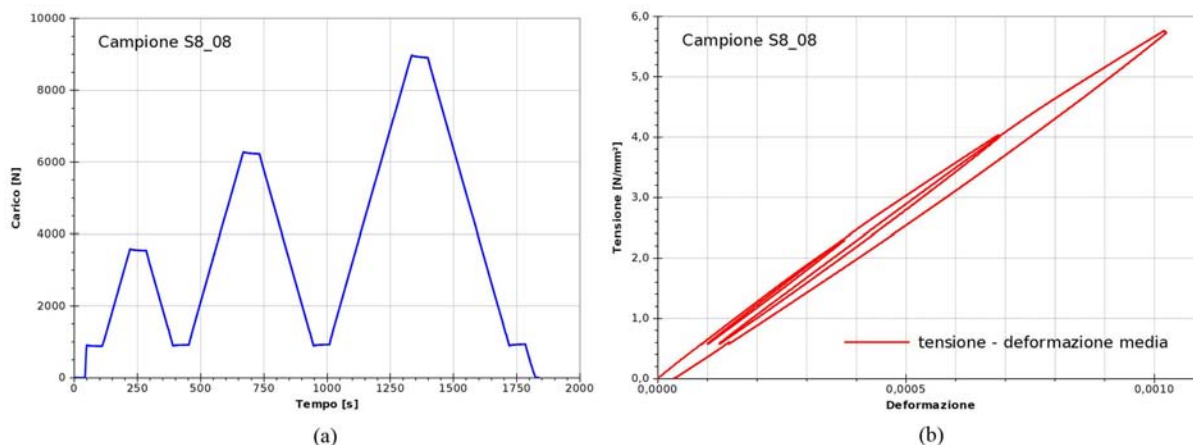


Figura 4.8: Determinazione del modulo elastico: (a) cicli di carico, (b) diagramma tensione-deformazione relativo al campione S8-08.

La prova è stata eseguita su 6 campioni di dimensioni $120 \times 40 \times 40 \text{ mm}$, strumentati con quattro estensimetri applicati alle facce verticali ed utilizzando una macchina universale Galdabini Sun 2500 dotata di cella di carico da 20 kN (Fig. 4.9) e di un'unità di acquisizione

esterna per registrare i dati provenienti dagli estensimetri. Si sono in questo modo calcolati i moduli elastici in ognuno dei tre cicli di carico, utilizzando di volta in volta come valore di deformazione la media di quelle registrate da ogni singolo estensimetro. La media dei moduli elastici calcolati, per ogni provino, sui rami di scarico del terzo ciclo ($\sigma_1-\sigma_0$) rappresenta il modulo elastico finale.

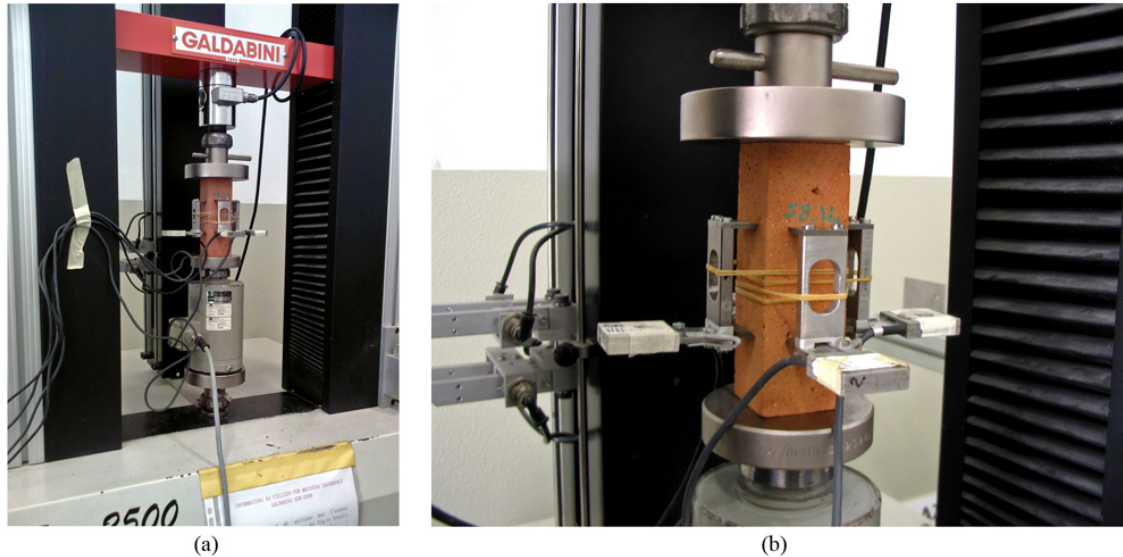


Figura 4.9: Determinazione del modulo elastico: (a) macchina utilizzata, (b) strumentazione provino.

La Tabella 4.6 riporta il calcolo del modulo elastico relativo ad ogni provino e per ognuno dei tre cicli, l'ultima colonna contiene la media dei tre valori precedenti.

Tabella 4.6: Modulo elastico, mattoni A6R55W

	primo ciclo $\sigma_3-\sigma_0$ (3600-900 N)	secondo ciclo $\sigma_2-\sigma_0$ (6300-900 N)	terzo ciclo $\sigma_1-\sigma_0$ (9000-900 N)	
Codice campione	E_I [N/mm ²]	E_{II} [N/mm ²]	E_{III} [N/mm ²]	E_{medio} [N/mm ²]
S8-08	6244	6067	5825	6045
S8-10	5875	5664	5512	5684
S8-11	6354	6154	5984	6164
S8-12	6103	5998	5972	6024
S8-13	6299	6157	5968	6141
S8-14	5677	5494	5274	5482
modulo elastico medio	$[N/mm^2]$			5756
	deviazione standard			297
	coefficiente di variazione			5.2%
				4.7%

Il modulo elastico medio calcolato sui sei provini è risultato pari a 5756 N/mm², con un coefficiente di variazione del 5,2%.

4.2 Malta T30V

Per la caratterizzazione meccanica della malta “Tassullo T30V” si sono realizzati due tipologie di provini: tre blocchi con dimensioni $250 \times 120 \times 5 \text{ mm}$, pari a quelle dei mattoni in laterizio, sono stati sottoposti a prove di flessione su tre punti, compressione semplice e splitting; e nove provini prismatici di dimensioni $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ sono stati testati a flessione, compressione semplice e strumentata, e determinazione del modulo elastico. La norma utilizzata come riferimento è la UNI EN 1015-11: “Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita”; questa norma prevede l’utilizzo dei soli campioni prismatici $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$, i blocchi di dimensioni pari a quelle dei mattoni sono stati quindi utilizzati solo come ulteriore indagine.

In Tabella 4.7 sono riassunti i valori medi delle proprietà meccaniche misurate sulla malta, nei paragrafi che seguono sono descritte nel dettaglio le modalità di esecuzione delle prove e i singoli risultati.

Tabella 4.7: Proprietà meccaniche misurate (CoV tra parentesi), malta T30V

Resist. a comp. (prismi) [N/mm^2]	Resist. a comp. (mattoni) [N/mm^2]	Resist. a traz. per flessione [N/mm^2]	Resist. a traz. per splitting [N/mm^2]	Modulo elastico [N/mm^2]
2.62 (10.9%)	4.98 (8.2%)	0.78 (24.8%)	0.35 (7.1%)	5487 (6.7%)

4.2.1 Flessione su tre punti

Per quanto riguarda i blocchi di dimensione $250 \times 120 \times 55 \text{ mm}$ la prova è stata condotta con le stesse modalità, e stessa attrezzatura, già descritte per le prove a flessione sui mattoni in laterizio nel Paragrafo 4.1.1. La Figura 4.10b mostra i provini dopo la prova a flessione, come si può notare le fratture sono in tutti e tre i casi irregolari, in particolare per quanto riguarda il provino denominato F2.

Per determinare la resistenza a flessione dei provini prismatici si è utilizzata un’apposita attrezzatura, prodotta dalle “Officine Galileo”, che tramite un funzionamento a bilancia fornisce il valore di tensione massima espresso in kg_f/cm^2 ; i provini sono stati appoggiati orizzontalmente su due coltelli inferiori, posti ad un interasse di 100 mm , mentre un terzo coltello superiore applica un carico crescente, concentrato in mezzeria, fino a rottura (Fig. 4.10c).

La Tabella 4.8 riassume le caratteristiche dei provini e i risultati delle prove. Come si può notare i valori della tensione di rottura presentano notevole variabilità, in particolare quelli ottenuti dai provini prismatici, con un coefficiente di variazione di 35,1%, facendo la media dei risultati ottenuti con entrambe le tipologie di provino si ottiene una resistenza di $0,78 \text{ N/mm}^2$, con un coefficiente di variazione del 24,8%.

4.2.2 Compressione semplice

Per le prove di compressione semplice sono state utilizzate le porzioni di provini risultanti dalle prove a flessione. I tre provini risultanti dalla flessione dei mattoni di malta sono stati regolarizzati nelle dimensioni e sottoposti a compressione con le modalità già descritte nel Paragrafo 4.1.2, la Figura 4.11 mostra alcune immagini relative alla prova.

Per i sei campioni derivanti dalla flessione dei prismi è stata utilizzata una pressa “Losen Hausen Werk”, posizionando tra le piastre inferiore e superiore un compressore “RMU” in



Figura 4.10: Prova a flessione: (a) set-up di prova, (b) provini dopo la rottura, (c) macchina “Officine Galileo”, (d) posizionamento provino.

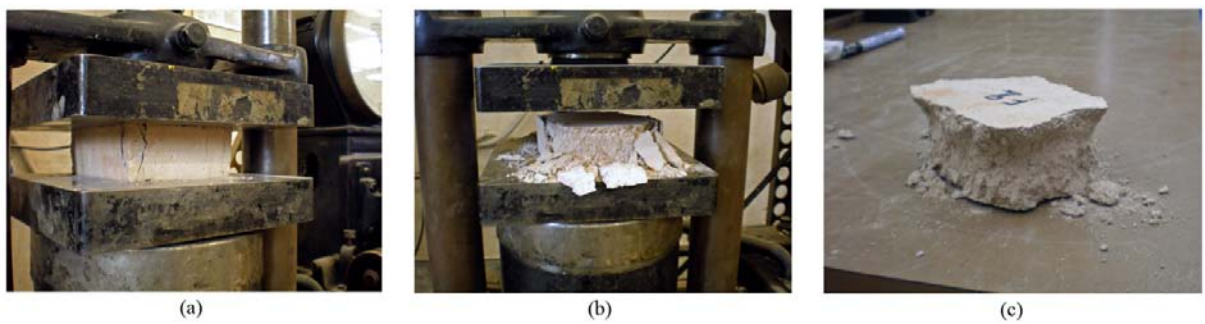


Figura 4.11: Prova a compressione semplice dei blocchi di malta: (a) esecuzione della prova, (b) rottura del provino, (c) particolare della tipica rottura a “clessidra”.

grado di trasmettere un carico assiale centrato su una superficie quadrata di 40 *mm* di lato (Fig. 4.12). I mezzi provini sono stati disposti orizzontalmente all'interno del comprimitore, in questo modo le dimensioni del campione effettivamente sottoposto a sollecitazione è un

Tabella 4.8: Flessione su tre punti, malta T30V

Codice campione	Larghezza b [mm]	Altezza h [mm]	Carico di rottura [N]	Tensione di rottura [N/mm ²]
F1	120	56	822	0.67
F2	120	56	1047	0.84
F3	121	55	1151	0.96
resistenza media [N/mm ²]				0.82
deviazione standard				0.15
coefficiente di variazione				17.8%

Codice campione	Larghezza b [mm]	Altezza h [mm]	Tensione di rottura [kg _f /cm ²]	Tensione di rottura [N/mm ²]
*	40	40	6.5	0.64
**	40	40	5.6	0.55
***	40	40	10.6	1.04
resistenza media [N/mm ²]				0.74
deviazione standard				0.26
coefficiente di variazione				35.1%

cubo di lato 40 mm.

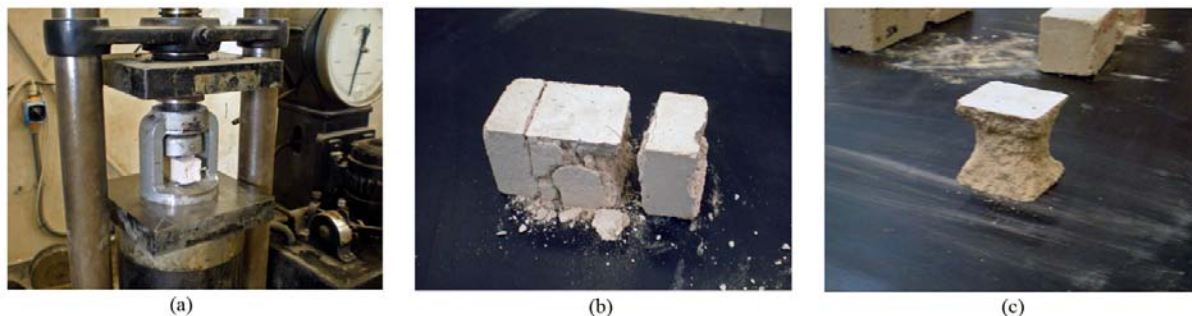


Figura 4.12: Prova a compressione semplice dei prismi di malta: (a) esecuzione della prova, (b) rottura del provino, (c) particolare della tipica rottura a “clessidra”.

Nella Tabella 4.9 sono riassunte le caratteristiche dei provini e i risultati delle prove. Per i campioni cubici la resistenza media a compressione è risultata essere di 2,48 N/mm², mentre per i mezzi mattoni di malta, di dimensioni medie 120x125x55 mm, la resistenza media è stata nettamente superiore, pari a 4,99 N/mm², valore quasi certamente dovuto all’effetto di confinamento delle piastre della pressa sul campione.

4.2.3 Compressione strumentata

Oltre alle nove prove di compressione semplice, descritte nel paragrafo precedente, sono state effettuate tre prove di compressione su prismi di dimensioni nominali 40x40x160 mm, ognuno dei quali strumentato con quattro trasduttori di spostamento per il calcolo delle

Tabella 4.9: Compressione semplice, malta T30V

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Carico di rottura [kg _f]	Carico di rottura [N]	Tensione di rottura [N/mm ²]
F1	120	116	7250	71123	5.11
F2	121	141	9250	90743	5.32
F3	120	119	6600	64746	4.53
resistenza media [N/mm ²]					4.99
deviazione standard					0.41
coefficiente di variazione					8.2%
Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Carico di rottura [kg _f]	Carico di rottura [N]	Tensione di rottura [N/mm ²]
*sx	40	40	350	3434	2.15
*dx	40	40	360	3532	2.21
**sx	40	40	440	4316	2.70
**dx	40	40	420	4120	2.58
* * *sx	40	40	430	4218	2.64
* * *dx	40	40	430	4218	2.64
resistenza media [N/mm ²]					2.48
deviazione standard					0.24
coefficiente di variazione					9.7%

deformazioni assiali nella direzione di applicazione del carico. In questo modo è stato anche possibile ottenere una stima del modulo elastico, calcolato su prova monotonica, per ognuno dei tre provini.

L'apparato di prova utilizzato consisteva nella macchina universale "Galdabini Sun 2500", una cella di carico da 20 kN e un'unità esterna di acquisizione dati per i trasduttori di spostamento, questi ultimi applicati alle quattro facce maggiori del provino. I campioni sono stati posti verticalmente fra le due piastre della macchina e la prova è stata condotta in controllo di spostamento fino a rottura (Fig. 4.13).

Dall'analisi dei dati sono stati rilevati carico massimo, e quindi la tensione massima a rottura, e le deformazioni del provino durante tutta la prova. Il modulo elastico è stato calcolato come pendenza della retta di regressione lineare che interpola i punti, del diagramma tensione-deformazione, corrispondenti alla fase di carico tra 150 e 1500 N. La Figura 4.14 mostra il diagramma tensione-deformazione media delle tre prove, mentre la Tabella 4.10 riassume i risultati delle prove.

La resistenza media a compressione è risultata essere di 2.41 N/mm² con un coefficiente di variazione del 2.5% , mentre il modulo elastico medio è risultato pari a 5669 N/mm² con un coefficiente di variazione del 6,6%.

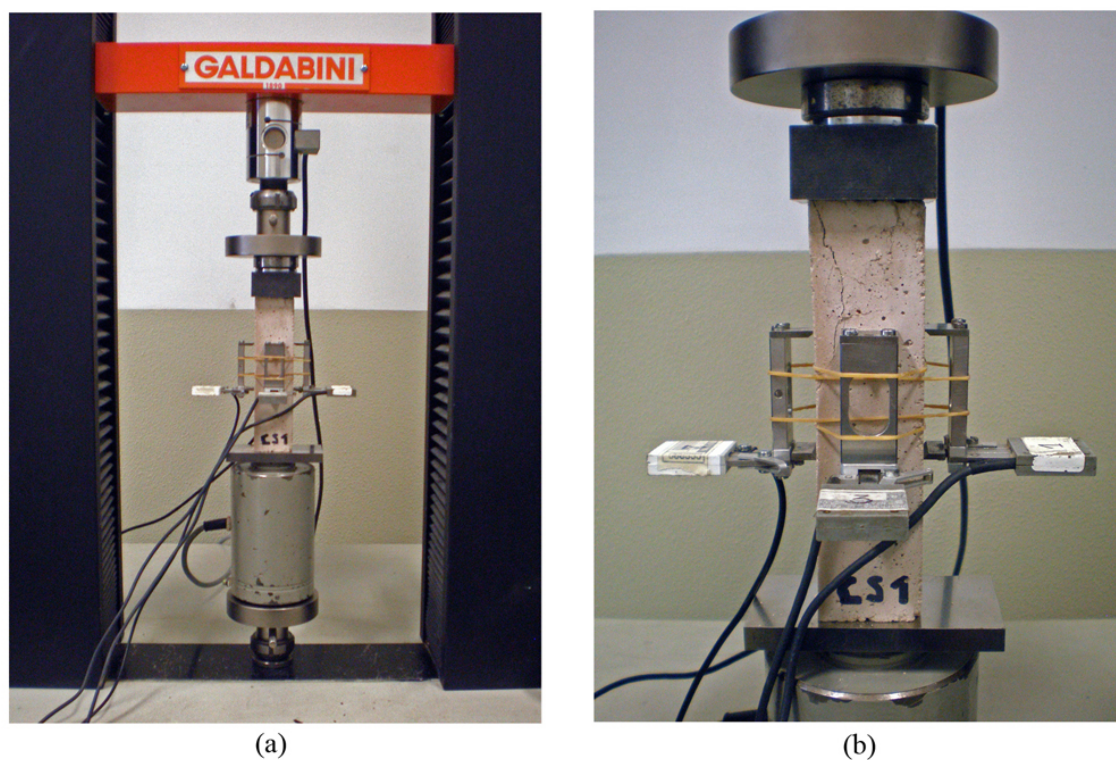


Figura 4.13: Compressione strumentata dei prismi in malta: (a) set-up di prova, (b) rottura del provino.

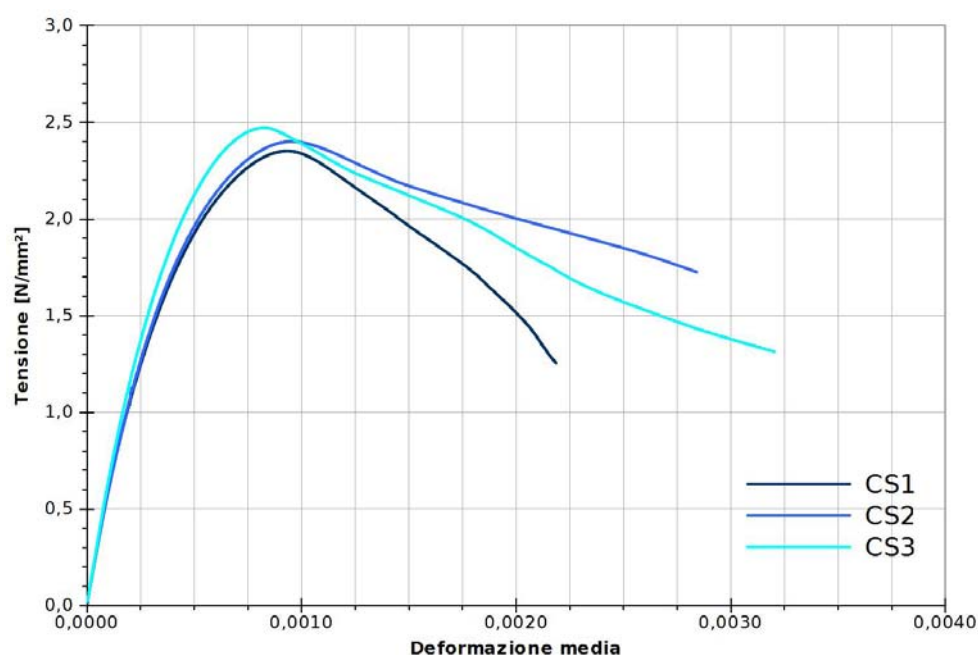


Figura 4.14: Prismi in malta: diagramma tensione-deformazione delle prove a compressione strumentata.

4.2.4 Trazione indiretta (splitting)

La prova di splitting è stata eseguita su tre porzioni di provino risultanti dalla prova a flessione, la faccia risultante dalla frattura è stata regolarizzata e le dimensioni sono state

Tabella 4.10: Compressione strumentata, malta T30V

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Carico di rottura [N]	Tensione di rottura [N/mm ²]	Modulo elastico [N/mm ²]
CS1	40.1	39.8	3753	2.35	5445
CS2	40.0	40.6	3900	2.40	5465
CS3	39.8	40.2	3958	2.47	6098
valori medi [N/mm²]				2.41	5669
deviazione standard				0.06	371.37
coefficiente di variazione				2.5%	6.6%

accuratamente rilevate con l'ausilio di un calibro. Le modalità di esecuzione della prova e di analisi dei dati sono le stesse utilizzate e descritte nel Paragrafo 4.1.3 in merito alle prove sui campioni in laterizio. La Figura 4.15 mostra alcune foto della prova e dei campioni dopo la rottura dove si può notare che le superfici di frattura sono molto irregolari, in particolare il campione denominato F2 che si è praticamente sgretolato durante la prova. Dalla media dei risultati delle tre prove la resistenza a trazione indiretta è risultata essere di $0,35 \text{ N/mm}^2$, con un coefficiente di variazione del 7,1% (Tab. 4.11).

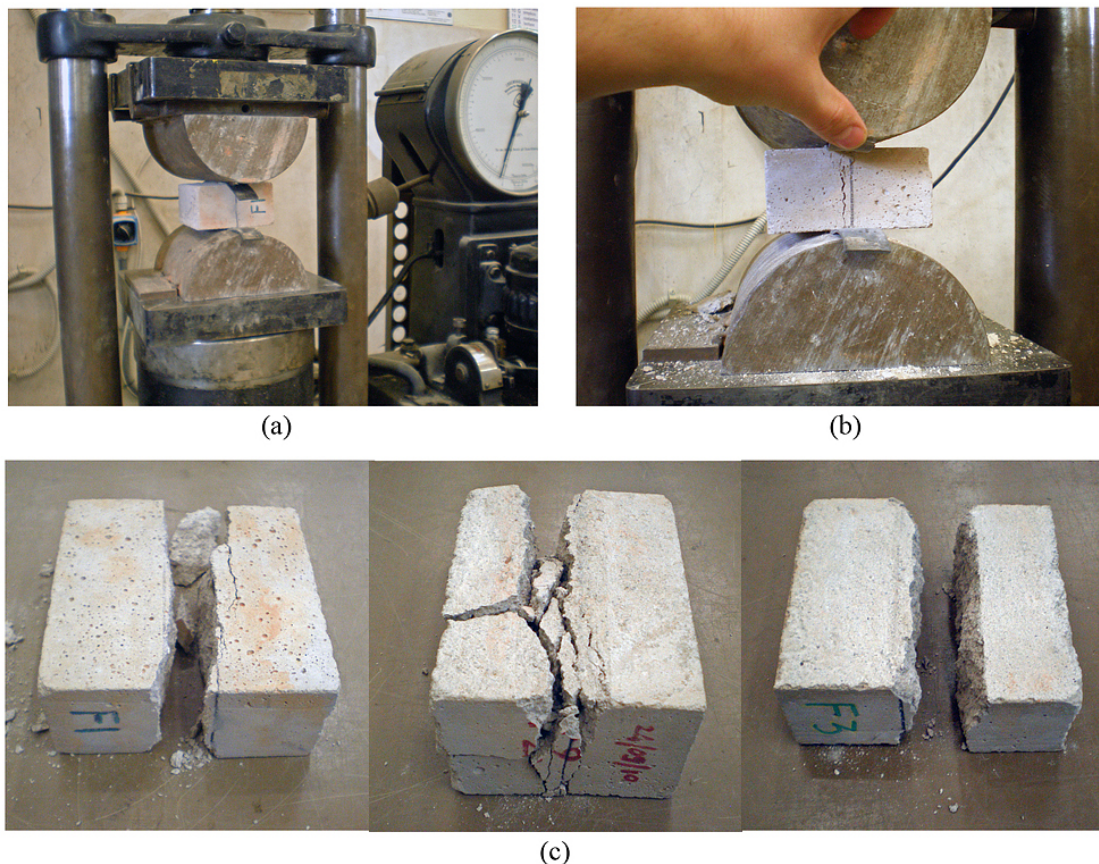


Figura 4.15: Splitting su campioni di malta: (a) set-up di prova, (b) rottura campione, (c) campioni dopo la prova.

Tabella 4.11: Splitting, malta T30V

Codice campione	Larghezza b [mm]	Altezza h [mm]	Carico di rottura [kgf]	Carico di rottura [N]	Tensione di rottura [N/mm ²]
F1	120.3	55.5	400	3924	0.37
F2	120.0	55.8	350	3434	0.33
F3	120.8	54.8	360	3532	0.34
resistenza media [N/mm ²]					0.35
deviazione standard					0.02
coefficiente di variazione					7.1%

4.2.5 Modulo elastico

Come per il calcolo del modulo elastico dei mattoni in laterizio (Paragrafo 4.1.5), e in accordo con la norma UNI 6556, anche per la malta è stata condotta una prova ciclica, al fine di stabilizzare il provino, e il modulo elastico è stato poi calcolato sul ramo di scarico del terzo ciclo. Il valore di tensione massima, σ_1 , da raggiungere durante la prova è stato fissato pari a quello corrispondente ad un carico nominale di 1500 N, cioè circa un terzo della resistenza a compressione della malta; la tensione di base σ_0 è stata fissata pari a circa un decimo di quella massima e quindi corrispondente ad un carico nominale di 150 N; infine, i valori di tensione intermedi σ_2 e σ_3 , tra i quali effettuare i cicli, corrispondono rispettivamente a carichi nominali di 1000 N e 500 N.

I campioni utilizzati sono stati tre provini prismatici di dimensioni medie 40x40x160 mm; per la prova è stata utilizzata la macchina universale “Galdabini Sun 2500”, una cella di carico da 20 kN e quattro trasduttori di spostamento applicati alle facce maggiori di ciascun provino al fine di misurare le deformazioni durante tutta la prova. In Figura 4.16 si può vedere un campione durante il test e il diagramma carico-tempo relativo al campione denominato MF2, la Figura 4.17 mostra invece i diagrammi tensione-deformazione relativi a tutte e tre le prove e, come si può notare, mette in luce il comportamento anomalo del campione denominato MF1 che è stato per questo escluso dal calcolo del modulo elastico medio. In Tabella 4.12 sono riassunti i risultati delle prove.

Tabella 4.12: Modulo elastico, malta T30V

Codice campione	primo ciclo	secondo ciclo	terzo ciclo	E_{medio} [N/mm ²]
	$\sigma_3 - \sigma_0$ (500-150 N)	$\sigma_2 - \sigma_0$ (1000-150 N)	$\sigma_1 - \sigma_0$ (1500-150 N)	
	E_I [N/mm ²]	E_{II} [N/mm ²]	E_{III} [N/mm ²]	
MF1	2948	2778	2564	2763
MF2	5626	5417	5108	5384
MF3	5677	5578	5318	5524
modulo elastico medio [N/mm ²] ¹			5213	5454
deviazione standard			148	99
coefficiente di variazione			2.8%	1.8%

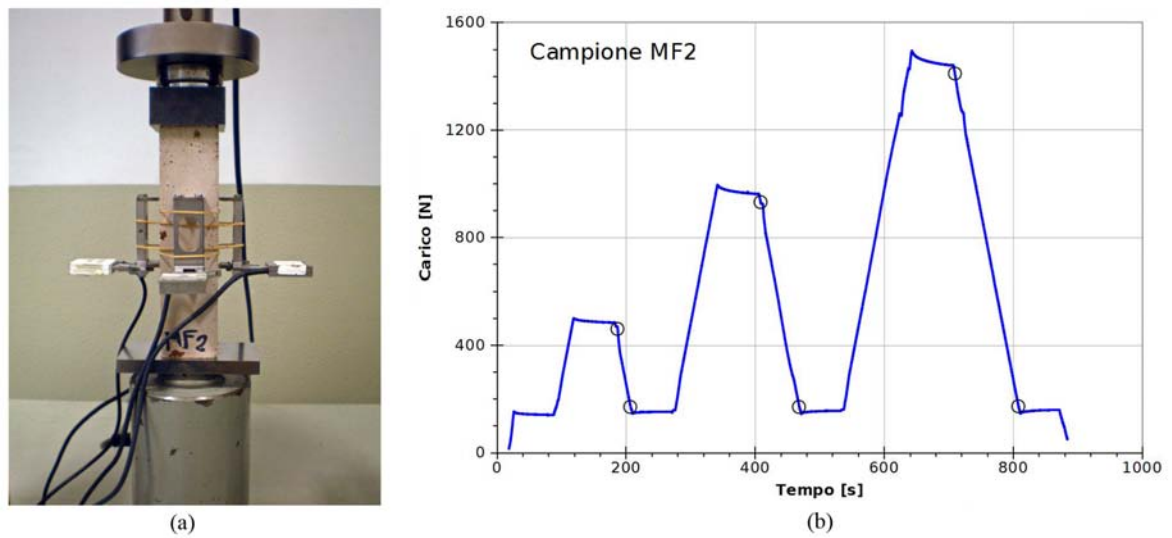


Figura 4.16: Modulo elastico della malta: (a) campione durante la prova, (b) diagramma carico-tempo.

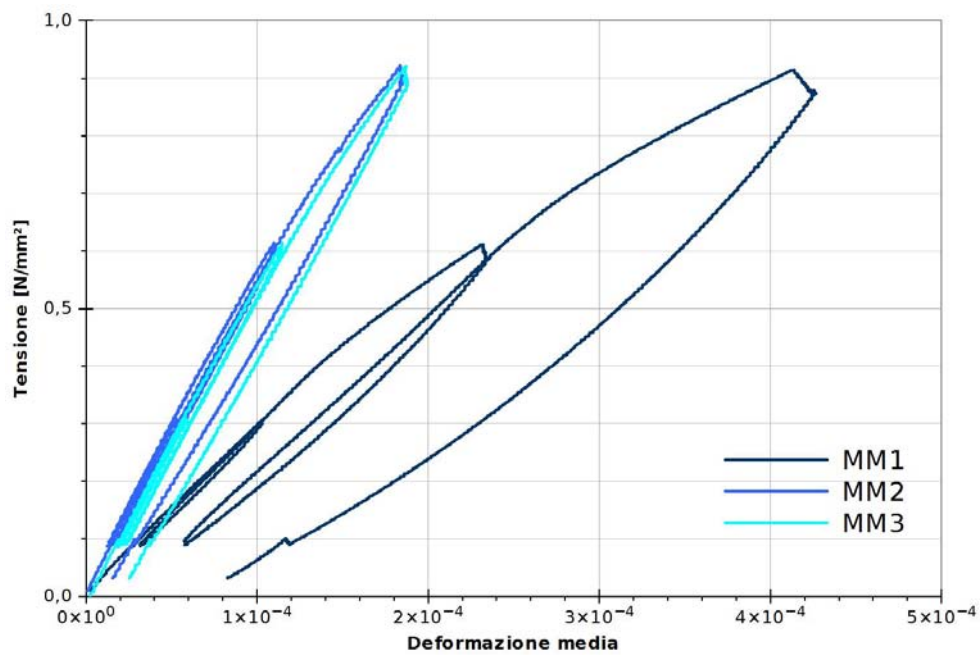


Figura 4.17: Modulo elastico della malta: diagramma tensione-deformazione delle tre prove.

Il valore del modulo elastico medio, calcolato escludendo il provino MF1, è pari a 5213 N/mm^2 con un coefficiente di variazione del 1,8%, il valore ottenuto è sostanzialmente in accordo con quello trovato nei tests a compressione dove le prove erano condotte in maniera monotonica.

¹escludendo il valore di MF1

4.3 Prismi in muratura

Per la caratterizzazione della muratura sono stati confezionati dei prismi, costituiti da cinque mattoni sovrapposti e intervallati da quattro giunti di malta dello spessore di circa un centimetro. Tre di questi prismi sono stati utilizzati interi e sottoposti a prova di splitting, mentre altri tre campioni, ottenuti tagliando a metà i prismi interi, sono stati testati a compressione strumentata.

In Tabella 4.13 sono riassunti i valori medi delle proprietà meccaniche misurate sui prismi murari, nei paragrafi che seguono sono descritte nel dettaglio le modalità di esecuzione delle prove e i singoli risultati.

Tabella 4.13: Proprietà meccaniche misurate (CoV tra parentesi), prismi murari

Resist. a compressione [N/mm^2]	Resist. a traz. per splitting [N/mm^2]	Modulo el. (0%-40%) [N/mm^2]	Modulo el. (10%-40%) [N/mm^2]	Modulo el. (30%-60%) [N/mm^2]
8.24 (20.9%)	1.10 (3.5%)	2132 (17.8%)	2063 (18.2%)	1080 (10.2%)

4.3.1 Trazione indiretta (splitting)

La prova è stata condotta con le modalità già descritte per i mattoni e la malta (Paragrafi 4.1.3 e 4.2.4). La Figura 4.18 mostra l'apparato di prova e uno dei campioni immediatamente dopo la rottura, come si può vedere, oltre alla attesa frattura lungo il piano mediano ortogonale ai giunti, i provini hanno tutti presentato rotture alle interfacce fra giunti e mattone. Questo fenomeno, che si è verificato apparentemente in concomitanza con la frattura nel piano mediano ma che probabilmente è avvenuto nell'istante immediatamente successivo, è dovuto ad una sorta di contraccolpo generato dalla rottura da splitting; in ogni caso, vista la regolarità delle fratture (Fig. 4.19) e il basso valore del coefficiente di variazione nei valori della resistenza finale, questo fenomeno sembra non aver influito nella buona riuscita delle prove. La resistenza media a trazione indiretta per la muratura è risultata pari a 1,10 N/mm^2 , con un coefficiente di variazione del 3,5%.

Nella Tabella 4.14 sono riassunti i risultati delle prove.

Tabella 4.14: Splitting muratura

Codice campione	Larghezza b [mm]	Altezza h [mm]	Carico di rottura [kg_f]	Carico di rottura [N]	Tensione di rottura [N/mm^2]
M-frp-1	120	320	6850	67199	1.11
M-frp-2	120	320	6950	68180	1.13
M-frp-3	120	320	6500	63765	1.06
resistenza media [N/mm^2]					1.10
deviazione standard					0.04
coefficiente di variazione					3.5%

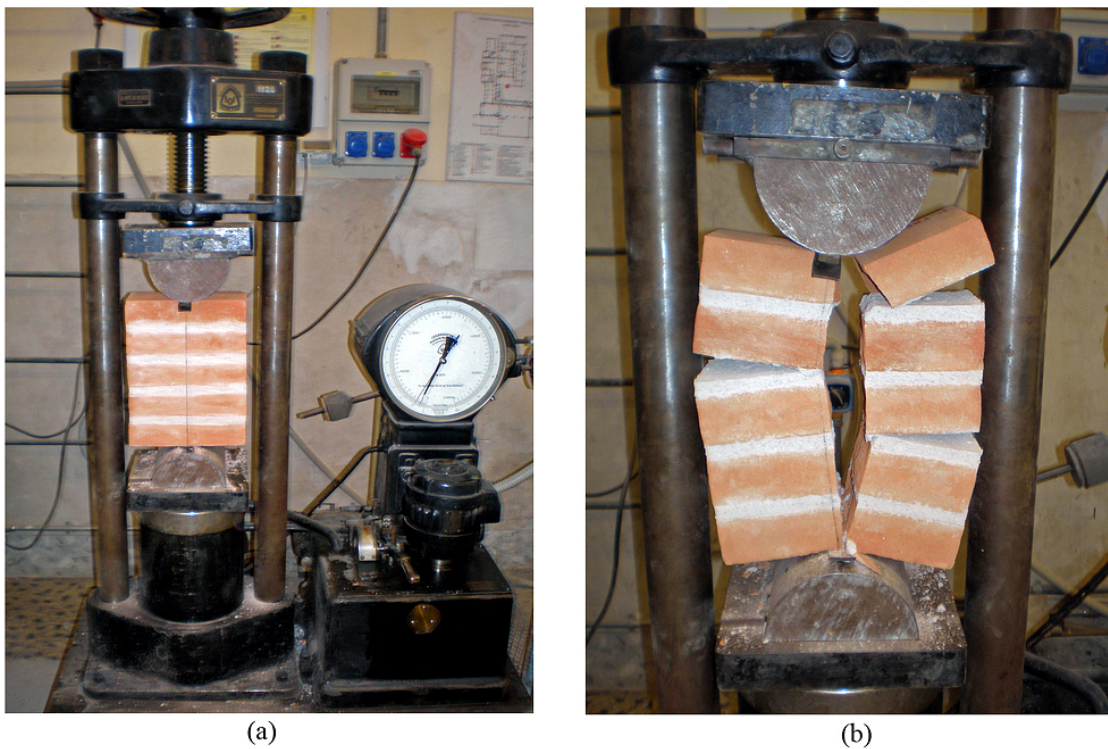


Figura 4.18: Splitting muratura: (a) apparato di prova, (b) campione fratturato.

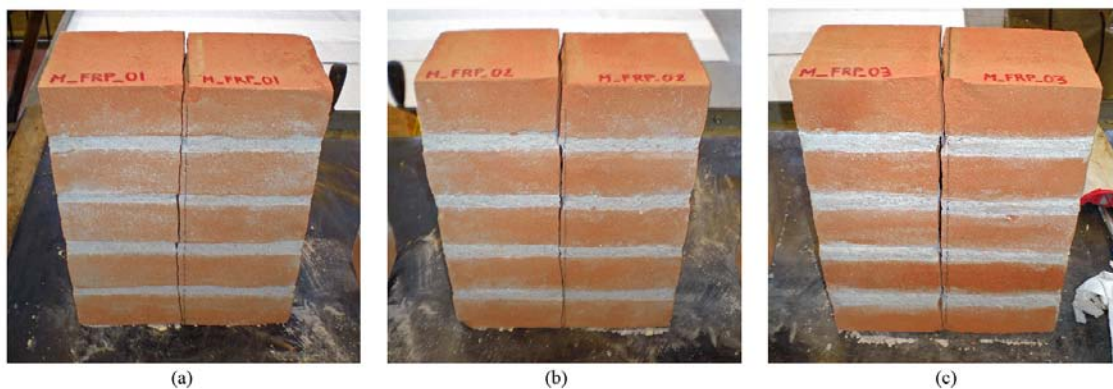


Figura 4.19: Splitting muratura: campioni ricomposti dopo la prova.

4.3.2 Compressione strumentata

La prova è stata condotta su tre pilastri di dimensioni nominali $120 \times 120 \times 320 \text{ mm}$ strumentati con quattro trasduttori di spostamento, applicati al centro delle quattro facce maggiori, per consentire il calcolo delle deformazioni in direzione dell'asse di applicazione del carico. Per il test è stata utilizzata una macchina universale "Galdabini Sun 60", dotata di apposite piastre e di una cella di carico da 600 kN (Fig. 4.20).

Le facce dei provini, destinate al contatto con le piastre della macchina, sono state spianate per eliminare eventuali difetti e renderle il più possibile parallele, e quindi garantire un'uniforme distribuzione del carico su tutta la superficie a contatto con la macchina; per ridurre ulteriori difetti la piastra superiore è stata dotata di un giunto sferico e prima di

ogni prova sono stati interposti, fra provino e piastre, dei fogli in piombo.

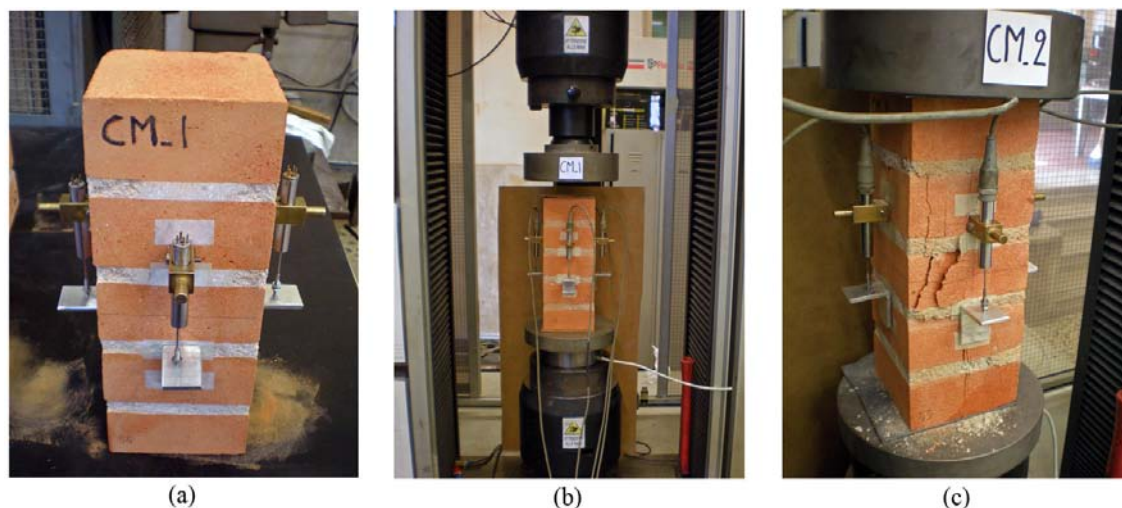


Figura 4.20: Compressione dei prismi in muratura: (a) strumentazione provino, (b) apparato di prova, (c) esecuzione della prova.

La prova è stata condotta in maniera monotonica e l'applicazione del carico è avvenuto in controllo di spostamento. Durante il test sono stati registrati, con una frequenza di acquisizione di 10 Hz , i valori di carico e gli spostamenti rilevati dai quattro trasduttori.

Avendo a disposizione le letture di deformazione è stato possibile calcolare una stima del modulo elastico, in particolare per ogni provino sono stati calcolati tre valori del modulo elastico, il primo come pendenza della retta di regressione lineare dei punti corrispondenti all'intervallo compreso fra 0 e 40% della resistenza massima, il secondo fra 10 e 40% e il terzo fra 30 e 60% della resistenza.

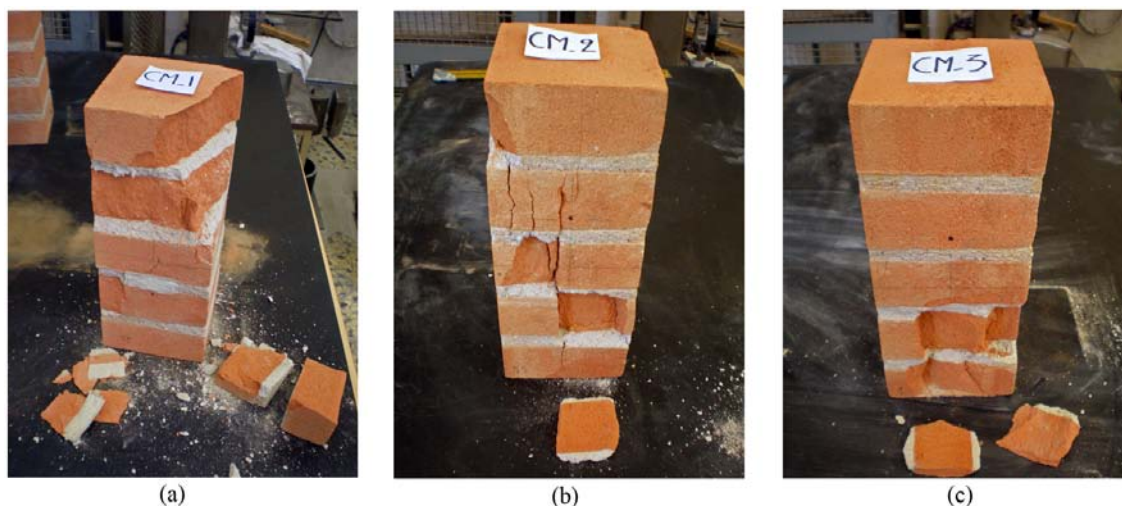


Figura 4.21: Compressione dei prismi in muratura: campioni dopo la prova.

In Tabella 4.15 sono riassunti i risultati delle prove. La resistenza media a compressione è risultata pari a $8,24\text{ N/mm}^2$, osservando i valori di resistenza delle singole prove si può notare come il campione denominato CM2 abbia fatto registrare un valore sensibilmente minore rispetto agli altri due, determinando così un coefficiente di variazione complessivo

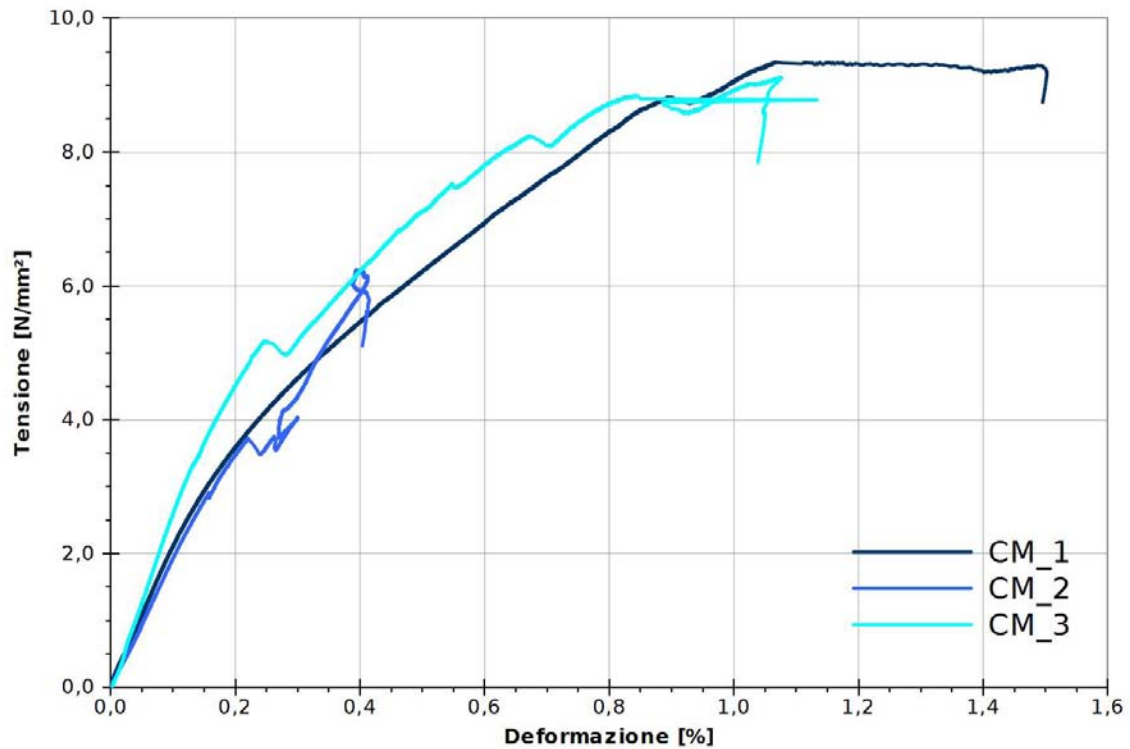


Figura 4.22: Compressione dei prismi in muratura: diagramma tensione-deformazione delle tre prove.

Tabella 4.15: Compressione strumentata, prismi in muratura.

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Altezza h [mm]	Carico di rottura [kN]	Tensione di rottura [N/mm ²]	
CM1	120.7	118.7	317.0	133.9	9.35	
CM2	119.7	119.3	318.0	89.3	6.25	
CM3	119.7	125.7	317.5	136.2	9.12	
resistenza media [N/mm ²]					8.24	
deviazione standard					1.72	
coefficiente di variazione					20.9%	
Codice campione				Modulo el. (0%-40%) [N/mm ²]	Modulo el. (10%-40%) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60%) [N/mm ²]
CM1				1912	1755	1009
CM2				1913	1953	1023
CM3				2570	2481	1207
valori medi [N/mm ²]				2132	2063	1080
deviazione standard				378	375	110
coefficiente di variazione				17.8%	18.2%	10.2%

del 20,9%; per quanto riguarda il modulo elastico è stato, invece, il campione CM3 a fare registrare valori sensibilmente superiori, come si può notare anche dal diagramma tensione-deformazione di Figura 4.22.

4.4 Compositi impregnati

Le fibre di rinforzo, opportunamente impregnate, sono state sottoposte a prove di trazione assiale al fine di determinare la resistenza ultima a trazione, il valore della deformazione massima a rottura e il modulo elastico. Le fibre utilizzate sono state di quattro tipi: FidBasalt Unidir 400 C95 (fibre di basalto, BFRP), FidGlass Unidir 300 HS73 (fibre di vetro, GFRP), FidCarbon Unidir HS240 (fibre di carbonio, CFRP) e acciaio a media densità FidSteel 3x2-B 12-12-500 (SRP), tutti forniti dall'azienda Fidia s.r.l. (Perugia).

I campioni, sei per ogni tipo di rinforzo, sono stati confezionati nel seguente modo: le strisce di tessuto sono state tagliate delle dimensioni di 50 *mm* di larghezza per 500 *mm* di lunghezza, 400 *mm* nel caso delle fibre di vetro; le strisce così ottenute sono state distese su una piastra in acciaio, preventivamente trattata con un agente distaccante, e impregnate con resina epossidica; ad ognuna delle due estremità di ogni striscia di composito sono stati incollati due tasselli in vetroresina per permettere l'aggancio alla macchina di prova, nel caso delle fibre in acciaio questa operazione non è stata necessaria (Fig. 4.23a).

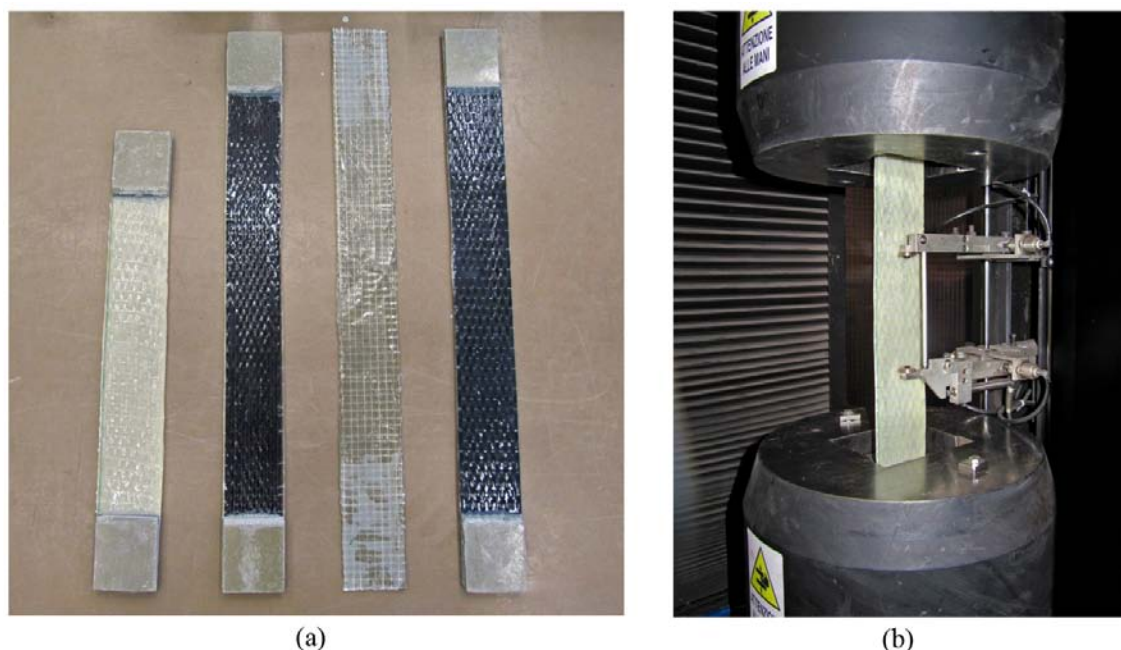


Figura 4.23: Trazioni sui compositi: (a) tipologie di compositi testati, (b) set-up di prova.

Le prove sono state condotte tramite la macchina universale “Galdabini Sun 60”, le estremità delle strisce di composito sono state agganciate alle ganasce di presa della macchina e al centro di ogni provino è stato installato un apposito estensimetro per il rilevamento delle deformazioni (Fig. 4.23b).

Le stime dei moduli elastici di ogni provino sono state calcolate come la pendenza della retta di regressione lineare dei punti tensione-deformazione corrispondenti a tre intervalli distinti: il primo comprendeva i punti nell'intervallo di deformazione 0,5‰ e 2,5‰; un secondo intervallo considerava i punti compresi tra il 10% e il 40% del carico massimo a

rottura; il terzo considerava i punti compresi tra il 30% e il 60% del carico massimo a rottura.

La Figura 4.24 mostra i campioni dopo le prove di trazione, come si può notare alcune fratture si sono sviluppate in corrispondenza dei tasselli in vetroresina, probabilmente alcune irregolarità geometriche dei provini, le difficoltà di allineamento con la macchina di prova e l'utilizzo di ganasce di presa non specifiche hanno fatto insorgere dei picchi di tensione localizzati agli spigoli dei tasselli.

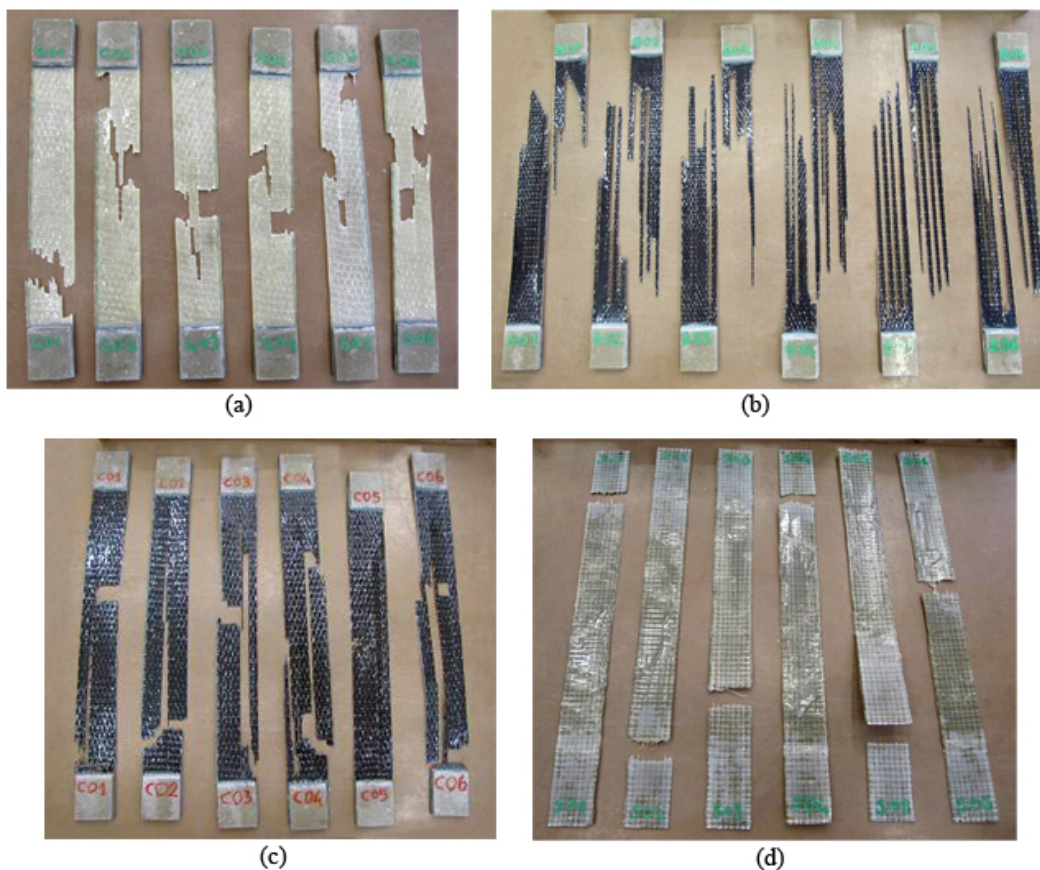


Figura 4.24: Trazioni sui compositi, campioni dopo le prove: (a) vetro, (b) basalto, (c) carbonio, (d) acciaio.

In Tabella 4.16 sono riassunti i valori medi, per tipologia di rinforzo, delle caratteristiche meccaniche indagate durante le prove.

Tabella 4.16: Trazione assiale sui compositi: valori medi dei risultati sperimentali.

Tipologia di rinforzo	Carico di rottura P_u [N]	Tensione di rottura f_t [N/mm ²]	Deformazione a rottura ϵ_f	Modulo el. (ϵ 0.5%-2.5%) [N/mm ²]	Modulo el. (10%-40% P_u) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60% P_u) [N/mm ²]
Vetro	6847	1141	1.50%	67110	73083	80124
Basalto	12682	1812	2.19%	69729	83902	86832
Carbonio	24557	2889	1.32%	168873	212702	241015
Acciaio	35202	3050	1.60%	205069	202026	200020

In Appendice A sono riportati i diagrammi tensione-deformazione e le tabelle con le

caratteristiche e i risultati di ogni singola prova; si può notare che i valori di resistenza a trazione sono risultati leggermente inferiori a quelli riportati nelle schede tecniche fornite dal produttore, una spiegazione può essere trovata nella scelta di utilizzare provini di grandi dimensioni, comparabili a quelle effettivamente utilizzate nelle prove di shear-test, e nella connessione non standard dei campioni alla macchina di prova.

4.5 Resine

Le resine utilizzate nella sperimentazione sono state di tre tipi: Fidprimer, Fidsaturant HM e Fidsaturant HM-T, tutte fornite dall'azienda Fidia s.r.l. (Perugia). I campioni realizzati con queste resine sono stati sottoposti a prova di trazione assiale al fine di determinare la resistenza ultima a trazione, il valore della deformazione massima a rottura e il modulo elastico.

Per il confezionamento dei provini sono stati utilizzati degli appositi stampi in metallo, dotati di pareti rimovibili per facilitare l'estrazione del campione indurito; le dimensioni della sezione centrale di ciascun provino così realizzato è pari a $4 \times 13 \text{ mm}$ (Fig. 4.25a).

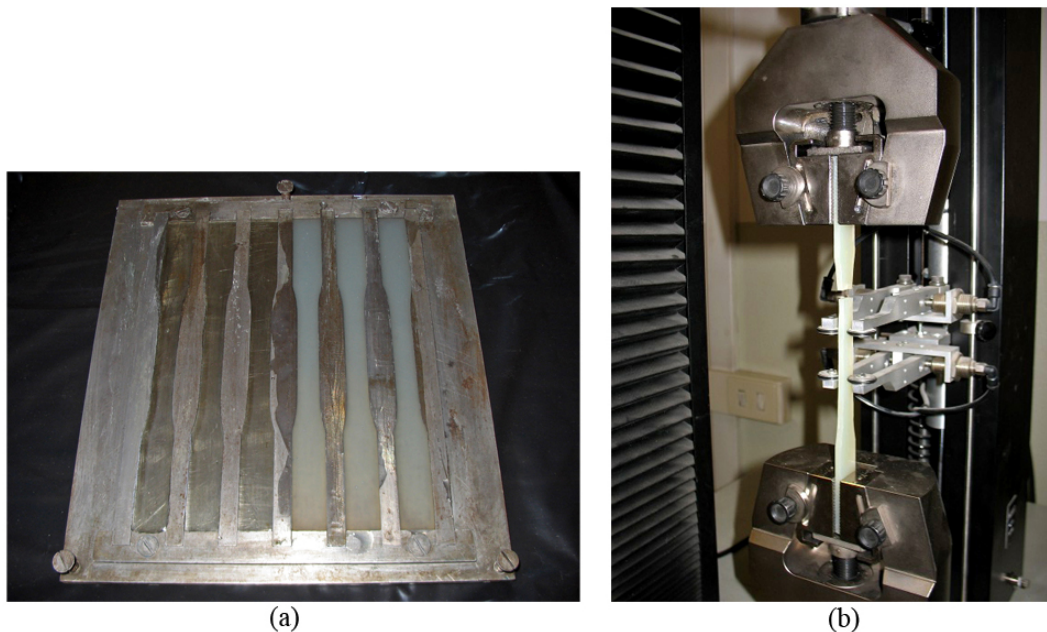


Figura 4.25: Trazioni sulle resine: (a) confezionamento, (b) apparato di prova.

La prova di trazione è stata condotta con la macchina universale “Galdabini Sun 2500”, dotata di cella di carico da 25 kN ; durante la prova a ciascun provino è stato applicato un estensimetro per il calcolo delle deformazioni nella direzione di applicazione del carico (Fig. 4.25b).

Sono stati, in questo modo, testati 12 provini per ognuna delle tre tipologie di resina, due di questi sono stati ignorati, nella successiva analisi dei dati, in quanto hanno manifestato un comportamento anomalo durante la prova, infine, un campione di Fidprimer è stato scartato perché presentava evidenti difetti di confezionamento. Le stime dei moduli elastici di ogni provino sono state calcolate come la pendenza della retta di regressione lineare dei punti tensione-deformazione corrispondenti a due intervalli distinti: il primo considera i punti compresi tra il 10% e il 40% del carico massimo a rottura; il secondo quelli compresi tra il 30% e il 60% del carico massimo a rottura.

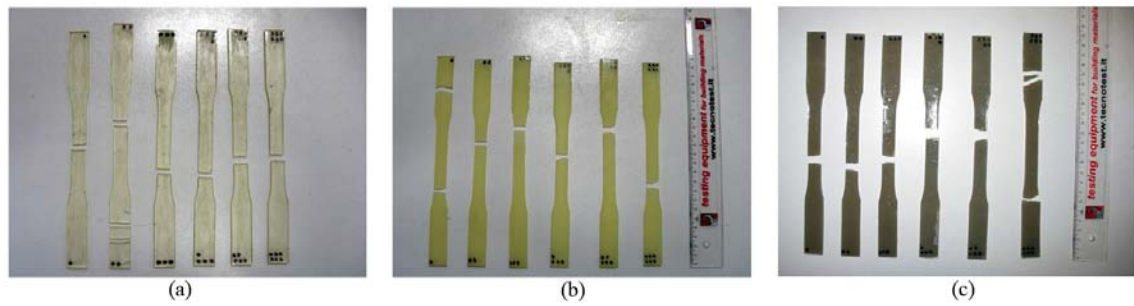


Figura 4.26: Trazioni sulle resine, alcuni campioni dopo le prove: (a) Fidprimer, (b) Fidsaturant HM, (c) Fidsaturant HM-T.

Nella Tabella 4.17 sono riassunti i valori medi, per tipologia di resina, delle caratteristiche meccaniche indagate durante le prove. In Appendice A si possono trovare le tabelle contenenti le caratteristiche e i risultati di ogni singola prova, con il confronto fra valori ottenuti nella sperimentazione e valori dichiarati nelle schede tecniche di prodotto.

Tabella 4.17: Trazione assiale sulle resine: valori medi dei risultati sperimentali.

Tipologia di resina	Carico di rottura P_u	Tensione di rottura f_t	Deformazione a rottura	Modulo el. (10%-40% P_u)	Modulo el. (30%-60% P_u)
Fidprimer	2729	52.5	3.60%	2347	2241
Fidsaturant HM	1713	32.9	3.77%	1879	1337
Fidsaturant HM-T	1712	32.9	3.18%	1865	1578

Capitolo 5

Esecuzione delle prove di adesione e analisi dei dati

Nel presente capitolo si espongono le modalità di esecuzione delle prove di adesione, la descrizione riguarderà un numero limitato di prove per non rendere eccessivamente dispersiva la trattazione, la documentazione sintetica di ogni singola prova troverà posto in Appendice B. L'esposizione è stata organizzata per gruppi di prove, affini per tipologia di substrato; dopo la descrizione delle prove più significative verrà proposta una prima analisi con i risultati di tutte le prove di quel gruppo. Un'analisi globale dell'intera sperimentazione sarà oggetto del prossimo capitolo.

5.1 Tipologia di prova e dati raccolti

Come già accennato, tutte le 56 prove eseguite durante la campagna sperimentale appartengono alla tipologia di test nota in letteratura come Single-Lap Shear Test (SLST), ossia una configurazione asimmetrica che prevede una singola striscia di rinforzo sollecitata a trazione e il supporto, chiamato nel seguito anche substrato, sottoposto a compressione; in sintesi, la prova consiste nell'applicare un carico di trazione, via via crescente, fino alla completa delaminazione, ossia al distacco del rinforzo dal substrato. Per far questo sono stati progettati e realizzati degli appositi apparati che verranno descritti nel paragrafo successivo.

Durante l'esecuzione delle prove sono stati registrati i valori di carico sottoposti al provino, quelli di spostamento relativo tra fibra di rinforzo e substrato e, per i provini strumentati con estensimetri, i valori di deformazione assiale del rinforzo. Dai valori di carico è stato possibile ricavare direttamente il valore P_{max} , corrispondente al carico massimo che il provino è stato in grado di sopportare; da questo, attraverso la (5.1) è stato possibile determinare la tensione massima a rottura, σ_{max} , dove b_f è la larghezza della striscia di rinforzo, e t_f lo spessore equivalente della fibra secca, non impregnata, fornito dalle schede tecniche di prodotto. Il confronto fra la tensione massima di rottura e la resistenza a trazione del composito fornisce una stima della "sfruttabilità" del sistema di rinforzo, in particolare per la resistenza delle fibre di composito sono stati utilizzati due valori: f_t , pari alla resistenza a trazione calcolata durante la caratterizzazione meccanica, e $f_{t,ds}$, pari alla resistenza dichiarata dal produttore.

$$(5.1) \quad \sigma_{max} = \frac{P_{max}}{b_f \cdot t_f}$$

Le letture di spostamento relativo e deformazioni della striscia di rinforzo hanno permesso di indagare l'evolversi del fenomeno di delaminazione durante tutta la prova, e di registrare alcuni valori significativi come la deformazione massima dell'estremità caricata in corrispondenza del carico ultimo, ϵ_{LE} a P_{max} e il rispettivo valore di spostamento, δ_{LE} a P_{max} . Con i valori forniti dall'estensimetro applicato in zona non incollata è stato inoltre possibile calcolare una stima del modulo elastico, $E_{f,sg}$, ottenuto come pendenza della retta di regressione lineare che interpola i punti sforzo-deformazione in un intervallo compreso tra il 30% e il 60% del carico massimo.

Con i valori di carico massimo e modulo elastico, ed utilizzando l'espressione (2.2) fornita dalle Istruzioni CNR (*CNR-DT R1 200/2013* 2013), è stato possibile calcolare l'energia di frattura G_f , stimata in tre valori che si differenziano in base al modulo elastico utilizzato; in particolare è stata chiamata G_f l'energia di frattura calcolata utilizzando il modulo elastico E_f derivante dalla caratterizzazione meccanica, $G_{f,ds}$ quella calcolata prendendo in considerazione il modulo elastico $E_{f,ds}$ riportato nelle schede tecniche di prodotto e infine, $G_{f,sg}$ calcolata utilizzando il valore $E_{f,sg}$, di cui si è parlato sopra. È importante fare notare che questo approccio per la stima dell'energia di frattura si basa sulle ipotesi che il distacco riscontrato a fine prova sia di tipo completo, ovvero che la rottura interessi uno strato di supporto più o meno fine, e che la lunghezza di incollaggio L_a sia sufficientemente maggiore della lunghezza efficace, indicata come lunghezza ottimale di ancoraggio dalle Istruzioni CNR; quest'ultima ipotesi resta, in realtà, da verificare e non pare certa dalle evidenze sperimentali nel caso dei compositi più rigidi come il carbonio e l'acciaio.

$$(5.2) \quad G_f = \left(\frac{P_{max}}{b_f} \right)^2 \frac{1}{2 \cdot t_f \cdot E_f}$$

5.2 Set-up di prova

Gli apparati di prova utilizzati sono stati di due tipi. Per le prove di shear test sui singoli mattoni in laterizio è stato progettato un set-up da installare in un telaio in acciaio. Un martinetto idraulico, controllato da un trasduttore di spostamento magnetostriativo, è stato collegato alla traversa superiore del telaio, mentre il sistema di ritenzione del campione, composto da varie piastre al fine di essere sufficientemente rigido ma, al tempo stesso, consentire spostamenti del campione per migliorare gli allineamenti delle parti, è stato connesso alla traversa inferiore. La parte libera del rinforzo di ciascun campione veniva collegata al martinetto mediante incollaggio con resina vinilestere a presa rapida a due piastre connesse ad una cella di carico da 50 kN fissata al martinetto (Fig. 5.1).

Per le prove di shear test sui blocchi di malta e sui prismi in muratura è stato progettato un set-up da installare nella macchina universale Galdabini Sun 60. Due piastre di acciaio di 40 mm di spessore sono state connesse mediante quattro barre filettate, due delle quali fissate sulla ganascia inferiore della macchina di prova. I campioni sono stati inseriti fra le due piastre, quella superiore fungente da contrasto; sottili piastrine in acciaio armonico sono state utilizzate per migliorare il contatto fra piastre e campione. Il rinforzo è stato collegato alla testa superiore della macchina, mediante incollaggio con resina vinilestere a presa rapida, su due piastre connesse tramite giunto sferico a una cella di carico da 50 kN fissata alla traversa mobile della macchina (Fig. 5.2).

L'acquisizione dei dati di tutte le prove è stata effettuata tramite un'unità esterna "MGCplus" e al software "Catman", entrambi della ditta HBM.

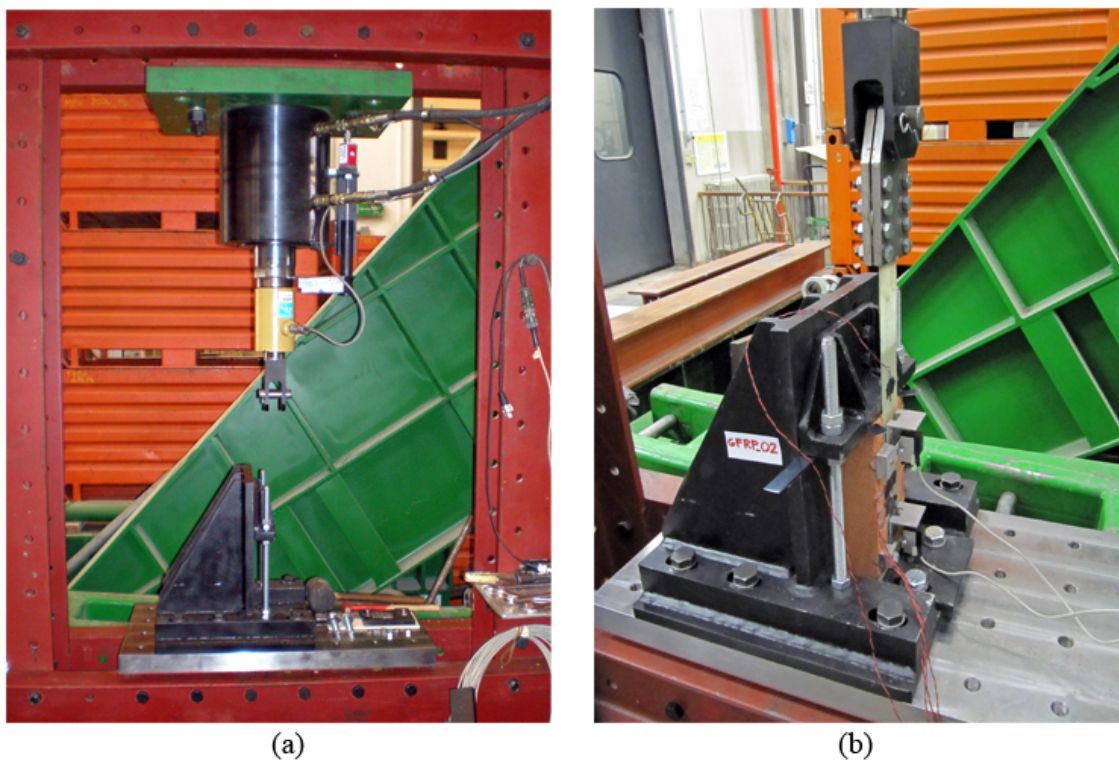


Figura 5.1: Set-up per il portale: (a) vista frontale, (b) particolare del sistema di ritenzione del campione.

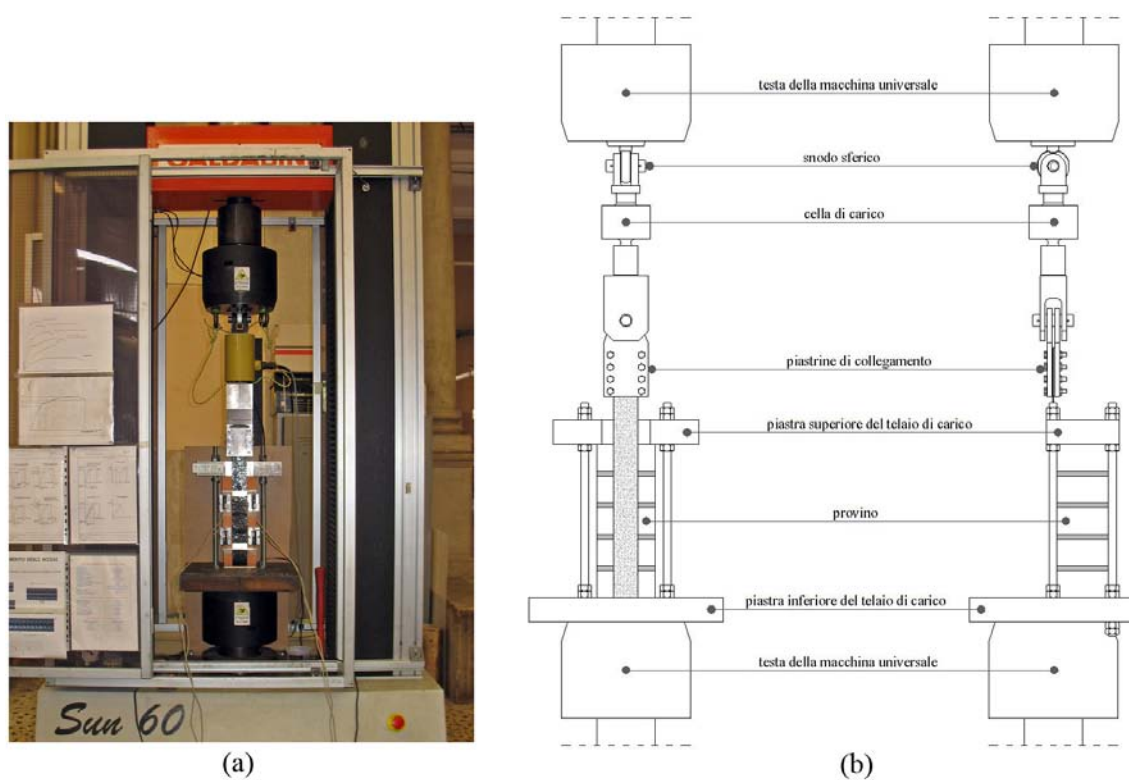


Figura 5.2: Set-up per macchina universale Galdabini Sun 60: (a) vista frontale della macchina, (b) schematizzazione dell'apparato di prova, vista frontale e laterale.

5.3 Prove di adesione su mattone

Su supporti costituiti da singoli mattoni in laterizio sono state effettuate 20 prove di adesione, 5 per ogni tipologia di rinforzo. La larghezza delle strisce di rinforzo (b_f) è stata, per tutti i campioni, pari a 50 mm e la lunghezza di adesione (L_a) di 160 mm, anch'essa mantenuta invariata.

Per misurare le deformazioni assiali del rinforzo sono stati utilizzati 4 strain-gauges, applicati sulla superficie esterna lungo l'asse centrale, di cui uno applicato in zona non incollata. Infine, per la misurazione degli scorrimenti relativi, tra mattone e striscia di rinforzo, sono stati applicati due potenziometri, uno sull'estremità caricata (LE) e un altro su quella non caricata (UE).

L'applicazione del carico è stata controllato imponendo una velocità costante di spostamento al martinetto idraulico pari a 0,3 mm/min e i dati sono stati raccolti con una frequenza di acquisizione di 10 Hz.

La Tabella 5.1 mostra il programma delle prove di adesione su mattone; le prove evidenziate dal carattere "grassetto" saranno trattate nel presente capitolo, per le altre si consulti l'Appendice B.

Tabella 5.1: Programma sperimentale delle prove di adesione su mattone.

Substrato	Codice campione	Tipologia di rinforzo				Lunghezza di adesione 160 mm	Strain gauges	
		GFRP	CFRP	BFRP	SRP		SI	NO
mattoni	SL-Glass01	*				*	*	
	SL-Glass02	*				*	*	
	SL-Glass03	*				*	*	
	SL-Glass04	*				*	*	
	SL-Glass05	*				*	*	
	SL-Carbon01		*			*	*	
	SL-Carbon02		*			*	*	
	SL-Carbon03		*			*	*	
	SL-Carbon04		*			*	*	
	SL-Carbon05		*			*	*	
	SL-Basalt01			*		*	*	
	SL-Basalt02			*		*	*	
	SL-Basalt03			*		*	*	
	SL-Basalt04			*		*	*	
	SL-Basalt05			*		*	*	
	SL-Steel01				*	*	*	
	SL-Steel02				*	*	*	
	SL-Steel03				*	*	*	
	SL-Steel04				*	*	*	
	SL-Steel05				*	*	*	

5.3.1 Descrizione di alcune prove significative

5.3.1.1 SL-Glass-02

Il provino è stato fissato all'interno del sistema di ritenzione facendo particolare attenzione che l'allineamento verticale fra la striscia di rinforzo e l'asse del sistema martinetto, cella di carico, e piastre di collegamento fosse il più accurato possibile, in modo da escludere, o perlomeno minimizzare, l'insorgere di tensioni normali al piano di adesione. Data l'irregolarità delle facce del mattone, fra la piastra e la faccia superiore del provino sono state inserite delle sottili lamine di acciaio con lo scopo di migliorarne il contatto e quindi anche la distribuzione della sollecitazione di compressione, alla quale il mattone è sottoposto.

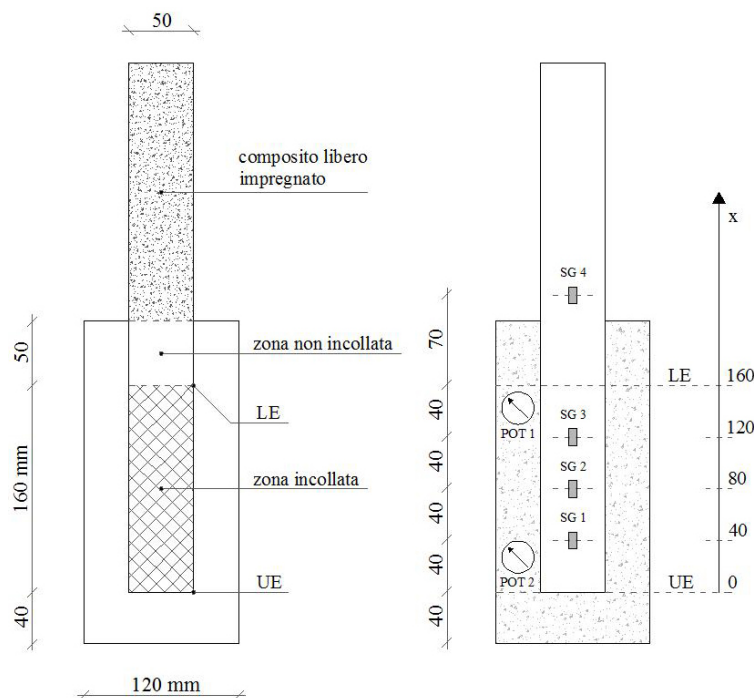


Figura 5.3: Campione SL-Glass-02: geometria del provino.

Tabella 5.2: Campione SL-Glass-02: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	160	80124	70000	1141	1400

Come si può notare dai grafici di Figura 5.4, una volta avviata la prova, il carico aumenta in modo lineare facendo registrare spostamenti contenuti all'estremità caricata del rinforzo e pressoché nulli per quella non caricata; le deformazioni, misurate lungo la striscia di rinforzo, presentano un comportamento di tipo elastico lineare con valori nettamente maggiori nella porzione di rinforzo non incollata. Arrivati ad un certo valore di carico, il rinforzo ha iniziato a perdere progressivamente aderenza, con aumento degli spostamenti e delle deformazioni, fino ad arrivare, attraverso una serie di distacchi progressivi, alla completa delaminazione del rinforzo dal substrato che si manifesta in maniera improvvisa,

tipica delle rotture di tipo fragile. L'analisi della superficie di rottura (Fig. 5.5b) mostra l'asportazione di uno strato uniforme di mattone dello spessore di qualche millimetro. In Tabella 5.3 sono riportati i principali valori delle grandezze misurate durante la prova.

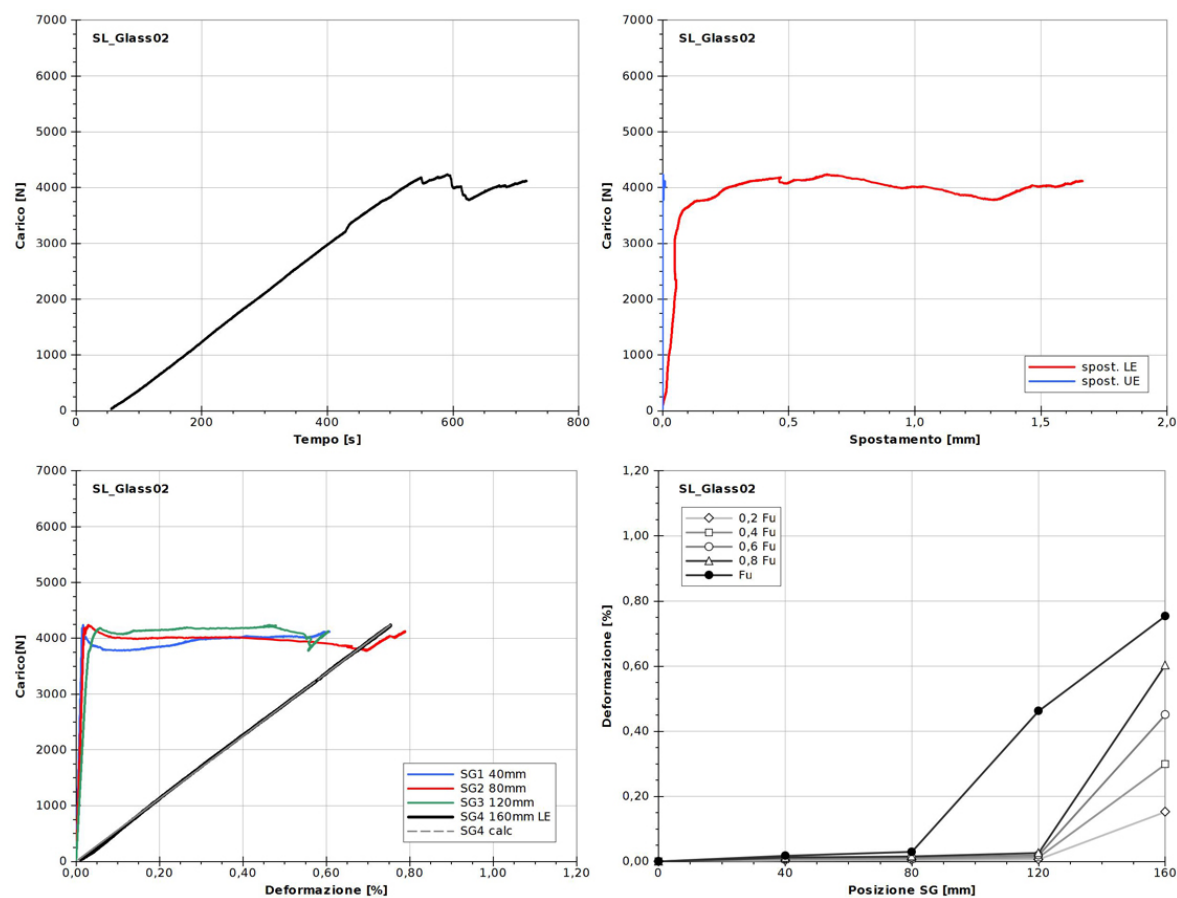


Figura 5.4: Campione SL-Glass-02: grafici delle principali grandezze analizzate.

Tabella 5.3: Campione SL-Glass-02: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	4238	0.75%	0.652	93724	0.374	0.428	0.319

5.3.1.2 SL-Glass-04

Come per la prova precedente, anche in questo caso l'aumento del carico è avvenuto in modo lineare e anche per quanto riguarda l'evolversi delle deformazioni e degli spostamenti vale quanto già detto per il campione SL-Glass-02. A differenza del caso precedente in cui il distacco è avvenuto in modo progressivo, con distacchi successivi fino alla totale perdita di aderenza, in questo caso la rottura è stata immediata e totale, interessando da subito tutta la zona di aderenza. La Figura 5.8 mostra il campione dopo la prova, come si può notare anche qui la rottura è avvenuta all'interno del substrato, con l'asportazione di un

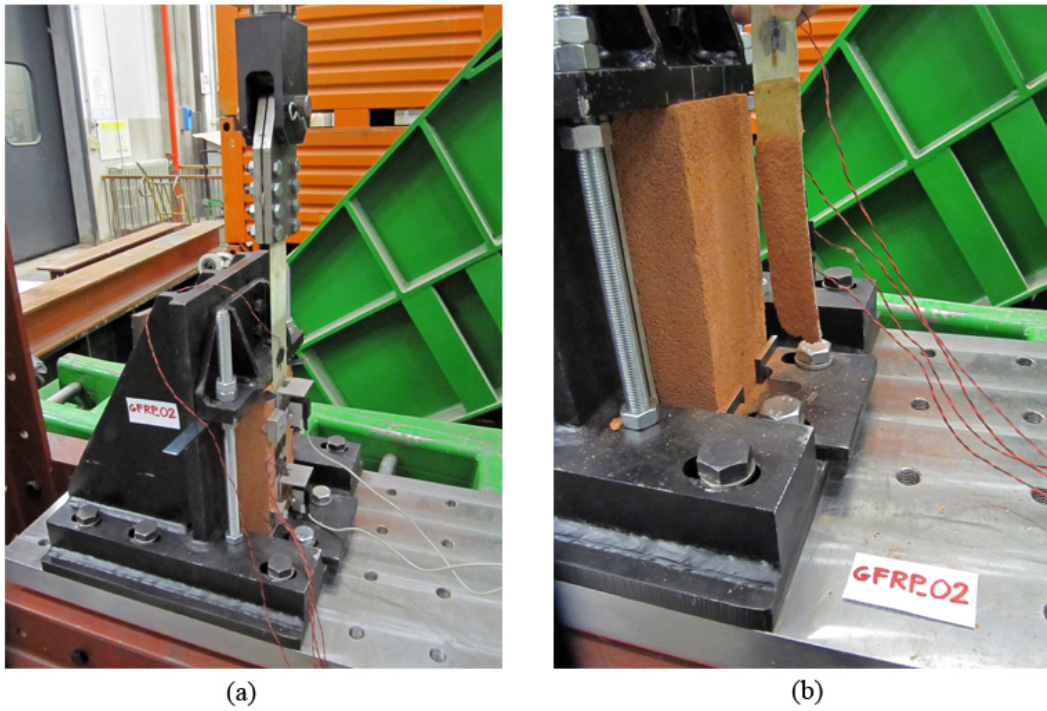


Figura 5.5: Campione SL-Glass-02: (a) apparato di prova, (b) campione dopo la prova.

sottile strato di materiale. In Tabella 5.5 sono riportati i principali valori delle grandezze misurate durante la prova.

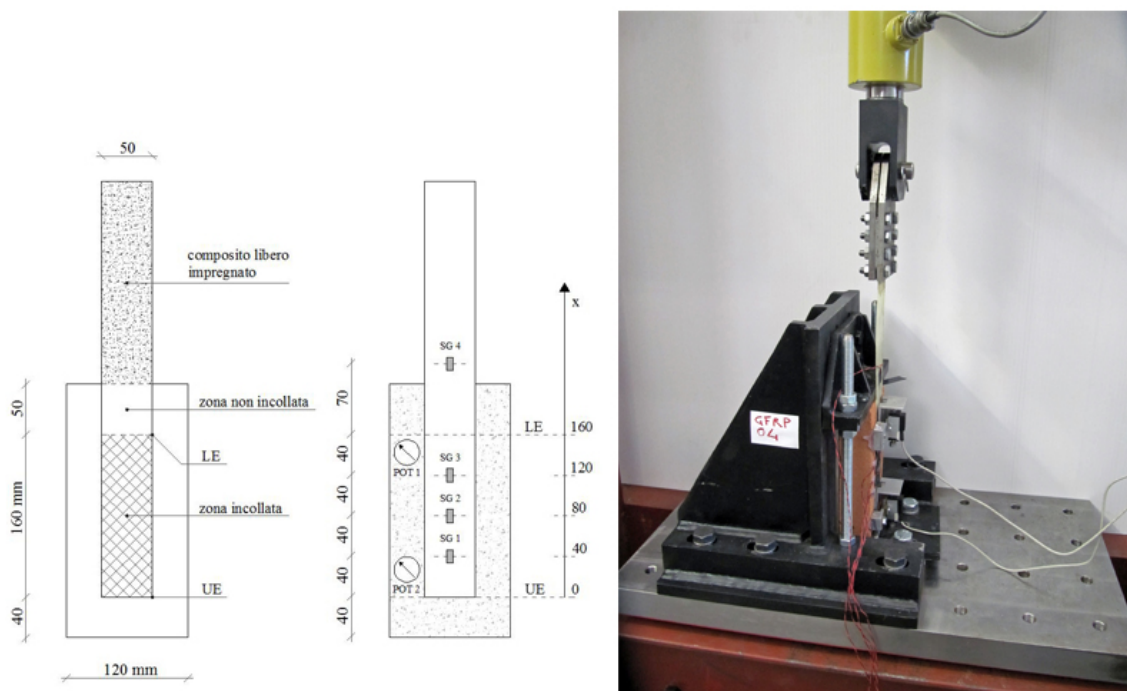


Figura 5.6: Campione SL-Glass-04: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 5.4: Campione SL-Glass-04: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	160	80124	70000	1141	1400

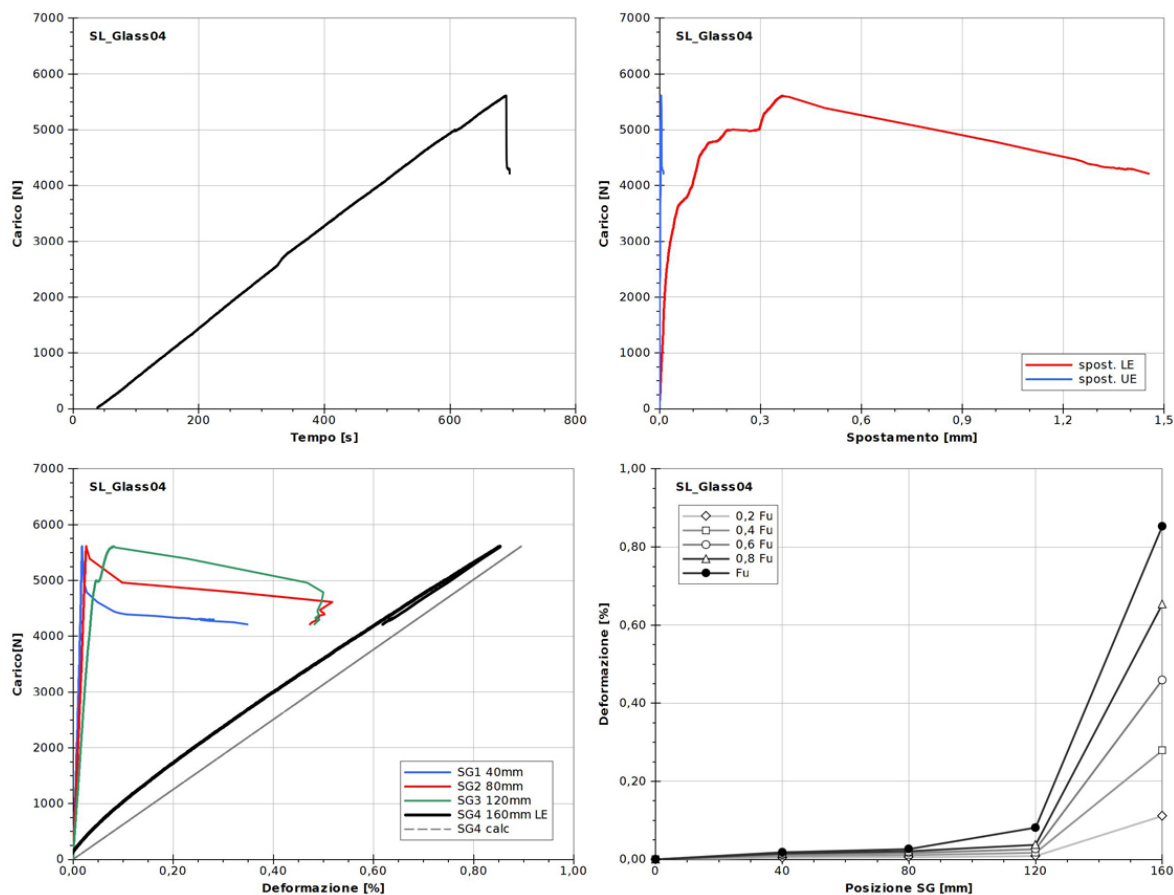


Figura 5.7: Campione SL-Glass-04: grafici delle principali grandezze analizzate.

Tabella 5.5: Campione SL-Glass-04: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	5613	0.85%	0.366	104504	0.655	0.750	0.503

5.3.1.3 SL-Carbon-02

Avviata la prova il carico è aumentato con regolarità, con un andamento lineare, e anche deformazioni e spostamenti hanno mostrato un tipico comportamento elastico lineare; arrivati ad un carico di poco superiore ai 6000 N si sono verificati i primi distacchi con aumento degli spostamenti dell'estremità caricata e delle deformazioni, queste ultime apprezzabili soprattutto dalle letture degli estensimetri posti più vicini alla zona di carico. Arrivati ad una carico di 7891 N il progredire dei distacchi ha interessato velocemente tutta la zona di

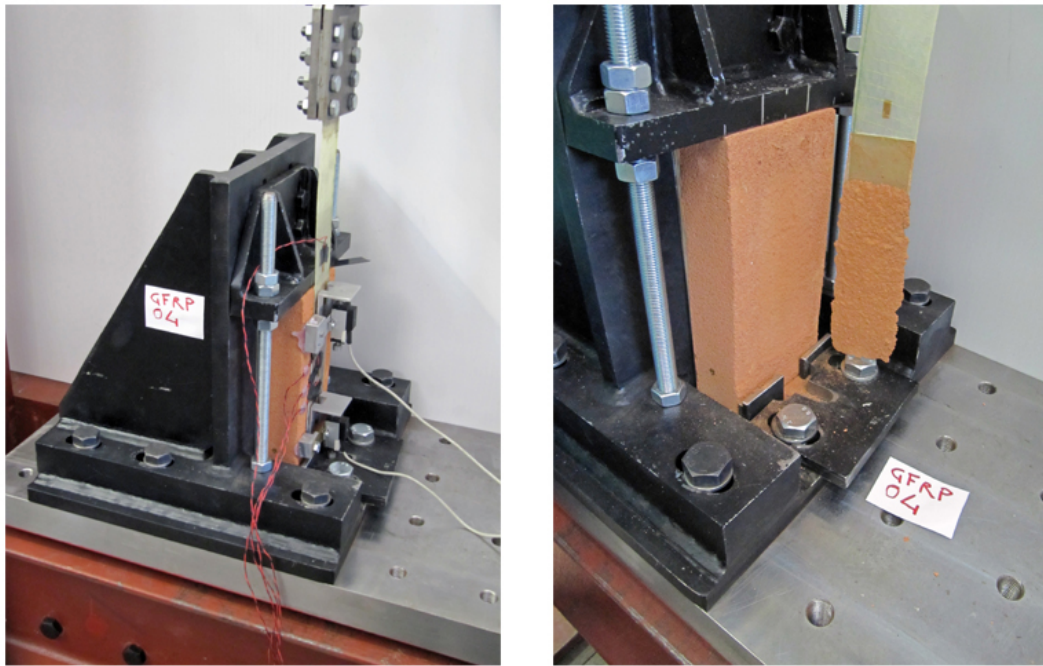


Figura 5.8: Campione SL-Glass-04: (a) apparato di prova, (b) campione dopo la prova.

adesione fino al distacco completo del rinforzo.

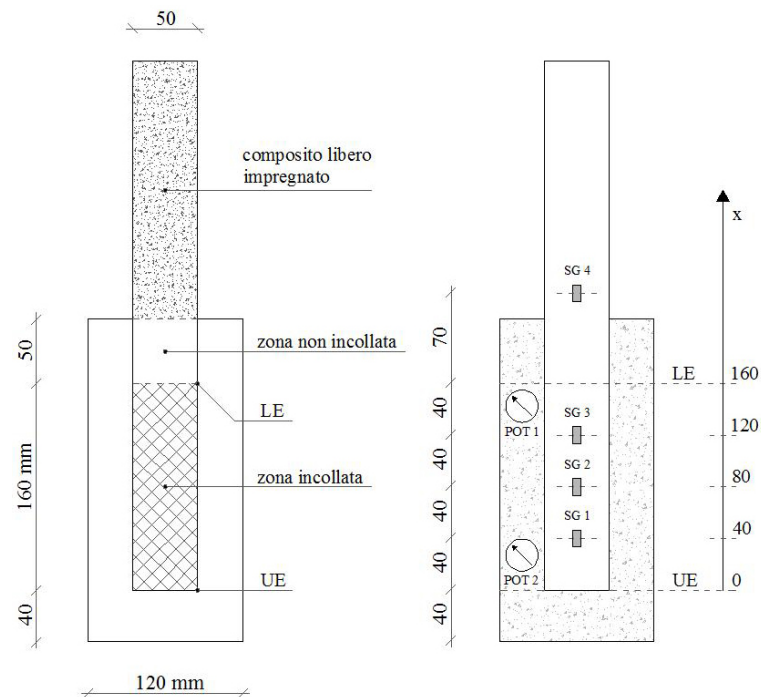


Figura 5.9: Campione SL-Carbon-02: geometria del provino.

Analizzando il campione dopo la prova (Fig. 5.11b) si può notare che il piano di rottura è contenuto nel mattone in laterizio e sulla striscia di rinforzo rimane uno strato omogeneo di materiale, osservando il mattone si può inoltre notare una lesione in corrispondenza

Tabella 5.6: Campione SL-Carbon-02: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	160	241015	220000	2889	3500

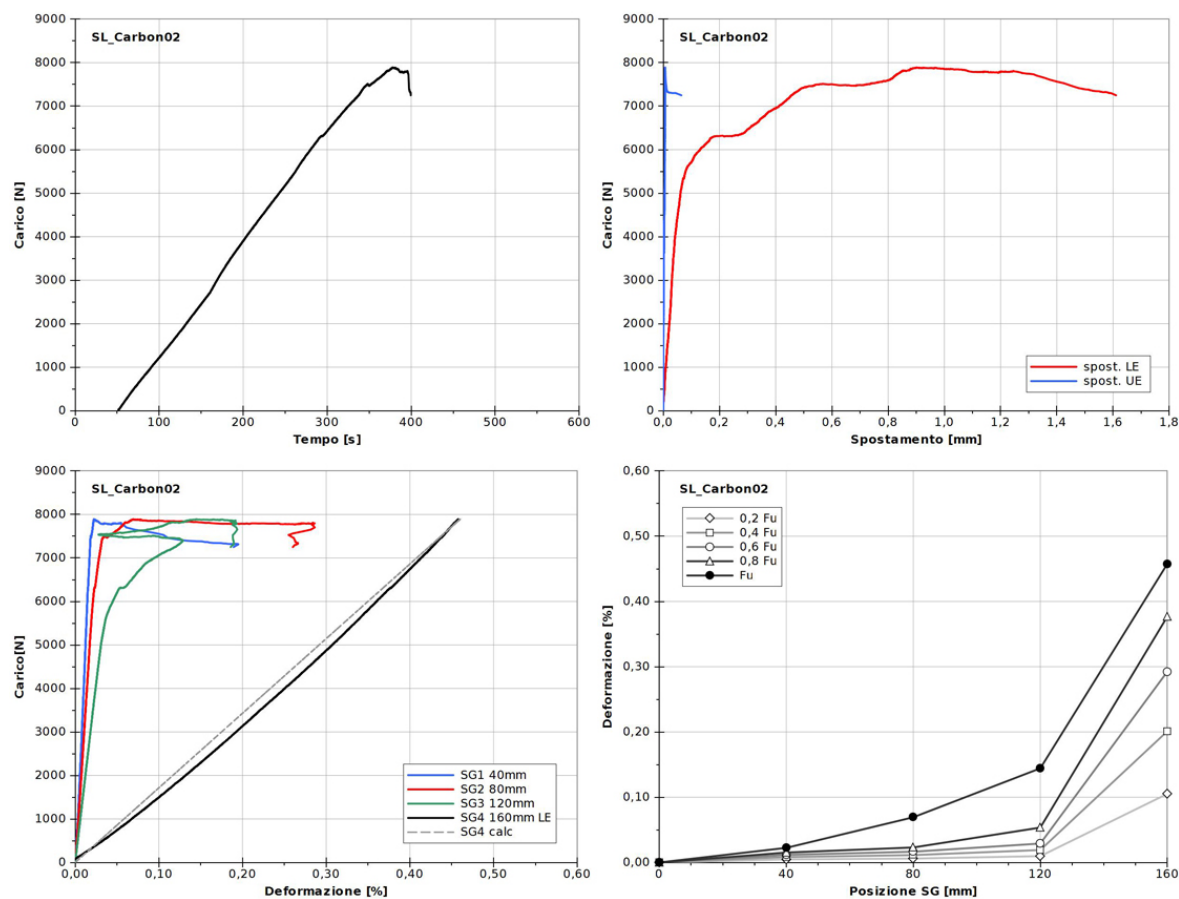


Figura 5.10: Campione SL-Carbon-02: grafici delle principali grandezze analizzate.

dell'inizio della zona di incollaggio, all'estremità caricata del rinforzo. In Tabella 5.7 sono riportati i principali valori delle grandezze misurate durante la prova.

Tabella 5.7: Campione SL-Carbon-02: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	7891	0.46%	0.900	201805	0.304	0.333	0.363

5.3.1.4 SL-Basalt-03

La perdita di aderenza di questo campione, rinforzato con fibre di basalto, è avvenuta essenzialmente in due momenti distinti, caratterizzati da dei picchi nella fase di carico

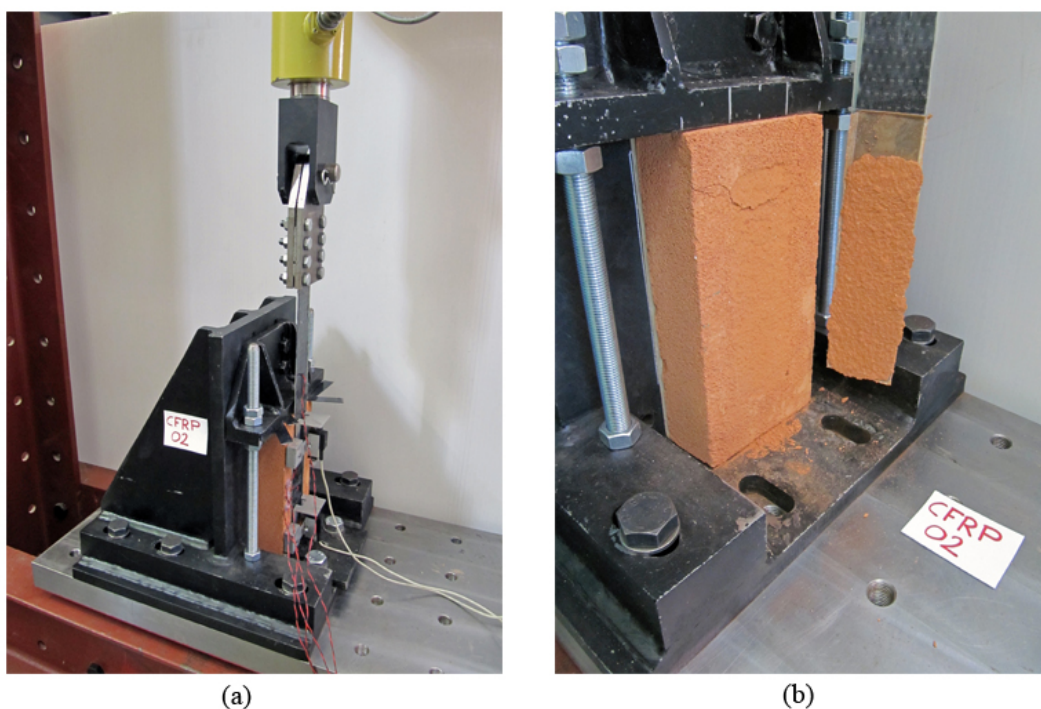


Figura 5.11: Campione SL-Carbon-02: (a) apparato di prova, (b) campione dopo la prova.

seguiti da improvvisi distacchi. Il carico è aumentato regolarmente fino ad un valore di 4828 N, raggiunto il quale si è verificato un improvviso distacco parziale nella zona di adesione con aumento repentino di spostamenti e deformazioni e perdita di carico fino ad un valore di poco inferiore ai 4000 N, il distacco totale è avvenuto dopo un'ulteriore fase di carico che si è conclusa, con un valore di circa 4500 N, con il distacco totale del rinforzo.

Tabella 5.8: Campione SL-Basalt-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	160	86832	80000	1812	1700

Analizzando la superficie di rottura (Fig. 5.14b) si può vedere come questa abbia interessato il mattone, con l'asportazione di uno strato omogeneo di materiale. In Tabella 5.9 sono riportati i principali valori delle grandezze misurate durante la prova.

Tabella 5.9: Campione SL-Basalt-03: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} [%]	δ_{LE} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	4828	0.86%	0.637	94333	0.383	0.416	0.353

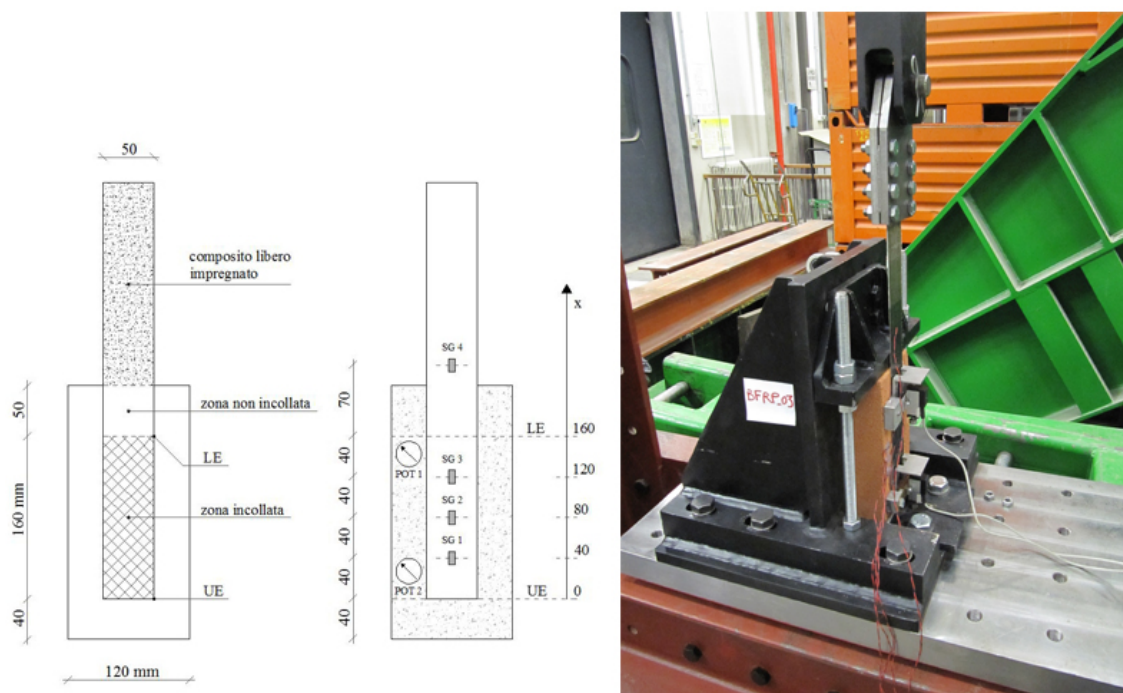


Figura 5.12: Campione SL-Basalt-03: geometria del provino e apparato di prova.

5.3.1.5 SL-Steel-01

La prova ha avuto uno svolgimento regolare, con aumento del carico fino ad un valore di 8367 N, raggiunto il quale si è verificato il distacco improvviso e totale della striscia di rinforzo dal substrato. Anche deformazioni e spostamenti hanno manifestato un andamento crescente e abbastanza regolare con alcune oscillazioni in prossimità del carico ultimo. La rottura si è prodotta all'interno del substrato con l'asportazione di uno strato omogeneo di materiale (Fig. 5.17). In Tabella 5.11 sono riportati i principali valori delle grandezze misurate durante la prova.

Tabella 5.10: Campione SL-Steel-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	160	200020	190000	3050	3070

Tabella 5.11: Campione SL-Steel-01: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	8367	0.31%	0.252	247849	0.308	0.325	0.249

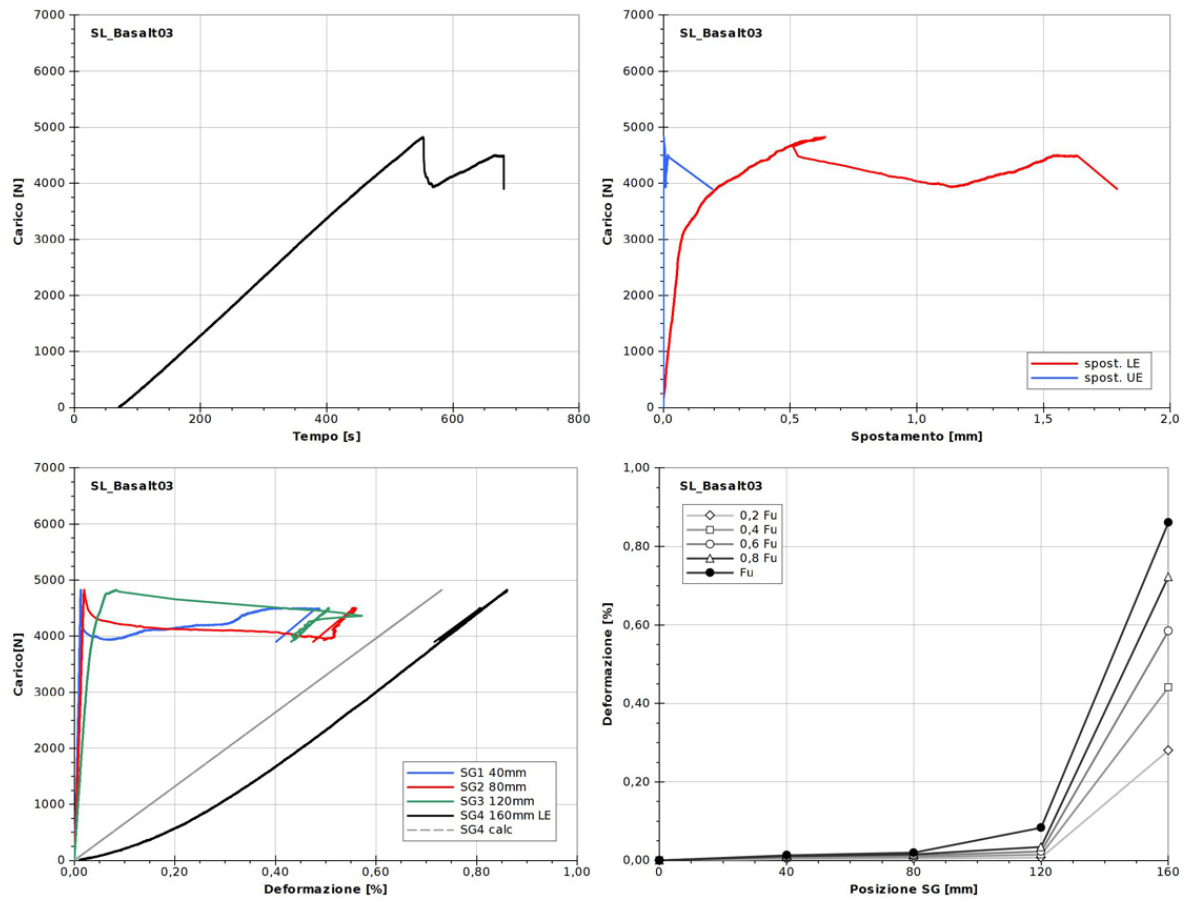


Figura 5.13: Campione SL-Basalt-03: grafici delle principali grandezze analizzate.

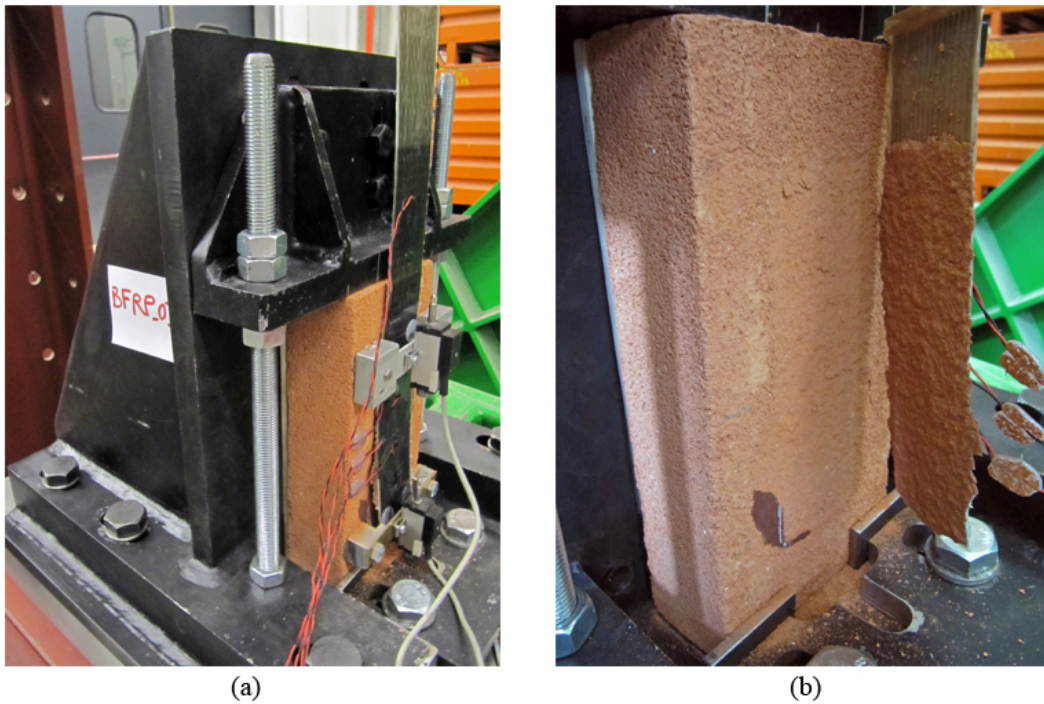


Figura 5.14: Campione SL-Basalt-03: campione dopo la rottura.

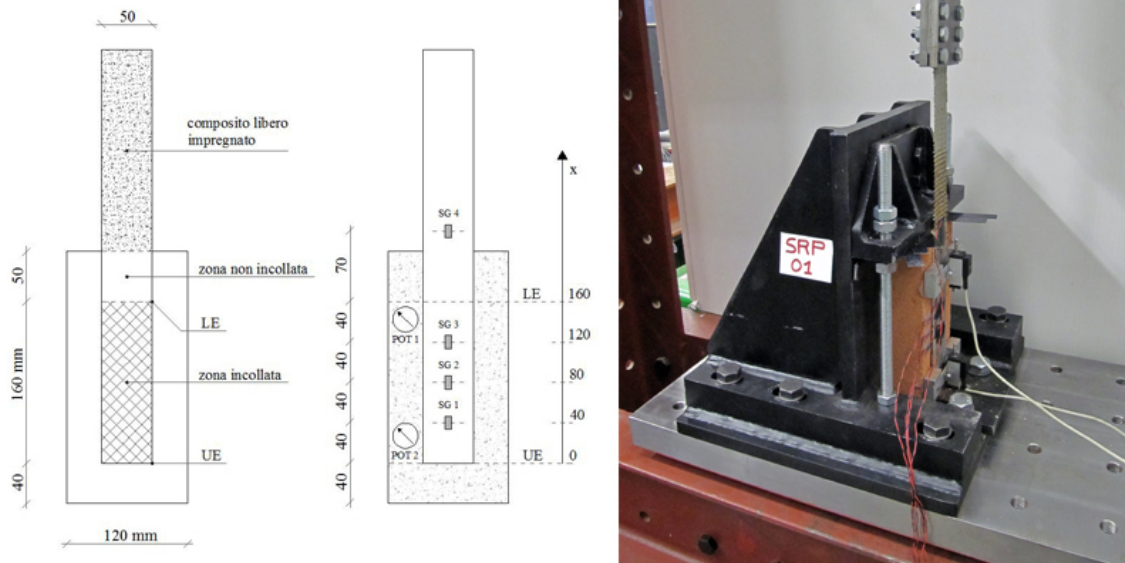


Figura 5.15: Campione SL-Steel-01: geometria del provino e apparato di prova.

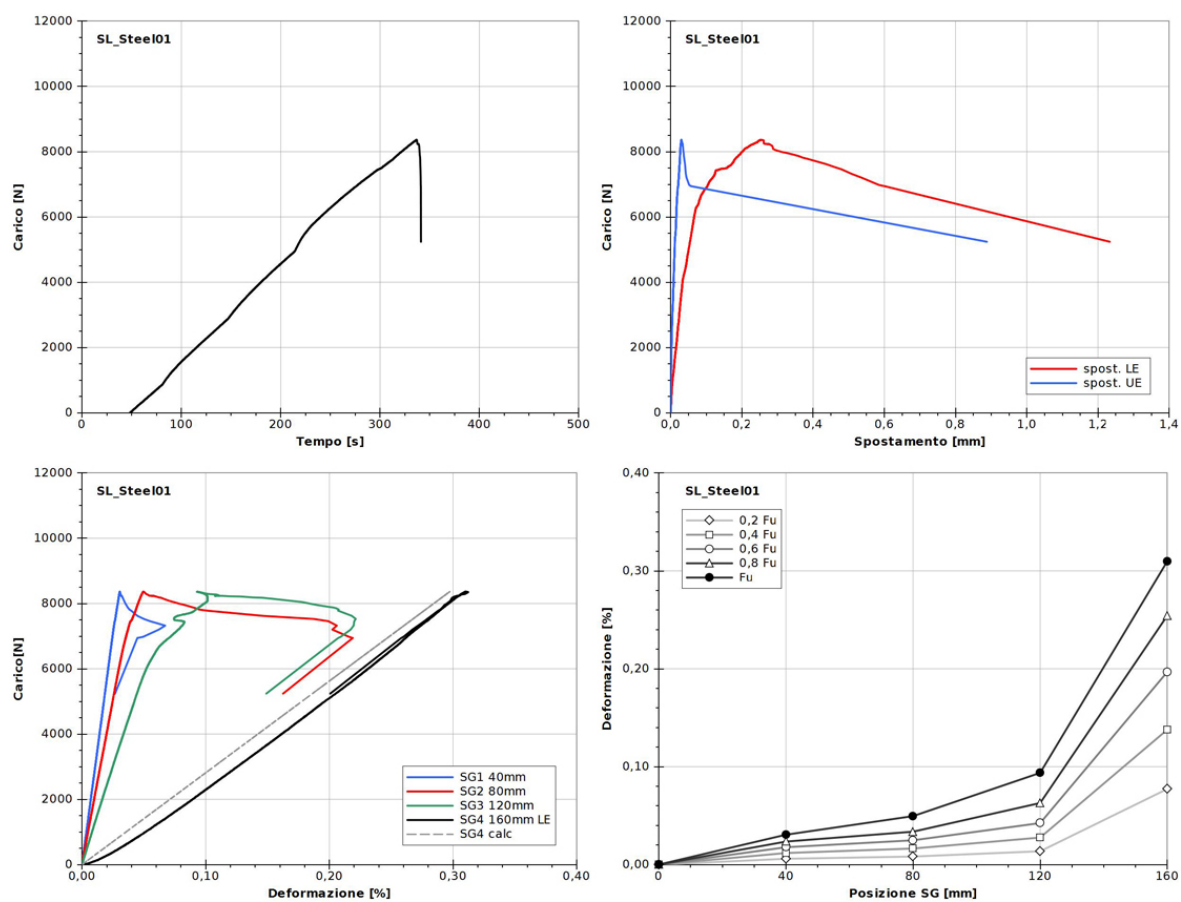


Figura 5.16: Campione SL-Steel-01: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 5.17: Campione SL-Steel-01: campione dopo la rottura.

5.3.2 Modalità di rottura

La prima importante valutazione che si può fare di ogni campione testato è l'analisi della superficie di distacco e quindi determinare quale tipologia di rottura il provino ha manifestato. Come già descritto nel Paragrafo 2.5, e con riferimento alla Figura 2.2, la tipologia di rottura desiderata è quella che si produce all'interno del materiale da rinforzare, nel caso specifico il mattone in laterizio, in quanto è l'unica che può escludere errori di progettazione o una scorretta posa in opera del sistema di rinforzo. Tutti e venti i provini hanno manifestato questo tipo di rottura, caratterizzato dall'asportazione di uno strato di materiale abbastanza omogeneo dello spessore medio di un paio di millimetri (Fig: 5.18a). In un paio di casi delle piccole porzioni di zona di incollaggio hanno manifestato un distacco fra rinforzo e adesivo, la Figura 5.18b mostra uno di questi due casi, come si può vedere questo distacco anomalo interessa un'area molto ridotta e posizionata all'estremità non caricata del rinforzo. In alcuni casi, in concomitanza al distacco del rinforzo, si è verificata una rottura del mattone, caratterizzata dal distacco, in un caso, o dalla fessurazione di una porzione cuneiforme in prossimità dell'estremità caricata e quindi nella zona di massima concentrazione degli sforzi (Fig. 5.18c,d).

5.3.3 Resistenze e spostamenti

I primi parametri di ricerca desunti dall'analisi dei dati di ogni campione sono stati il carico massimo sopportato e il rispettivo spostamento relativo, tra striscia di rinforzo e supporto, misurato all'estremità caricata, all'inizio della zona di incollaggio. Il carico massimo P_{max} è stato determinato come il valore massimo fra quelli registrati attraverso la cella di carico durante ogni prova, mentre per il corrispondente spostamento δ_{LE} si è fatto riferimento alle letture del potenziometro. Con il valore di carico massimo, e disponendo dei dati relativi allo spessore e alla larghezza della striscia di rinforzo, è stato possibile calcolare la tensione massima $\sigma_{f,max}$ nelle strisce di rinforzo.

I campioni rinforzati con fibra di vetro hanno fatto registrare un valore di carico massimo medio pari a 5028 N con un coefficiente di variazione del 14,34%; come si può vedere dalla Figura 5.19 e dalla Tabella 5.12, i due provini che hanno presentato un carico ultimo inferiore (Glass-02 e Glass-05) sono quelli in cui la perdita di aderenza è avvenuta per gradi, con una serie di distacchi progressivi, il valore di carico per questi due provini è praticamente identico, così come è molto simile il carico sopportato dagli altri tre provini che hanno manifestato, invece, un distacco improvviso di tutta la zona di incollaggio. Anche gli spostamenti, pur con una maggiore dispersione nei valori, rispecchiano questa differenza di comportamento, i due provini citati hanno fatto registrare i valori maggiori mentre gli altri tre hanno presentato dei valori di spostamento più contenuti, in definitiva il valore medio di spostamento è risultato pari a 0,572 mm con un coefficiente di variazione del 25%.

I campioni rinforzati con fibra di carbonio hanno manifestato tutti un comportamento molto simile, il valore di carico massimo medio è risultato pari a 7543 N con coefficiente di variazione del 5,54%, quindi un valore molto uniforme. Com'era logico aspettarsi la maggiore rigidità delle fibre di carbonio rispetto a quelle di vetro ha determinato carichi ultimi sensibilmente maggiori. Lo spostamento medio all'estremità caricata è stato pari a 0,672 mm con un coefficiente di variazione del 52,97%. In Tabella 5.13 e in Figura 5.20 sono raccolti valori e diagrammi relativi alle prove con fibre di carbonio.

Per i campioni rinforzati con fibre di basalto, che presentano caratteristiche molto simili a quelle in vetro, il carico massimo medio è stato di 5516 N con un coefficiente di variazione del 8,24%, lo spostamento medio dell'estremità caricata è stato di 0,644 mm con un

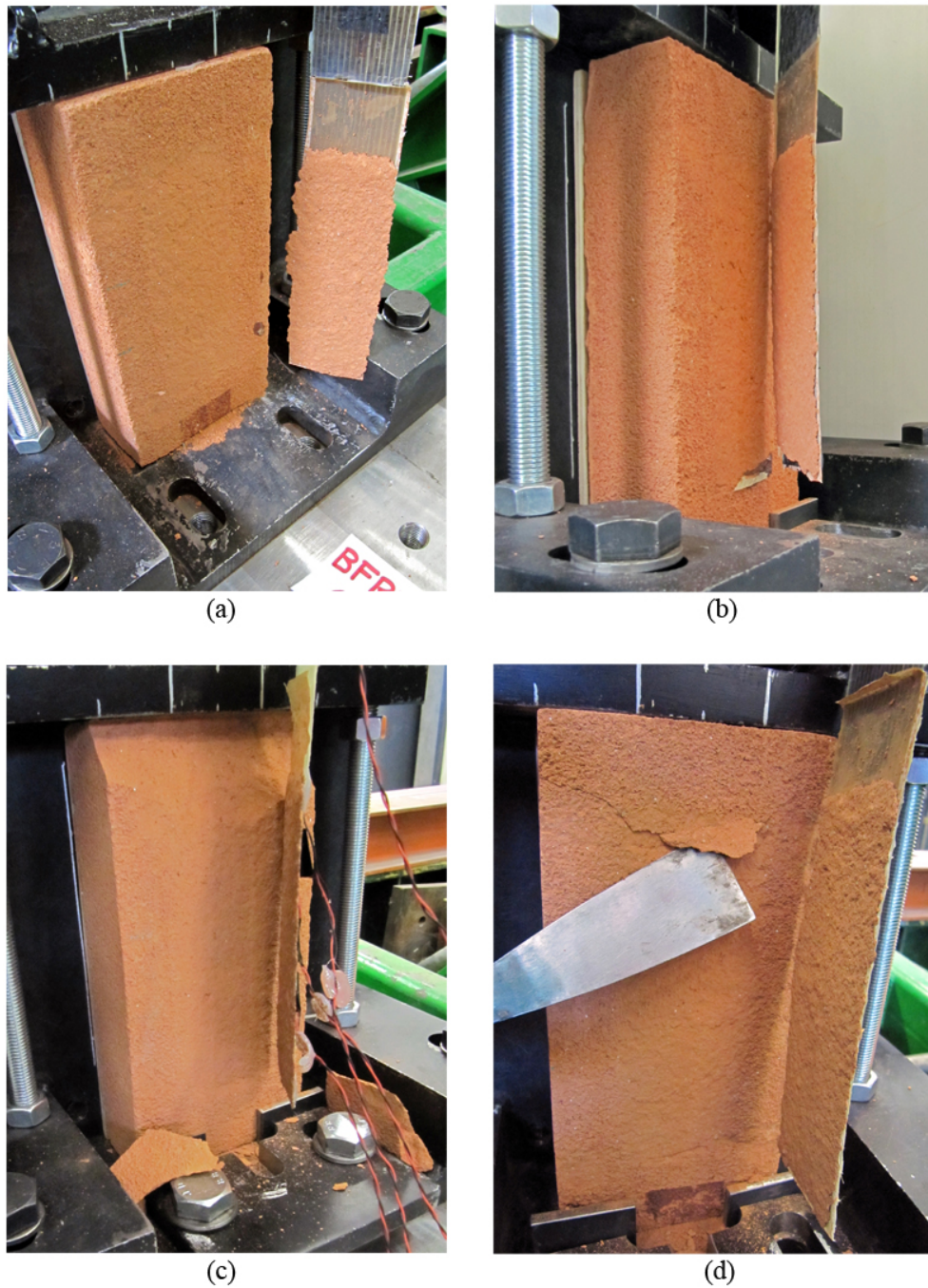


Figura 5.18: Prove di adesione su mattone: esempi di rotture riscontrate.

coefficiente di variazione del 20,93%. In Tabella 5.14 e in Figura 5.21 sono raccolti valori e diagrammi relativi alle prove con fibre di basalto.

Infine, per quanto riguarda i campioni con fibre di acciaio, il valore medio di carico massimo è stato di 8322 N con un coefficiente di variazione del 12,31% e uno spostamento medio pari a 0,324 mm con un coefficiente di variazione del 46,54%. Anche in questo caso l'elevata rigidità delle fibre di acciaio ha fatto registrare valori di carico ultimo elevati. In Tabella 5.15 e in Figura 5.22 sono raccolti valori e diagrammi relativi alle prove con fibre di acciaio.

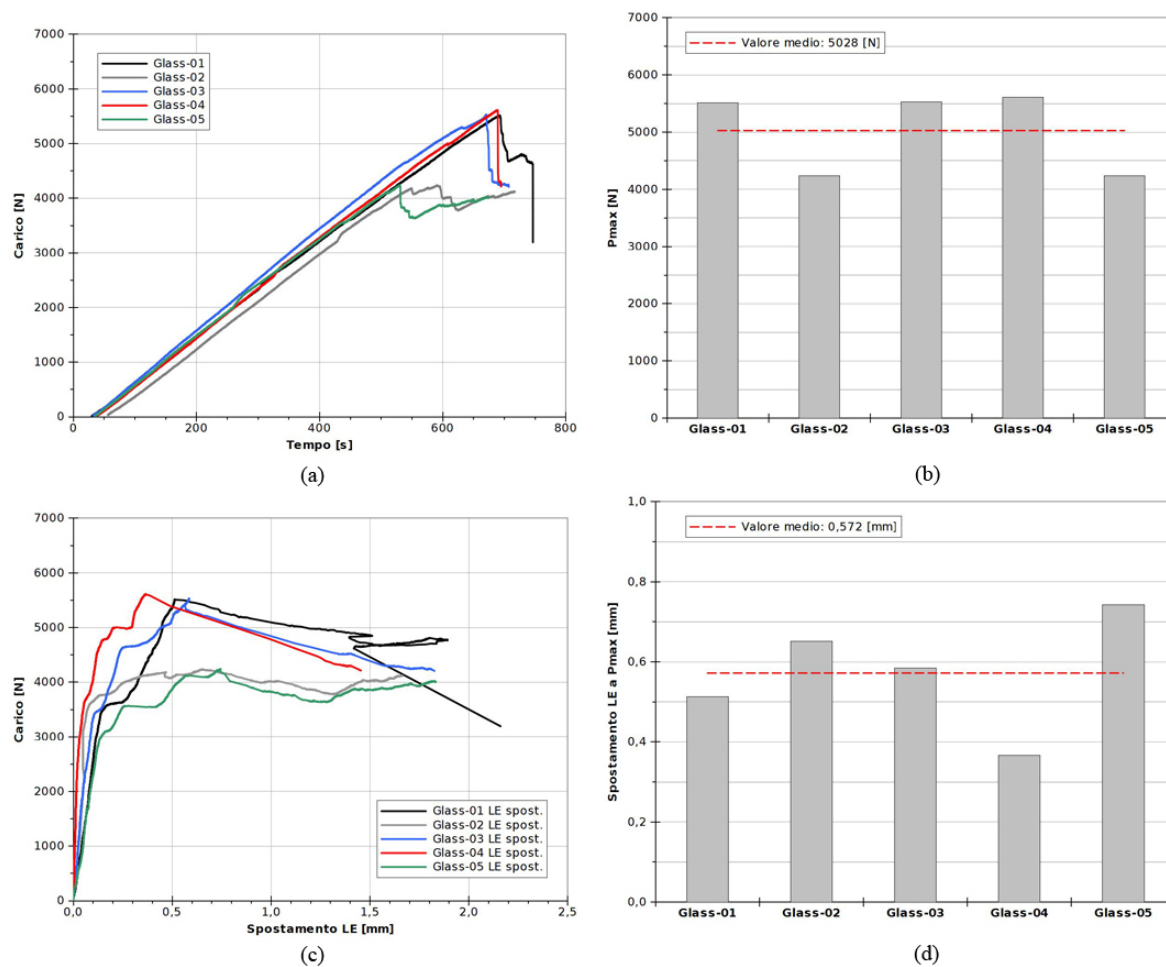


Figura 5.19: Prove di adesione su mattone: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro.

Tabella 5.12: Prove di adesione su mattone: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro.

Campione	P_{max} [N]	$\delta_{LE a P_{max}}$ [mm]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_{t,ds}}$ [%]
Glass-01	5515	0.513	919.2	80.6%	65.7%
Glass-02	4238	0.652	706.3	61.9%	50.5%
Glass-03	5533	0.585	922.1	80.8%	65.9%
Glass-04	5613	0.366	935.6	82.0%	66.8%
Glass-05	4240	0.743	706.7	61.9%	50.5%
valori medi	5028	0.572	838.0	73.4%	59.9%
dev. stand.	721	0.143	120.2	10.5%	8.6%
CoV	14.34%	25.00%	14.34%	14.34%	14.34%

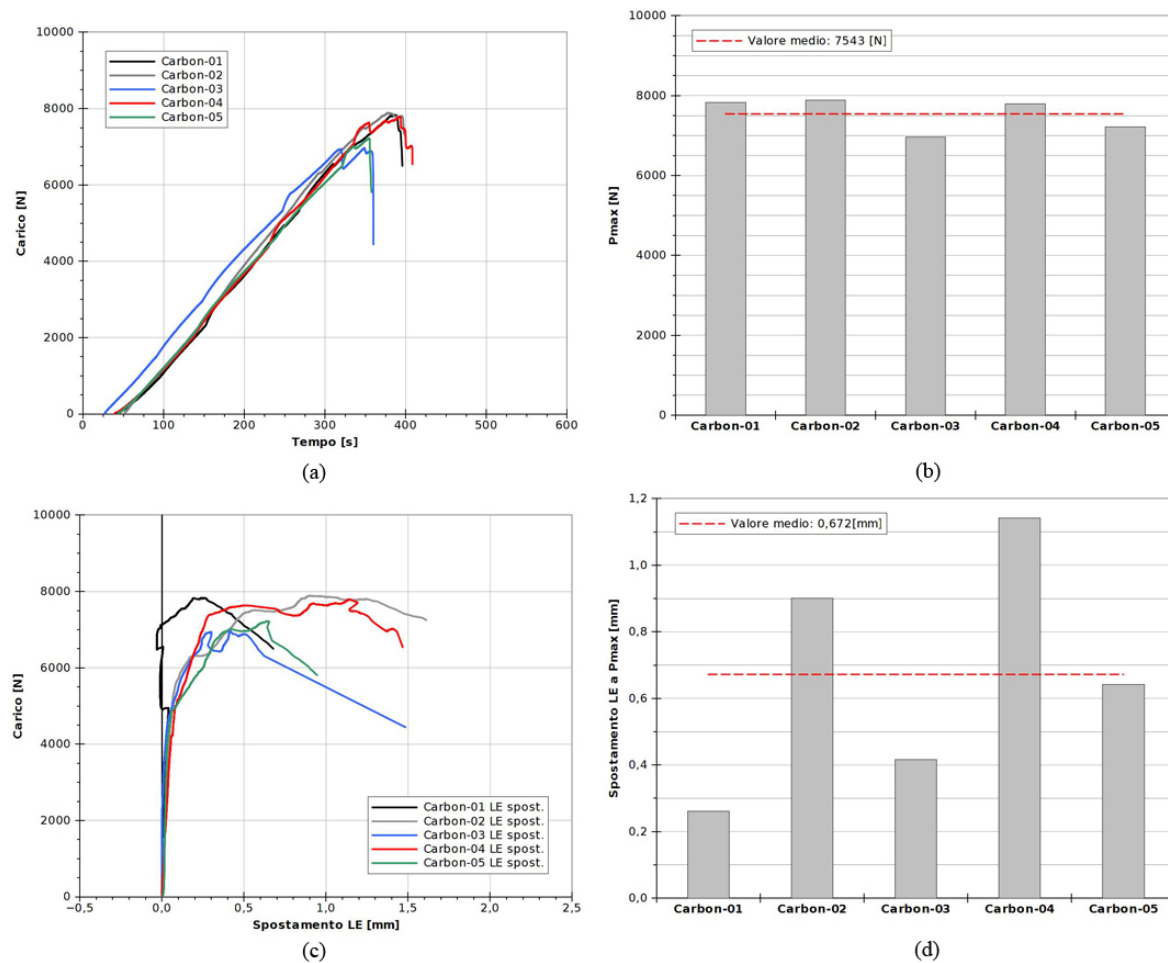


Figura 5.20: Prove di adesione su mattone: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.

Tabella 5.13: Prove di adesione su mattone: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.

Campione	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_{t,ds}}$ [%]
Carbon-01	7833	0.261	921.5	31.9%	26.3%
Carbon-02	7891	0.900	928.3	32.1%	26.5%
Carbon-03	6971	0.417	820.1	28.4%	23.4%
Carbon-04	7796	1.141	917.1	31.7%	26.2%
Carbon-05	7223	0.643	849.8	29.4%	24.3%
valori medi	7543	0.672	887.4	30.7%	25.4%
dev. stand.	418	0.356	49.2	1.7%	1.4%
CoV	5.54%	52.97%	5.54%	5.54%	5.54%

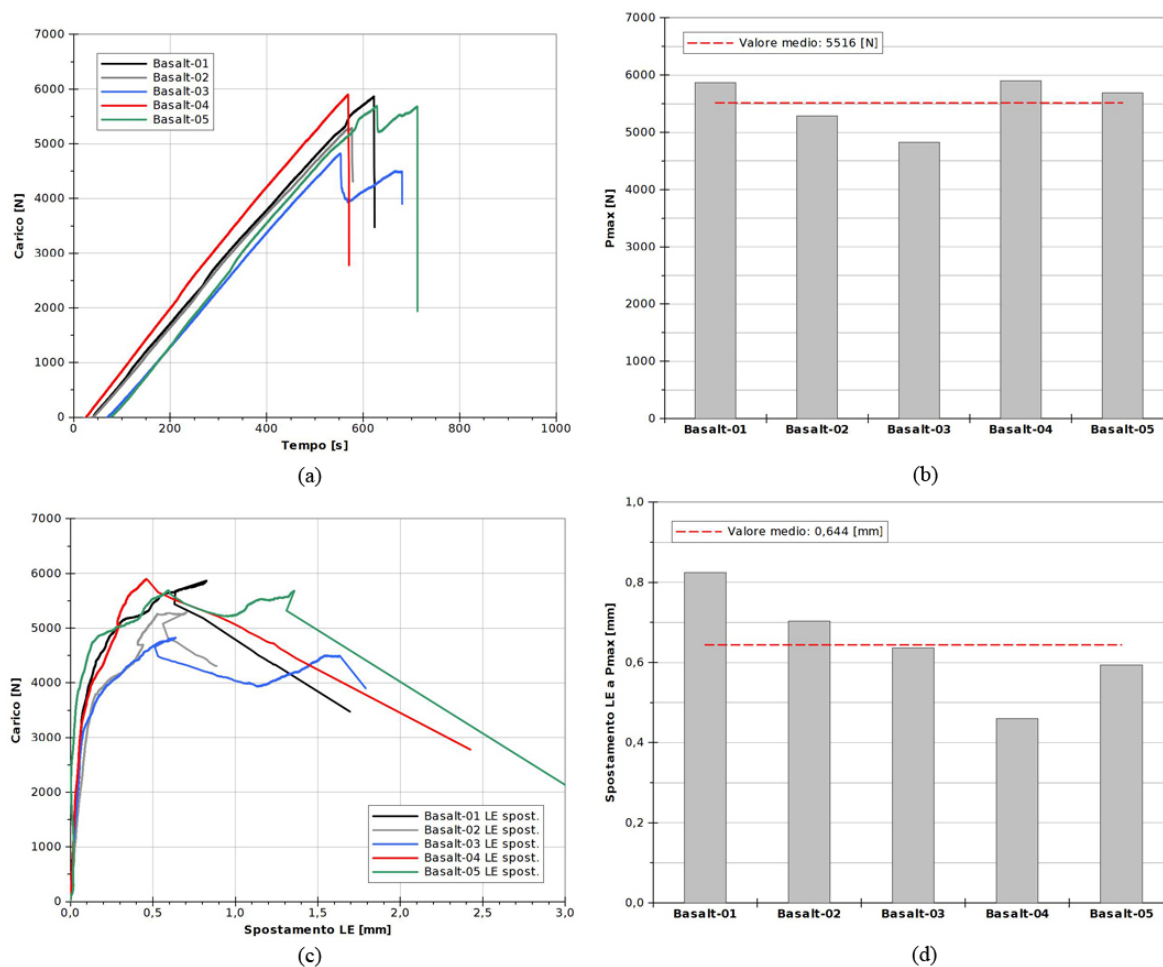


Figura 5.21: Prove di adesione su mattone: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto.

Tabella 5.14: Prove di adesione su mattone: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto.

Campione	P_{max} [N]	$\delta_{LE} \text{ a } P_{max}$ [mm]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_{t,ds}}$ [%]
Basalt-01	5868	0.825	838.3	46.3%	49.3%
Basalt-02	5291	0.703	755.9	41.7%	44.5%
Basalt-03	4828	0.637	689.7	38.1%	40.6%
Basalt-04	5900	0.460	842.9	46.5%	49.6%
Basalt-05	5695	0.594	813.5	44.9%	47.9%
valori medi	5516	0.644	788.1	43.5%	46.4%
dev. stand.	455	0.135	65.0	3.6%	3.8%
CoV	8.24%	20.93%	8.25%	8.25%	8.25%

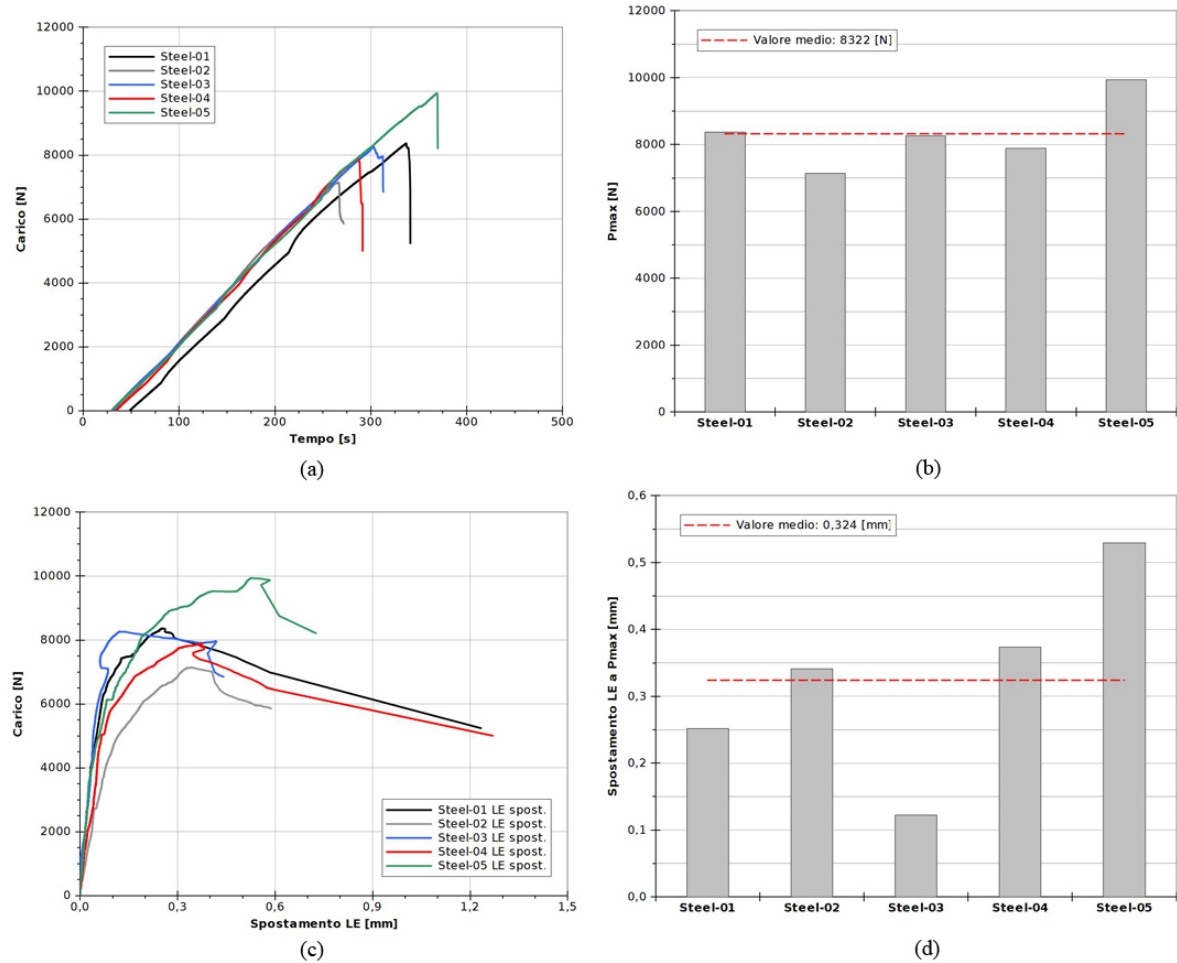


Figura 5.22: Prove di adesione su mattone: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio.

Tabella 5.15: Prove di adesione su mattone: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio.

Campione	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_{t,ds}}$ [%]
Steel-01	8367	0.252	737.1	24.2%	24.0%
Steel-02	7143	0.341	629.3	20.6%	20.5%
Steel-03	8267	0.122	728.4	23.9%	23.7%
Steel-04	7894	0.374	695.5	22.8%	22.7%
Steel-05	9940	0.529	875.8	28.7%	28.5%
valori medi	8322	0.324	733.2	24.0%	23.9%
dev. stand.	1024	0.151	90.2	3.0%	2.9%
CoV	12.31%	46.54%	12.31%	12.31%	12.31%

5.3.4 Deformazioni e rigidzze

A tutti e venti i campioni testati sono stati applicati quattro estensimetri (strain-gauges) per la misurazione delle deformazioni assiali nella direzione di applicazione del carico, tre di questi sono stati incollati nella zona di adesione, equispaziati di 40 mm, l'ultimo è stato applicato sulla parte di rinforzo libera, ossia non adesa al mattone. Per individuare univocamente la posizione di ogni estensimetro è stato scelto un asse di riferimento con l'origine posta all'inizio dell'area di incollaggio, all'estremità non caricata (UE), e direzione e verso concordi con quelle di applicazione del carico, la Figura 5.23 mostra la disposizione geometrica degli strain-gauges e dell'asse di riferimento scelto. La deformazione all'estremità non caricata, ossia nella posizione $x = 0$, è stata ipotizzata nulla, mentre per la deformazione della striscia di rinforzo libera si è ipotizzato un valore uniforme lungo tutta la sua lunghezza e pari a quello registrato dall'unico estensimetro presente, secondo questa ipotesi, quindi, la deformazione in $x = 160\text{mm}$, ossia quella dell'inizio della zona di adesione all'estremità caricata (LE), è da considerarsi uguale a quella in $x = 230$, posizione reale di applicazione dell'estensimetro.

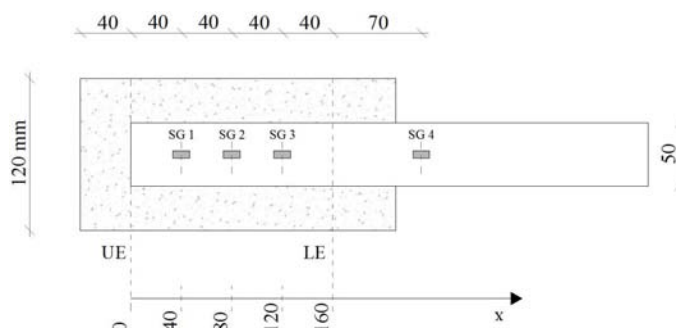


Figura 5.23: Prove di adesione su mattone: schema della disposizione degli strain-gauges e sistema di riferimento adottato.

Con i valori di deformazione ottenuti durante le prove, e individuando la posizione di ogni estensimetro nel modo appena descritto, sono stati realizzati dei grafici che mostrano, per ogni provino e considerando valori di deformazioni relativi a determinate percentuali di carico massimo, lo stato di deformazione nei punti di applicazione degli strumenti. La Figura 5.24 mostra un esempio di questi diagrammi, relativi a quattro provini diversi per tipologia di rinforzo; come si può notare gli andamenti delle curve sono molto simili, l'unico aspetto che differenzia il comportamento deformativo delle strisce di rinforzo sembra essere il tipo di composito utilizzato, più questo è rigido minori sono le deformazioni registrate.

Negli istogrammi di Figura 5.25 sono rappresentati i valori di deformazione dell'estremità caricata in corrispondenza del carico massimo, i provini rinforzati con fibre di vetro hanno subito una deformazione media dello 0,91% con un coefficiente di variazione del 14,98%, quelli con fibra di basalto una deformazione media dello 0,89% con un coefficiente di variazione del 17,41%, quelli con fibra di carbonio una deformazione media del 0,54% con un coefficiente di variazione del 8,97% e, infine, i provini rinforzati con fibre di acciaio hanno subito una deformazione media del 0,29% con un coefficiente di variazione del 18,02%. Anche in questo caso si può notare che compositi con caratteristiche meccaniche simili, come vetro e basalto, hanno comportamenti simili.

Con le letture ottenute dagli estensimetri applicati nelle zone libere di composito è stato calcolato, per ogni provino e con le modalità descritte all'inizio del capitolo, una stima del modulo elastico $E_{f,sg}$, in Figura 5.26 sono mostrati gli istogrammi con i valori ottenuti;

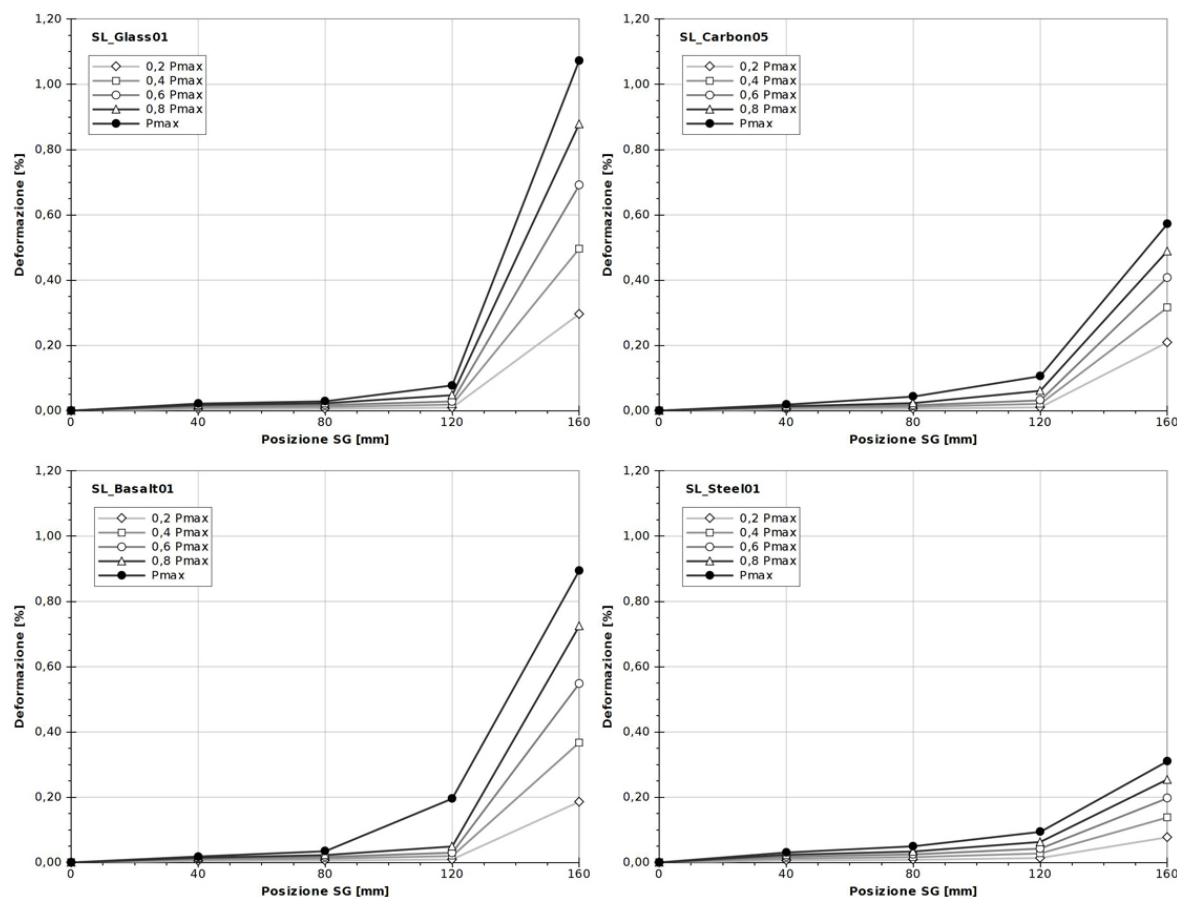


Figura 5.24: Prove di adesione su mattone: esempi di profili di deformazione per le quattro tipologie di rinforzo.

come si può vedere i valori sono abbastanza uniformi, per stessa tipologia di rinforzo, e non si discostano molto da quelli ottenuti durante la caratterizzazione meccanica.

Le Tabelle da 5.16 a 5.19 riportano, per ognuno dei quattro tipi di rinforzo utilizzato, i valori di deformazioni e rigidzze calcolati per ogni campione testato.

Tabella 5.16: Prove di adesione su mattone: valori relativi a deformazioni e rigidzze dei campioni rinforzati con fibra di vetro.

Campione	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	Rigidezza assiale $E_{f,sg} \cdot t_f$
Glass-01	5515	1.07%	95055	11407
Glass-02	4238	0.75%	93724	11247
Glass-03	5533	1.03%	90238	10829
Glass-04	5613	0.85%	104504	12540
Glass-05	4240	0.83%	88098	10572
valori medi	5028	0.91%	94324	11319
dev. stand.	721	0.14%	6324	759
CoV	14.34%	14.98%	6.70%	6.70%

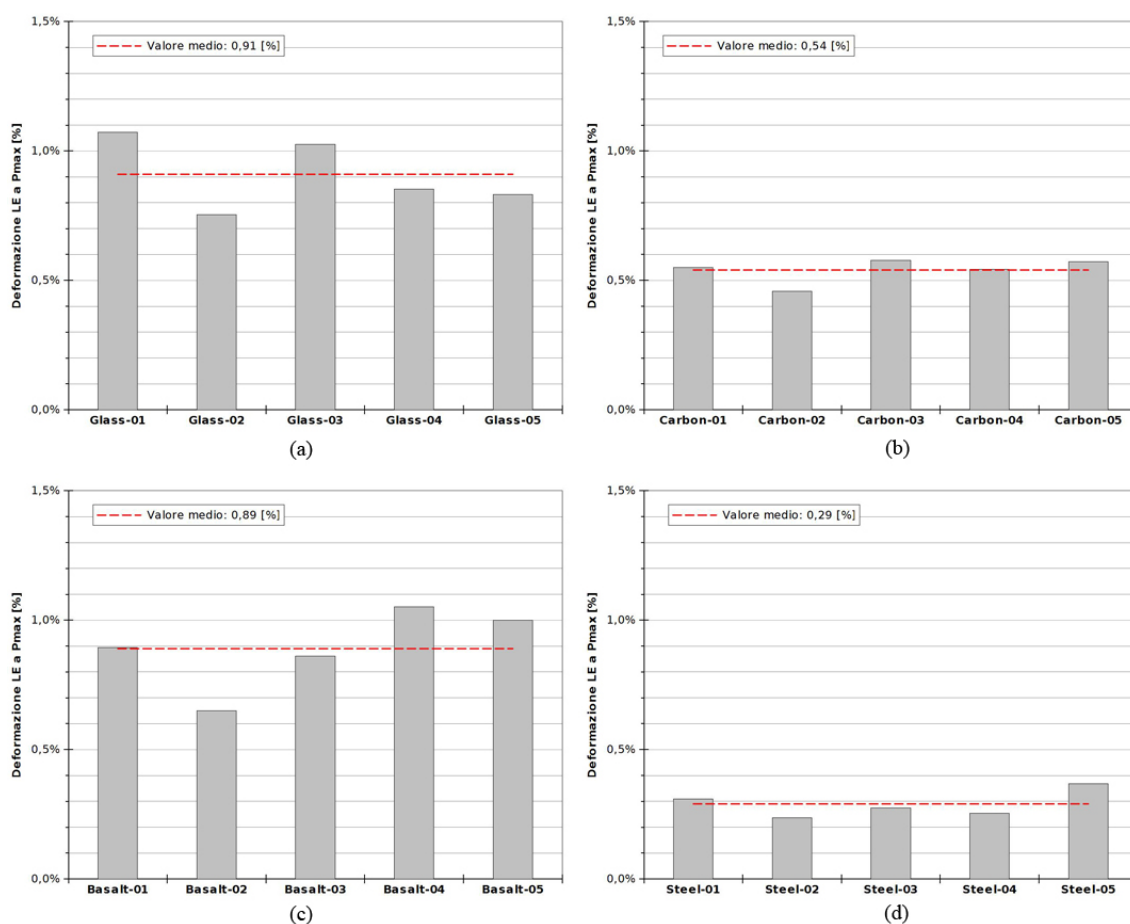


Figura 5.25: Prove di adesione su mattone: deformazioni dell'estremità caricata corrispondenti al carico massimo.

Tabella 5.17: Prove di adesione su mattone: valori relativi a deformazioni e rigidzze dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.

Campione	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	Rigidzza assiale $E_{f,sg} \cdot t_f$
Carbon-01	7833	0.55%	259705	44150
Carbon-02	7891	0.46%	201805	34307
Carbon-03	6971	0.58%	160273	27246
Carbon-04	7796	0.54%	220627	37507
Carbon-05	7223	0.57%	179180	30461
valori medi	7543	0.54%	204318	34734
dev. stand.	418	0.05%	38445	6536
CoV	5.54%	8.97%	18.82%	18.82%

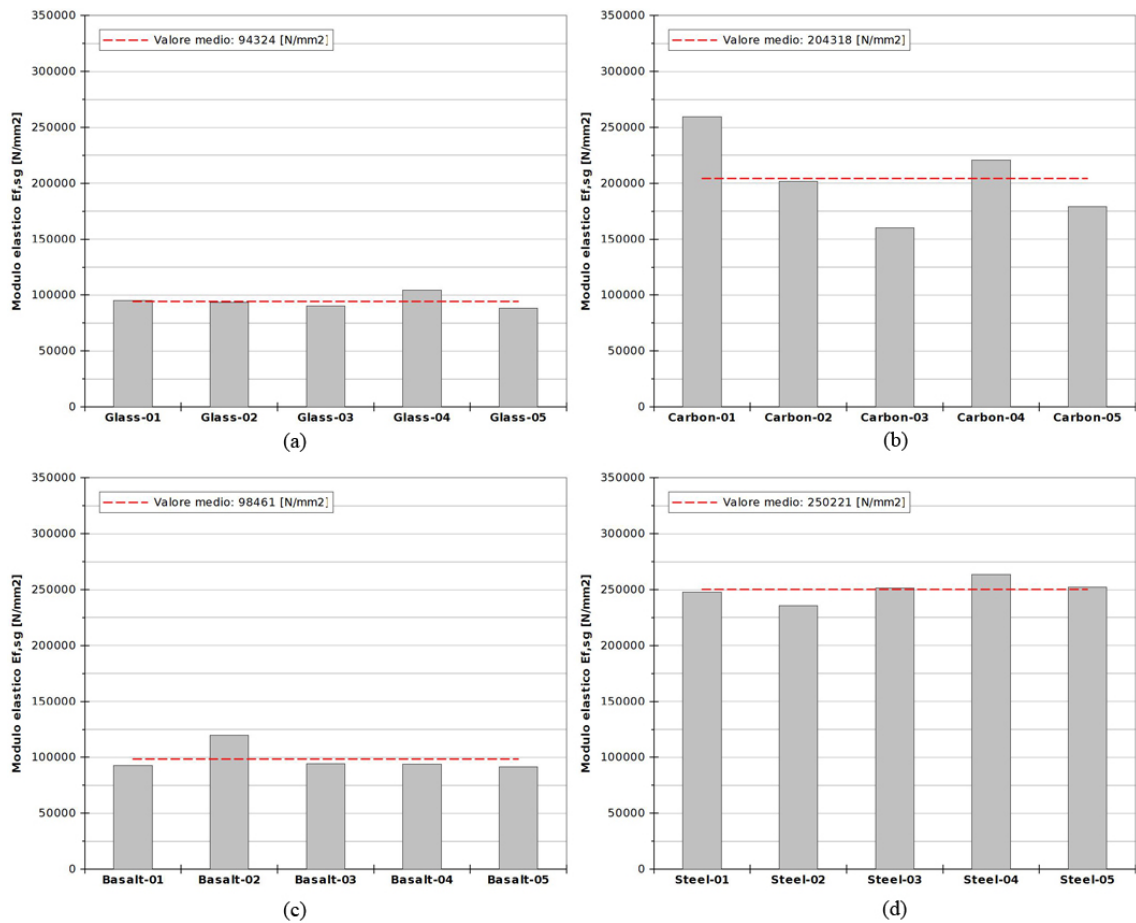


Figura 5.26: Prove di adesione su mattone: moduli elastici calcolati durante le prove di adesione.

Tabella 5.18: Prove di adesione su mattone: valori relativi a deformazioni e rigidezze dei campioni rinforzati con fibra di basalto.

Campione	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	$E_{f,sg}$ [N/mm^2]	Rigidezza assiale $E_{f,sg} \cdot t_f$
Basalt-01	5868	0.89%	92867	13001
Basalt-02	5291	0.65%	119982	16797
Basalt-03	4828	0.86%	94333	13207
Basalt-04	5900	1.05%	93745	13124
Basalt-05	5695	1.00%	91379	12793
valori medi	5516	0.89%	98461	13785
dev. stand.	455	0.16%	12082	1691
CoV	8.24%	17.41%	12.27%	12.27%

5.3.5 Energia di frattura

Utilizzando l'espressione (5.2) sono state calcolate, per ogni campione testato, tre stime dell'energia di frattura che si differenziano per il valore di modulo elastico utilizzato nel

Tabella 5.19: Prove di adesione su mattone: valori relativi a deformazioni e rigidezze dei campioni rinforzati con fibra di acciaio.

Campione	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	Rigidezza assiale $E_{f,sg} \cdot t_f$
Steel-01	8367	0.31%	247849	56262
Steel-02	7143	0.24%	235689	53501
Steel-03	8267	0.28%	251577	57108
Steel-04	7894	0.25%	263579	59832
Steel-05	9940	0.37%	252411	57297
valori medi	8322	0.29%	250221	56800
dev. stand.	1024	0.05%	10023	2275
CoV	12.31%	18.02%	4.01%	4.01%

calcolo, come già detto all'inizio del capitolo. In Tabella 5.20 sono raccolti i risultati, per ogni campione, di tutte e tre le stime, mentre la Figura 5.27 mostra gli istogrammi relativi all'energia di frattura denominata $G_{f,sg}$, ossia quella calcolata utilizzando il modulo elastico $E_{f,sg}$.

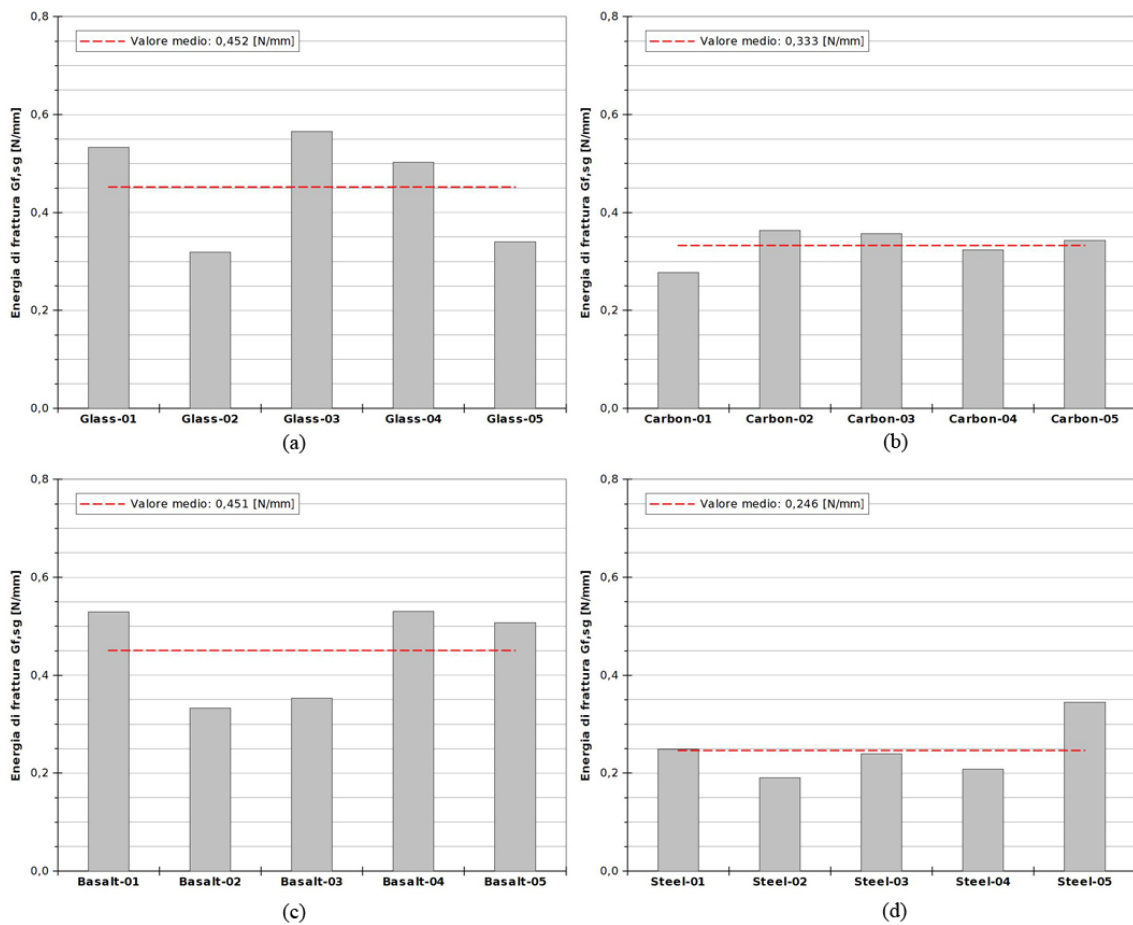


Figura 5.27: Prove di adesione su mattone: energia di frattura, $G_{f,sg}$.

Tabella 5.20: Prove di adesione su mattone: energia di frattura.

Campione	P_{max} [N]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
Glass-01	5515	80124	70000	95055	0.633	0.724	0.533
Glass-02	4238	80124	70000	93724	0.374	0.428	0.319
Glass-03	5533	80124	70000	90238	0.637	0.729	0.565
Glass-04	5613	80124	70000	104504	0.655	0.750	0.503
Glass-05	4240	80124	70000	88098	0.374	0.428	0.340
valori medi	5028			94324	0.534	0.612	0.452
dev. stand.	721			6324	0.147	0.168	0.114
CoV	14.34%			6.70%	27.49%	27.49%	25.24%
Carbon-01	7833	241015	220000	259705	0.299	0.328	0.278
Carbon-02	7891	241015	220000	201805	0.304	0.333	0.363
Carbon-03	6971	241015	220000	160273	0.237	0.260	0.357
Carbon-04	7796	241015	220000	220627	0.297	0.325	0.324
Carbon-05	7223	241015	220000	179180	0.255	0.279	0.343
valori medi	7543			204318	0.278	0.305	0.333
dev. stand.	418			38445	0.030	0.033	0.034
CoV	5.54%			18.82%	10.91%	10.91%	10.26%
Basalt-01	5868	86832	80000	92867	0.567	0.615	0.530
Basalt-02	5291	86832	80000	119982	0.461	0.500	0.333
Basalt-03	4828	86832	80000	94333	0.383	0.416	0.353
Basalt-04	5900	86832	80000	93745	0.573	0.622	0.531
Basalt-05	5695	86832	80000	91379	0.534	0.579	0.507
valori medi	5516			98461	0.503	0.546	0.451
dev. stand.	455			12082	0.081	0.087	0.099
CoV	8.24%			12.27%	15.99%	15.99%	21.94%
Steel-01	8367	200020	190000	247849	0.308	0.325	0.249
Steel-02	7143	200020	190000	235689	0.225	0.237	0.191
Steel-03	8267	200020	190000	251577	0.301	0.317	0.239
Steel-04	7894	200020	190000	263579	0.274	0.289	0.208
Steel-05	9940	200020	190000	252411	0.435	0.458	0.345
valori medi	8322			250221	0.309	0.325	0.246
dev. stand.	1024			10023	0.078	0.082	0.060
CoV	12.31%			4.01%	25.24%	25.24%	24.27%

5.4 Prove di adesione su blocchi di malta

Su supporti realizzati con blocchi di malta T30V sono state eseguite 6 prove di aderenza, 3 con rinforzo in fibra di vetro e le rimanenti con fibra di carbonio. Tutti i campioni prevedevano l'ancoraggio finale del rinforzo, ottenuto arrotondando lo spigolo inferiore del blocco di malta e risvoltando il tessuto alla base; la larghezza delle striscie di rinforzo (b_f) è stata, per tutti i campioni, pari a 50 mm, mentre la lunghezza di adesione (L_a) è stata scelta pari a 210 mm per le fibre di vetro e 220 mm per quelle in carbonio.

La strumentazione dei campioni con fibre di vetro comprendeva 5 strain-gauges, di cui uno applicato sul composito libero, e due potenziometri, uno installato all'estremità caricata (LE) e il secondo, vista l'impossibilità, dovuta all'ancoraggio, di misurare lo scorrimento dell'estremità non caricata, è stato posto in asse all'ultimo estensimetro. Nei 3 campioni con fibre di carbonio solo uno è stato strumentato con estensimetri, in questo campione ne sono stati applicati 6, di cui uno sulla porzione libera, mentre i potenziometri utilizzati sono stati 4, due all'estremità caricata e due in corrispondenza dell'ultimo estensimetro, gli scorrimenti sono stati poi calcolati come media delle letture di ogni coppia. La Figura 5.28 mostra le geometrie delle due tipologie di provino utilizzati.

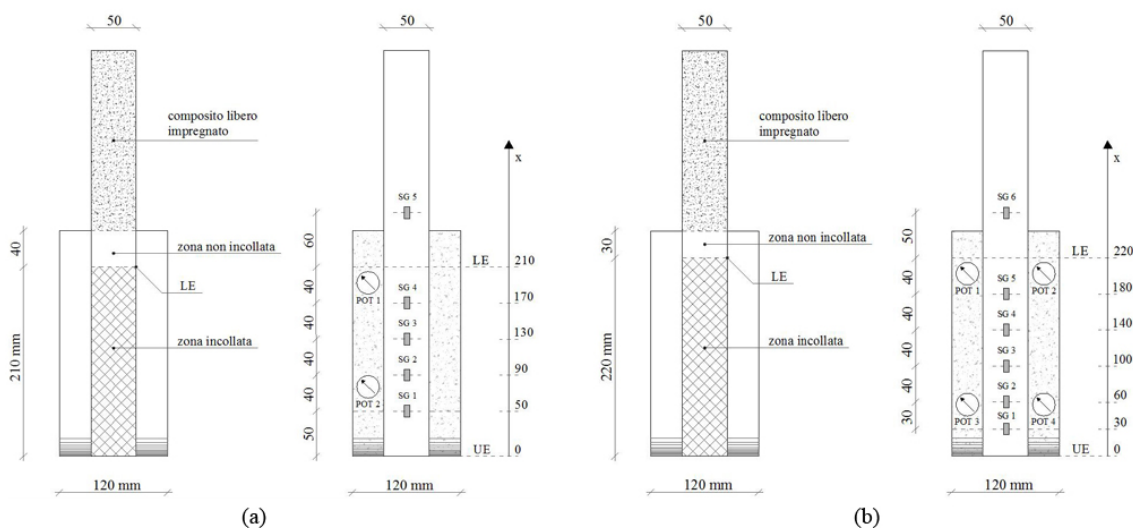


Figura 5.28: Prove di adesione su blocchi di malta: tipologie di provino utilizzate, (a) con fibre di vetro, (b) con fibre di carbonio.

I provini sono stati posti all'interno dell'apparato di prova interponendo, tra le facce inferiori e superiori del blocco di malta e le piastre metalliche di ritenzione, delle tavolette di compensato da 5 mm, questa scelta si è resa utile sia per facilitare l'allineamento del provino all'apparato di prova, operazione che si è rivelata molto complicata, sia per migliorare il contatto e quindi la distribuzione delle tensioni sul blocco di malta. Nonostante questi accorgimenti la bassa resistenza meccanica della malta ha creato qualche problema, infatti, anche applicando basse coppie di serraggio ai bulloni del sistema di piastre di ritenzione, alcuni provini hanno subito delle lesioni.

Per tutte le prove è stata utilizzata la macchina universale Galdabini Sun60, l'applicazione del carico è stata controllata imponendo una velocità di spostamento costante alla traversa superiore pari a 0,3 mm/min e i dati sono stati registrati con una frequenza di acquisizione di 10 Hz.

La Tabella 5.21 mostra il programma delle prove di adesione su blocchi di malta; le prove evidenziate dal carattere “grassetto” saranno trattate nel seguito, per le altre si consulti l’Appendice B.

Tabella 5.21: Programma sperimentale delle prove di adesione su blocchi di malta.

Substrato	Codice campione	Tipologia di rinforzo		Lunghezza di adesione [mm]		Strain gauges	
		GFRP	CFRP	210anc	220anc	SI	NO
malta	malta-G-01f	*		*		*	
	malta-G-2f	*		*		*	
	malta-G-03f	*		*		*	
	malta-C-01		*		*		*
	malta-C-03		*		*	*	
	malta-C-05		*		*		*

5.4.1 Descrizione di alcune prove significative

5.4.1.1 Malta-G-02f

Avviata la prova il carico è aumentato in modo abbastanza regolare fino ad un valore massimo di 2394 N , raggiunto il quale i distacchi hanno interessato rapidamente l’intera zona di adesione, con contemporaneo aumento improvviso di spostamenti e deformazioni. Avvenuto il completo distacco del rinforzo la prova è continuata con l’attivazione del meccanismo di ancoraggio fino ad essere fermata manualmente a circa 3000 N , in modo da evitare il cedimento per rottura della fibra di rinforzo o dell’ancoraggio e di conseguenza inutili danni alle strumentazioni.

Tabella 5.22: Campione Malta-G-02f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	210	80124	70000	1141	1400

Analizzando la superficie di rottura (Fig. 5.31b) si può vedere come questa si sia generata all’interno del blocco di malta, con l’asportazione di uno strato abbastanza omogeneo di materiale, da notare, inoltre, il distacco di una porzione cuneiforme di substrato in prossimità dell’estremità caricata. Lo spessore dello strato di malta asportato è di alcuni millimetri, confrontando questo spessore con quelli delle prove di adesione su mattone si nota subito che questi ultimi erano minori, la spiegazione si può ricercare facilmente nella maggiore porosità della malta e quindi nella maggiore penetrazione della resina durante l’impregnazione delle fibre. In Tabella 5.23 sono riportati i principali valori delle grandezze misurate durante la prova.

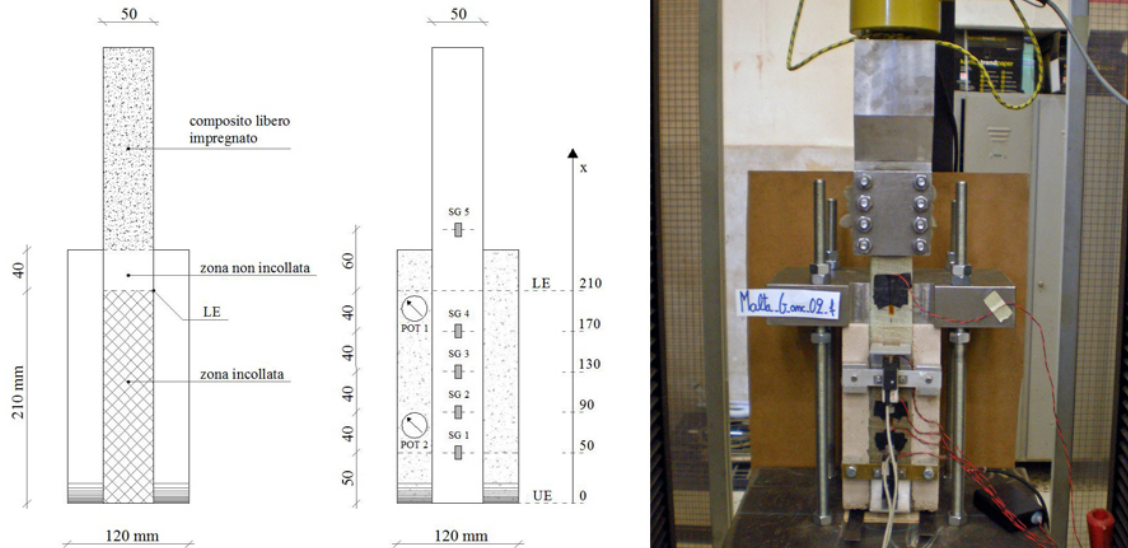


Figura 5.29: Campione Malta-G-02f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 5.23: Campione Malta-G-02f: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	2394	0.43%	0.316	93234	0.119	0.136	0.102

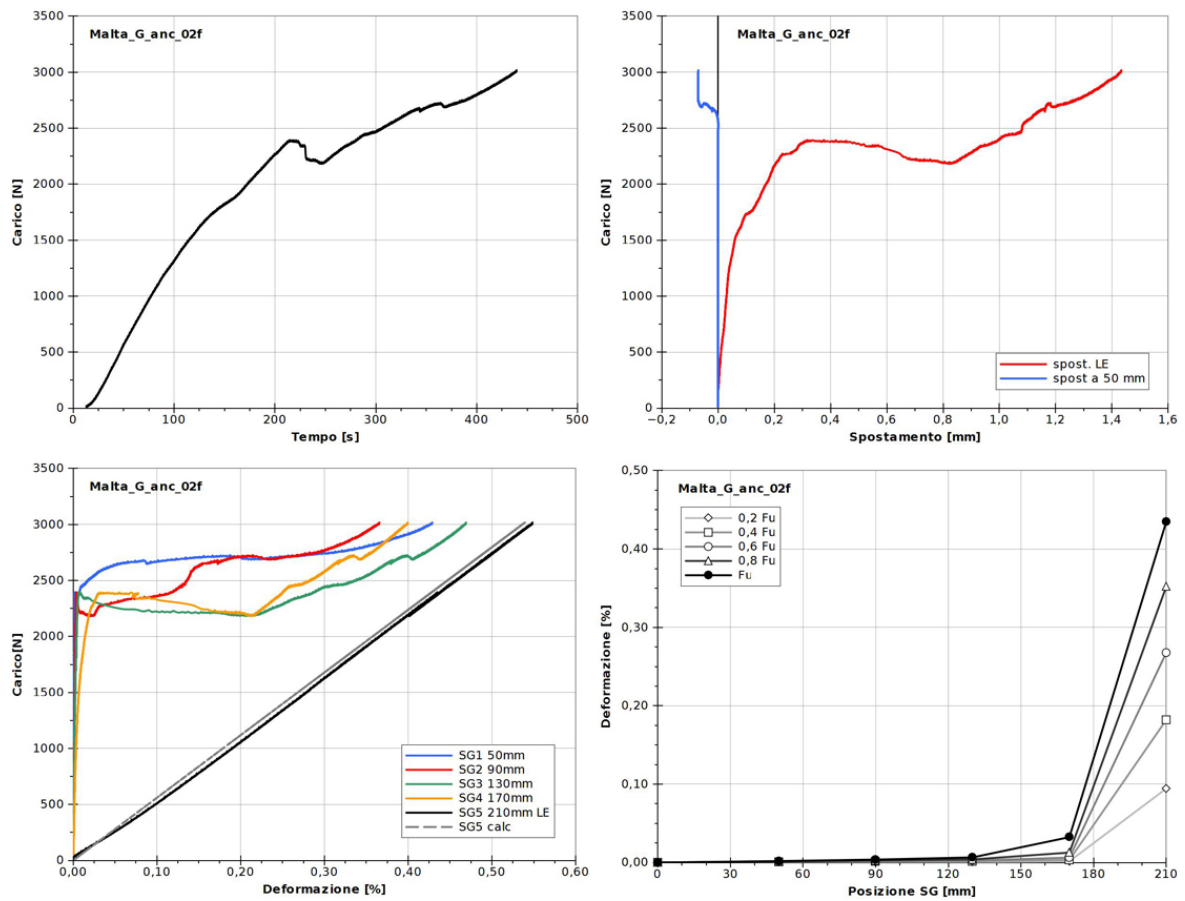


Figura 5.30: Campione Malta-G-02f: grafici delle principali grandezze analizzate.

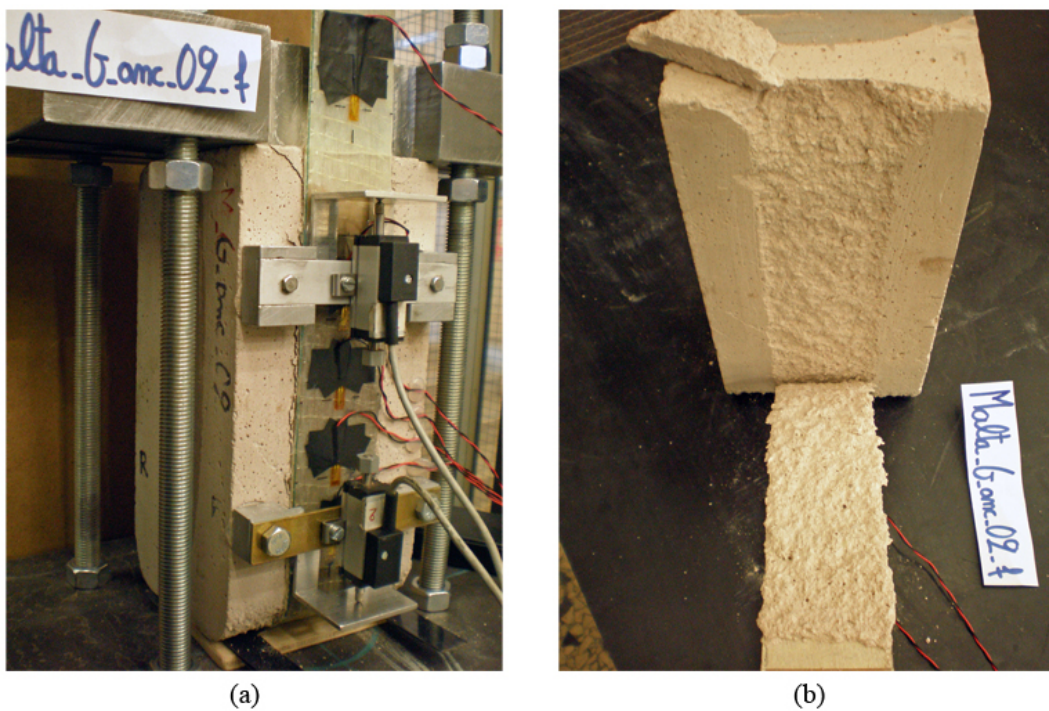


Figura 5.31: Campione Malta-G-02f: campione dopo la rottura.

5.4.1.2 Malta-C-03

Avviata la prova il carico è aumentato con un andamento lineare fino ad un valore pari a 3917 N, raggiunto il quale si è verificato il distacco del rinforzo in modo abbastanza veloce e senza grosse oscillazioni nei valori di carico; a distacco completato la prova è proseguita grazie all'ancoraggio per poi essere fermata a circa 5300 N. Deformazioni e spostamenti presentano anch'essi un primo tratto rappresentato da una relazione di tipo elastico lineare che caratterizza il comportamento del materiale composito e quello all'interfaccia tra i due elementi; in corrispondenza dell'inizio della progressiva perdita di aderenza i valori aumentano fino al completo distacco, avvenuto il quale, vista la presenza di ancoraggio, l'andamento ritorna a essere essenzialmente lineare, con letture di spostamento anche da parte dei potenziometri applicati all'estremità non caricata.

Tabella 5.24: Campione Malta-C-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	220	241015	220000	2889	3500

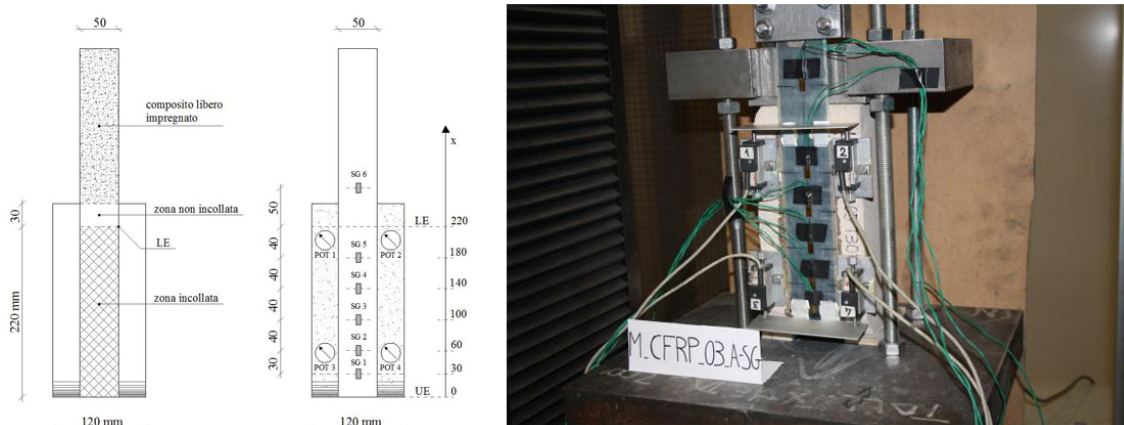


Figura 5.32: Campione Malta-C-03: geometria del provino e apparato di prova.

Osservando la Figura 5.34 si può vedere che, anche in questo caso, la superficie di rottura è contenuta nel substrato di malta, con l'asportazione di uno strato di materiale abbastanza omogeneo dello spessore di alcuni millimetri.

Tabella 5.25: Campione Malta-C-03: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	3917	0.19%	0.407	246169	0.075	0.082	0.073

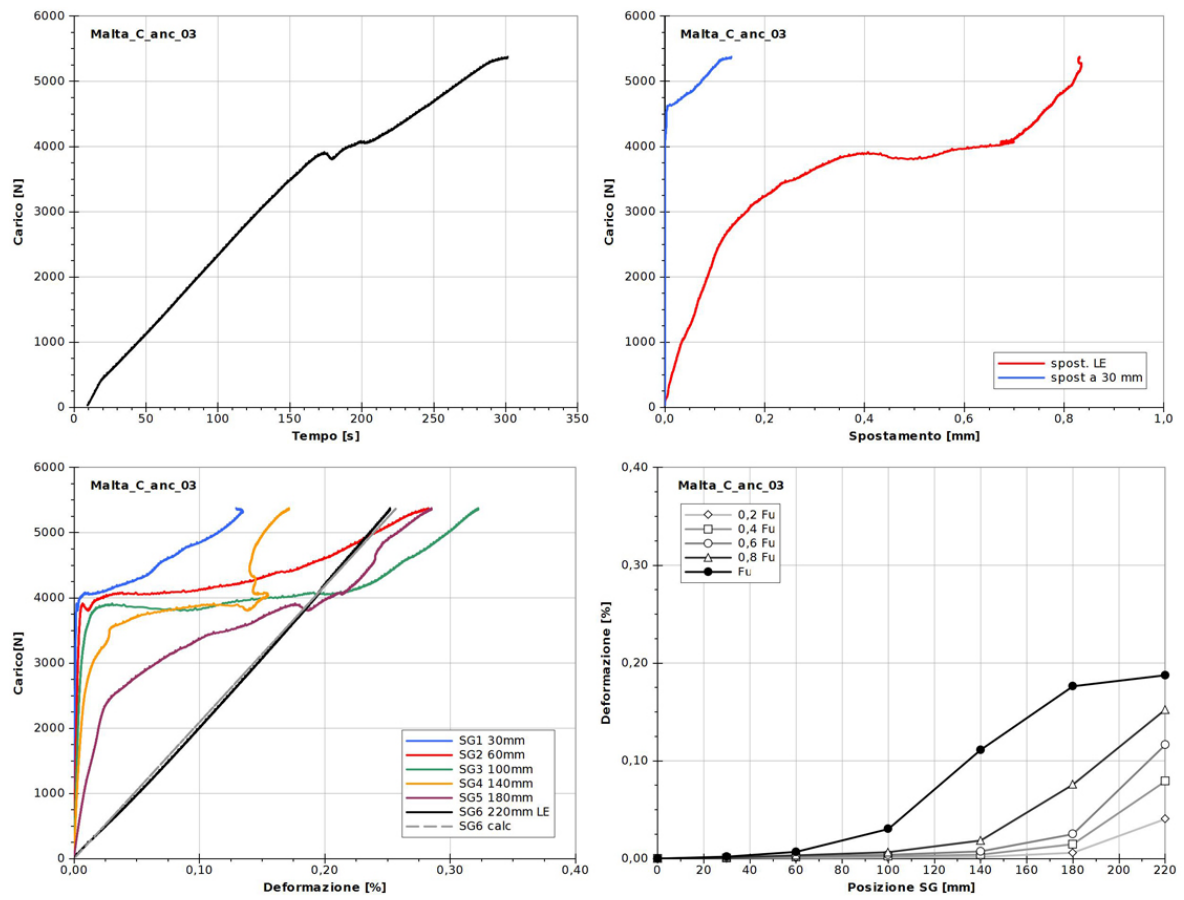


Figura 5.33: Campione Malta-C-03: grafici delle principali grandezze analizzate.

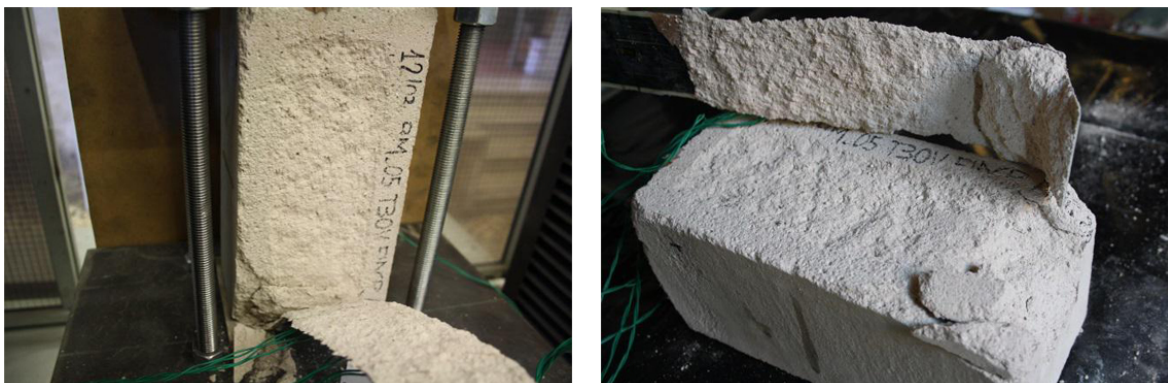


Figura 5.34: Campione Malta-C-03: campione dopo la rottura.

5.4.2 Modalità di rottura

In tutti e sei i provini la rottura si è prodotta all'interno del blocco di malta, con l'asportazione di uno strato di materiale, lo spessore è risultato abbastanza omogeneo in alcuni provini, tenuto conto delle dimensioni degli inerti costituenti la malta, mentre in altri lo spessore dello strato asportato è risultato meno uniforme con un sensibile ispessimento nelle zone di estremità; in particolare, nel caso dei campioni rinforzati con fibre di carbonio, lo strato di malta rimasto adeso al composito in corrispondenza dell'ancoraggio è risultato di notevole spessore. In Figura 5.35 sono raccolte alcune immagini di esempio delle rotture riscontrate.



Figura 5.35: Prove di adesione su blocchi di malta: esempi di rotture riscontrate.

5.4.3 Resistenze e spostamenti

I primi parametri di ricerca ricavati dall'analisi dei dati di ogni campione sono stati il carico massimo sopportato e il rispettivo spostamento relativo, tra striscia di rinforzo e supporto,

misurato all'estremità caricata, all'inizio della zona di incollaggio. In questo caso, vista la presenza di ancoraggio finale delle strisce di rinforzo, il carico massimo P_{max} non è stato determinato come valore massimo fra quelli registrati dalla cella di carico ma come il valore massimo raggiunto prima dell'inizio della delaminazione del composito dal substrato. Con il valore di carico massimo, e disponendo dei dati relativi allo spessore e alla larghezza della striscia di rinforzo, è stato possibile calcolare la tensione massima $\sigma_{f,max}$ nelle strisce di rinforzo.

I campioni rinforzati con fibra di vetro hanno fatto registrare un valore di carico massimo medio pari a 2443 N con un coefficiente di variazione del 13,24%, lo spostamento medio dell'estremità caricata è stato di 0,294 mm con un coefficiente di variazione del 22,23%. In Tabella 5.26 e in Figura 5.36 sono raccolti valori e diagrammi relativi alle prove con fibre di vetro.

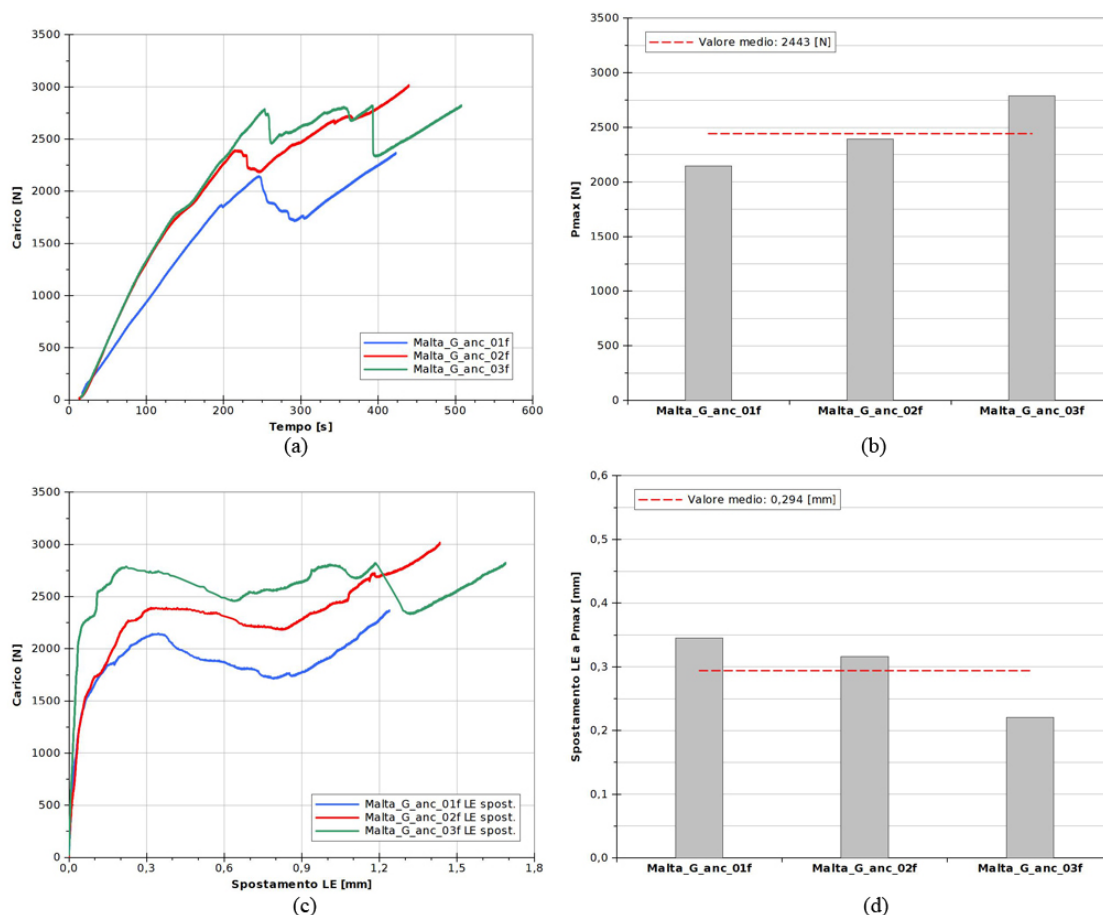


Figura 5.36: Prove di adesione su blocchi di malta: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro.

I campioni rinforzati con fibra di carbonio hanno fatto registrare un valore di carico massimo medio pari a 4342 N con un coefficiente di variazione del 10,29%, anche in questo caso la maggiore rigidità delle fibre di carbonio rispetto a quelle di vetro ha determinato carichi ultimi sensibilmente maggiori. Lo spostamento medio all'estremità caricata è stato pari a 0,488 mm con un coefficiente di variazione del 33,26%. In Tabella 5.27 e in Figura 5.37 sono raccolti valori e diagrammi relativi alle prove con fibre di carbonio.

Tabella 5.26: Prove di adesione su blocchi di malta: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro.

Campione	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_{t,d,s}}$ [%]
Malta-G-anc-01f	2147	0.345	357.9	31.4%	25.6%
Malta-G-anc-02f	2394	0.316	399.0	35.0%	28.5%
Malta-G-anc-03f	2789	0.220	464.8	40.7%	33.2%
valori medi	2443	0.294	407.2	35.7%	29.1%
dev. stand.	323	0.065	53.9	4.7%	3.9%
CoV	13.24%	22.23%	13.24%	13.24%	13.24%

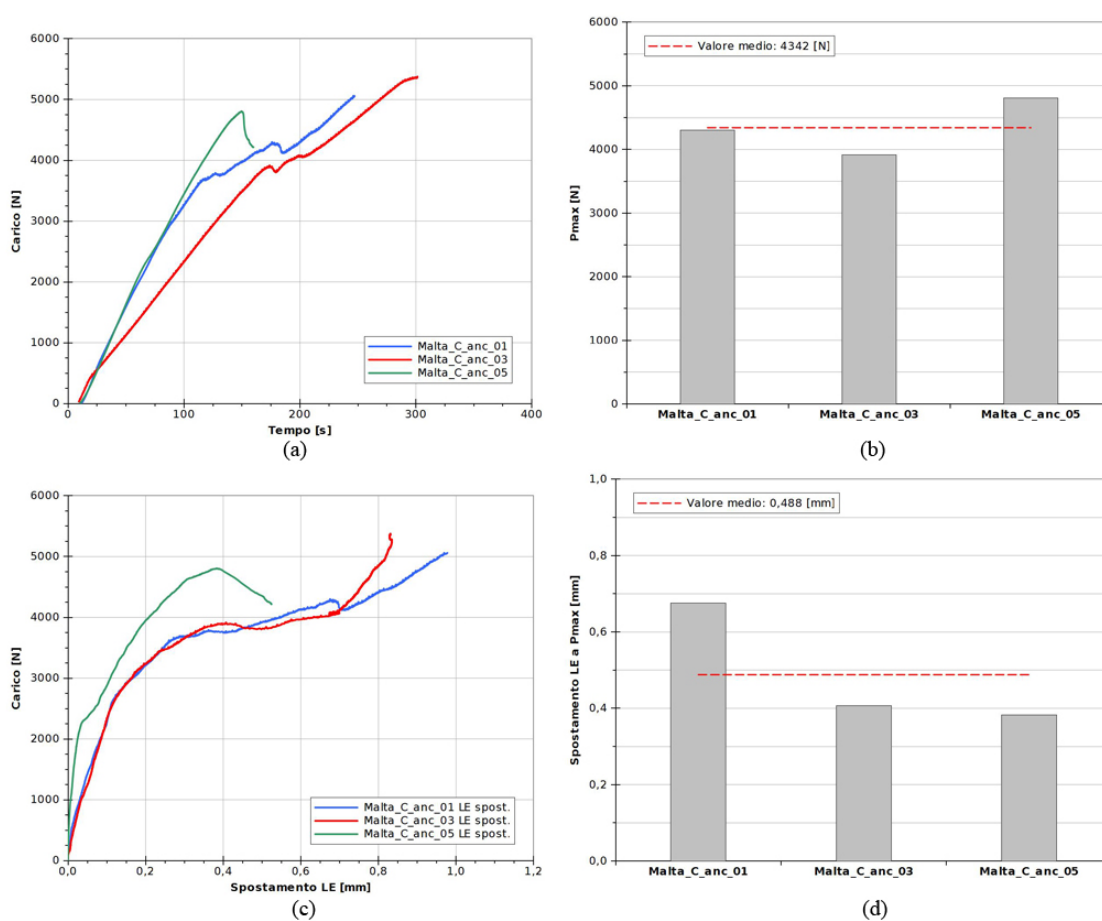


Figura 5.37: Prove di adesione su blocchi di malta: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.

5.4.4 Deformazioni e rigidizze

Ai tre campioni rinforzati con fibre di vetro sono stati applicati 5 strain-gauges per la misurazione delle deformazioni assiali nella direzione di applicazione del carico, quattro di questi sono stati incollati nella zona di adesione, equispaziati di 40 mm l'uno dall'altro,

Tabella 5.27: Prove di adesione su blocchi di malta: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.

Campione	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_{t,ds}}$ [%]
Malta-C-anc-01	4302	0.676	506.1	17.5%	14.5%
Malta-C-anc-03	3917	0.407	460.8	15.9%	13.2%
Malta-C-anc-05	4808	0.383	565.6	19.6%	16.2%
valori medi	4342	0.488	510.8	17.7%	14.6%
dev. stand.	447	0.162	52.6	1.8%	1.5%
CoV	10.29%	33.26%	10.29%	10.29%	10.29%

l'ultimo è stato applicato sulla parte di rinforzo libera. Dei campioni rinforzati con fibre di carbonio solo uno è stato strumentato con strain-gauges, in questo caso gli estensimetri erano in totale 6, cinque nella zona di adesione e uno in quella libera. La Figura 5.38 mostra, nei due casi, la disposizione geometrica degli estensimetri e dell'asse di riferimento scelto per individuare la posizione di ognuno. La deformazione all'estremità non caricata, ossia nella posizione $x = 0$, è stata ipotizzata nulla, mentre la deformazione all'estremità caricata (LE) è stata assunta pari a quella misurata sulla parte di rinforzo libera.

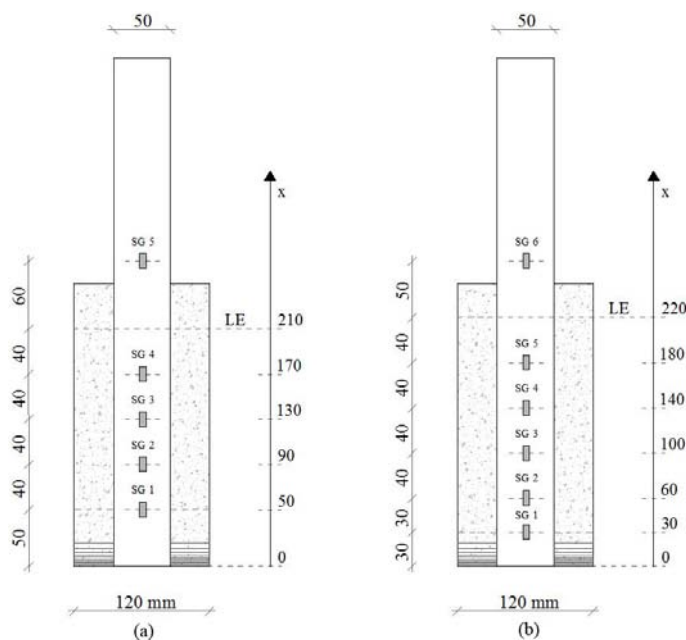


Figura 5.38: Prove di adesione su blocchi di malta: schema della disposizione degli strain-gauges e sistema di riferimento adottato, (a) per rinforzo in fibra di vetro, (b) per rinforzo in fibra di carbonio.

Con i valori di deformazione ottenuti durante le prove sono stati realizzati dei grafici che mostrano, per ogni provino e considerando valori di deformazioni relativi a determinate percentuali di carico massimo, lo stato di deformazione della striscia di composito nei punti di applicazione degli strumenti. La Figura 5.39 mostra un esempio di questi diagrammi, relativi ad un campione con fibra di vetro e all'unico campione con fibra di carbonio; come

si può vedere, a parte la minor deformabilità del carbonio rispetto alle fibre di vetro, il comportamento deformativo delle strisce di rinforzo è sostanzialmente simile.

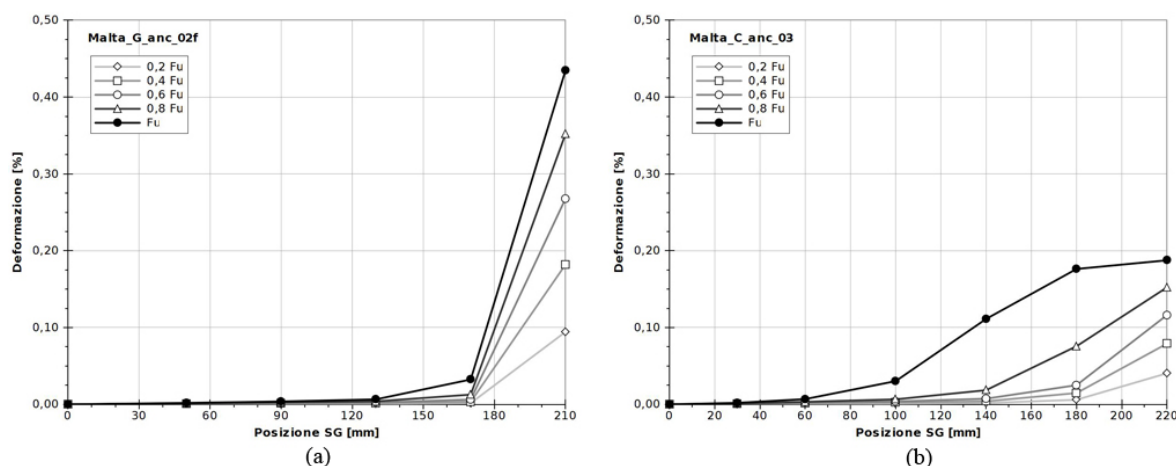


Figura 5.39: Prove di adesione su blocchi di malta: esempi di profili di deformazione, (a) fibre di vetro, (b) fibre di carbonio.

In Figura 5.40 sono rappresentati attraverso degli istogrammi i valori di deformazione, relativi all'estremità caricata in corrispondenza del carico massimo, e la stima del modulo elastico del composito $E_{f,sg}$ per i tre campioni rinforzati con fibra di vetro, nella Tabella 5.28 sono raccolti i valori numerici. I provini con fibre di vetro hanno subito una deformazione media all'estremità caricata pari allo 0,44%, il campione con fibre di carbonio una deformazione dello 0,19%.

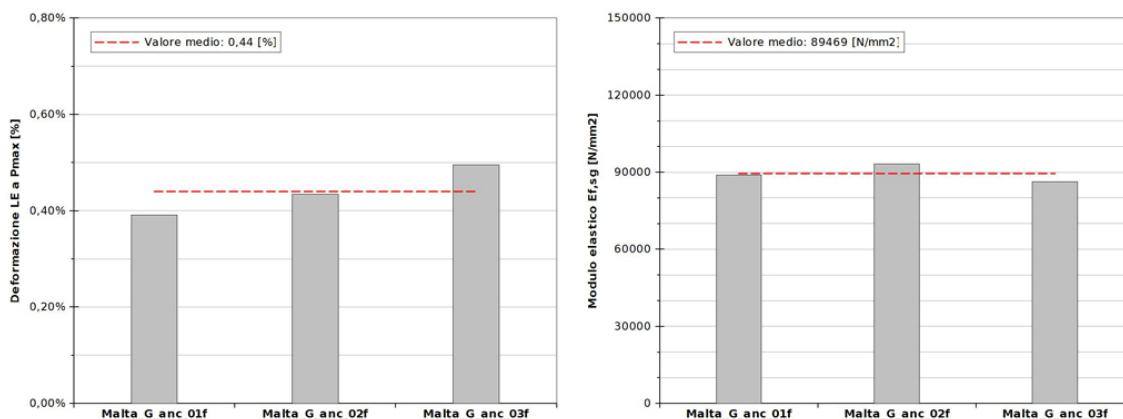


Figura 5.40: Prove di adesione su blocchi di malta: deformazioni dell'estremità caricata e moduli elastici dei campioni rinforzati con fibre di vetro.

5.4.5 Energia di frattura

Utilizzando l'espressione (5.2) sono state calcolate, per ogni campione testato, tre stime dell'energia di frattura che si differenziano per il valore di modulo elastico utilizzato nel calcolo. In Tabella 5.29 sono raccolti i valori, per ogni campione, di tutte e tre le stime, mentre la Figura 5.27 mostra gli istogrammi relativi all'energia di frattura denominata

Tabella 5.28: Prove di adesione su blocchi di malta: valori relativi a deformazioni e rigidezze.

Campione	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	Rigidezza assiale $E_{f,sg} \cdot t_f$
Malta-G-anc-01f	2147	0.39%	88814	10658
Malta-G-anc-02f	2394	0.43%	93234	11188
Malta-G-anc-03f	2789	0.49%	86361	10363
valori medi	2443	0.44%	89469	10736
dev. stand.	232	0.05%	3483	418
CoV	13.24%	11.86%	3.89%	3.89%
Malta-C-anc-03	3917	0.19%	246169	41849

$G_{f,sg}$, ossia quella calcolata utilizzando il modulo elastico $E_{f,sg}$, per i campioni rinforzati con fibre di vetro.

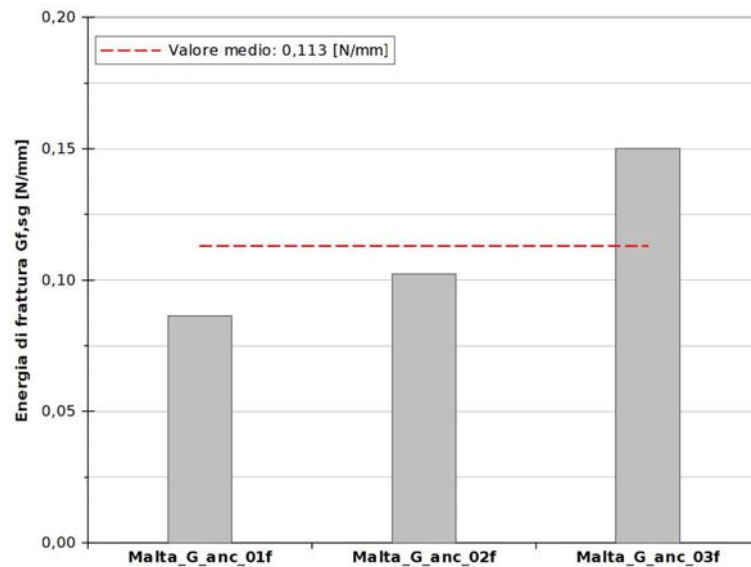


Figura 5.41: Prove di adesione su blocchi di malta: energia di frattura $G_{f,sg}$ dei campioni rinforzati con fibre di vetro.

Tabella 5.29: Prove di adesione su blocchi di malta: energia di frattura.

Campione	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
Malta-G-anc-01f	80124	70000	88814	0.096	0.110	0.087
Malta-G-anc-02f	80124	70000	93234	0.119	0.136	0.102
Malta-G-anc-03f	80124	70000	86361	0.162	0.185	0.150
	valori medi		89469	0.126	0.144	0.113
	deviazione standard		3483	0.033	0.038	0.033
	coefficiente di variazione		3.89%	26.57%	26.57%	29.25%
Malta-C-anc-01	241015	220000	-	0.090	0.099	-
Malta-C-anc-03	241015	220000	246169	0.075	0.082	0.073
Malta-C-anc-05	241015	220000	-	0.113	0.124	-
	valori medi			0.093	0.102	
	deviazione standard			0.019	0.021	
	coefficiente di variazione			20.59%	20.59%	

5.5 Prove di adesione su prismi murari

Su supporti costituiti da pilastri in muratura sono state eseguite in totale 30 prove che si differenziano per tipologia di rinforzo utilizzata e per lunghezza di adesione adottata (Fig. 5.42). Nei campioni in cui era previsto l'ancoraggio finale del rinforzo, questo è stato ottenuto arrotondando lo spigolo inferiore con un raggio di circa 20 mm e risvoltando il rinforzo fino alla base del prisma in muratura; per i campioni rinforzati con fibre di acciaio l'ancoraggio è stato effettuato incollando una piastra metallica sopra la parte terminale del rinforzo. In tutti i provini è stata lasciata una lunghezza non incollata di 55 mm , pari cioè all'altezza della testa di un mattone, per ridurre eventuali effetti di bordo.

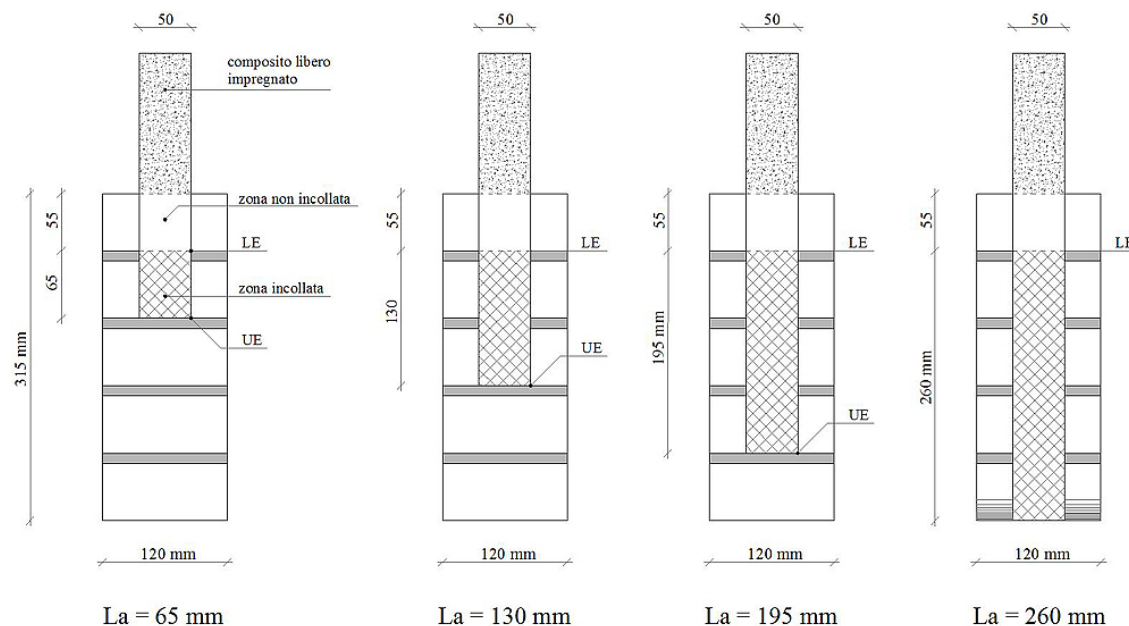


Figura 5.42: Prove di adesione su murature: lunghezze di adesione adottate.

La macchina di prova utilizzata è stata una Galdabini Sun60 dotata di un setup appositamente progettato e già descritto all'inizio del capitolo. La strumentazione dei provini consisteva in quattro potenziometri, usati per monitorare gli spostamenti relativi tra rinforzo e substrato, questi sono stati installati a coppie, due in corrispondenza dell'estremità caricata (LE) e due in corrispondenza di quella non caricata (UE), nel caso dei campioni con ancoraggio terminale questi ultimi sono stati applicati convenzionalmente a 195 mm dall'inizio dell'incollaggio. L'applicazione del carico è stata controllata imponendo una velocità di spostamento costante alla traversa superiore pari a $0,3\text{ mm/min}$ e i dati sono stati registrati con una frequenza di acquisizione di 10 Hz .

La Tabella 5.30 riassume in modo schematico il programma di tutte le prove con le principali caratteristiche di ognuna; le prove evidenziate dal carattere "grassetto" saranno trattate nel presente capitolo, per le altre si consulti l'Appendice B.

Tabella 5.30: Programma sperimentale delle prove di adesione su murature

Substrato	Cod. campione	Rinforzo				Lunghezza di adesione [mm]				
		GFRP	CFRP	BFRP	SRP	65	130	160	195	260anc
muratura	M-GFRP-065-01f	*				*				
	M-GFRP-065-01r	*				*				
	M-GFRP-065-05r	*				*				
	M-GFRP-130-02f	*					*			
	M-GFRP-130-03r	*					*			
	M-GFRP-130-06r	*					*			
	M-GFRP-195-02r	*							*	
	M-GFRP-195-03f	*							*	
	M-GFRP-195-05f	*							*	
	M-GFRP-anc-04f	*								*
	M-GFRP-anc-06f	*								*
	M-GFRP-anc-10f	*								*
	M-CFRP-195-02dx			*						*
	M-CFRP-195-05dx			*						*
	M-CFRP-195-13dx			*						*
	M-CFRP-anc-07r			*						*
	M-CFRP-anc-08r			*						*
	M-CFRP-anc-13f			*						*
	M-BFRP-195-01sx				*					*
	M-BFRP-195-03dx				*					*
	M-BFRP-195-06sx				*					*
	M-BFRP-anc-07f				*					*
	M-BFRP-anc-08f				*					*
	M-BFRP-anc-09f				*					*
	M-SRP-195-08dx					*				*
	M-SRP-195-10r					*				*
	M-SRP-195-14f					*				*
	M-SRP-anc-10sx					*				*
	M-SRP-anc-13r					*				*
	M-SRP-anc-14r					*				*

5.5.1 Descrizione di alcune prove significative

5.5.1.1 M-GFRP-065-01f

Il provino è stato sistemato all'interno delle piastre di ritenzione, a loro volta fissate solidalmente alla testa inferiore della macchina di prova, ponendo particolare attenzione all'allineamento della striscia di rinforzo con l'apparato superiore, costituito dalle piastrine di collegamento, la cella di carico e il giunto sferico, affinché la forza impressa dalla macchina durante la prova sia riconducibile ad uno sforzo di taglio, e quindi a delle tensioni tangenziali distribuite sulla superficie di incollaggio, minimizzando l'insorgere di tensioni normali al piano di applicazione del rinforzo.

Tabella 5.31: Campione M-GFRP-065-01f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	65	80124	70000	1141	1400

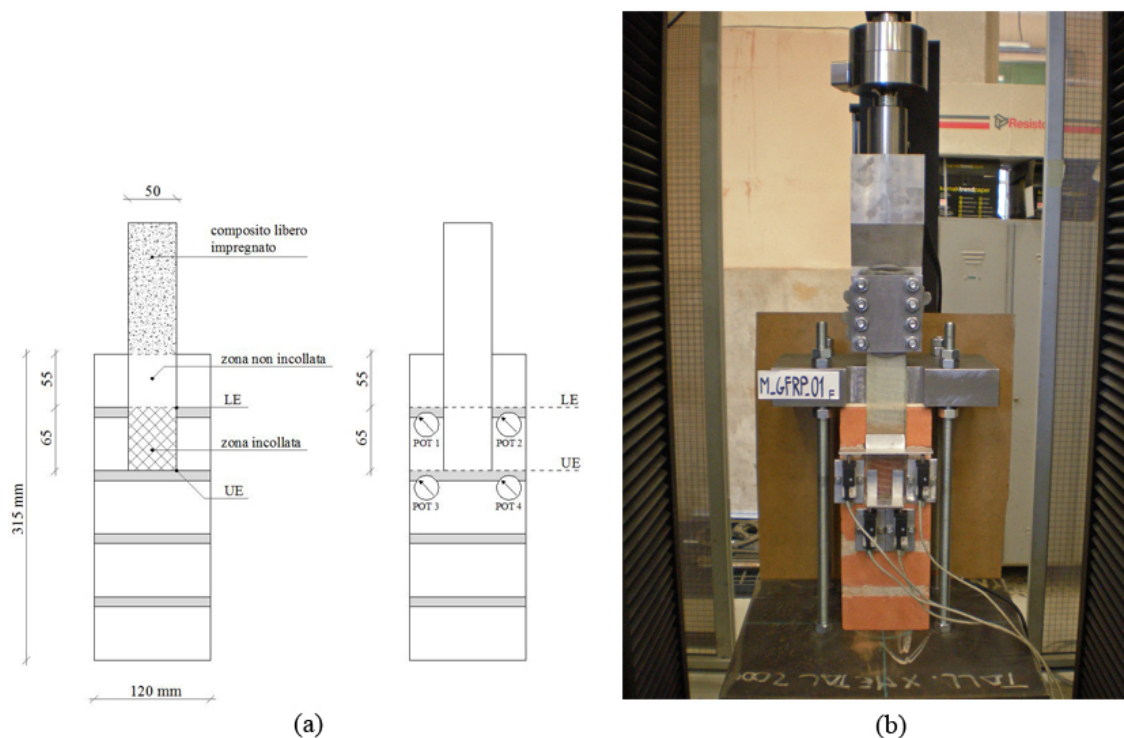


Figura 5.43: Campione M-GFRP-065-01f: geometria del provino e apparato di prova.

Avviata la prova il carico è aumentato con regolarità, con un andamento essenzialmente lineare, fino ad un valore di 5287 N, raggiunto il quale si è verificato l'improvviso distacco del composito. Osservando l'andamento degli spostamenti (Fig. 5.44) si può distinguere una prima fase caratterizzata da un comportamento elastico lineare e una seconda fase in cui, all'approssimarsi del carico massimo, i valori di spostamento aumentano in modo repentino fino al distacco totale.

Osservando la superficie di rottura al termine della prova (Fig. 5.45) si può notare come questa si sia generata nel modo desiderato, ossia all'interno del substrato in muratura, con

Tabella 5.32: Campione M-GFRP-065-01f: risultati della prova.

P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
5287	0.275	881	77.2%	62.9%	0.582	0.666

l'asportazione di uno strato omogeneo di materiale, sottile e uniforme per quanto riguarda il laterizio e un pò più irregolare e di spessore maggiore in corrispondenza del giunto di malta.

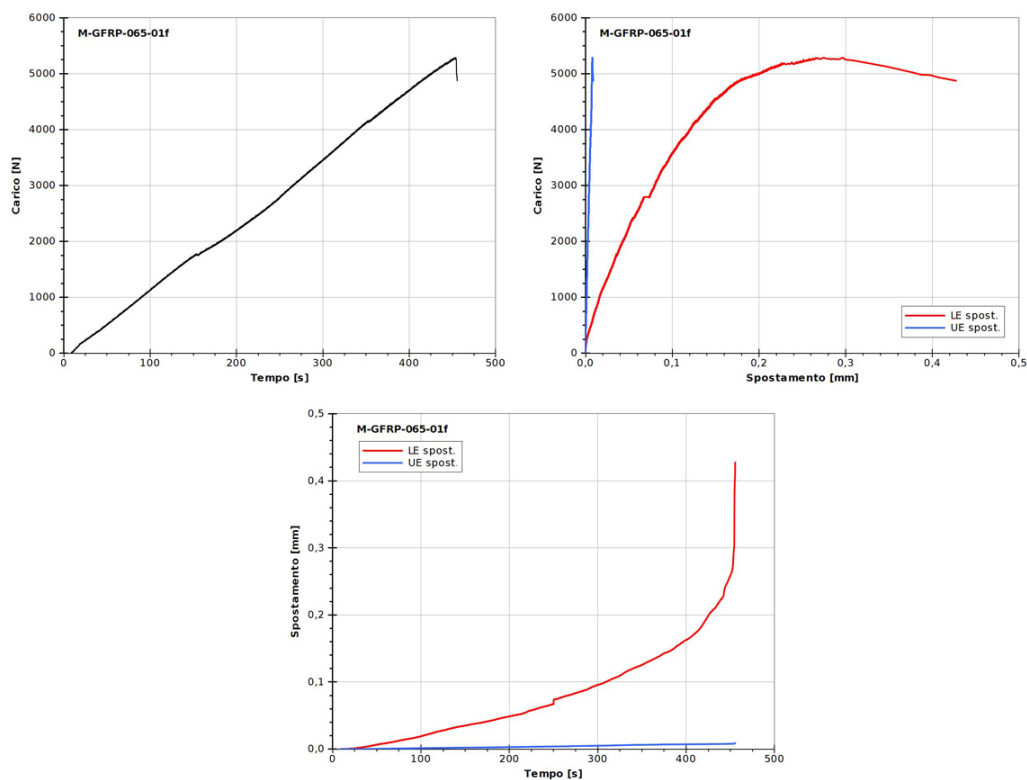


Figura 5.44: Campione M-GFRP-065-01f: grafici delle principali grandezze analizzate.

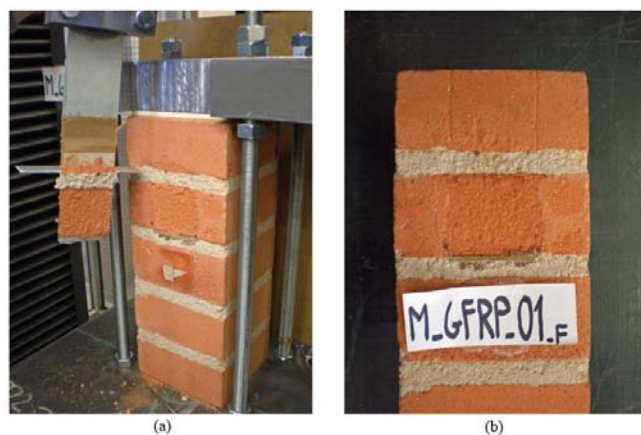


Figura 5.45: Campione M-GFRP-065-01f: campione dopo la rottura.

5.5.1.2 M-GFRP-130-06r

La lunghezza di ancoraggio in questo campione è stata scelta pari a 130 *mm*, corrispondente a due giunti e due mattoni. Avviata la prova il carico è aumentato regolarmente fino ad un valore di 4124 *N* raggiunto il quale si è verificato un primo distacco parziale, riconducibile alla superficie del primo mattone, con conseguente improvvisa perdita di carico e aumento degli spostamenti all'estremità caricata, in seguito il carico è tornato a salire, in modo stabile, fino a raggiungere un secondo picco, pari a 3473 *N*, a seguito del quale si è verificato il distacco anche del secondo mattone. Il giunto di malta ha avuto l'effetto di una discontinuità nell'area di incollaggio, provocando la perdita di aderenza in due fasi distinte.

Tabella 5.33: Campione M-GFRP-130-06r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [<i>mm</i>]	b_f [<i>mm</i>]	L_a [<i>mm</i>]	E_f [<i>N/mm</i> ²]	$E_{f,ds}$ [<i>N/mm</i> ²]	f_t [<i>N/mm</i> ²]	$f_{t,ds}$ [<i>N/mm</i> ²]
GFRP	0.120	50	130	80124	70000	1141	1400

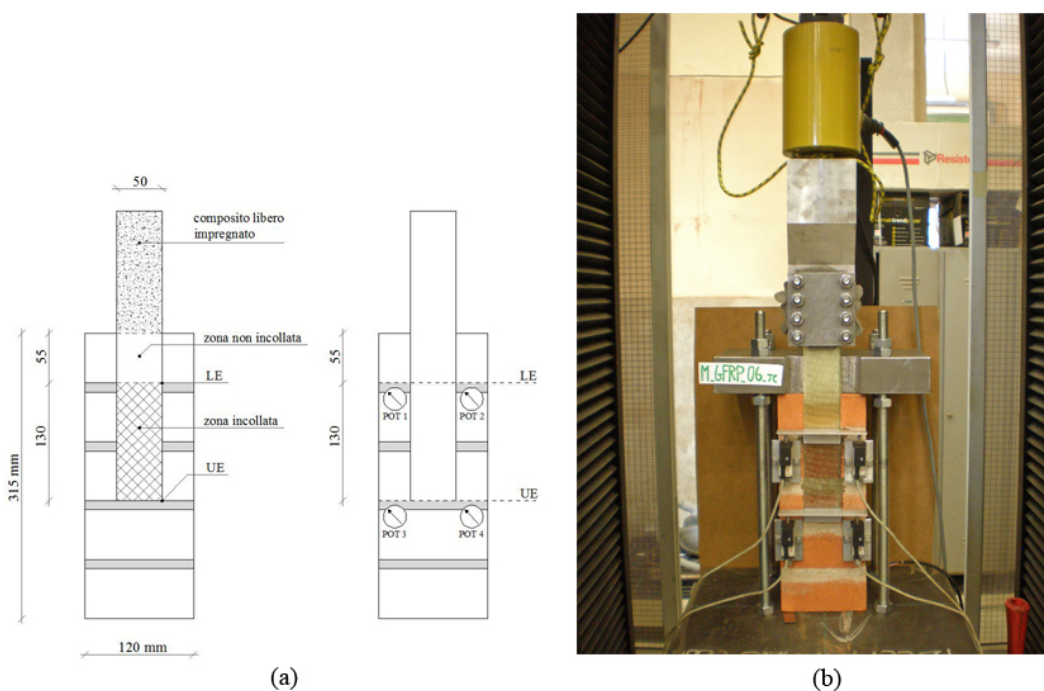


Figura 5.46: Campione M-GFRP-130-06r: geometria del provino e apparato di prova.

Nei grafici di Figura 5.47 sono rappresentate le curve di carico e spostamento, dove le linee tratteggiate, parallele all'asse delle ordinate, sono state inserite per indicare i punti in cui si sono verificati i picchi di carico. In Tabella 5.34 sono riportati i valori risultanti dall'analisi dei dati relativi alla prova, dove, per il calcolo degli spostamenti massimi, della tensione e dell'energia di frattura, si è fatto riferimento al valore di carico massimo raggiunto in ognuno dei due picchi.

La rottura, riscontrata al termine della prova (Fig. 5.48), è quella desiderata: la superficie di frattura si è generata all'interno del substrato con l'asportazione di uno strato omogeneo di materiale.

Tabella 5.34: Campione M-GFRP-130-06r: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4124	0.353	687	60.2%	49.1%	0.354	0.405
2° picco	3473	0.985	579	50.7%	41.3%	0.251	0.287

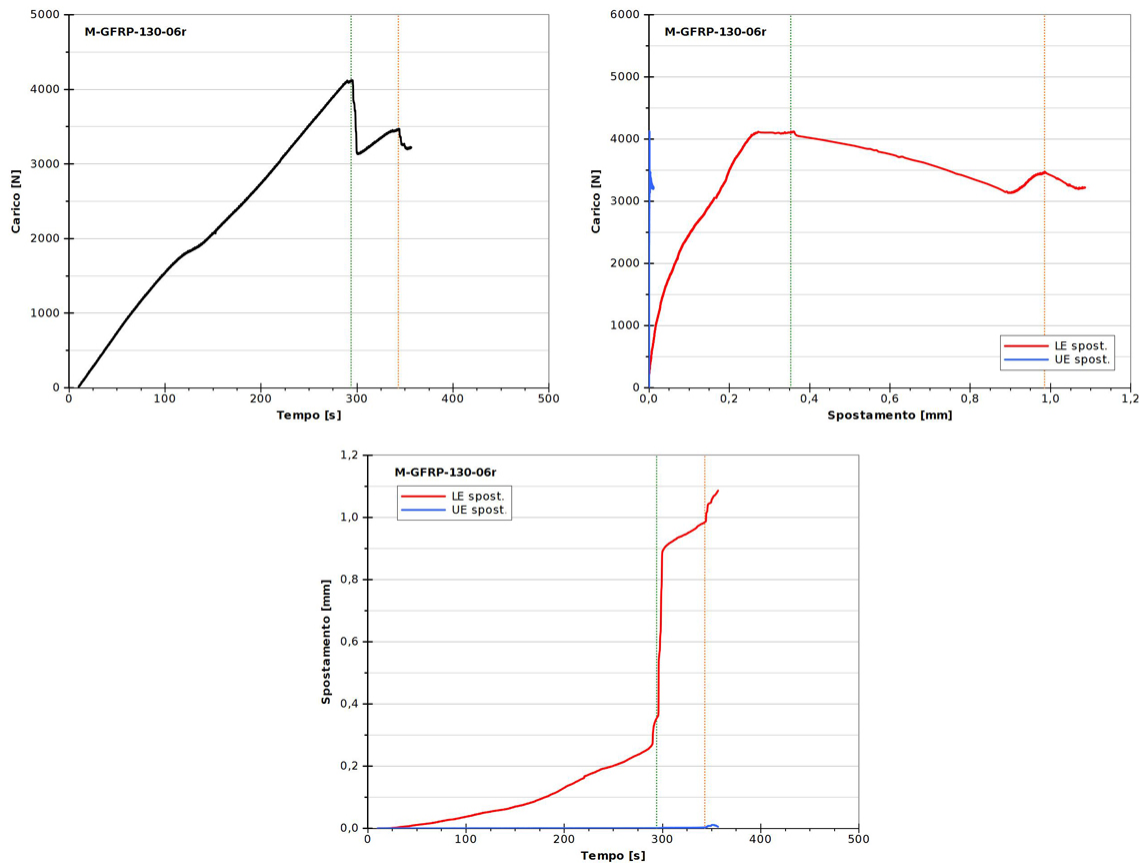


Figura 5.47: Campione M-GFRP-130-06r: grafici delle principali grandezze analizzate.

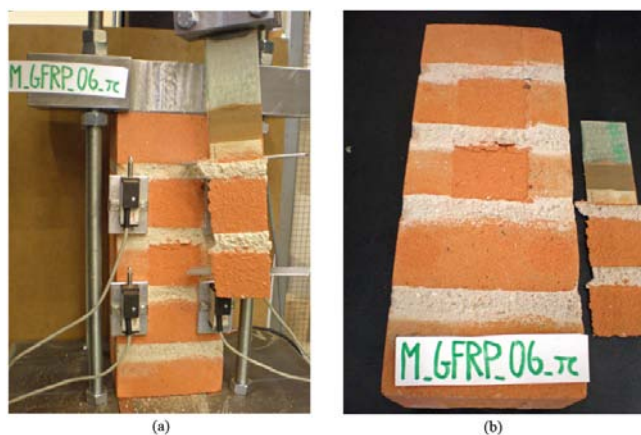


Figura 5.48: Campione M-GFRP-130-06r: campione dopo la rottura.

5.5.1.3 M-GFRP-195-02r

In questo campione la lunghezza di adesione scelta di 195 mm copre la superficie di tre giunti e tre mattoni; anche in questo caso, il distacco del rinforzo è avvenuto per gradi e osservando la curva carico-tempo di Figura 5.50 si possono facilmente individuare i tre picchi di carico che corrispondono alle tre fasi di distacco parziale. Dopo aver raggiunto un valore di carico di 4736 N si è verificato il distacco di una prima porzione di area di incollaggio corrispondente ad un giunto e ad un mattone, con conseguente perdita di carico e aumento degli spostamenti registrati all'estremità caricata; il carico è tornato poi a salire fino ad un valore di 4359 N raggiunto il quale è avvenuto il secondo distacco parziale, mentre il terzo si è verificato, dopo una breve fase di ricarico, ad un valore di 3797 N, completando così il distacco del rinforzo dal substrato. Dalla Figura 5.51 si può notare che anche in questo caso la frattura è avvenuta all'interno della muratura con l'asportazione di uno strato di materiale.

Tabella 5.35: Campione M-GFRP-195-02r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	195	80124	70000	1141	1400

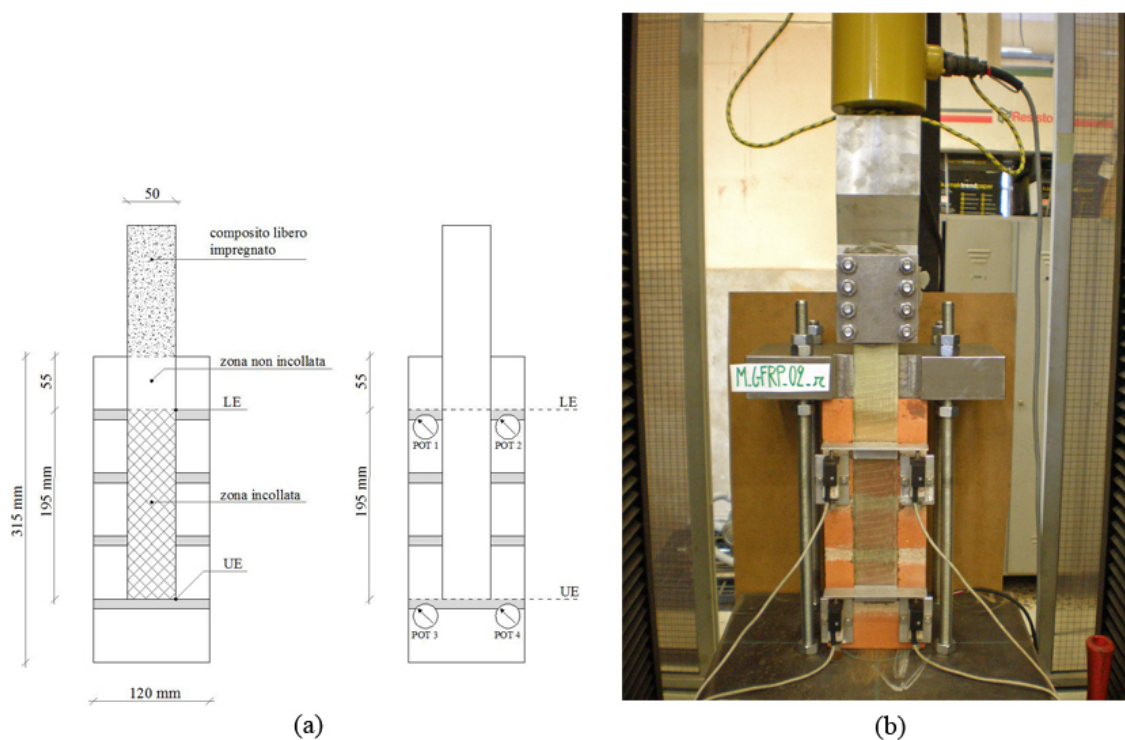


Figura 5.49: Campione M-GFRP-195-02r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 5.36: Campione M-GFRP-195-02r: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4736	0.359	789	69.2%	56.4%	0.467	0.534
2° picco	4359	1.151	727	63.7%	51.9%	0.395	0.452
3° picco	3797	1.485	633	55.5%	45.2%	0.300	0.343

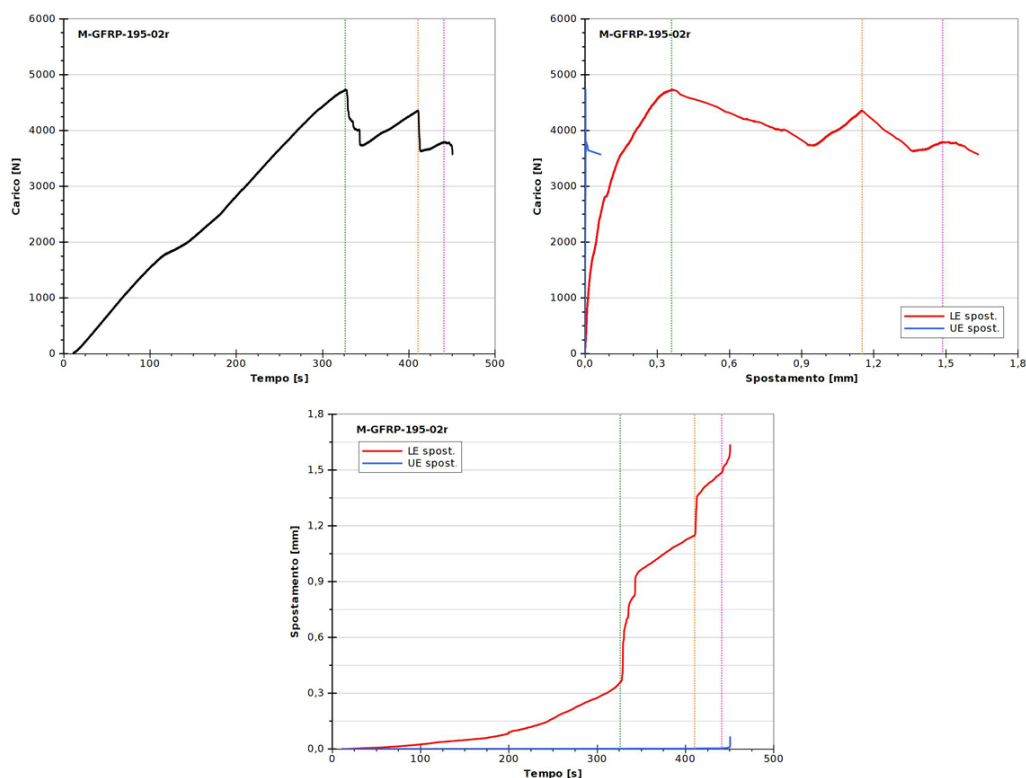


Figura 5.50: Campione M-GFRP-195-02r: grafici delle principali grandezze analizzate.

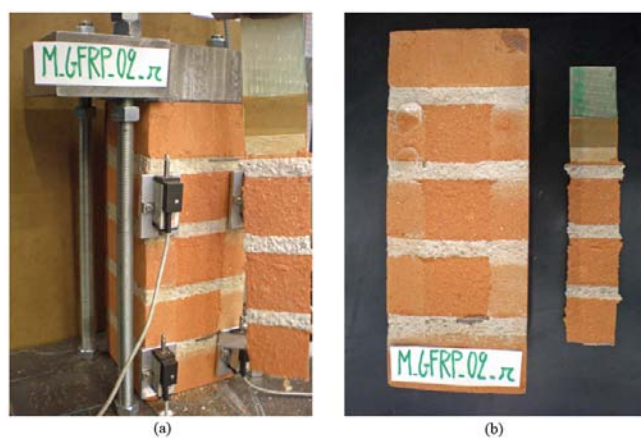


Figura 5.51: Campione M-GFRP-195-02r: campione dopo la rottura.

5.5.1.4 M-GFRP-anc-06f

Il campione è stato confezionato adottando una lunghezza di adesione di 260 mm e l'ancoraggio finale del rinforzo, ottenuto risvoltando il tessuto alla base del pilastrino in muratura. La prova ha avuto uno svolgimento regolare; osservando la curva carico-tempo di Figura 5.53 si può notare come il distacco sia avvenuto, anche in questo caso, per fasi successive, con una progressione di distacchi parziali. In particolare, coprendo l'area di incollaggio un totale di quattro mattoni intervallati dai giunti di malta che fungono da elemento di discontinuità, si possono osservare altrettanti picchi di carico, caratterizzati da un ramo in cui i valori di carico aumentano e da una improvvisa perdita di carico e aumento degli spostamenti dovute al distacco di una porzione di rinforzo. Essendo la striscia di composito ancorata, dopo l'ultimo distacco il carico è tornato a salire linearmente mostrando un comportamento elastico fino alla conclusione della prova che è avvenuta fermando manualmente la macchina.

Tabella 5.37: Campione M-GFRP-anc-06f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	260	80124	70000	1141	1400

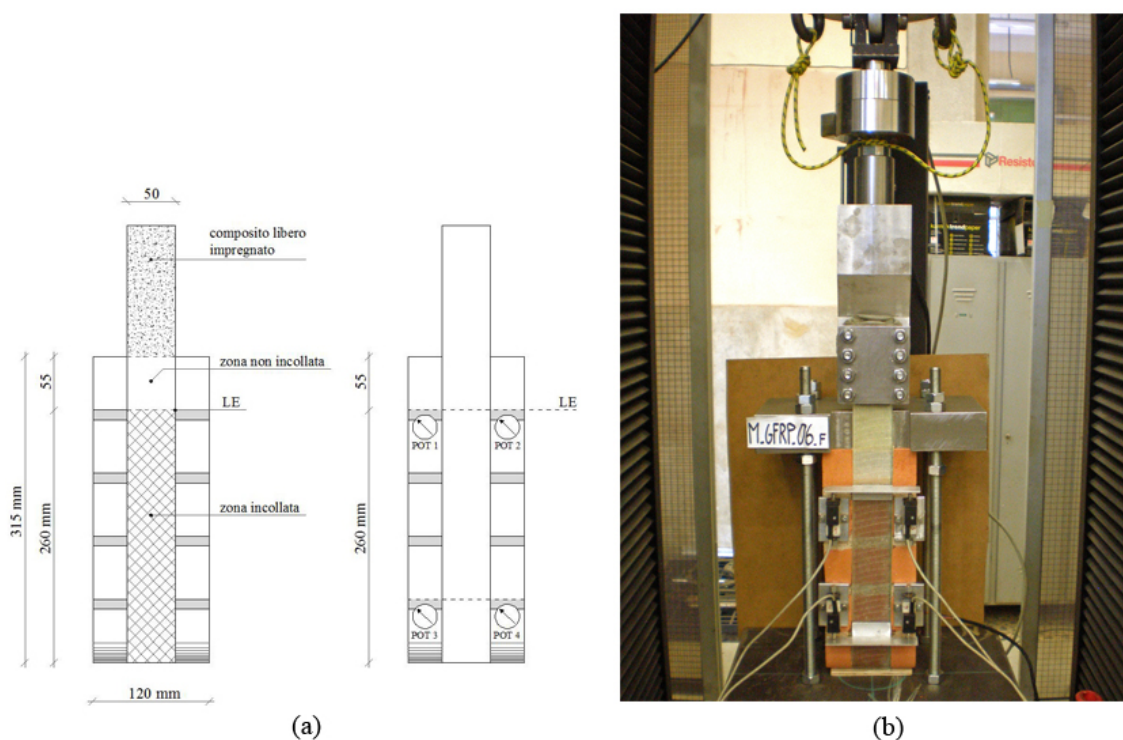


Figura 5.52: Campione M-GFRP-anc-06f: geometria del provino e apparato di prova.

Dalla Figura 5.54 si può vedere che la superficie di rottura si è sviluppata nella maniera desiderata, all'interno del materiale da rinforzare.

Tabella 5.38: Campione M-GFRP-anc-06f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4681	0.171	780	68.4%	55.7%	0.456	0.522
2° picco	4096	0.739	683	59.8%	48.8%	0.349	0.399
3° picco	4665	1.424	778	68.1%	55.5%	0.453	0.518
4° picco	5092	2.060	849	74.4%	60.6%	0.539	0.617

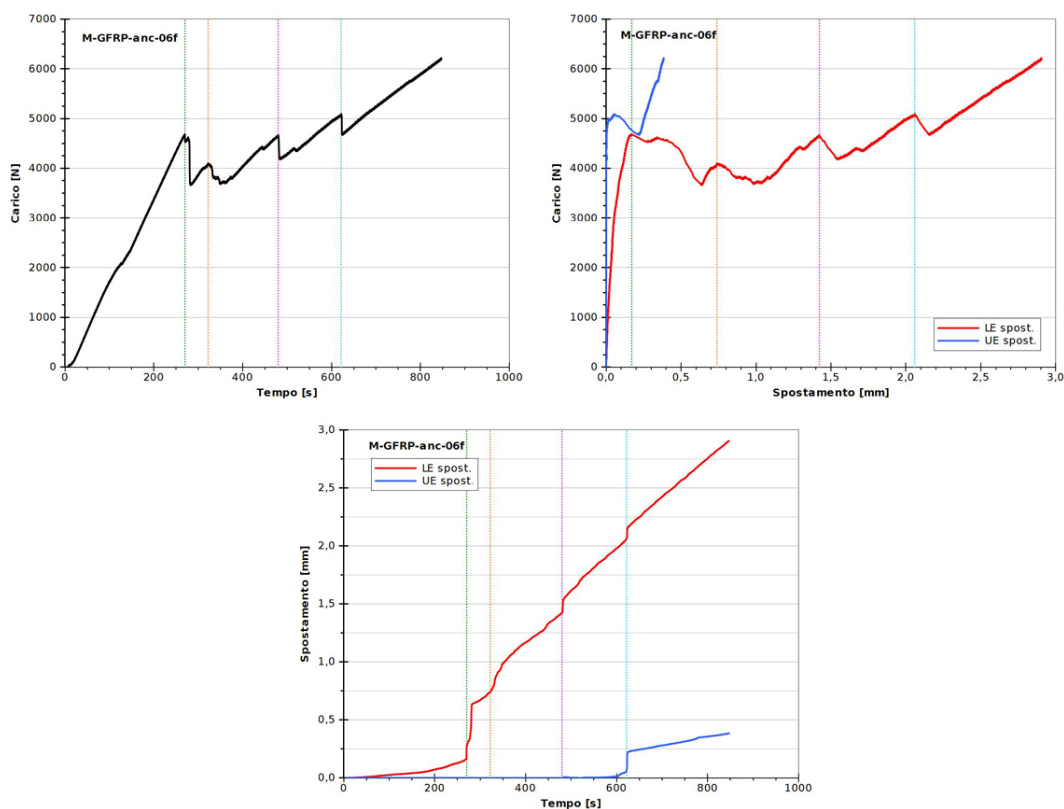


Figura 5.53: Campione M-GFRP-anc-06f: grafici delle principali grandezze analizzate.

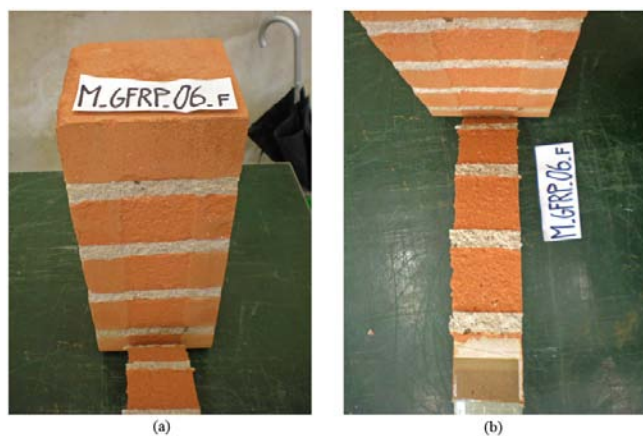


Figura 5.54: Campione M-GFRP-anc-06f: campione dopo la rottura.

5.5.1.5 M-CFRP-anc-08r

A questo campione è stato applicato un rinforzo in fibra di carbonio per una lunghezza di 260 mm e l'ancoraggio finale. Come si può vedere dai grafici di Figura 5.56 anche in questo caso la perdita di aderenza è avvenuta con una progressione di distacchi parziali, in particolare se ne individuano facilmente tre, riconoscibili da dei picchi nella curva carico-tempo seguiti da improvvisa perdita di carico e aumento degli spostamenti. Il distacco è stato completo e la superficie di rottura si è generata all'interno della muratura (Fig. 5.57) con l'asportazione di uno strato di materiale di spessore contenuto in corrispondenza dei mattoni in laterizio e maggiore nei giunti di malta.

Tabella 5.39: Campione M-CFRP-anc-08r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	260	241015	220000	2889	3500

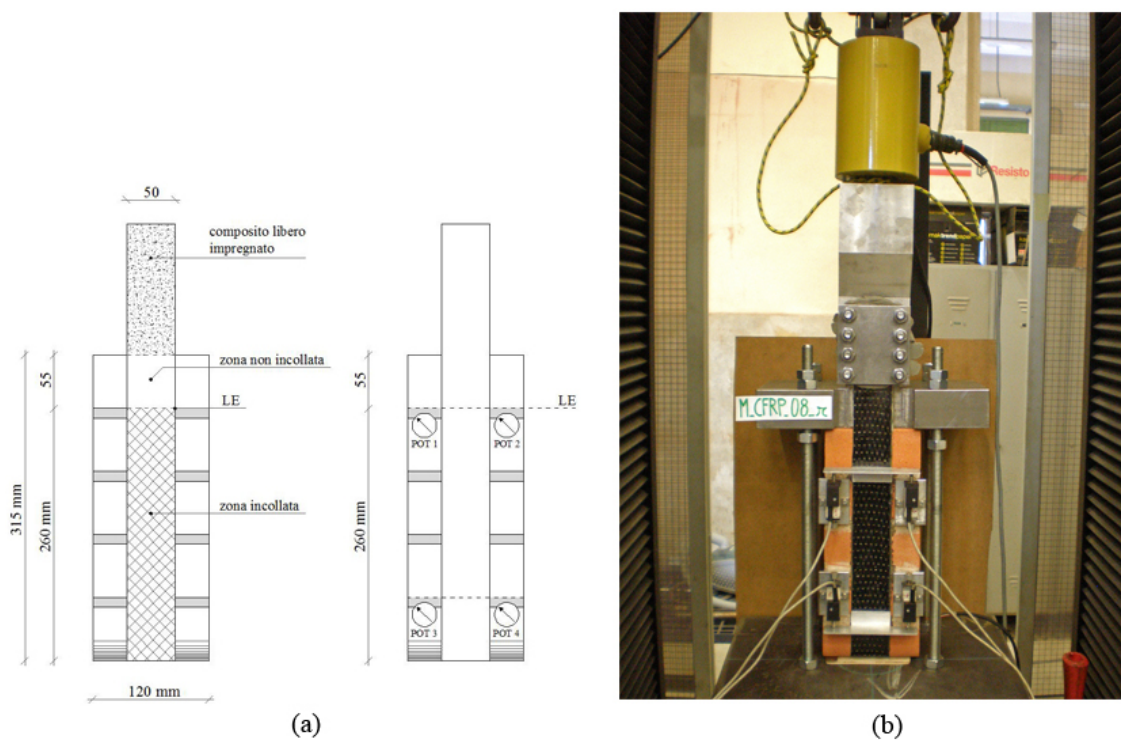


Figura 5.55: Campione M-CFRP-anc-08r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 5.40: Campione M-CFRP-anc-08r: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	5552	0.431	653	22.6%	18.7%	0.150	0.165
2° picco	5522	0.573	650	22.5%	18.6%	0.149	0.163
3° picco	5845	1.054	688	23.8%	19.6%	0.167	0.183

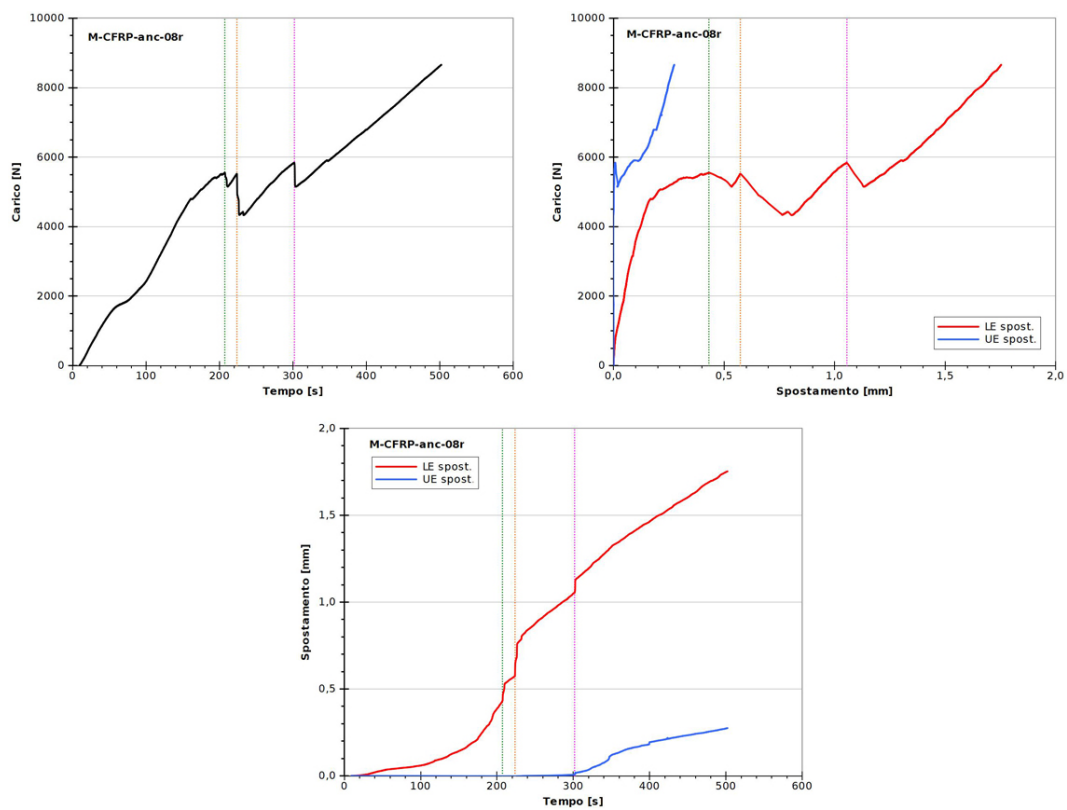


Figura 5.56: Campione M-CFRP-anc-08r: grafici delle principali grandezze analizzate.

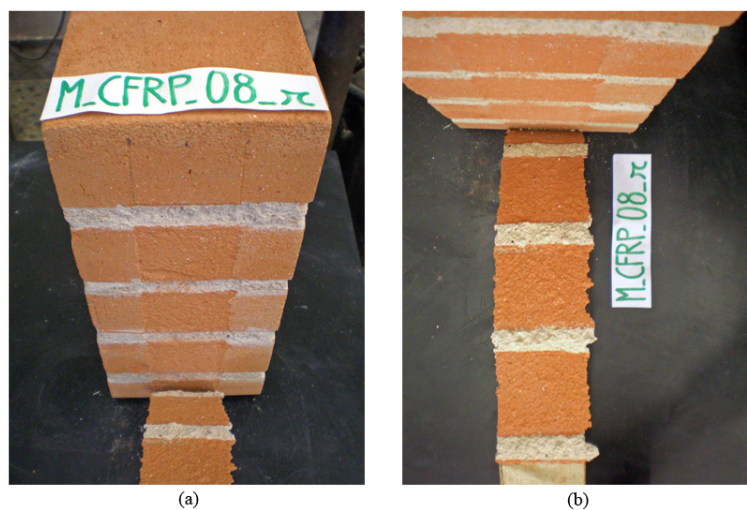


Figura 5.57: Campione M-CFRP-anc-08r: campione dopo la rottura.

5.5.1.6 M-BFRP-anc-09f

A questo campione è stata applicata una striscia di rinforzo in fibre di basalto, con una lunghezza si ancoraggio di 260 mm e l'ancoraggio finale. Dai grafici di Figura 5.59 si possono vedere chiaramente i picchi di carico a seguito dei quali si sono verificati i distacchi parziali della fibra dal substrato. In questo caso, sebbene la lunghezza di ancoraggio copra la superficie di quattro mattoni, non sono chiaramente distinguibili quattro picchi ma solamente tre, è probabile che il distacco dall'ultimo mattone sia avvenuto non in maniera improvvisa come i primi tre ma in modo più graduale come fanno pensare quelle piccole oscillazioni di carico, visibili nella curva carico-tempo, prima dell'attivazione del meccanismo di ancoraggio. Altra cosa da notare sono le letture inizialmente negative registrate dai potenziometri posti in prossimità dell'estremità non caricata; questi due strumenti hanno cominciato a rilevare spostamenti apprezzabili solo in concomitanza al terzo picco di carico, che corrisponde quindi al distacco del terzo mattone, e in un primo momento questi spostamenti sono risultati di verso opposto a quello atteso, la causa di ciò è da ricercarsi probabilmente in un'allineamento non perfetto del provino all'apparato di prova. Analizzando la superficie di rottura (Fig. 5.60b) si può notare che per delle piccole porzioni di zona di adesione, localizzate in prossimità dei giunti di malta, il distacco è stato parziale.

Tabella 5.41: Campione M-BFRP-anc-09f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	260	86832	80000	1812	1700

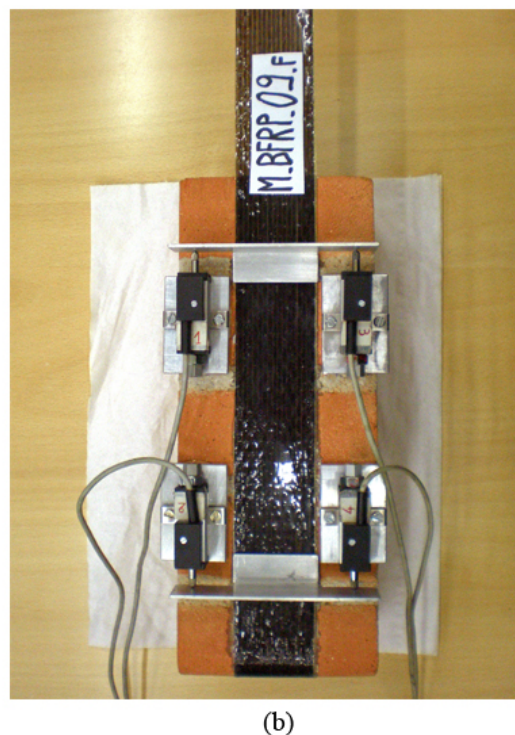
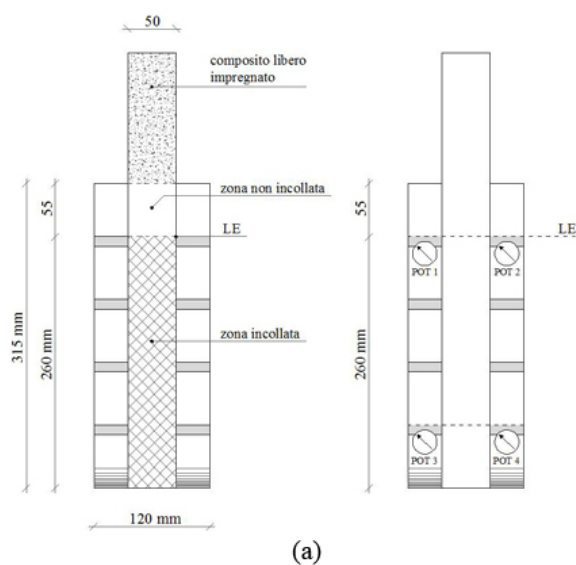


Figura 5.58: Campione M-BFRP-anc-09f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 5.42: Campione M-BFRP-anc-09f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	5743	0.399	820	45.3%	48.3%	0.543	0.589
2° picco	4893	0.692	699	38.6%	41.1%	0.394	0.427
3° picco	4912	1.141	702	38.7%	41.3%	0.397	0.431

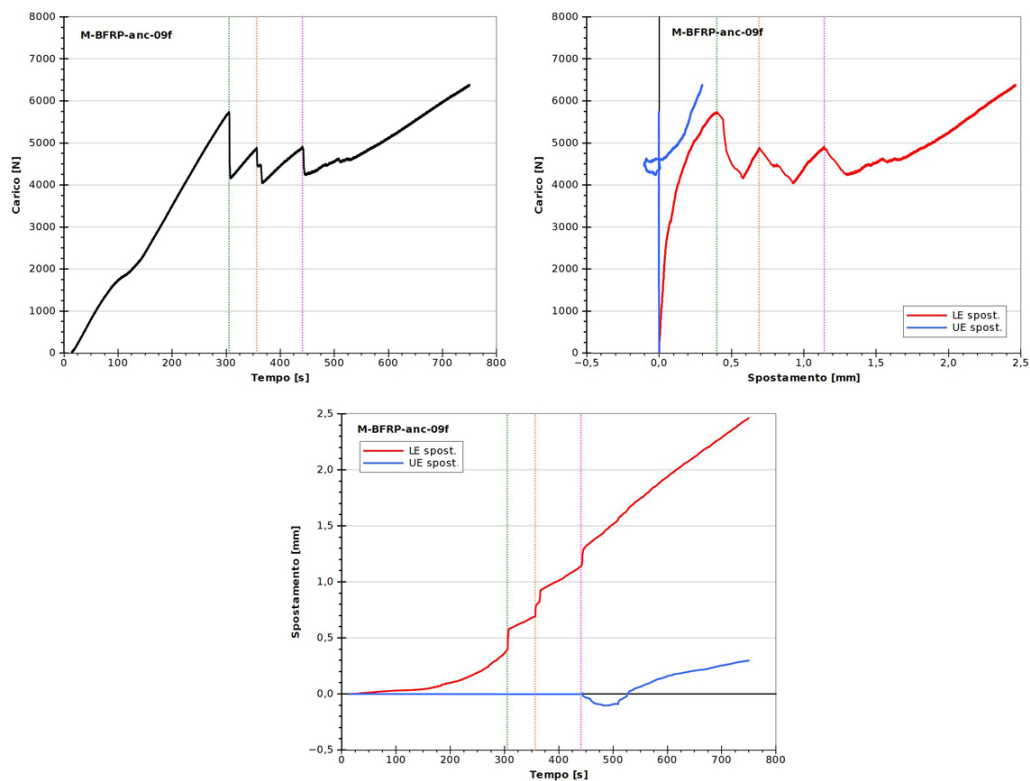


Figura 5.59: Campione M-BFRP-anc-09f: grafici delle principali grandezze analizzate.

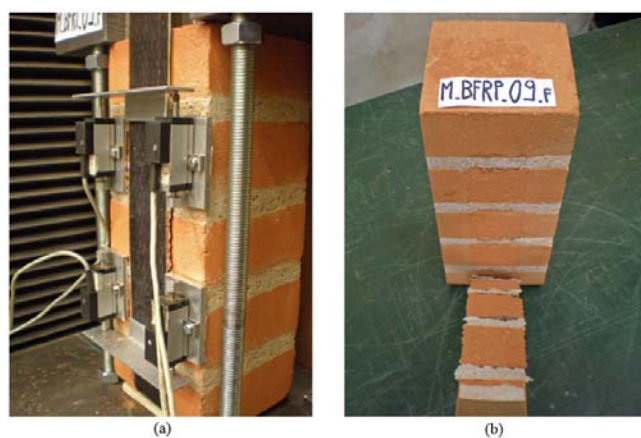


Figura 5.60: Campione M-BFRP-anc-09f: campione dopo la rottura.

5.5.1.7 M-SRP-anc-13r

A questo campione è stata applicata una striscia di rinforzo in fibre di acciaio per una lunghezza di 195 mm; non essendo possibile risvoltare le fibre alla base del pilastrino per realizzare l'ancoraggio, questo è stato ottenuto con una piastra rigida in acciaio incollata con resina epossidica a livello del mattone di base (Fig. 5.61), inoltre, per maggiore sicurezza sulla tenuta dell'ancoraggio durante la prova, sono stati applicati due morsetti. Anche in questo caso la perdita di aderenza del rinforzo è avvenuto per gradi, con tre distacchi in successione, dai grafici di Figura 5.62 sono facilmente riconoscibili i tre picchi di carico corrispondenti. Da notare inoltre che l'elevata rigidità assiale delle fibre di acciaio ha fatto registrare apprezzabili valori di spostamento, rilevati in corrispondenza dell'estremità non caricata, fin dal primo distacco. Infine, Analizzando la superficie di rottura si può vedere (Fig. 5.63) che il distacco è stato completo con l'asportazione di uno strato di materiale da tutta l'area di incollaggio.

Tabella 5.43: Campione M-SRP-anc-13r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	195	200020	190000	3050	3070

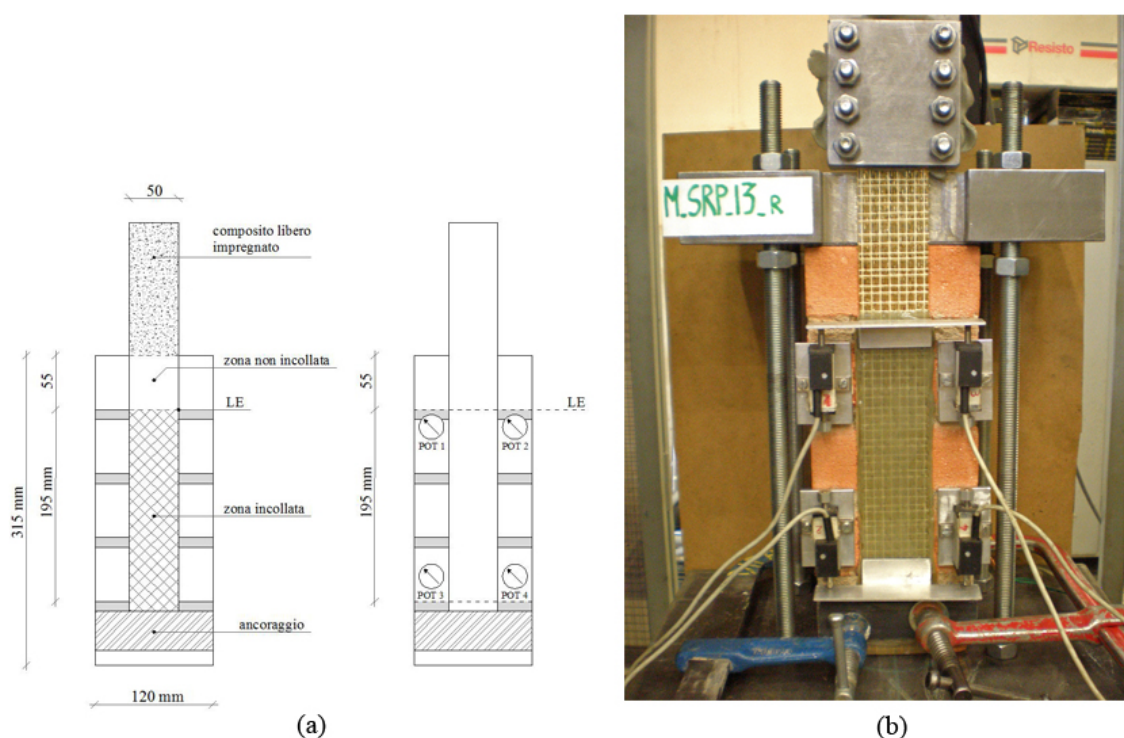


Figura 5.61: Campione M-SRP-anc-13r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 5.44: Campione M-SRP-anc-13r: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	7251	0.117	639	20.9%	20.8%	0.232	0.244
2° picco	6874	0.461	606	19.9%	19.7%	0.208	0.219
3° picco	7516	0.783	662	21.7%	21.6%	0.249	0.262

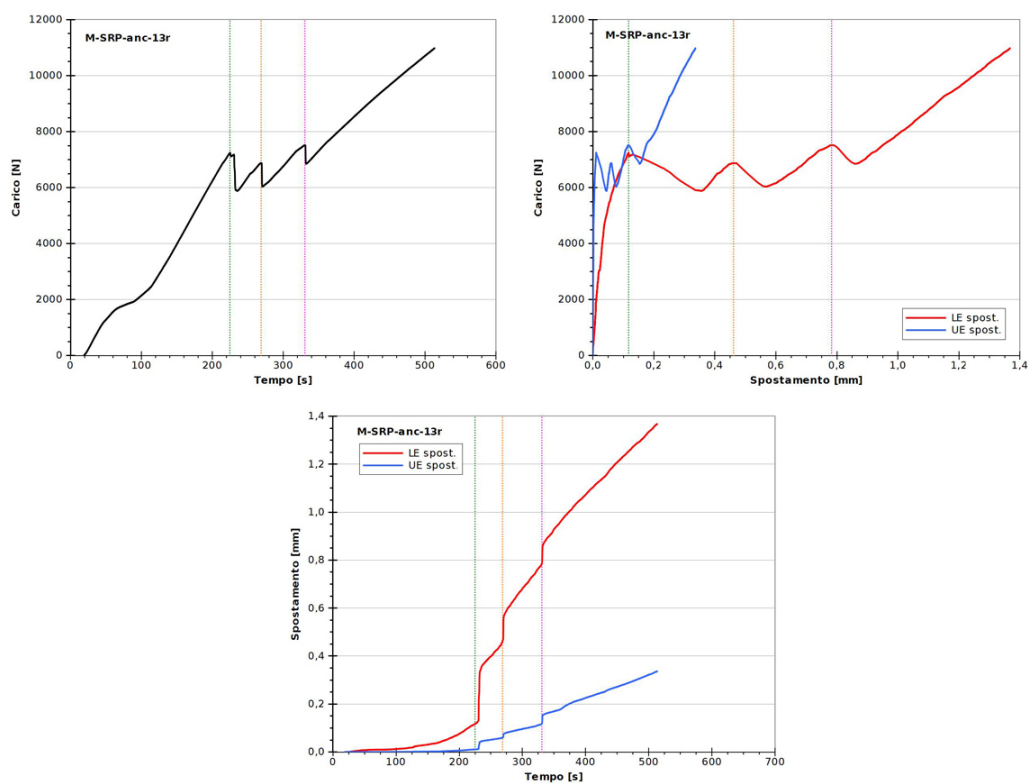


Figura 5.62: Campione M-SRP-anc-13r: grafici delle principali grandezze analizzate.

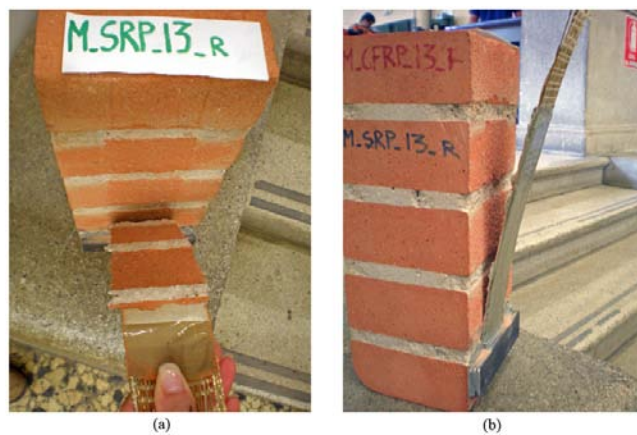


Figura 5.63: Campione M-SRP-anc-13r: campione dopo la rottura.

5.5.2 Modalità di rottura

In tutte e trenta le prove di adesione su prismi in muratura la rottura è avvenuta nella maniera desiderata, ossia per distacco della striscia di rinforzo dal substrato con l'asportazione di uno strato di materiale. Lo spessore asportato è risultato variabile nei due materiali costituenti la muratura, con un ispessimento in corrispondenza dei giunti di malta (Fig. 5.64a); questo è dovuto in parte alla maggiore porosità della malta, che favorisce quindi una migliore penetrazione del primer e della resina epossidica durante l'impregnazione delle fibre, e in secondo luogo alle dimensioni degli inerti che, come dichiara il produttore, hanno una dimensione massima di 4 mm. In alcuni campioni si sono riscontrate delle aree in cui il distacco è avvenuto all'interfaccia adesivo-muratura (Fig. 5.64b), manifestando quindi un difetto in fase di impregnazione, il fenomeno ha interessato in particolare i provini rinforzati con fibre di carbonio e basalto, quindi proprio quei tessuti di più difficile impregnazione; le aree di incollaggio interessate da questo fenomeno sono state comunque molto contenute e quasi sempre localizzate a cavallo fra giunto e mattone. Da registrare, infine, una rottura nel mattone di testa del provino denominato M-BFRP-195-03, che durante lo svolgimento della prova ha manifestato una lesione, con successivo distacco, di una porzione cuneiforme di mattone, in analogia a quanto accaduto in alcuni provini in malta (Fig. 5.64c).



Figura 5.64: Prove di adesione su murature: esempi di rotture riscontrate.

5.5.3 Resistenze e spostamenti

L'esecuzione, e successiva analisi delle prove, ha messo in luce l'influenza dei giunti di malta sulla rottura per perdita di aderenza. Sembra chiaro come la presenza dei giunti costituisca un elemento di discontinuità all'interno dell'area di incollaggio, suddividendola di fatto in più porzioni quanti sono i mattoni all'interno dell'area di incollaggio. Per lunghezze di incollaggio di 65 mm , comprendenti quindi un giunto e un mattone, il distacco avviene in modo repentino, in analogia a quanto visto nelle prove su singolo mattone, per lunghezze di incollaggio maggiori il distacco totale della striscia di rinforzo si è prodotto attraverso una progressione di distacchi parziali, caratterizzati dal raggiungimento di un picco di carico seguito da improvvisa perdita di carico e aumento degli spostamenti all'estremità caricata, e in numero uguale ai mattoni interessati dall'incollaggio. La Figura 5.65 mostra un esempio di curva carico-tempo relativa ad una prova su campione rinforzato con fibra di vetro e lunghezza di ancoraggio di 195 mm , comprendente quindi tre giunti e tre mattoni; come si può notare sono ben visibili i tre picchi di carico, a seguito di ognuno dei quali si è verificato il distacco del rinforzo per una porzione corrispondente ad un singolo mattone. Per questi motivi, analizzando i dati raccolti durante le prove, si è deciso di considerare come valori notevoli quelli di carico massimo e corrispondente spostamento per ognuno dei picchi di carico verificatesi. In alcune prove la distinzione dei picchi di carico non è stata così immediata come nell'esempio riportato in Figura 5.65, in alcuni casi i distacchi sono molto ravvicinati, con brevi fasi di ricarico, rendendo difficile ricostruire con precisione l'evoluzione dei distacchi.

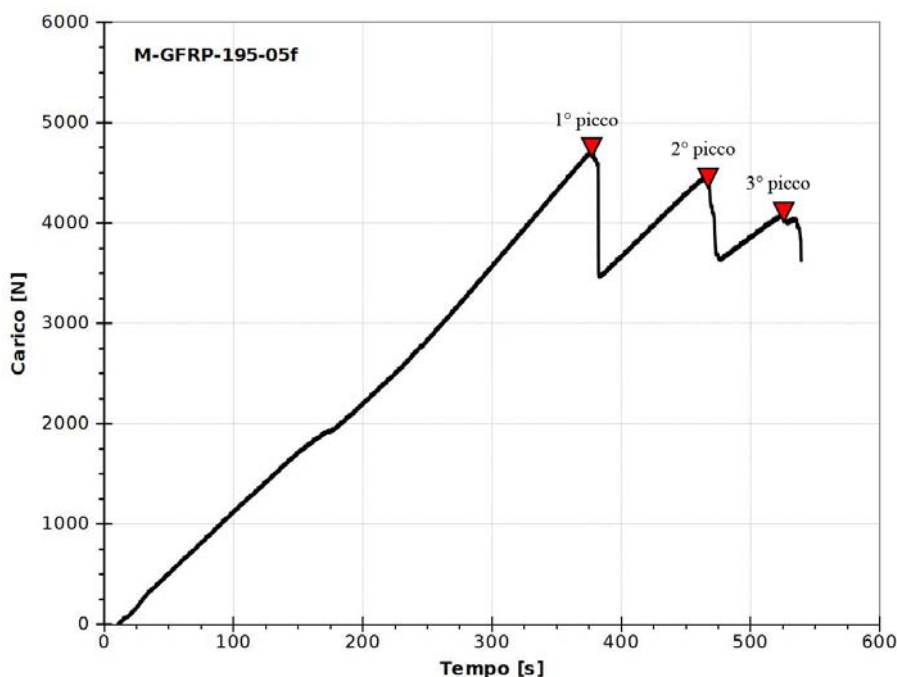


Figura 5.65: Prove di adesione su murature: esempio di curva carico-tempo di un campione con lunghezza di adesione di 195 mm .

Nelle Tabelle da 5.45 a 5.54 e nelle Figure da 5.66 a 5.75 sono riportati i risultati, relativi a resistenze e spostamenti, per tutte le prove.

Per quanto riguarda i valori di resistenza raggiunti si è riconfermato quanto già visto nelle prove precedenti, ossia compositi più rigidi (CFRP e SRP) hanno dimostrato resistenze

maggiori, mentre rinforzi simili (GFRP e BFRP) hanno avuto prestazioni simili. Da notare poi, come i campioni con lunghezza di ancoraggio di soli 65 *mm* abbiano fatto registrare valori di resistenza comparabili a quelli ottenuti nelle prove su singolo mattone, dove la lunghezza di incollaggio era di 160 *mm*.

I carichi di picco per ogni tipologia di rinforzo non hanno mostrato grosse differenze in termini di valore, facendo rilevare solo un valore mediamente superiore per il primo picco, avvalorando quindi l'ipotesi che la presenza del giunto divida l'area di incollaggio in segmenti distinti.

Per quanto riguarda gli spostamenti dell'estremità caricata, si può notare che i valori registrati in corrispondenza del primo carico di picco non mostrano particolari differenze, anche considerando le diverse tipologie di rinforzo, mentre gli spostamenti relativi ai picchi successivi, che dipendono dalle crescenti lunghezze staccate, variano in funzione delle diverse rigidità dei tessuti utilizzati per il rinforzo.

5.5.3.1 Campioni rinforzati con fibre di vetro

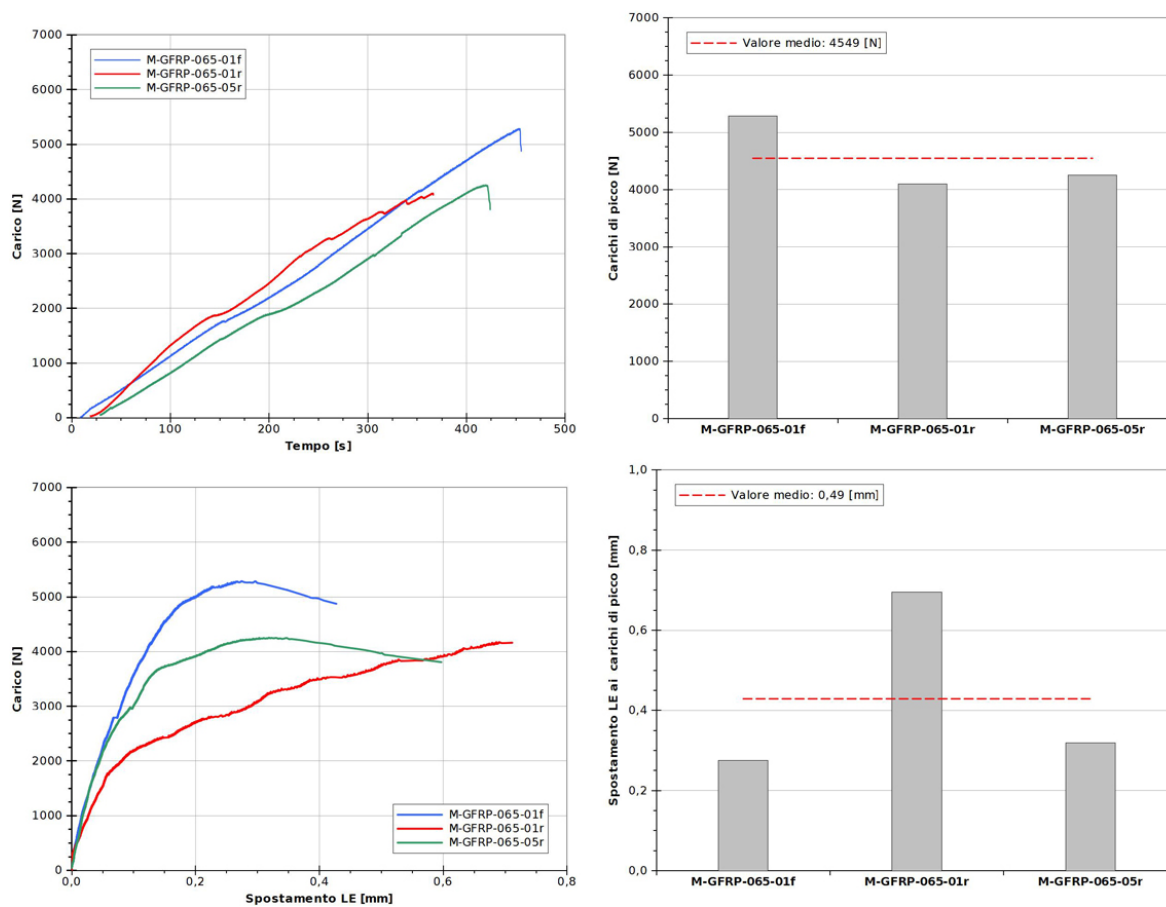


Figura 5.66: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 65 mm.

Tabella 5.45: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 65 mm.

Campione	Primo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-GFRP-065-01f	5287	0.275
M-GFRP-065-01r	4104	0.695
M-GFRP-065-05r	4255	0.319
valori medi	4549	0.429
dev. stand.	644	0.231
CoV	14.2%	53.7%

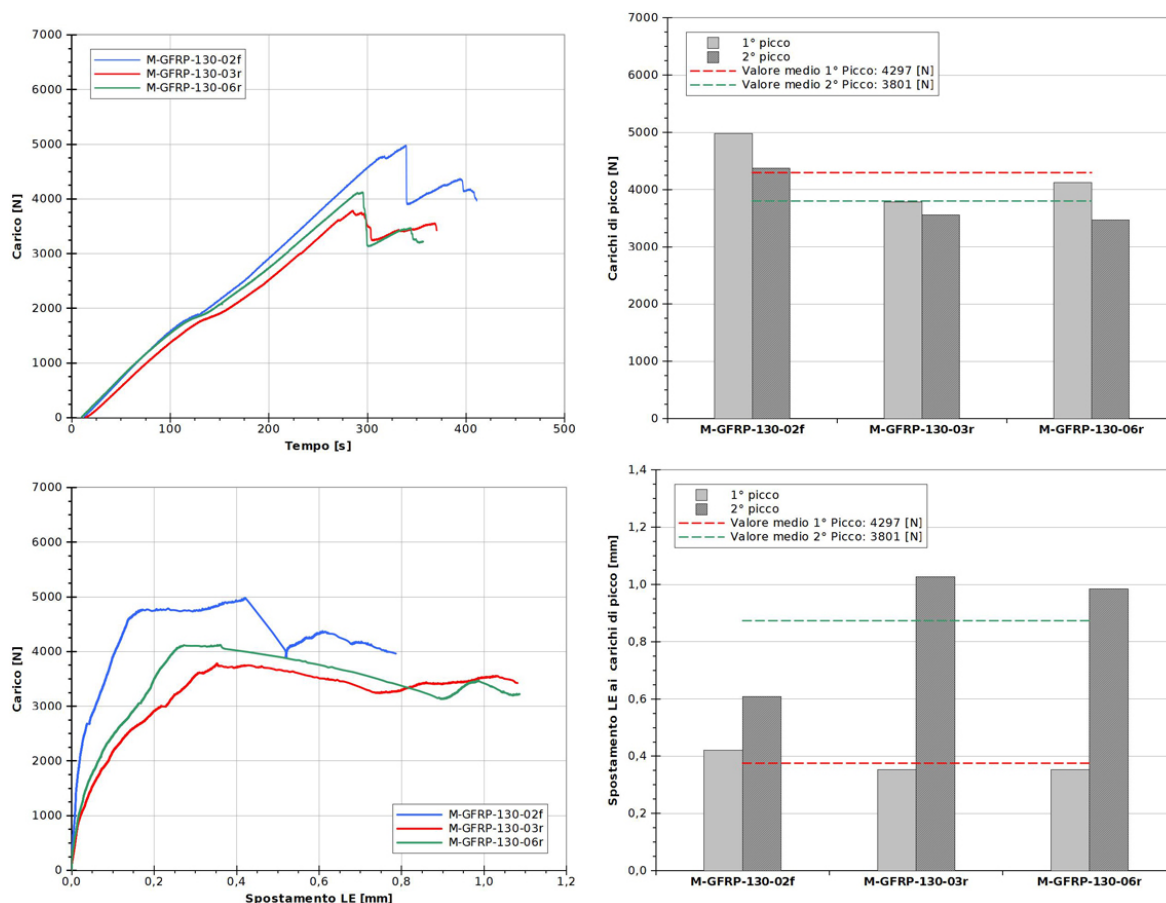


Figura 5.67: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 130 mm.

Tabella 5.46: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 130 mm.

Campione	Primo picco		Secondo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-GFRP-130-02f	4982	0.421	4375	0.608
M-GFRP-130-03r	3785	0.352	3556	1.027
M-GFRP-130-06r	4124	0.353	3473	0.985
valori medi	4297	0.376	3801	0.873
dev. stand.	617	0.039	498	0.231
CoV	14.4%	10.5%	13.1%	26.4%

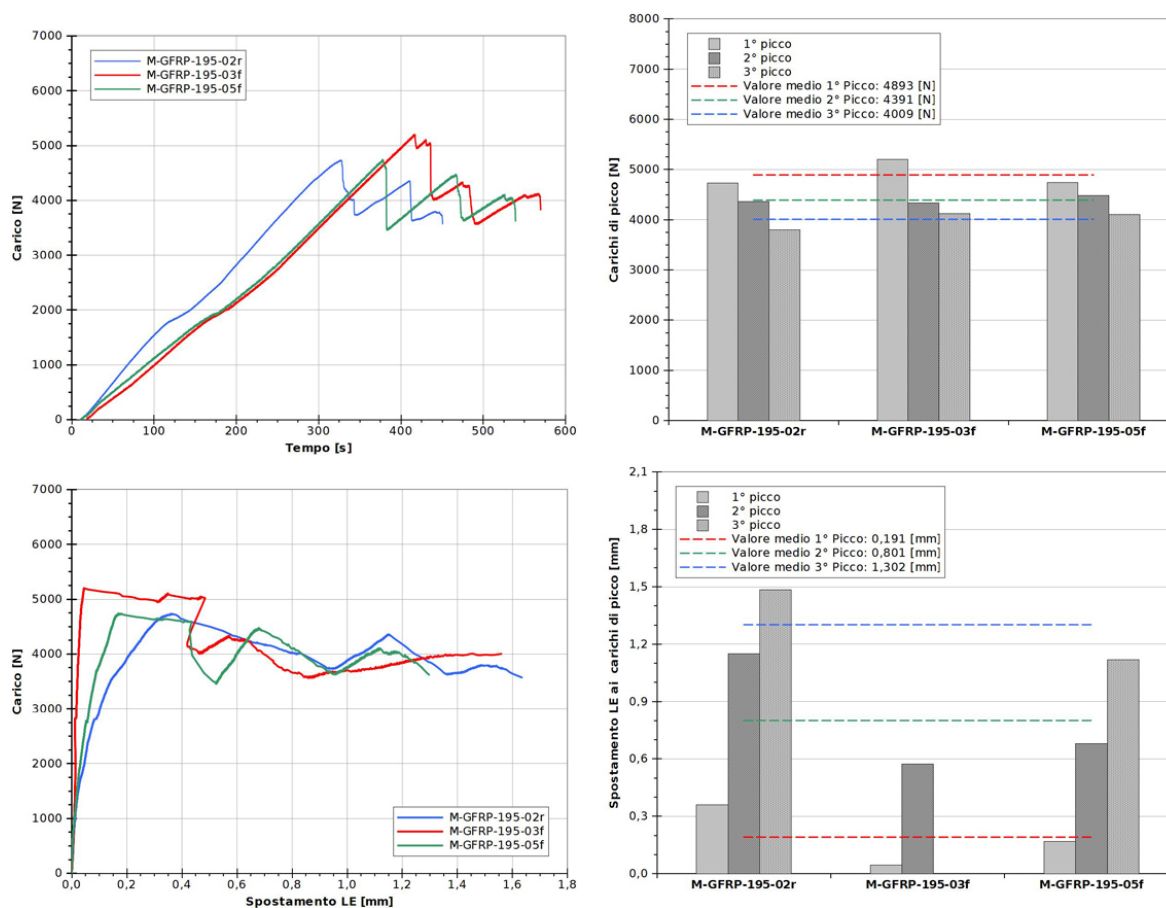


Figura 5.68: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 195 mm.

Tabella 5.47: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 195 mm.

Campione	Primo picco		Secondo picco		Terzo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-GFRP-195-02r	4736	0.359	4359	1.151	3797	1.485
M-GFRP-195-03f	5199	0.044	4336	0.572	4124	-
M-GFRP-195-05f	4744	0.170	4479	0.679	4107	1.118
valori medi	4893	0.191	4391	0.801	4009	1.302
dev. stand.	265	0.159	77	0.308	184	0.259
CoV	5.4%	83.0%	1.8%	38.5%	4.6%	19.9%

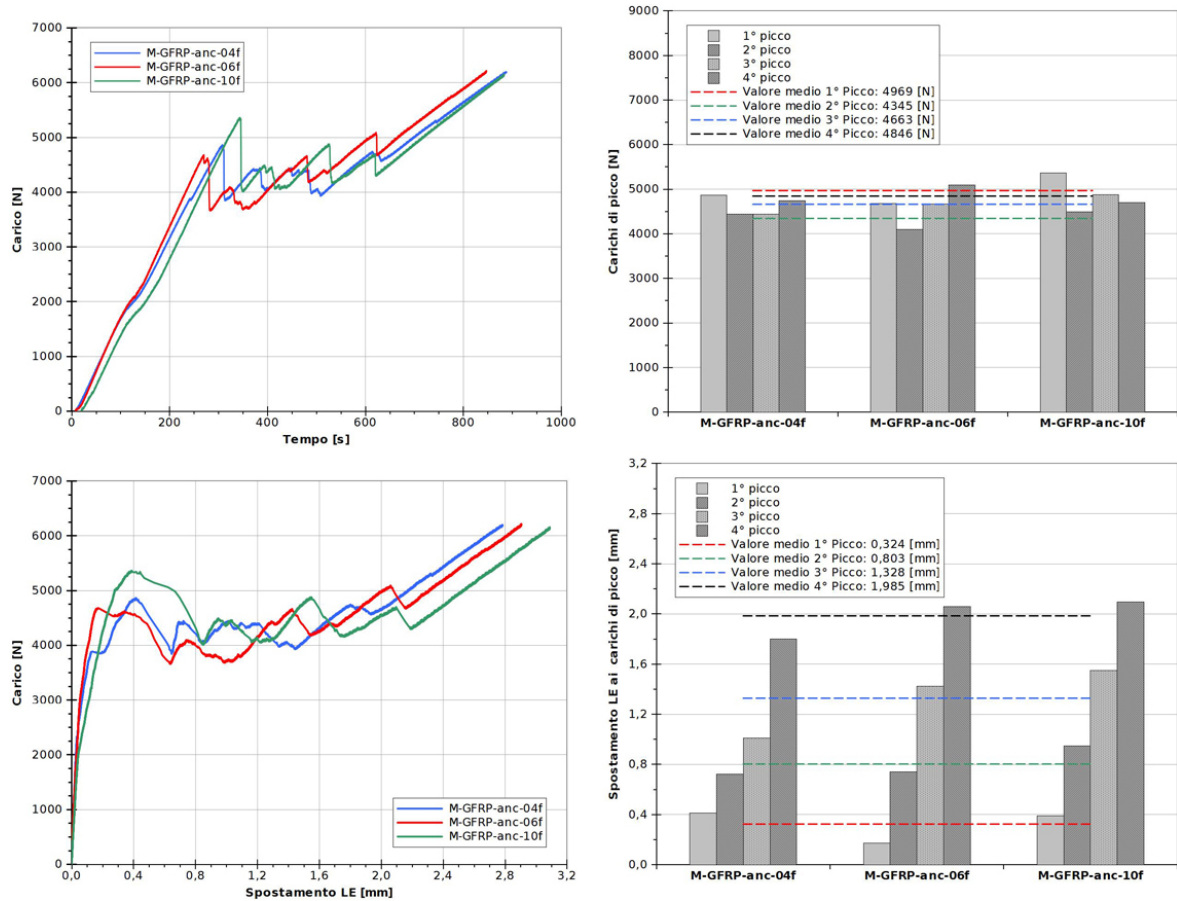


Figura 5.69: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 260 mm.

Tabella 5.48: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 260 mm.

Campione	Primo picco		Secondo picco		Terzo picco		Quarto picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-GFRP-anc-04f	4865	0.414	4445	0.721	4445	1.010	4745	1.800
M-GFRP-anc-06f	4681	0.171	4096	0.739	4665	1.424	5092	2.060
M-GFRP-anc-10f	5362	0.388	4493	0.947	4880	1.549	4700	2.096
valori medi	4969	0.324	4345	0.803	4663	1.328	4846	1.985
dev. stand.	352	0.133	217	0.126	217	0.282	214	0.162
CoV	7.09%	41.03%	4.99%	15.67%	4.66%	21.23%	4.43%	8.14%

5.5.3.2 Campioni rinforzati con fibre di carbonio

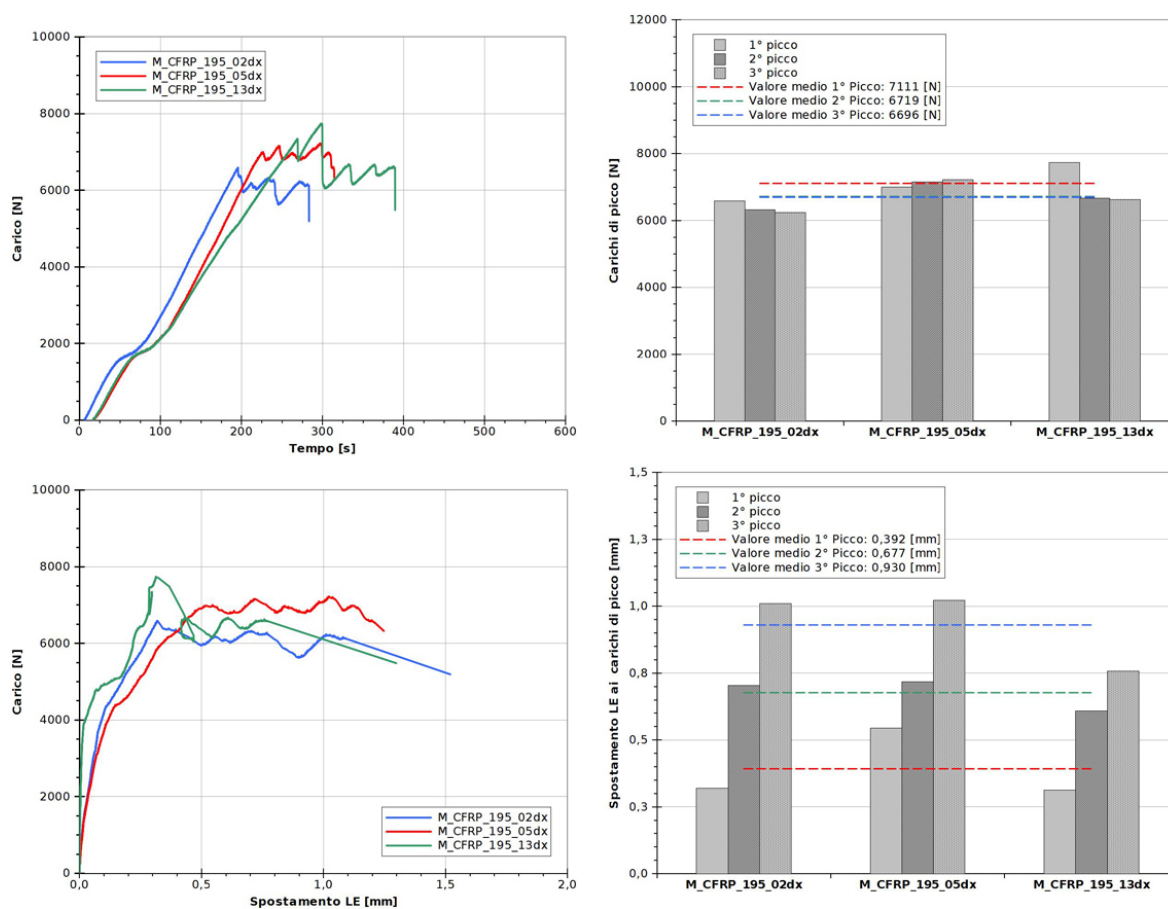


Figura 5.70: Proves di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio e lunghezza di adesione di 195 mm.

Tabella 5.49: Proves di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio e lunghezza di adesione di 195 mm.

Campione	Primo picco		Secondo picco		Terzo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-CFRP-195-02dx	6592	0.319	6329	0.704	6236	1.010
M-CFRP-195-05dx	7000	0.545	7156	0.718	7224	1.022
M-CFRP-195-13dx	7741	0.313	6673	0.609	6629	0.758
valori medi	7111	0.392	6719	0.677	6696	0.930
dev. stand.	583	0.132	415	0.059	498	0.150
CoV	8.2%	33.7%	6.2%	8.7%	7.4%	16.1%

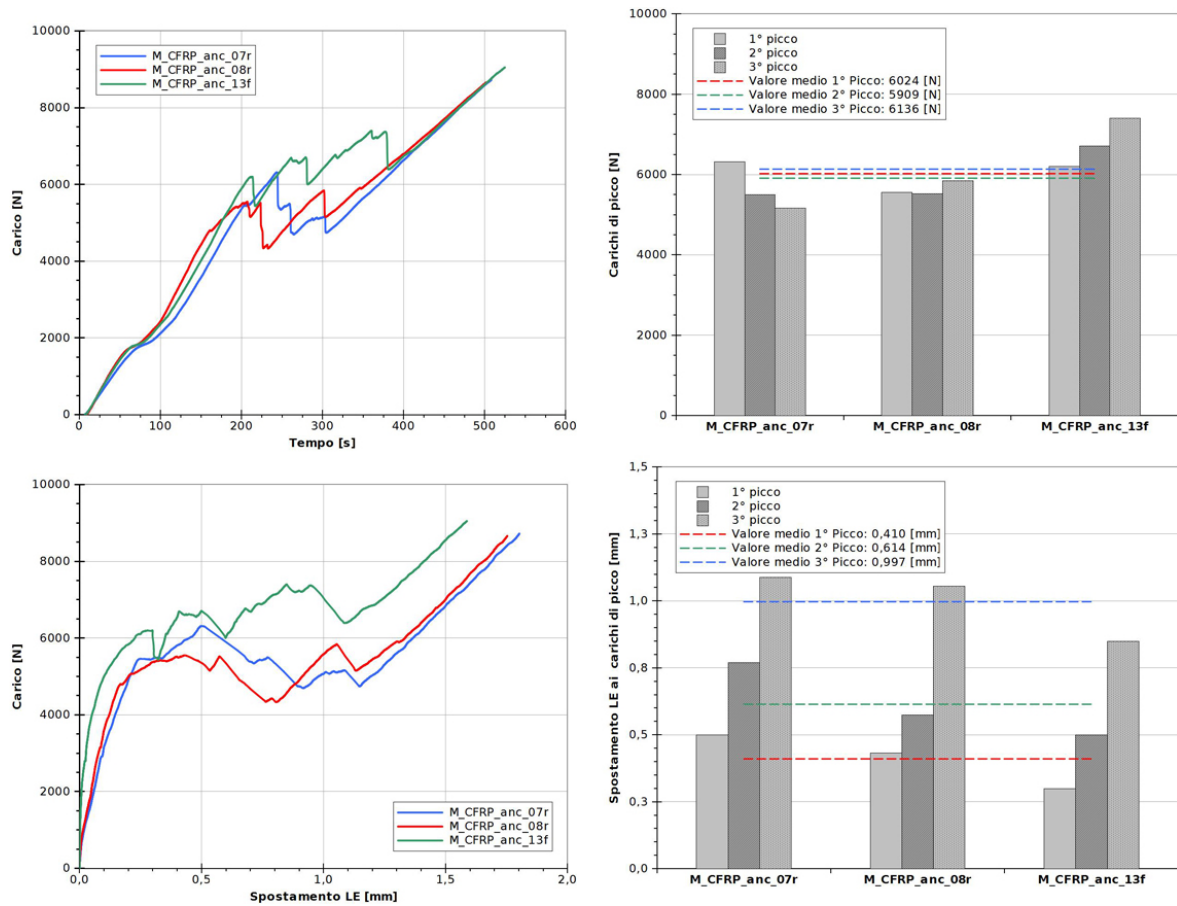


Figura 5.71: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio e lunghezza di adesione di 260 mm.

Tabella 5.50: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio e lunghezza di adesione di 260 mm.

Campione	Primo picco		Secondo picco		Terzo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-CFRP-anc-07r	6318	0.500	5501	0.770	5161	1.088
M-CFRP-anc-08r	5552	0.431	5522	0.573	5845	1.054
M-CFRP-anc-13f	6202	0.299	6706	0.500	7401	0.849
valori medi	6024	0.410	5909	0.614	6136	0.997
dev. stand.	413	0.102	690	0.140	1148	0.129
CoV	6.9%	24.8%	11.7%	22.7%	18.7%	13.0%

5.5.3.3 Campioni rinforzati con fibre di basalto

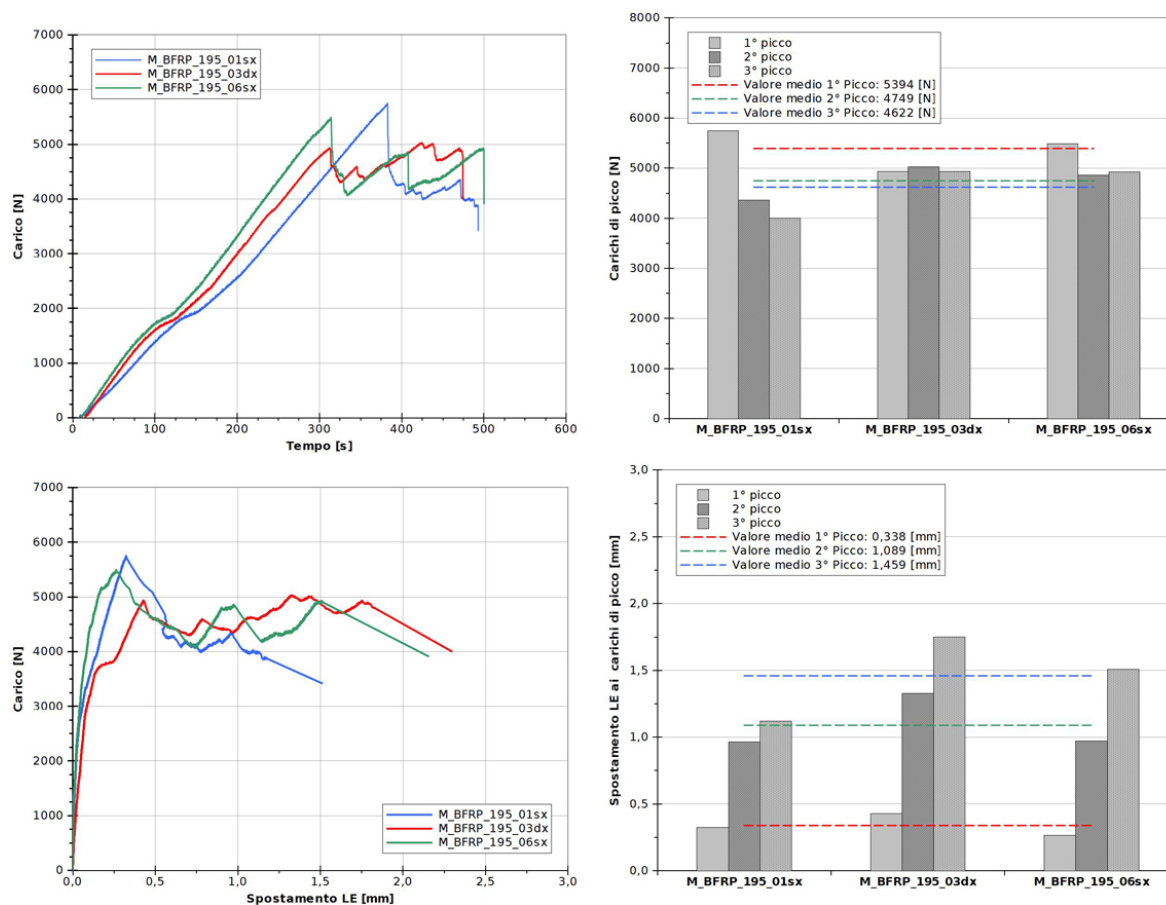


Figura 5.72: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto e lunghezza di adesione di 195 mm.

Tabella 5.51: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto e lunghezza di adesione di 195 mm.

Campione	Primo picco		Secondo picco		Terzo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-BFRP-195-01sx	5752	0.324	4361	0.965	4002	1.120
M-BFRP-195-03dx	4937	0.428	5027	1.329	4935	1.751
M-BFRP-195-06sx	5493	0.264	4859	0.973	4929	1.507
valori medi	5394	0.338	4749	1.089	4622	1.459
dev. stand.	416	0.083	347	0.208	537	0.319
CoV	7.7%	24.6%	7.3%	19.1%	11.6%	21.8%

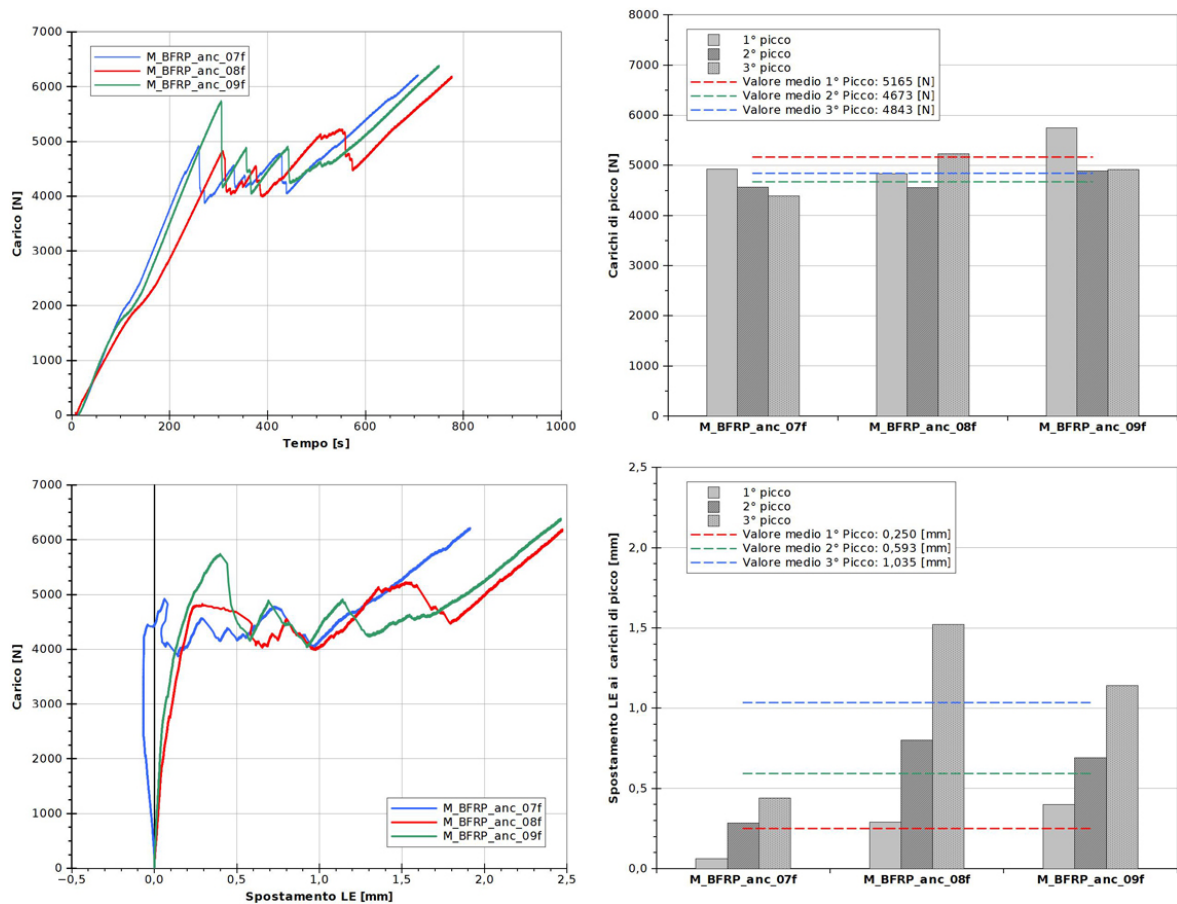


Figura 5.73: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto e lunghezza di adesione di 260 mm.

Tabella 5.52: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto e lunghezza di adesione di 260 mm.

Campione	Primo picco		Secondo picco		Terzo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-BFRP-anc-07f	4923	0.062	4570	0.285	4390	0.441
M-BFRP-anc-08f	4830	0.291	4555	0.802	5226	1.523
M-BFRP-anc-09f	5743	0.399	4893	0.692	4912	1.141
valori medi	5165	0.250	4673	0.593	4843	1.035
dev. stand.	503	0.172	191	0.272	423	0.548
CoV	9.7%	68.7%	4.1%	45.9%	8.7%	53.0%

5.5.3.4 Campioni rinforzati con fibre di acciaio

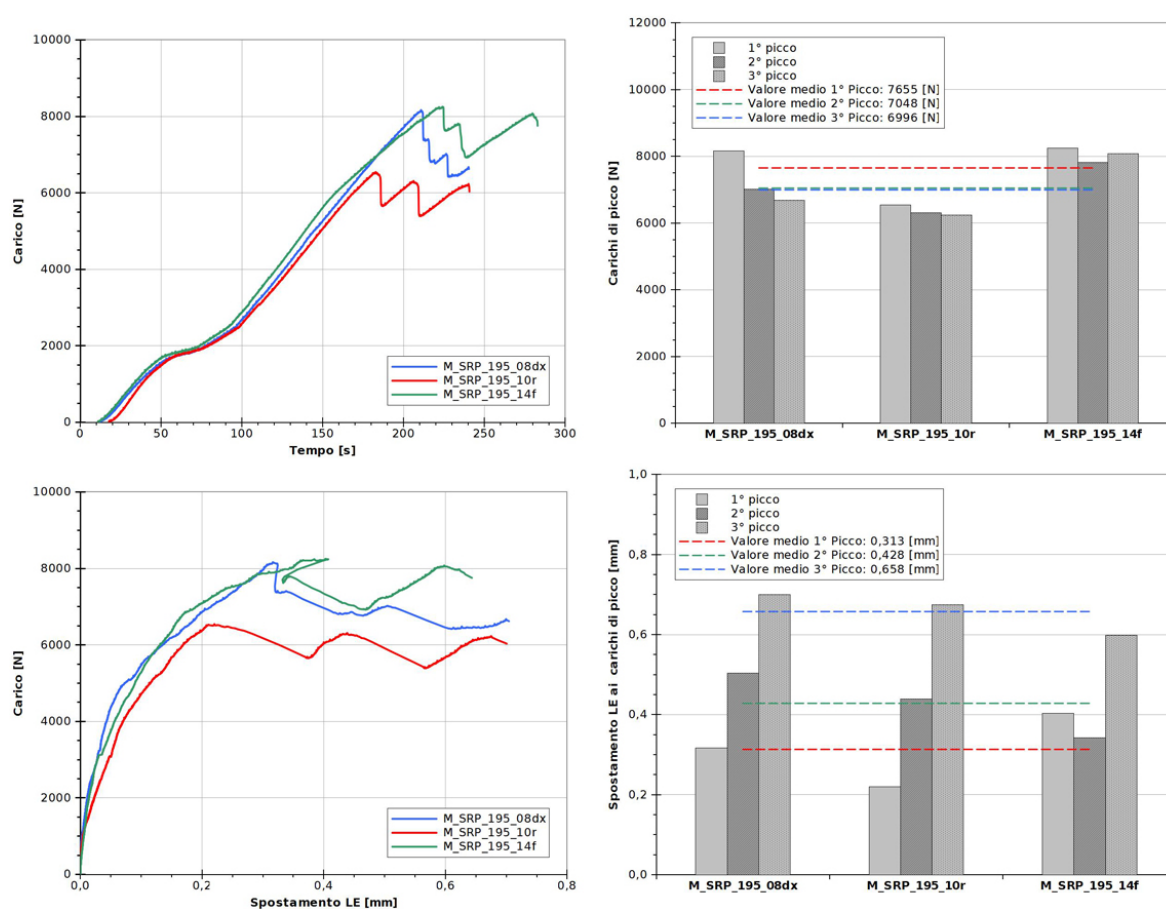


Figura 5.74: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio e lunghezza di adesione di 195 mm.

Tabella 5.53: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio e lunghezza di adesione di 195 mm.

Campione	Primo picco		Secondo picco		Terzo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-SRP-195-08dx	8167	0.316	7021	0.504	6676	0.700
M-SRP-195-10r	6546	0.220	6311	0.439	6233	0.675
M-SRP-195-14f	8251	0.403	7812	0.342	8080	0.598
valori medi	7655	0.313	7048	0.428	6996	0.658
dev. stand.	961	0.091	751	0.082	964	0.053
CoV	12.6%	29.2%	10.7%	19.0%	13.8%	8.1%

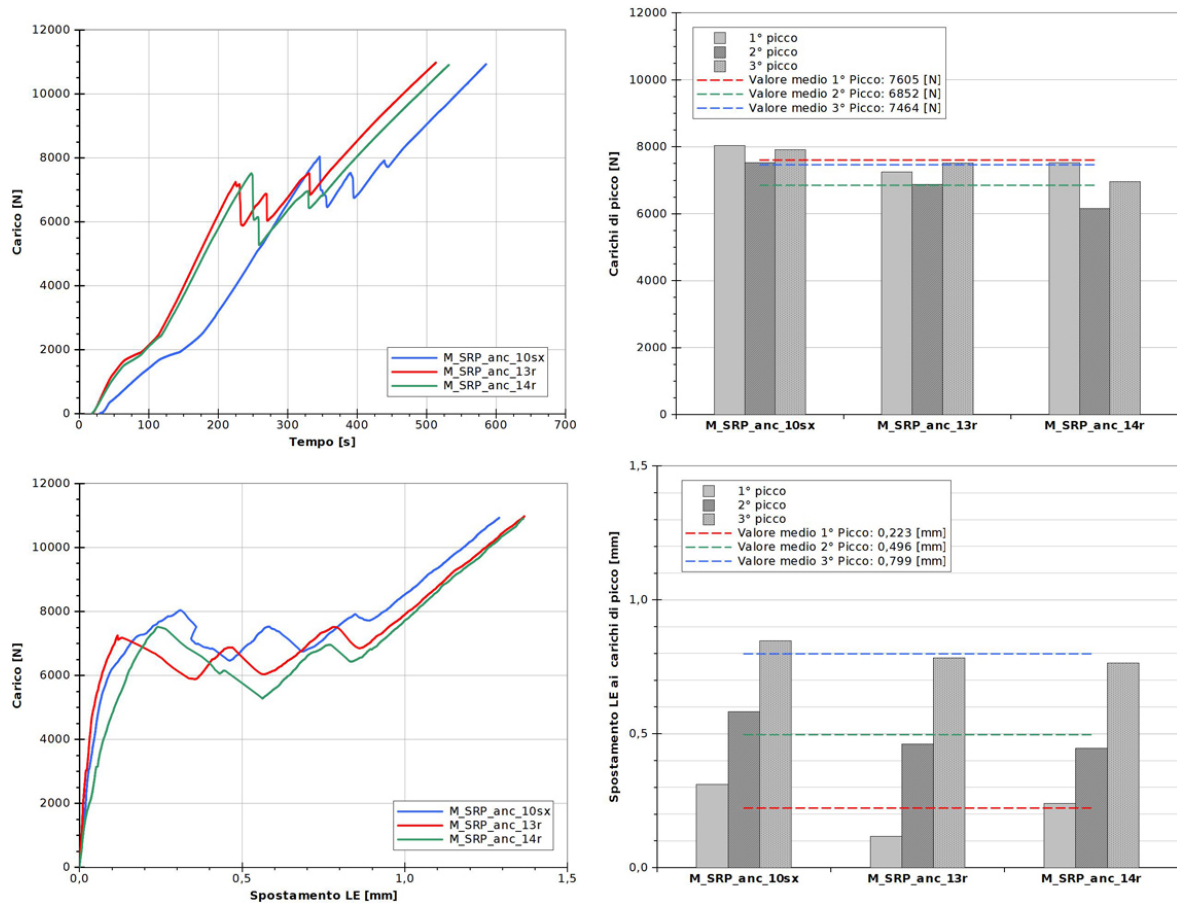


Figura 5.75: Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio e lunghezza di adesione di 195 mm e ancoraggio finale.

Tabella 5.54: Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio e lunghezza di adesione di 195 mm e ancoraggio finale.

Campione	Primo picco		Secondo picco		Terzo picco	
	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]
M-SRP-anc-10sx	8041	0.310	7530	0.583	7918	0.848
M-SRP-anc-13r	7251	0.117	6874	0.461	7516	0.783
M-SRP-anc-14r	7522	0.241	6152	0.445	6959	0.765
valori medi	7605	0.223	6852	0.496	7464	0.799
dev. stand.	402	0.098	689	0.075	481	0.044
CoV	5.3%	44.0%	10.1%	15.2%	6.4%	5.5%

5.5.4 Energia di frattura

Non avendo strumentato i campioni con gli estensimetri non è stato possibile calcolare il modulo elastico effettivo $E_{f,sg}$, e quindi nemmeno l'energia di frattura $G_{f,sg}$. In Tabella 5.55 sono riportati i valori medi delle stime di energia di frattura G_f e $G_{f,ds}$ calcolate utilizzando rispettivamente i valori di modulo elastico E_f , derivante dalla caratterizzazione meccanica, e i valori $E_{f,ds}$ ricavati dalle schede tecniche di prodotto, mentre, per ogni prova, il valore di carico utilizzato nel calcolo è stato il valore massimo fra quelli raggiunti nei vari picchi.

Tabella 5.55: Prove di adesione su murature: valori medi di energia di frattura per tipologia di rinforzo.

Rinforzo	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
GFRP	80124	70000	0.467	0.534
BFRP	86832	80000	0.475	0.515
CFRP	241015	220000	0.231	0.253
SRP	200020	190000	0.261	0.275

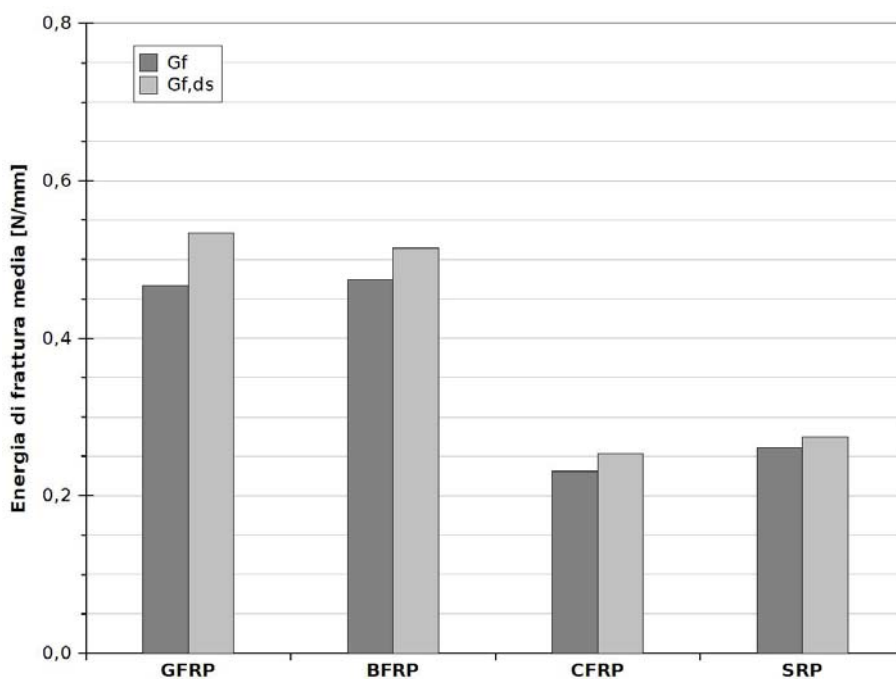


Figura 5.76: Prove di adesione su murature: istogramma dei valori medi di energia di frattura per tipologia di rinforzo.

Capitolo 6

Analisi globale dei dati sperimentali

In questo capitolo si affronta un'analisi globale dei risultati sperimentali; i vari aspetti (come le modalità di rottura, le resistenze, gli spostamenti, le deformazioni, ecc...) già analizzati nel capitolo precedente per gruppi di prove analoghe per tipologia di substrato e fibra di rinforzo utilizzata, vengono qui ritrattati operando un confronto d'insieme, in cui le principali variabili che saranno prese in considerazione sono:

- tipo di substrato: singolo mattone, blocco di malta, prisma in muratura;
- tipo di rinforzo: vetro, carbonio, basalto, acciaio;
- lunghezza di adesione.

6.1 Modalità di rottura

Come c'è già stato modo di ricordare, le modalità di rottura, ossia il modo in cui avviene la perdita di aderenza fra substrato e materiale di rinforzo, riveste una grande importanza. Il distacco può prodursi in vari modi ma quello desiderato, che esclude errori di progettazione e difetti nella posa in opera dei materiali, si produce all'interno del substrato con l'asportazione di uno strato di materiale che rimane adeso alla striscia di rinforzo.

Quando questa modalità di distacco interessa in maniera uniforme l'intera area di incollaggio si parla di distacco completo, quando invece l'area di incollaggio mostra delle rotture di tipo misto, ad esempio aree in cui il distacco si è prodotto all'interno del substrato ed altre, più o meno estese, in cui il distacco è avvenuto all'interfaccia tra substrato e adesivo, si parla di distacco parziale (Fig. 6.1a).

Analizzando le superfici di rottura di tutte e 56 le prove di shear-test si può constatare che il distacco è stato completo per la quasi totalità dei campioni testati, mentre per alcuni provini il distacco è stato parziale, presentando delle aree, tuttavia di estensione molto contenuta (Fig. 6.1b), in cui il distacco si è prodotto all'interfaccia tra substrato e adesivo. Il motivo di questa rottura non uniforme è dovuto a difetti di impregnazione delle fibre e quindi ad errori in fase di confezionamento dei provini. A questo proposito la scelta, adottata in seguito ad un errore iniziale, di applicare la resina epossidica senza stendere preventivamente un primo strato di adesivo tra substrato e tessuto di rinforzo, ma bensì impregnare le fibre solo dopo averle posizionate sui provini, è sicuramente da evitare.

Lo spessore del materiale che dopo la rottura rimane adeso alla striscia di rinforzo è risultato variabile in funzione della tipologia di substrato; nel caso dei provini costituiti

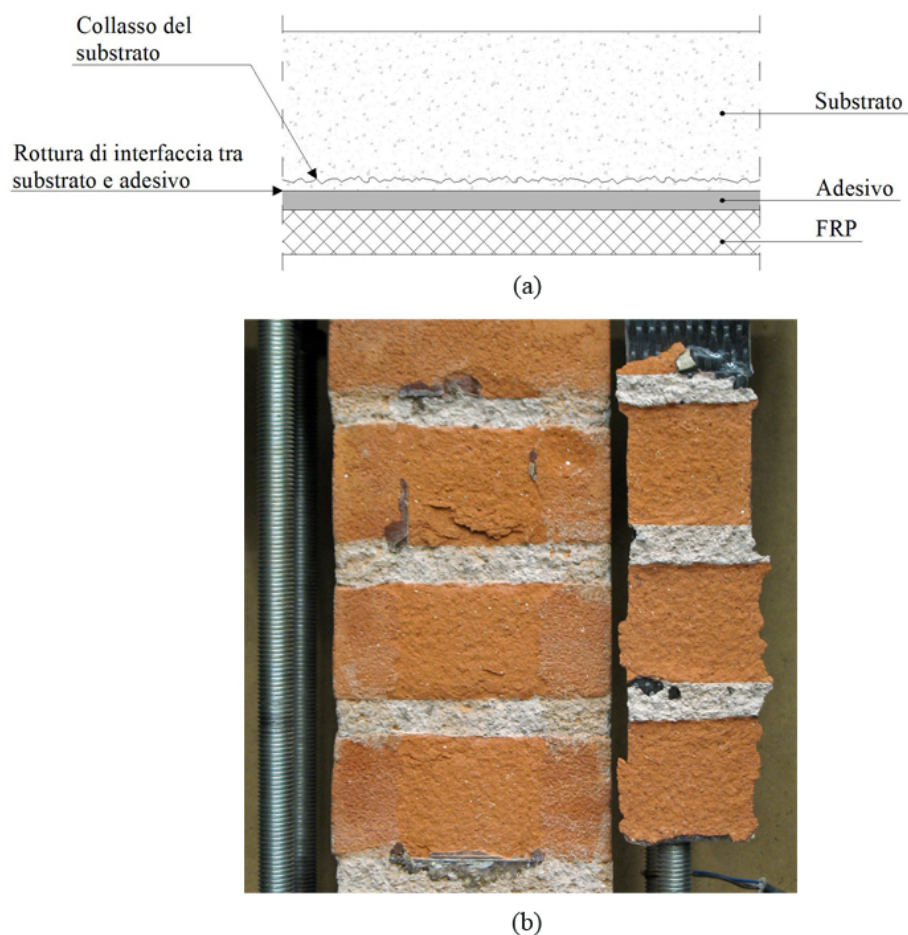


Figura 6.1: Modalità di rottura: (a) tipologie di rotture riscontrate, (b) esempio di distacco parziale.

da un singolo mattone in laterizio lo spessore è risultato omogeneo e pari a circa un paio di millimetri, nel caso dei blocchi di malta lo spessore è risultato superiore in virtù della maggiore porosità del materiale, e quindi una penetrazione più profonda della resina, e delle dimensioni degli inerti contenuti nella malta, infine per i pilastri in muratura vale quanto appena detto per i singoli materiali, ossia lo spessore è risultato più contenuto in corrispondenza del mattone in laterizio e maggiore in corrispondenza del giunto di malta.

6.2 Resistenze e spostamenti

6.2.1 Confronto tra differenti rinforzi

Come primo confronto si analizzano le resistenze e gli spostamenti ottenuti su provini costituiti da un singolo mattone in laterizio, la variabile per il confronto è rappresentata quindi dalla tipologia di rinforzo utilizzata, ossia vetro, carbonio, basalto e acciaio. In Figura 6.2 sono rappresentate nello stesso grafico le curve carico-tempo relative ai campioni rinforzati con fibre di vetro e carbonio (Fig. 6.2a) e a quelli con fibre di basalto e acciaio (Fig. 6.2b), mentre la Figura 6.2c riporta l'istogramma con i valori medi di carico massimo a rottura per tipologia di rinforzo; come si può notare i campioni rinforzati con fibre di vetro e basalto hanno manifestato resistenze molto simili, mentre la differenza si fa più marcata

se confrontiamo queste tipologie di rinforzo con quelle realizzate in fibra di carbonio e acciaio. Considerando i valori medi di carico a rottura per ogni tipologia di rinforzo si può infatti osservare che i provini rinforzati con fibre di basalto hanno mostrato una resistenza ultima maggiore del 9,71% rispetto a quelli con fibre di vetro, mentre se confrontiamo i valori ottenuti dalla fibra di carbonio rispetto al vetro otteniamo un aumento del 50,02% e del 50,87% fra acciaio e basalto. In conclusione si può affermare che i rinforzi più rigidi, come carbonio e acciaio, sopportano carichi maggiori, mentre rinforzi con caratteristiche meccaniche simili dimostrano prestazioni simili.

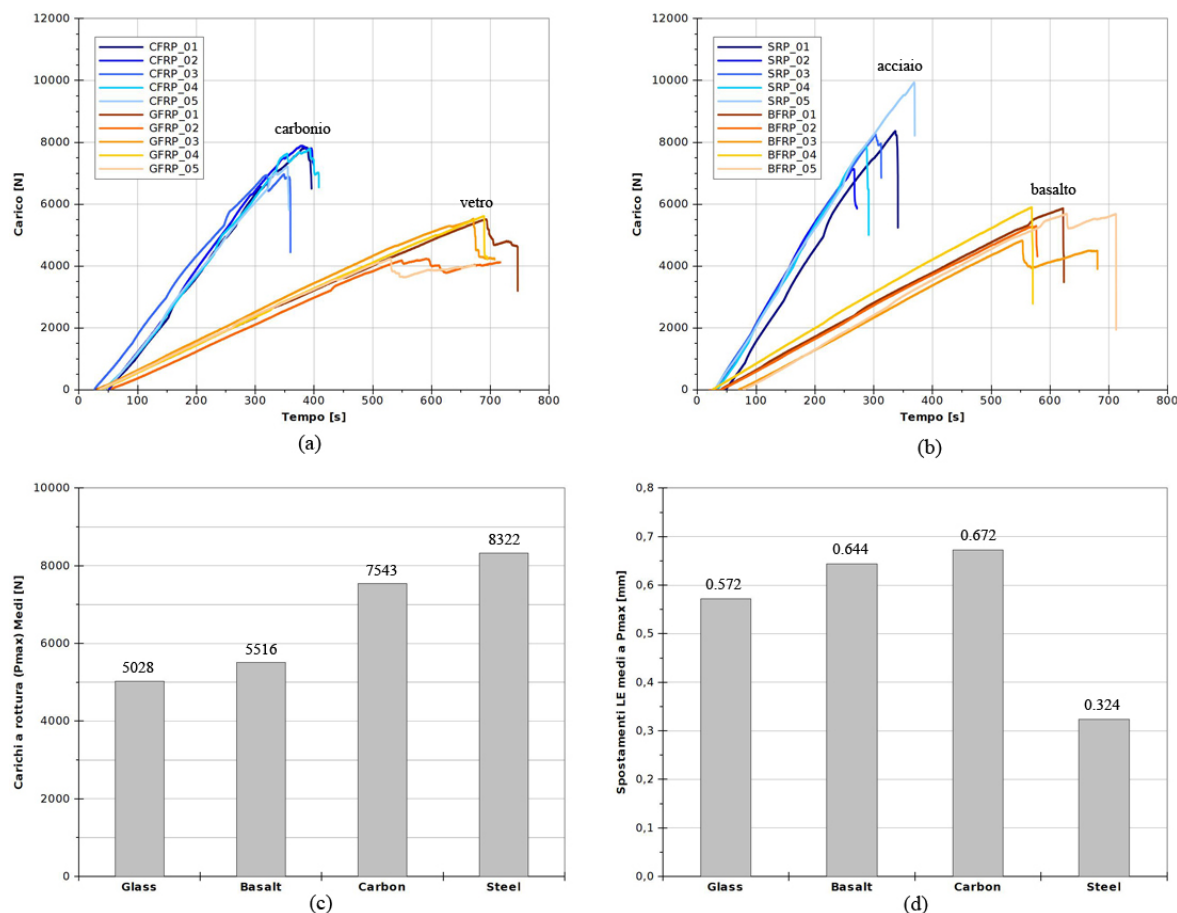


Figura 6.2: Resistenze e spostamenti, ottenuti nelle prove su singolo mattone, per varie tipologie di rinforzo: (a) curve carico-tempo per vetro e carbonio, (b) curve carico-tempo per basalto e acciaio, (c) istogramma dei valori medi di carico massimo, (d) istogramma degli spostamenti medi LE a P_{max}

Per quanto riguarda gli spostamenti dell'estremità caricata, misurati in corrispondenza del carico massimo, si può notare (Fig. 6.2d) che per vetro, basalto e carbonio i valori ottenuti sono tutto sommato confrontabili, mentre molto minori sono stati gli spostamenti registrati nel caso dell'acciaio, fibra con una rigidità assiale molto maggiore. In Tabella 6.3 sono raccolti i maggiori risultati sperimentali relativi alle prove di adesione su singolo mattone in laterizio.

Nelle sei prove di adesione eseguite su blocco di malta sono stati utilizzati due tipi di rinforzo: il vetro e il carbonio; come si può vedere dai grafici di Figura 6.3 anche in questo caso vale quanto detto nel caso dei singoli mattoni in laterizio, il carbonio sfruttando la sua maggiore rigidità ha fatto registrare carichi ultimi molto maggiori rispetto al composito

Tabella 6.1: Prove di adesione su mattone: risultati sperimentali per tutte le tipologie di rinforzo utilizzate.

Campione	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	$E_{f,sg} \cdot t_f$ [N/mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]
Glass-01	95055	11407	5515	0.513	1.07%	80.6%
Glass-02	93724	11247	4238	0.652	0.75%	61.9%
Glass-03	90238	10829	5533	0.585	1.03%	80.8%
Glass-04	104504	12540	5613	0.366	0.85%	82.0%
Glass-05	88098	10572	4240	0.743	0.83%	61.9%
valori medi	94324	11319	5028	0.572	0.91%	73.4%
dev. stand.	6324	759	721	0.143	0.14%	10.5%
CoV	6.70%	6.70%	14.34%	25.00%	14.98%	14.34%
Basalt-01	92867	13001	5868	0.825	0.89%	46.3%
Basalt-02	119982	16797	5291	0.703	0.65%	41.7%
Basalt-03	94333	13207	4828	0.637	0.86%	38.1%
Basalt-04	93745	13124	5900	0.460	1.05%	46.5%
Basalt-05	91379	12793	5695	0.594	1.00%	44.9%
valori medi	98461	13785	5516	0.644	0.89%	43.5%
dev. stand.	12082	1691	455	0.135	0.16%	3.6%
CoV	12.27%	12.27%	8.24%	20.93%	17.41%	8.25%
Carbon-01	259705	44150	7833	0.261	0.55%	31.9%
Carbon-02	201805	34307	7891	0.900	0.46%	32.1%
Carbon-03	160273	27246	6971	0.417	0.58%	28.4%
Carbon-04	220627	37507	7796	1.141	0.54%	31.7%
Carbon-05	179180	30461	7223	0.643	0.57%	29.4%
valori medi	204318	34734	7543	0.672	0.54%	30.7%
dev. stand.	38445	6536	418	0.356	0.05%	1.7%
CoV	18.82%	18.22%	5.54%	52.97%	8.97%	5.54%
Steel-01	247849	56262	8367	0.252	0.31%	24.2%
Steel-02	235689	53501	7143	0.341	0.24%	20.6%
Steel-03	251577	57108	8267	0.122	0.28%	23.9%
Steel-04	263579	59832	7894	0.374	0.25%	22.8%
Steel-05	252411	57297	9940	0.529	0.37%	28.7%
valori medi	250221	56800	8322	0.324	0.29%	24.0%
dev. stand.	10023	2275	1024	0.151	0.05%	3.0%
CoV	4.01%	4.01%	12.31%	46.54%	18.02%	12.31%

in fibra di vetro, in particolare il valore medio di carico massimo dei provini rinforzati con fibre di carbonio è risultato essere maggiore del 77,73% rispetto al valore medio dei tre provini rinforzati con fibre di vetro, e stessa cosa si può dire a riguardo degli spostamenti registrati all'estremità caricata in corrispondenza del carico massimo. In Tabella 6.2 sono raccolti i valori sperimentali risultanti dalle sei prove di adesione su blocchi di malta.

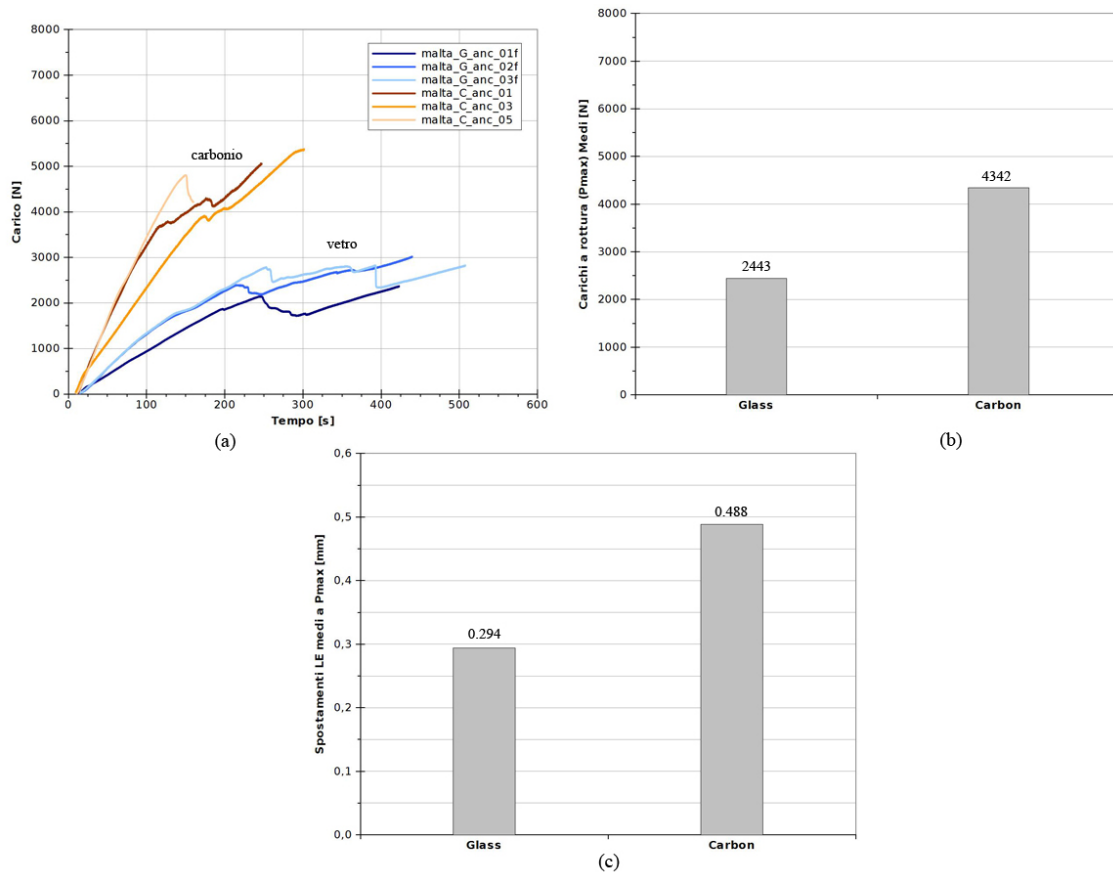


Figura 6.3: Resistenze e spostamenti, ottenuti nelle prove su blocco di malta, per le due tipologie di rinforzo utilizzate: (a) curve carico-tempo per vetro e carbonio, (b) istogramma dei valori medi di carico massimo, (c) istogramma degli spostamenti medi LE a P_{max}

Tabella 6.2: Prove di adesione su mattone: risultati sperimentali per tutte le tipologie di rinforzo utilizzate.

Campione	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	$E_{f,sg} \cdot t_f$ [N/mm]	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]
malta-G-anc-01f	88814	10658	2147	0.345	0.39%	31.4%
malta-G-anc-02f	93234	11188	2394	0.316	0.43%	35.0%
malta-G-anc-03f	86361	10363	2789	0.220	0.49%	40.7%
valori medi	89469	10736	2443	0.294	0.44%	35.7%
dev. stand.	3483	418	323	0.065	0.05%	4.7%
CoV	3.89%	3.89%	13.24%	22.23%	11.86%	13.24%
malta-C-anc-01	-	-	4302	0.676	-	17.5%
malta-C-anc-03	246169	41849	3917	0.407	0.19%	15.9%
malta-C-anc-05	-	-	4808	0.383	-	19.6%
valori medi	246169	41849	4342	0.488	0.19%	17.7%
dev. stand.	-	-	447	0.162	-	1.8%
CoV	-	-	10.29%	33.26%	-	10.29%

6.2.2 Confronto tra differenti rinforzi nei prismi murari

Nei campioni realizzati in muratura di laterizio sono stati applicati quattro tipi di rinforzo: in fibra di vetro, basalto, carbonio e acciaio. Il confronto fra queste tipologie di rinforzo è

stato condotto fra tutti i campioni con lunghezze di adesione di 195 mm e quelli ancorati, escludendo quindi i campioni, rinforzati con fibre di vetro, con lunghezze di ancoraggio minori che saranno analizzati nel seguito. Le Figure 6.4a e 6.4b mostrano le curve carico-tempo dei campioni oggetto di questo confronto, come si può vedere, anche in questo caso, le fibre caratterizzate da maggiore rigidezza, come carbonio e acciaio, hanno fatto registrare carichi ultimi maggiori mentre i campioni rinforzati con fibre di vetro e basalto hanno ottenuto risultati molto simili. In Figura 6.4c è riportato l'istogramma con i carichi di picco medi per ogni tipologia di rinforzo, anche qui è evidente quanto appena detto per le curve di carico e si può inoltre osservare che il carico massimo raggiunto si è verificato mediamente in corrispondenza del primo picco di carico, mentre i valori medi relativi al secondo e terzo picco di carico, per ogni tipologia di rinforzo, sono sostanzialmente identici.

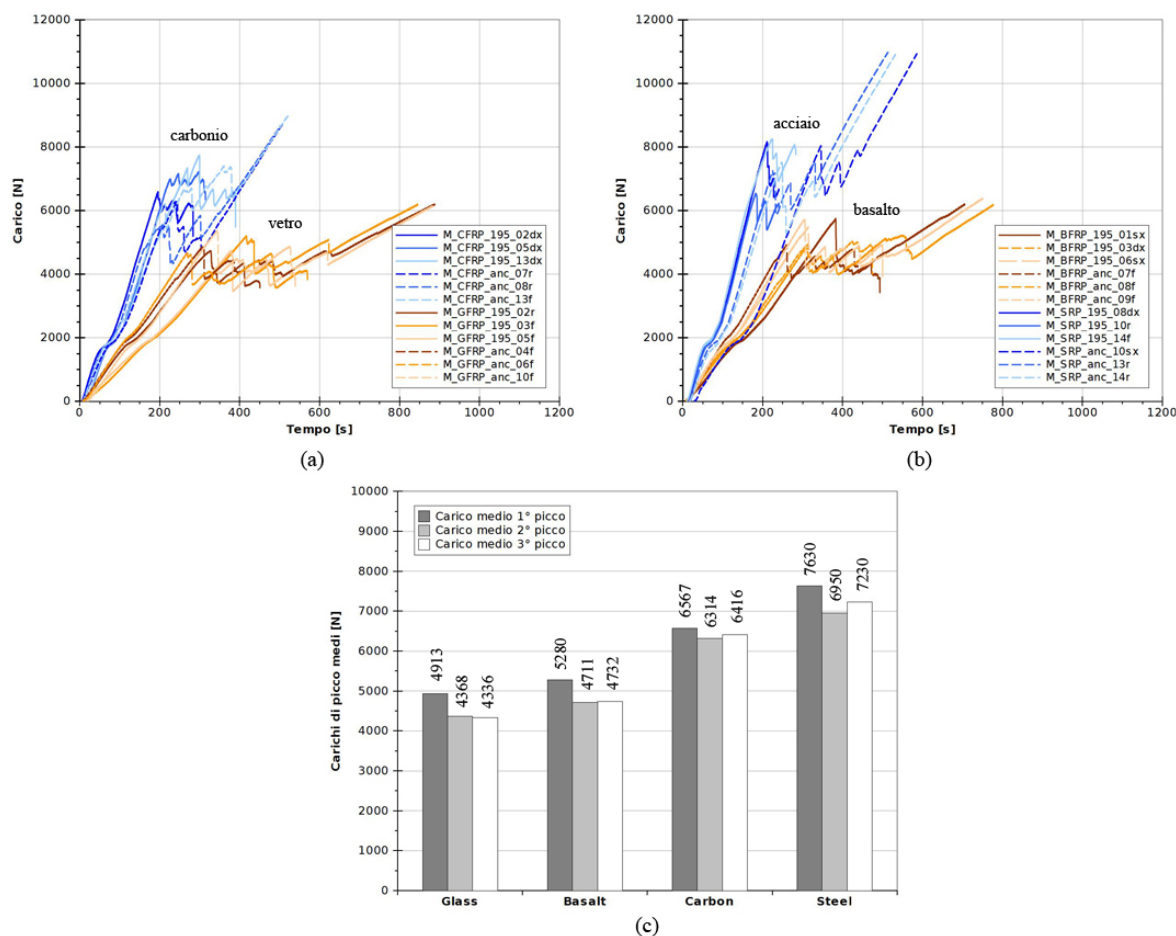


Figura 6.4: Resistenze nelle prove su prismi in muratura: (a) curve carico-tempo per vetro e carbonio, (b) curve carico-tempo per basalto e acciaio, (c) istogramma dei valori medi di carico di picco.

Le Figure 6.4a e 6.4b mostrano le curve carico-spostamento, mentre in Figura 6.4c è riportato l'istogramma relativo agli spostamenti dell'estremità caricata (LE) rilevati in corrispondenza del carico di primo picco; la scelta di non considerare in questo confronto i valori di spostamento relativi ai picchi di carico successivi dipende dal fatto che questi dipendono dalle lunghezze di composito che si vanno via via staccandosi dal supporto durante la prova e non sono quindi facilmente confrontabili. Considerando quindi i valori medi di spostamento registrati in corrispondenza del carico di primo picco, si può osservare una

sostanziale uniformità nei valori, ad eccezione delle letture relative ai campioni rinforzati con fibre di carbonio dove il valore di spostamento medio è sensibilmente maggiore; in realtà analizzando i valori di ogni singola prova (Tabella 6.3) si nota una grande variabilità nei dati raccolti, nel caso dei rinforzi in fibra di vetro, ad esempio, il coefficiente di variazione è pari al 58,2%.

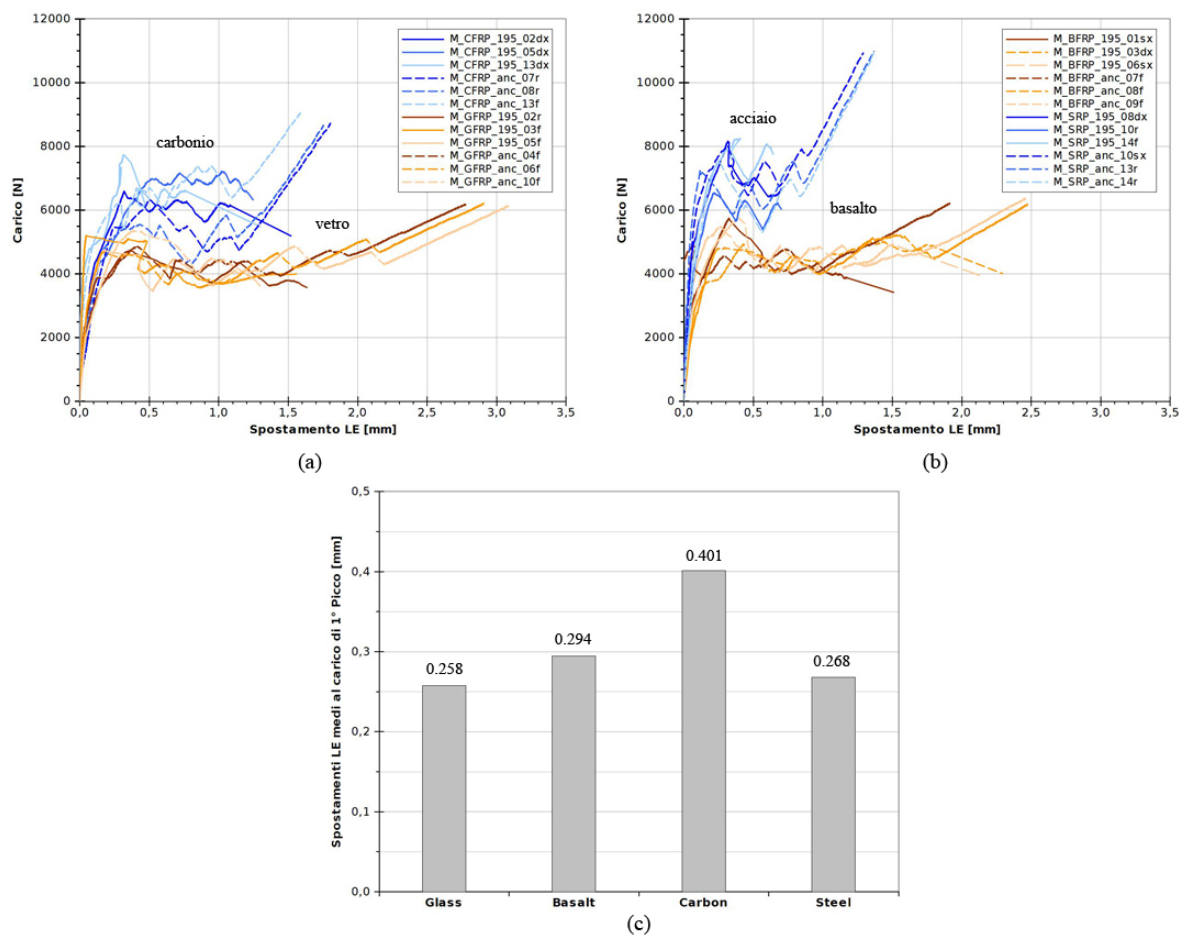


Figura 6.5: Spostamenti nelle prove su prismi in muratura: (a) curve carico-spostamento per vetro e carbonio, (b) curve carico-spostamento per basalto e acciaio, (c) istogramma degli spostamenti medi LE corrispondenti al carico di primo picco.

6.2.3 Confronto tra differenti substrati

Un ulteriore confronto, che si può fare per indagare i vari aspetti che influenzano il fenomeno dell'aderenza, è quello fra diverse tipologie di supporto; nella campagna sperimentale svolta sono stati utilizzati tre tipi di substrato: singoli mattoni in laterizio, blocchi di malta e pilastri in muratura, questi ultimi realizzati utilizzando i primi due materiali. Il confronto fra i tre diversi tipi di supporto presupporrebbe di non introdurre altre variabili, purtroppo la lunghezza di ancoraggio delle strisce di rinforzo non è la stessa, per i campioni realizzati su mattone è pari a 160 mm, nei blocchi di malta è pari a 210 mm, nei rinforzi in fibra di vetro, e 220 mm in quelli in fibra di carbonio e in entrambi i casi è presente anche l'ancoraggio finale, e infine nei pilastri in muratura la lunghezza di ancoraggio è di 195 mm e 260 mm per i campioni ancorati. Il confronto ha quindi senso se si suppone verificata

Tabella 6.3: Prove di adesione su murature: risultati sperimentali per le prove con lunghezza di adesione di 195 mm e quelle con ancoraggio, per tutte le tipologie di rinforzo utilizzate.

Campione	P_{max} [N]			δ_{LE} al 1° picco [mm]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]
	1° picco	2° picco	3° picco		
M-GFRP-195-02r	4736	4359	3797	0.359	62.8%
M-GFRP-195-03f	5199	4336	4124	0.044	66.5%
M-GFRP-195-05f	4744	4479	4107	0.170	64.9%
M-GFRP-anc-04f	4865	4445	4445	0.414	67.6%
M-GFRP-anc-06f	4681	4096	4665	0.171	67.7%
M-GFRP-anc-10f	5362	4493	4880	0.388	71.0%
valori medi	4931	4368	4336	0.258	66.8%
dev. stand.	282	148	401	0.150	2.8%
CoV	5.7%	3.4%	9.2%	58.2%	4.2%
M-BFRP-195-01sx	5752	4361	4002	0.324	37.1%
M-BFRP-195-03dx	4937	5027	4935	0.428	39.2%
M-BFRP-195-06sx	5493	4859	4929	0.264	40.2%
M-BFRP-anc-07f	4923	4570	4390	0.062	36.5%
M-BFRP-anc-08f	4830	4555	5226	0.291	38.4%
M-GFRP-anc-09f	5743	4893	4912	0.399	40.9%
valori medi	5280	4711	4732	0.294	38.7%
dev. stand.	431	254	449	0.130	1.7%
CoV	8.2%	5.4%	9.5%	44.2%	4.4%
M-CFRP-195-02dx	6592	6329	6236	0.319	26.0%
M-CFRP-195-05dx	7000	7156	7224	0.545	29.0%
M-CFRP-195-13dx	7741	6673	6629	0.313	28.6%
M-CFRP-anc-07r	6318	5501	5161	0.500	23.0%
M-CFRP-anc-08r	5552	5522	5845	0.431	23.0%
M-CFRP-anc-13f	6202	6706	7401	0.299	27.6%
valori medi	6567	6314	6416	0.401	26.2%
dev. stand.	747	675	849	0.106	2.7%
CoV	11.4%	10.7%	13.2%	26.4%	10.2%
M-SRP-195-08dx	8167	7021	6676	0.316	21.1%
M-SRP-195-10r	6546	6311	6233	0.220	18.4%
M-SRP-195-14f	8251	7812	8080	0.403	23.2%
M-SRP-anc-10sx	8041	7530	7918	0.310	22.6%
M-SRP-anc-13r	7251	6874	7516	0.117	20.8%
M-SRP-anc-14r	7522	6152	6959	0.241	19.9%
valori medi	7630	6950	7230	0.268	21.0%
dev. stand.	659	653	728	0.098	1.8%
CoV	8.6%	9.4%	10.1%	36.6%	8.5%

l'ipotesi che la lunghezza di ancoraggio sia, in tutte le prove considerate, maggiore o tutt'al più uguale a quella che le Istruzioni CNR (*CNR-DT R1 200/2013* 2013) definiscono come lunghezza ottimale di ancoraggio, ossia quella lunghezza per cui ulteriori allungamenti della zona di incollaggio non comportano incrementi della forza trasmessa. Con queste premesse

sono state analizzate e raffrontate le prove relative ai tre diversi tipi di substrato ma affini per tipologia di rinforzo utilizzato, nello specifico si è operato il confronto solo per le fibre di vetro e carbonio.

Nei provini rinforzati con fibra di vetro (Fig. 6.6) si può notare che i valori medi di carico massimo dei campioni realizzati su singolo mattone e quelli su muratura, in questi ultimi il carico massimo è stato calcolato come media dei vari picchi di carico, sono molto simili, con valori leggermente superiori nelle prove su mattone, mentre nei campioni realizzati con blocchi di malta la media dei carichi massimi delle singole prove risulta nettamente inferiore, per quanto riguarda gli spostamenti sono invece malta e muratura ad aver registrato valori molto simili mentre i provini in mattone hanno manifestato spostamenti all'estremità caricata superiori anche del 121%.

Nei provini rinforzati con fibra di carbonio (Fig. 6.7) le differenze si fanno più marcate seppur rispecchiando lo stesso comportamento, i provini realizzati su singoli mattoni in laterizio presentano un carico massimo medio superiore del 17% rispetto a quelli su muratura e del 74% rispetto ai provini realizzati in malta.

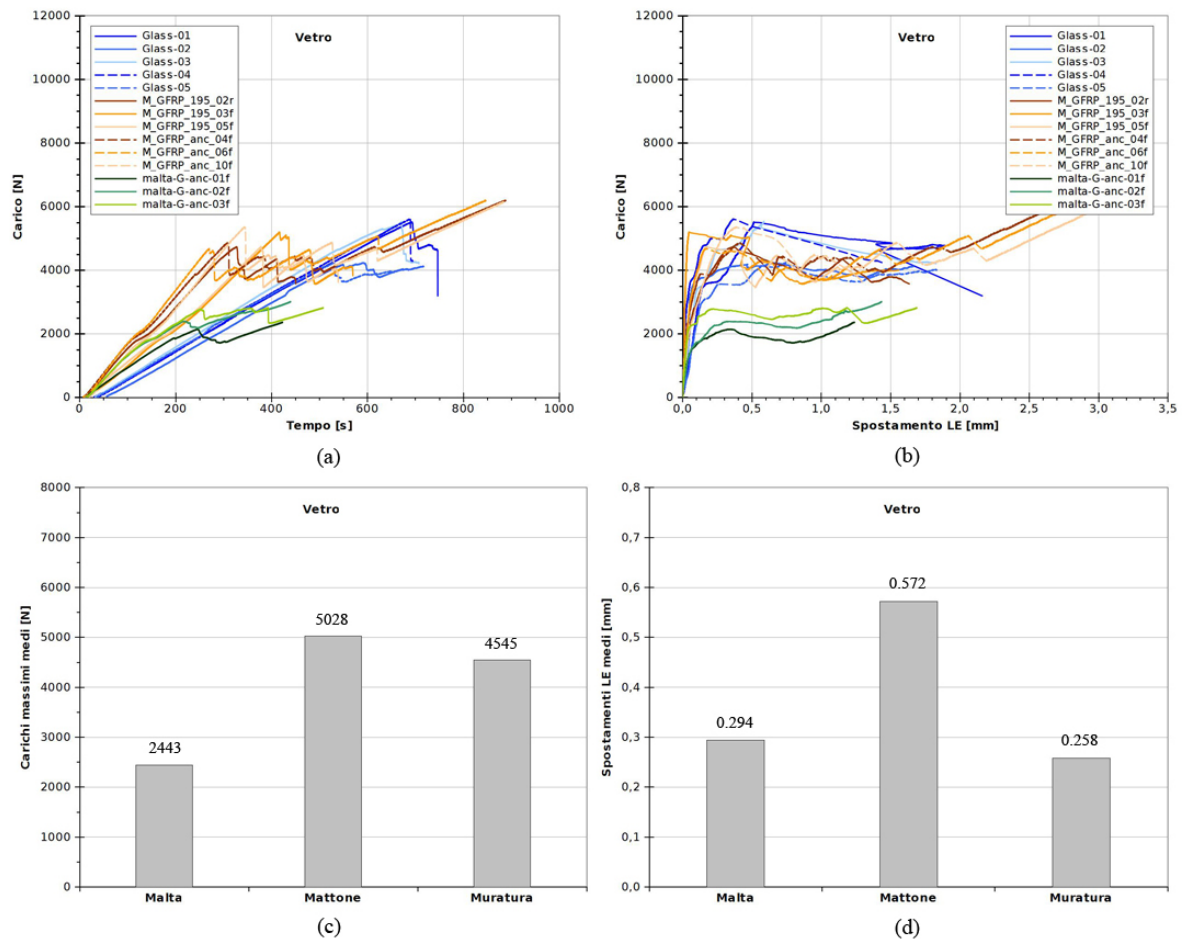


Figura 6.6: Confronto fra diverse tipologie di substrato nel caso di rinforzo in fibra di vetro: (a) curve carico-tempo, (b) curve carico-spostamento, (c) istogramma dei valori medi di carico massimo, (d) istogramma dei valori medi di spostamento all'estremità caricata.

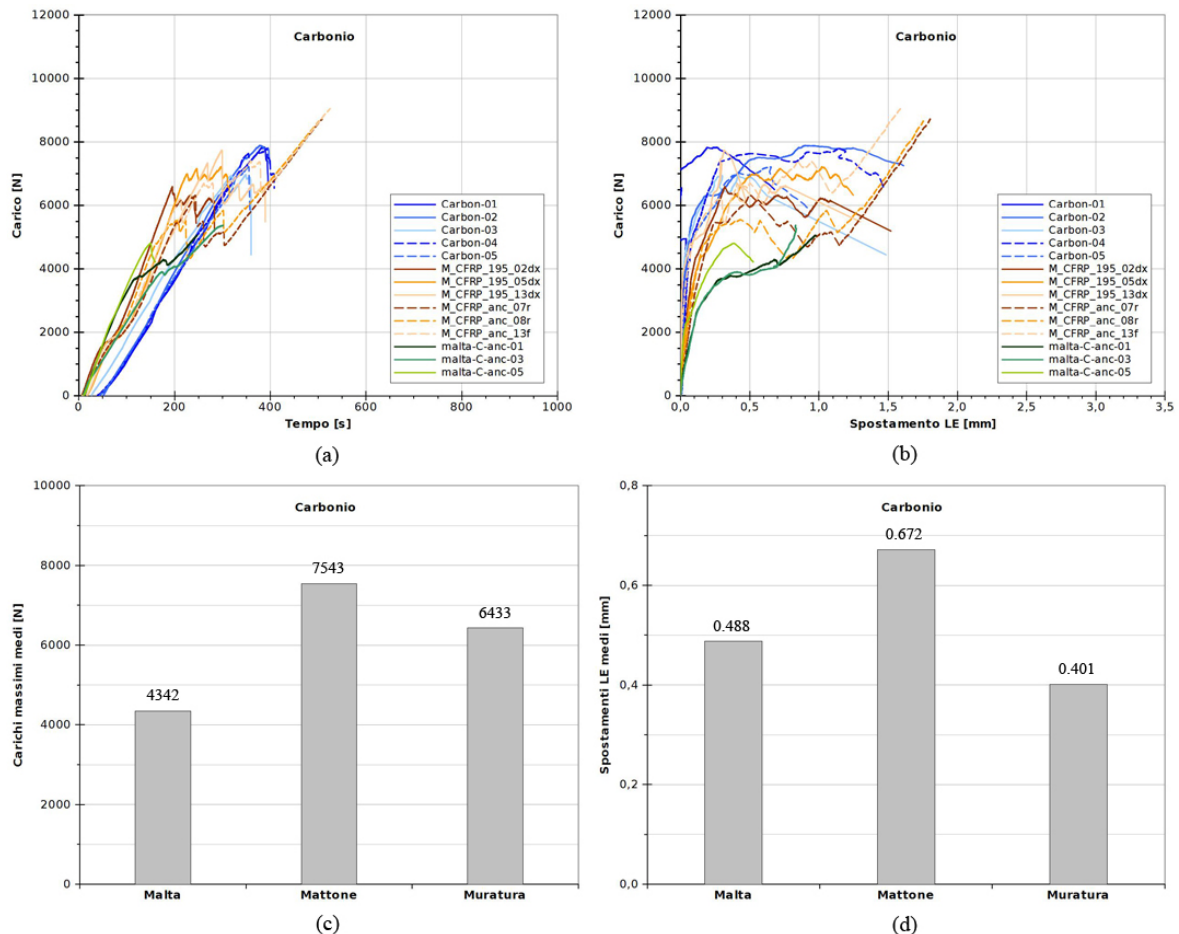


Figura 6.7: Confronto fra diverse tipologie di substrato nel caso di rinforzo in fibra di carbonio: (a) curve carico-tempo, (b) curve carico-spostamento, (c) istogramma dei valori medi di carico massimo, (d) istogramma dei valori medi di spostamento all'estremità caricata.

6.2.4 La lunghezza di adesione nella muratura

L'influenza della diversa lunghezza di adesione sul fenomeno dell'aderenza è stata indagata sui prismi in muratura rinforzati con fibre di vetro, in particolare sono state scelte quattro diverse lunghezze di incollaggio: 65 mm corrispondente ad un giunto e un mattone, 130 mm corrispondente a due giunti e due mattoni, 195 mm corrispondente a tre giunti e tre mattoni e infine 260 mm corrispondente a quattro giunti e quattro mattoni, in quest'ultimo caso è stato realizzato anche un ancoraggio finale risvoltando la striscia di rinforzo alla base del provino.

Lo scopo di questa indagine era quello di determinare quale fosse la lunghezza di incollaggio minima in grado di garantire il massimo trasferimento di carico tra rinforzo e substrato in muratura, dai risultati sperimentali ci si attendeva quindi dei valori di carico massimo sopportato via via crescenti con l'aumentare della lunghezza di incollaggio. Analizzando i risultati si può notare invece un comportamento singolare, sembra che la presenza del giunto di malta, posto ad intervalli regolari, abbia l'effetto pratico di dividere la zona di adesione in tante porzioni quanti sono i mattoni all'interno dell'area di incollaggio, analizzando l'andamento del carico questo comportamento si caratterizza con dei picchi, al raggiungimento dei quali si verifica il distacco di una porzione di rinforzo con conseguente

perdita di carico e successiva fase di ricarico fino al picco successivo. I valori di carico massimo sono risultati quindi molto uniformi e apparentemente indipendenti dalla diversa lunghezza di ancoraggio, dall'istogramma di Figura 6.9 si può vedere infatti come i tre campioni con lunghezza di ancoraggio di 65 mm hanno fatto registrare un carico massimo medio superiore ai provini con L_a pari a 130 mm e di poco inferiore a quelli con L_a di 195 e 260 mm ; considerando complessivamente tutte le prove il valore di carico massimo si è avuto in corrispondenza del primo picco, con un valore medio di 4676 N e un coefficiente di variazione del $10,9\%$ (Tab. 6.4), mentre il valore medio calcolato su tutti i picchi di carico è risultato pari a 4435 N , per confronto si ricorda che il valore di carico medio per le prove su singolo mattone e rinforzo in fibra di vetro era risultato pari 5028 N , quindi non di molto superiore.

In Figura 6.8 sono riportate le curve carico-tempo e carico-spostamento di tutte le prove con le diverse lunghezze di adesione considerate, le linee tratteggiate, parallele all'asse delle ascisse, mostrano i valori massimo, minimo e medio relativi alle prove su singolo mattone e rinforzo in fibra di vetro.

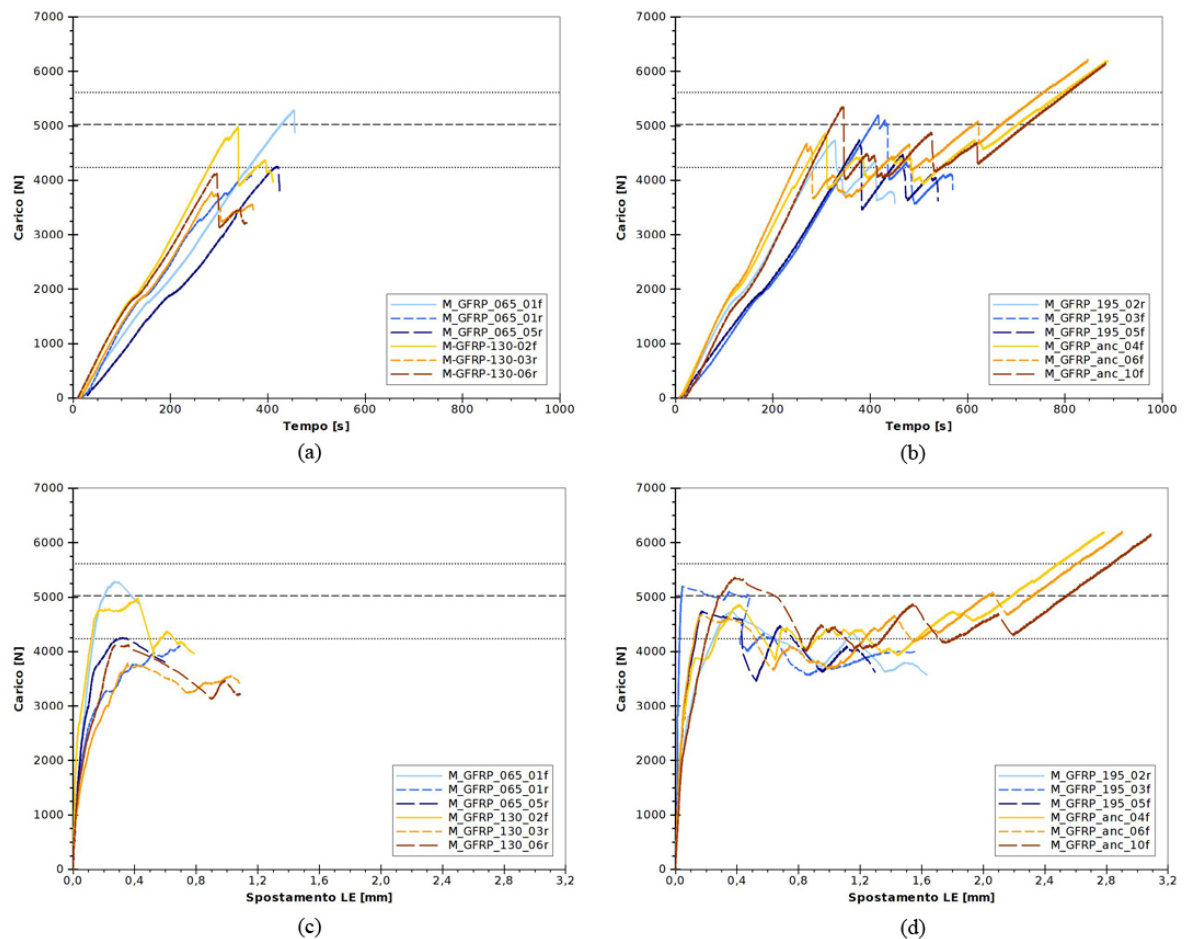


Figura 6.8: Confronto fra diverse lunghezze di adesione: (a) curve carico-tempo per provini con $L_a = 65\text{ mm}$ e $L_a = 130\text{ mm}$, (b) curve carico-tempo per provini con $L_a = 195\text{ mm}$ e $L_a = 260\text{ mm}$, (c) curve carico-spostamento per provini con $L_a = 65\text{ mm}$ e $L_a = 130\text{ mm}$, (d) curve carico-spostamento per provini con $L_a = 195\text{ mm}$ e $L_a = 260\text{ mm}$.

Considerando gli spostamenti (Fig. 6.10) si può constatare dei valori abbastanza uniformi, eccetto per un paio di prove, in corrispondenza del carico di primo picco, mentre per

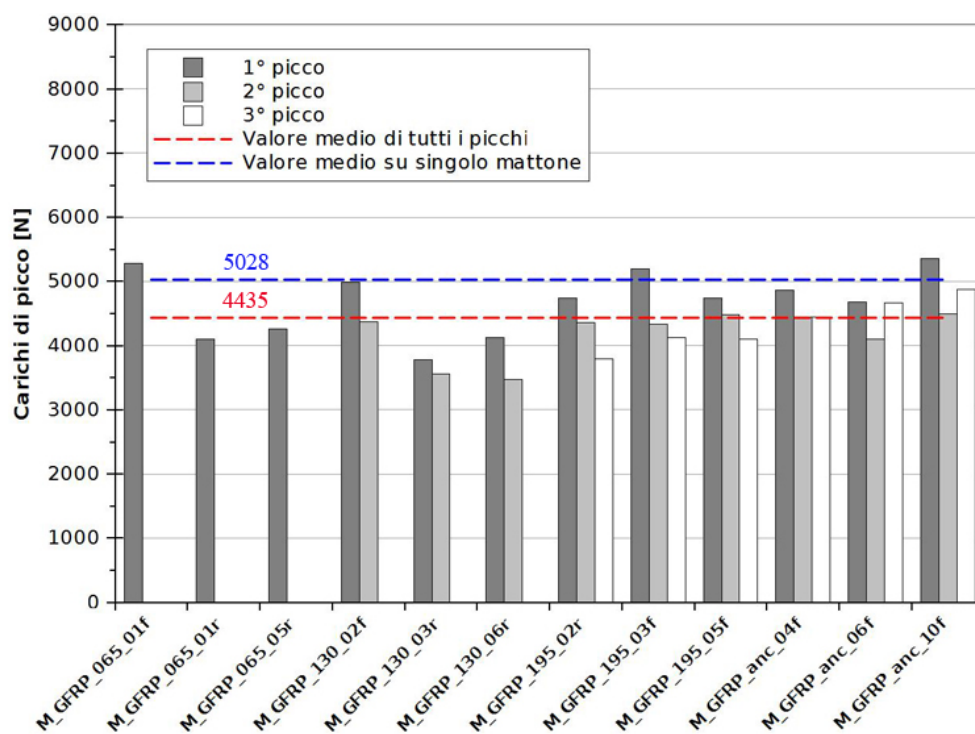


Figura 6.9: Confronto fra diverse lunghezze di adesione: istogramma con i valori di carico massimo per tutte le prove.

i picchi successivi c'è una maggiore dispersione nei dati rilevati.

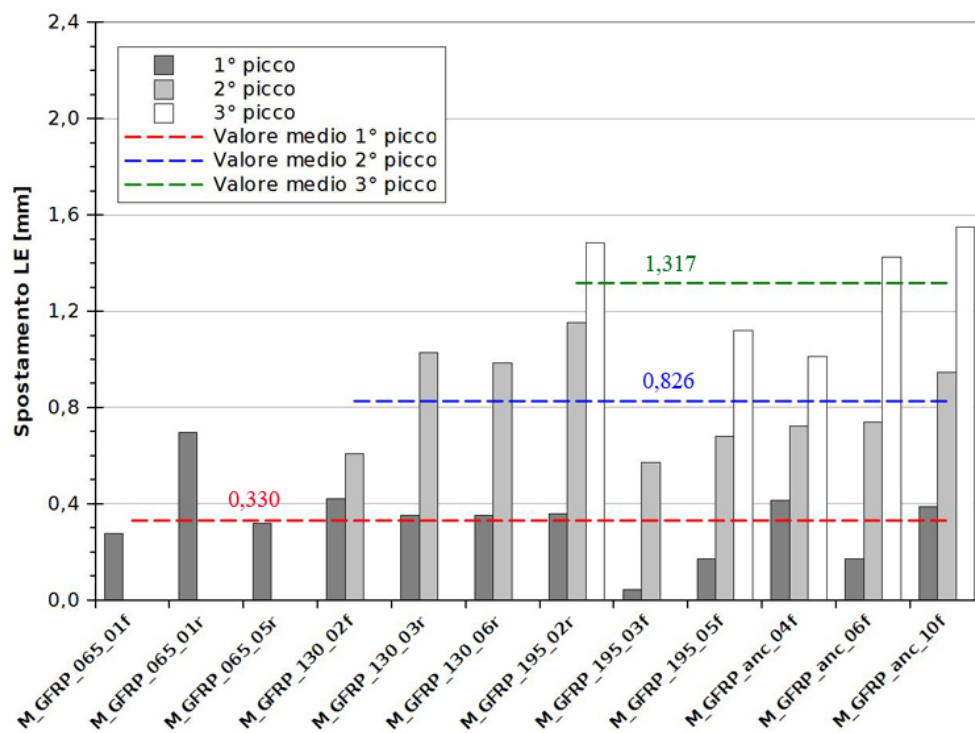


Figura 6.10: Confronto fra diverse lunghezze di adesione: istogramma con i valori di spostamento all'estremità caricata per tutte le prove.

Tabella 6.4: Confronto dei risultati sperimentali per prove con diversa lunghezza di adesione.

Campione	L_a	P_{max} [N]			δ_{LE} al 1° picco [mm]	$\frac{\sigma_{f,max}}{f_t}$ [%]
	[mm]	1° picco	2° picco	3° picco		
M-GFRP-065-01f	65	5287			0.275	77.2%
M-GFRP-065-01r	65	4104			0.695	59.9%
M-GFRP-065-05r	65	4255			0.319	62.2%
valori medi		4549			0.429	66.4%
dev. stand.		644			0.231	9.4%
CoV		14.2%			53.7%	14.2%
M-GFRP-130-02f	130	4982	4375		0.421	68.3%
M-GFRP-130-03r	130	3785	3556		0.352	53.6%
M-GFRP-130-06r	130	4124	3473		0.353	55.5%
valori medi		4297	3801		0.376	59.1%
dev. stand.		617	498		0.039	8.0%
CoV		14.4%	13.1%		10.5%	13.6%
M-GFRP-195-02r	195	4736	4359	3797	0.359	62.8%
M-GFRP-195-03f	195	5199	4336	4124	0.044	66.5%
M-GFRP-195-05f	195	4744	4479	4107	0.170	64.9%
valori medi		4893	4391	4009	0.191	64.7%
dev. stand.		265	77	184	0.159	1.9%
CoV		5.4%	1.8%	4.6%	83.0%	2.9%
M-GFRP-anc-04f	260	4865	4445	4445	0.414	67.6%
M-GFRP-anc-06f	260	4681	4096	4665	0.171	67.7%
M-GFRP-anc-10f	260	5362	4493	4880	0.388	71.0%
valori medi		4969	4345	4663	0.324	68.7%
dev. stand.		352	217	217	0.133	1.9%
CoV		7.09%	4.99%	4.66%	41.0%	2.8%
valori medi di tutte le prove		4676	4179	4336	0.330	64.8%
dev. stand.		510	395	401	0.162	6.5%
CoV		10.9%	9.4%	9.2%	49.1%	10.1%

6.2.5 Influenza del giunto di malta nella muratura

Si è già parlato dell'effetto dei giunti di malta come elemento di discontinuità all'interno della lunghezza di adesione, ma c'è un ulteriore aspetto che è emerso dalla sperimentazione e che merita di essere esaminato. Nel confezionamento dei provini in muratura è stata adottata la scelta di fare iniziare la zona di incollaggio a partire dal primo giunto di malta; in una analoga campagna sperimentale, condotta dal medesimo laboratorio e che si proponeva lo studio del fenomeno dell'aderenza su murature in pietra leccese, anziché su mattoni in laterizio, la zona di incollaggio è stata fatta partire non da un giunto di malta ma dall'elemento lapideo. Dalle prove condotte su provini così confezionati, e tese a indagare l'influenza della diversa lunghezza di ancoraggio, è stato riscontrato un effettivo aumento del carico massimo sopportabile con l'allungamento della lunghezza di adesione, diversamente da quanto riscontrato nelle murature in laterizio dove, come è stato illustrato nel paragrafo precedente, i campioni con L_a di 65 mm hanno mostrato una resistenza media superiore a quelli con L_a di 130 mm. Pur tenendo conto della diversità dei materiali, pietra leccese e mattone in laterizio, è quindi ammissibile ipotizzare che, perlomeno per i campioni con lunghezza di ancoraggio di 65 mm, questa scelta di far iniziare l'area di incollaggio con un giunto di malta abbia avuto una certa influenza sulle prestazioni meccaniche del sistema.

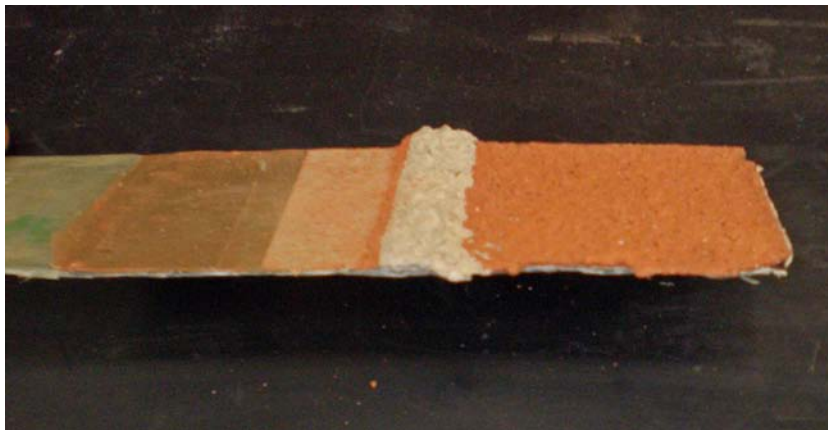


Figura 6.11: Esempio di superficie di rottura per un campione con L_a pari a 65 mm; è facilmente visibile l'ispessimento di materiale in corrispondenza del giunto di malta.

La probabile spiegazione per questo aumento della resistenza, dovuto al giunto di malta all'estremità caricata della zona di incollaggio, è che si crei una sorta di aggrappaggio meccanico; si è già visto, analizzando le superfici di rottura (Fig. 6.11), che lo spessore di materiale asportato risulta maggiore in corrispondenza dei giunti di malta, quest'ultima, infatti, grazie alla sua maggiore porosità, facilita la penetrazione della resina epossidica in profondità formando dei "cunei" di malta impregnata, e quindi molto resistente, che durante la prova di taglio realizzano appunto una sorta di aggrappaggio meccanico in grado di aumentare sensibilmente il carico ultimo.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi era finalizzato ad indagare il fenomeno del distacco per perdita di aderenza di strisce di rinforzo, costituite da materiale composito fibrorinforzato, da supporti realizzati in muratura di laterizio, mettendo in evidenza l'influenza dei giunti di malta sul comportamento dell'adesione. Lo studio è stato condotto tramite una campagna sperimentale che prevedeva l'esecuzione di prove di shear-test su provini appositamente confezionati al fine di indagare i vari aspetti del fenomeno. Nel seguito sono riassunti in maniera schematica le principali osservazioni e i risultati emersi dallo studio.

Modalità di rottura e osservazioni sul confezionamento dei provini:

- la modalità di rottura riscontrata in tutte e 56 le prove di shear-test eseguite è stata quella attesa, ossia il distacco per perdita di aderenza del rinforzo dal substrato. Nel caso di supporti costituiti da un singolo mattone in laterizio, e in quelli realizzati con blocchi di malta, la rottura si è caratterizzata dal repentino e fragile distacco del rinforzo dal substrato, con l'asportazione di un sottile strato di materiale, il cui spessore è risultato minore nei supporti in laterizio e maggiore nel caso della malta;
- nel caso delle prove eseguite su pilastri in muratura il distacco è avvenuto nel seguente modo: per lunghezze di adesione di 65 mm il distacco è stato improvviso, mentre per lunghezze di adesione maggiori, dopo un primo picco di carico e un parziale distacco corrispondente al primo mattone, con improvvisa perdita di carico e aumento di spostamento all'estremità caricata, è seguita una fase successiva di incremento del carico sino al distacco del secondo mattone e così via per il mattone successivo, con un totale di picchi di carico uguale al numero di mattoni interessati dall'incollaggio. Nei campioni con ancoraggio finale del rinforzo, dopo il distacco dell'ultimo mattone, il carico è tornato a salire mostrando un ramo elastico stabile;
- durante lo svolgimento delle prove è emersa l'influenza, sulle modalità di rottura e sui valori registrati dalle strumentazioni, di eventuali difetti dei provini come, ad esempio, curvature o rugosità localizzate nell'area di incollaggio, o difetti nell'impregnazione e allineamento delle strisce di rinforzo, rimarcando quindi l'importanza della fase relativa al confezionamento dei provini.

Prestazioni meccaniche:

- nelle prove su singolo mattone in laterizio i campioni rinforzati con GFRP e BFRP hanno ottenuto dei carichi medi a delaminazione rispettivamente di 5028 N e 5516 N , quindi valori molto simili, mentre i campioni rinforzati con CFRP e SRP hanno ottenuto dei valori maggiori pari, rispettivamente, a 7543 N e 8322 N . Il rapporto tra la resistenza a trazione della fibra di rinforzo (assunta pari a quella dichiarata nelle schede tecniche di prodotto) e il carico a delaminazione è risultato compreso tra il 46% e il 60% per GFRP e BFRP e tra il 24% e il 26% per CFRP e SRP;

- nelle prove su blocco di malta i campioni rinforzati con GFRP hanno ottenuto un carico medio a delaminazione di 2443 N mentre quelli rinforzati con CFRP un carico di 4342 N , il rapporto tra la resistenza a trazione della fibra di rinforzo e il carico a delaminazione è risultato pari al 29% per i rinforzi in fibra di vetro e al 14,6% per le fibre di carbonio;
- nelle prove su pilastri in muratura, considerando i provini con lunghezze di adesione di 195 mm e quelli ancorati, i campioni rinforzati con GFRP hanno ottenuto un carico di delaminazione, calcolato come media dei carichi di picco registrati durante la prova, di 4545 N , quelli rinforzati con BFRP un carico medio di 4908 N , quelli rinforzati con CFRP un carico di 6432 N e, infine, i campioni con SRP un carico medio di 7270 N . Come atteso, compositi più rigidi (CFRP ed SRP) hanno manifestato resistenze più elevate, mentre rinforzi simili (GFRP e BFRP) hanno avuto prestazioni simili;
- nelle prove su pilastri in muratura rinforzate con GFRP, e in cui sono state adottate diverse lunghezze di ancoraggio, i campioni con La pari a 65 mm hanno ottenuto un carico medio a delaminazione pari a 4549 N , quelli con La di 130 mm un carico medio di 4297 N , quelli con La di 195 mm un carico a delaminazione di 4893 N e, infine, quelli con lunghezza di ancoraggio di 260 mm e ancoraggio finale un carico medio di 4969 N . Come si può notare i valori di carico massimo non presentano sostanziali differenze, sembra che l'aumento della lunghezza di adesione sia ininfluenza ai fini della resistenza finale;
- considerando i valori dei picchi di carico raggiunti nelle prove su muratura, per ogni tipologia di rinforzo, non si notano differenze significative eccetto una generale prevalenza per il primo picco di carico, come se la presenza del giunto di malta dividesse la zona di incollaggio in segmenti indipendenti. Gli spostamenti dell'estremità caricata, registrati in corrispondenza del carico di primo picco, non mostrano particolari differenze fra le diverse tipologie di rinforzo, mentre gli spostamenti relativi ai picchi successivi dipendono dalle crescenti lunghezze staccate e quindi dalle diverse rigidità dei rinforzi utilizzati.

Strumentazione dei provini ed apparati di prova utilizzati:

- ai provini sono stati applicati due tipi di strumentazioni, degli estensimetri per il rilevamento delle deformazioni lungo le strisce di rinforzo e dei potenziometri per rilevare gli spostamenti relativi tra rinforzo e substrato, in alcuni casi i dati registrati da questi strumenti sono risultati essere errati o di difficile interpretazione, probabilmente a causa di malfunzionamenti, errori nell'applicazione degli strumenti stessi o disallineamenti delle strisce di rinforzo o degli stessi provini rispetto all'apparato di prova;
- l'ancoraggio finale delle strisce di rinforzo, adottato in alcuni campioni, si è rilevato molto utile nell'evitare l'improvviso distacco dei rinforzi con possibili danni alle strumentazioni;
- gli apparati di prova utilizzati per lo svolgimento delle prove si sono rilevati adeguati, nonostante ciò in alcuni casi le operazioni di allineamento dei provini è risultato essere difficoltoso così come l'ancoraggio dell'estremità libera dei rinforzi, richiedendo di conseguenza una particolare cura;

- le prove condotte sui provini rinforzati con fibre di vetro e basalto sono risultate, in termini temporali, sensibilmente più lunghe rispetto ai provini con carbonio e acciaio; per questo motivo sembra utile, in vista di una standardizzazione delle modalità di prova, collegare la velocità di prova alla rigidità del rinforzo, in modo da garantire uniformità nei tempi di esecuzione.

In conclusione il lavoro svolto ha permesso di indagare ulteriormente il fenomeno dell'adesione di compositi fibrorinforzati su laterizio e murature; nel caso delle murature è emersa la maggiore complessità del fenomeno, legata non tanto al meccanismo, che fondamentalmente è lo stesso, ma per il fatto che il rinforzo lungo il suo sviluppo risulta connesso a materiali differenti (elemento resistente e giunto) caratterizzati da diverse proprietà di interfaccia. Dall'analisi delle prove effettuate sembra che l'aumento delle lunghezze di adesione non fornisca una maggiore resistenza al distacco, come se i giunti dividessero la zona di incollaggio in porzioni di lunghezza pari allo spessore del mattone in laterizio; sembra quindi che, da un lato, la discontinuità dovuta alla presenza del giunto influisca negativamente sulle prestazioni, ostacolando la diffusione delle tensioni di adesione, dall'altro, che la rottura più profonda che avviene all'interno della malta in corrispondenza di ogni giunto, formi una sorta di cuneo di ingranamento, in grado di fornire un contributo di resistenza aggiuntiva.

Bibliografia

- Aiello, M.A. e M. Sciolti (2003). "Masonry structures strengthened with FRP sheets, the interface behavior". In: *6th International Conference on MSR-V*.
- (2007). "Analysis of the durability of the bond between masonry and FRP sheets." In: *ASTM C1583-04* (2004). Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method).
- Basilio, I. (2007). "Strengthening of arched masonry structures with composite materials". Tesi di dott. Università del Minho (Portogallo).
- Bizindavyi, L. e K.W. Neale (1999). "Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete". In: *ASCE Journal of Composites for Construction* 3.4, pp. 153–160.
- Borri, A. et al. (2006). *Compositi SRP/SRG: Caratteristiche, sperimentazioni ed applicazioni per edifici esistenti in muratura*. L'edilizia.
- Camli, U.S. e B. Binici (2007). "Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry". In: *Construction and Building Materials* 21, pp. 1431–1446.
- Cancelli, A.N., M.A. Aiello e P. Casadei (2007). "Experimental investigation on bond properties of SRP-SRG masonry systems". In:
- Capozucca, R. (2010). "Experimental FRP SRP historic masonry delamination." In: *Composites Structures* 92, pp. 891–903.
- Carbone, I.V. et al. (2001). *Le costruzioni in muratura. Interpretazione del comportamento statico e tecniche di intervento*. Milano: Hoepli.
- Carloni, C. e K. V. Subramaniam (2008). "Preliminary experimental investigation on the FRP-masonry interface debonding." In: *XXXVII Convegno Nazionale, Università di Roma La Sapienza*. AIAS. Roma.
- (2009). "Investigation of the interface fracture during debonding between FRP and masonry". In: *Advances in Structural Engineering* 12(5), pp. 731–743.
- (2012). "FRP-masonry debonding - Numerical and experimental study of the role of mortar joints". In: *ASCEE Journal of Composites for Constructions*.
- Carrara, P., D. Ferretti e F. Freddi (2013). "Debonding behavior of ancient masonry elements strengthened with CFRP sheets". In: *Composites Part B: Engineering* 45, pp. 800–810.
- Chajes, M.J. et al. (1996). "Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete". In: *ACI Structural Journal* 93.2, pp. 295–303.
- CNR-DT 200/2004* (2008). Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.
- CNR-DT R1 200/2012* (2012). Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.
- CNR-DT R1 200/2013* (2013). Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.

- De Lorenzis, Laura, B. Miller e Antonio Nanni (2001). "Bond of FRP laminates to concrete". In: *ACI Materials Journal* 98.3, pp. 256–264.
- Grande, Ernesto, Maura Imbimbo e Elio Sacco (2008). "FRP-strengthening of masonry structures: effect of debonding phenomenon". In: *VI Int. Conf. on Structural Analysis of Historic Constructions*. Bath (UK).
- Grande, M., M. Imbimbo e E. Sacco (2010). "Bond behavior of CFRP laminates glued on clay bricks experimental and numerical study". In: *Composites* 42 (part B), pp. 330–340.
- (2011). "Bond behavior of historical clay bricks strengthened with steel reinforced polymers (SRP)". In: *Materials* 4(3), pp. 585–600.
- Hendry, A.W. (1986). *Statistica delle strutture in muratura di mattoni*. Bologna: Pátron Editore.
- Lee, Y.J. et al. (1999). "Slip Modulus of FRP Sheets Bonded to Concrete". In: *ASCE Journal of Composites for Construction* 3.4, pp. 161–167.
- Mazzotti, Claudio, Marco Savoia e Barbara Ferracuti (2009). "A new single-shear set-up for stable debonding of FRP concrete joints". In: *Construction and Building Materials* 23, pp. 1529–1537.
- Minguzzi, G. (1998). *Fiber Reinforced Plastics - Utilizzo dei materiali compositi a matrice polimerica in edilizia civile*. Firenze: Alinea.
- Nakaba, Kasumassa et al. (2001). "Bond Behavior between fiber-reinforced Polymer Laminates and Concrete". In: *ACI Structural Journal* 98.3, pp. 359–367.
- Oliveira, D.V., L. Basilio e P.B. Lourenco (2011). "Experimental bond behavior of FRP sheets glued on brick masonry". In: *ASCEE Journal of Composites for Costructions* 15(1), pp. 161–167.
- Panizza, M. et al. (2010b). "Experimental comparison of various types of specimens to SL and DL shear tests on EB composites applied to bricks." In: *Dipartimento di Costruzioni e Trasporti. Università degli studi di Padova (UNIPD)*.
- (2010c). "Experimental investigation on bond of FRP-SRG applied to masonry prisms". In: *Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università degli Studi di Padova*.
- Panizza, Matteo (2010a). "FRP strengthening of masonry arches: analysis of local mechanisms and global behavior." Tesi di dott. Università degli studi di Padova.
- Savoia, M. et al. (2009). *Convegno nazionale IGF XX*. Torino.
- Scarinci, G. (2002). *Proprietà meccaniche dei materiali polimerici e compositi*. Padova: Libreria Progetto.
- Täljsten, Björn (1997). "Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete". In: *Int. J. of Adhesion and Adhesives* 19, pp. 319–327.
- Tomazevic, M. (2000). *Heartquake resistant design of masonry buildings*. London: Imperial college Press.
- Valluzzi, M.R. et al. (2012). "Round Robin Test for composite-to-brick shear bond characterization. RILEM Technical Committee." In: *Materials and Structures* 45, pp. 1761–1791.
- Watkin, D. (1990). *Storia dell'architettura occidentale*. Bologna: Zanichelli.
- Yao, J., J.G. Teng e J.F. Chen (2005). "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints". In: *Composites: Part B* 36, pp. 99–113.

Appendice A - Caratterizzazione meccanica dei materiali

.1 Risultati delle prove di trazione assiale sui compositi

Nel seguito sono riportati tabelle e diagrammi delle prove di trazione assiale sui compositi impregnati, per informazioni sulle modalità di esecuzione delle prove consultare il Paragrafo 4.4.

Tabella 5: Trazione fibre di vetro

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Spessore t_f [mm]	Carico di rottura P_u [N]	Tensione di rottura f_t [N/mm ²]	Deformazione a rottura ϵ_f
G-01	400	50	0.120	5291	882	1.20%
G-02	400	50	0.120	6863	1144	1.51%
G-03	400	50	0.120	7455	1243	1.57%
G-04	400	50	0.120	6698	1116	1.42%
G-05	400	50	0.120	7230	1205	1.63%
G-06	400	50	0.120	7545	1258	1.69%
valori medi				6847	1141	1.50%
deviazione standard				830	138	0.18%
coefficiente di variazione				12.1%	12.1%	11.7%
Valori da scheda tecnica					1400	2.32%
Codice campione				Modulo el. (ϵ 0.5‰-2.5‰) [N/mm ²]	Modulo el. (10%-40% P_u) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60% P_u) [N/mm ²]
G-01				63956	69916	77856
G-02				70951	68409	79597
G-03				66365	73798	88779
G-04				69869	82918	78881
G-05				65247	71080	77477
G-06				66272	72379	78156
valori medi				67110	73083	80124
deviazione standard				2722	5170	4307
coefficiente di variazione				4.1%	7.1%	5.4%
Valore da scheda tecnica				70000		

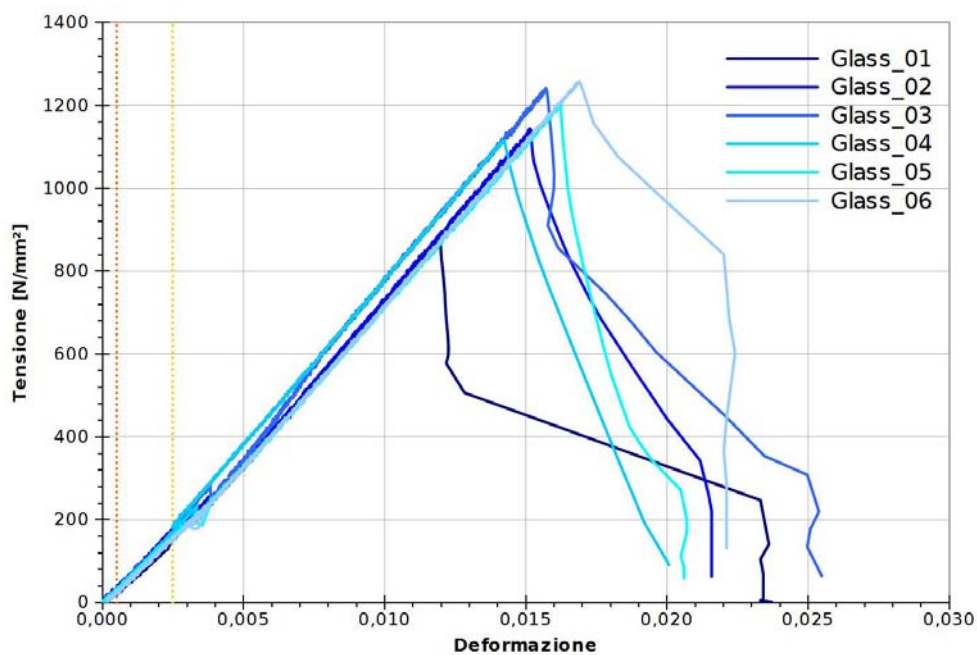


Figura 12: Trazione fibre di vetro: diagramma tensione-deformazione delle sei prove.

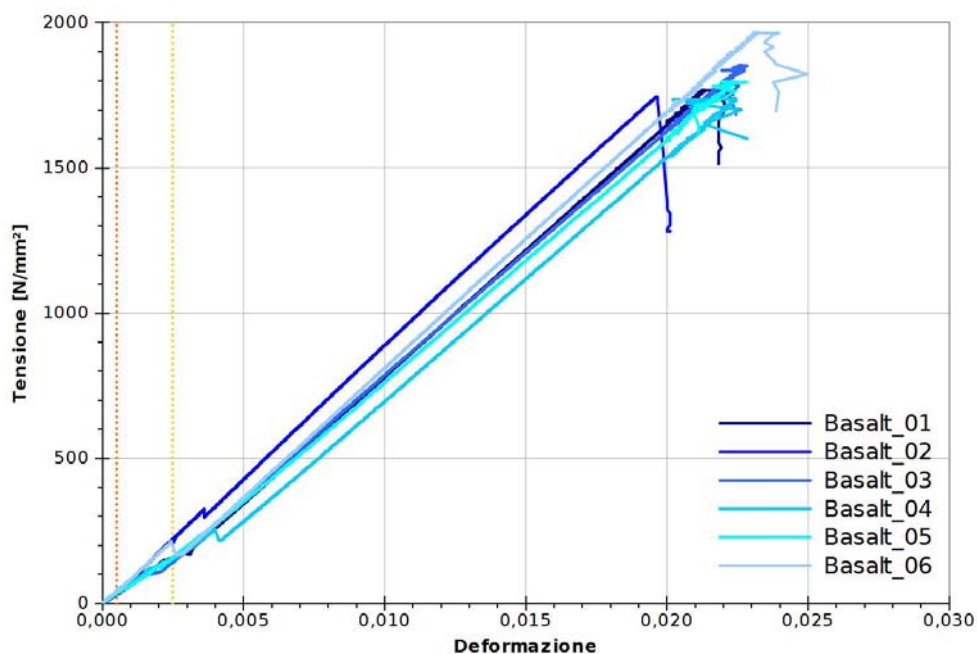


Figura 13: Trazione fibre di basalto: diagramma tensione-deformazione delle sei prove.

Tabella 6: Trazione fibre di basalto

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Spessore t_f [mm]	Carico di rottura P_u [N]	Tensione di rottura f_t [N/mm ²]	Deformazione a rottura ϵ_f
B-01	500	50	0.140	12379	1768	2.13%
B-02	500	50	0.140	12214	1745	1.96%
B-03	500	50	0.140	12979	1854	2.26%
B-04	500	50	0.140	12176	1739	2.23%
B-05	500	50	0.140	12578	1797	2.23%
B-06	500	50	0.140	13766	1967	2.31%
valori medi				12682	1812	2.19%
deviazione standard				607	87	0.13%
coefficiente di variazione				4.8%	4.8%	5.8%
Valori da scheda tecnica					1700	2.12%

Codice campione	Modulo el. (ϵ 0.5‰-2.5‰) [N/mm ²]	Modulo el. (10%-40% P_u) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60% P_u) [N/mm ²]
B-01	67057	85250	87544
B-02	93923	87052	91671
B-03	45947	86340	84755
B-04	61559	74953	84073
B-05	60823	80558	83642
B-06	89066	89261	89305
valori medi		69729	83902
deviazione standard		18320	5247
coefficiente di variazione		26.3%	6.3%
Valore da scheda tecnica		80000	

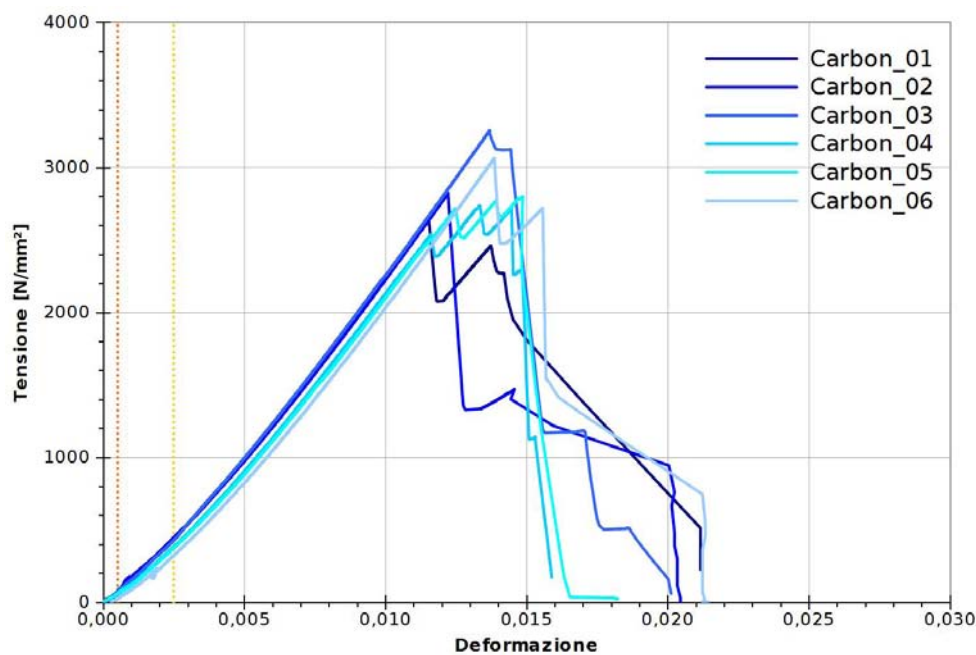


Figura 14: Trazione fibre di carbonio: diagramma tensione-deformazione delle sei prove.

Tabella 7: Trazione fibre di carbonio

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Spessore t_f [mm]	Carico di rottura P_u [N]	Tensione di rottura f_t [N/mm ²]	Deformazione a rottura ϵ_f
C-01	500	50	0.170	22549	2653	1.15%
C-02	500	50	0.170	24019	2826	1.22%
C-03	500	50	0.170	27671	3255	1.37%
C-04	500	50	0.170	23261	2737	1.33%
C-05	500	50	0.170	23783	2798	1.49%
C-06	500	50	0.170	26059	3066	1.39%
valori medi				24557	2889	1.32%
deviazione standard				1926	227	0.12%
coefficiente di variazione				7.8%	7.8%	9.1%
Valori da scheda tecnica					3500	1.45%

Codice campione	Modulo el. (ϵ 0.5%-2.5%) [N/mm ²]	Modulo el. (10%-40% P_u) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60% P_u) [N/mm ²]
C-01	177197	213270	237700
C-02	179873	209901	240801
C-03	180179	227484	250094
C-04	163554	208441	238590
C-05	163461	206475	237523
C-06	148975	210641	241382
valori medi		168873	212702
deviazione standard		12423	7587
coefficiente di variazione		7.3%	3.6%
Valore da scheda tecnica		220000	

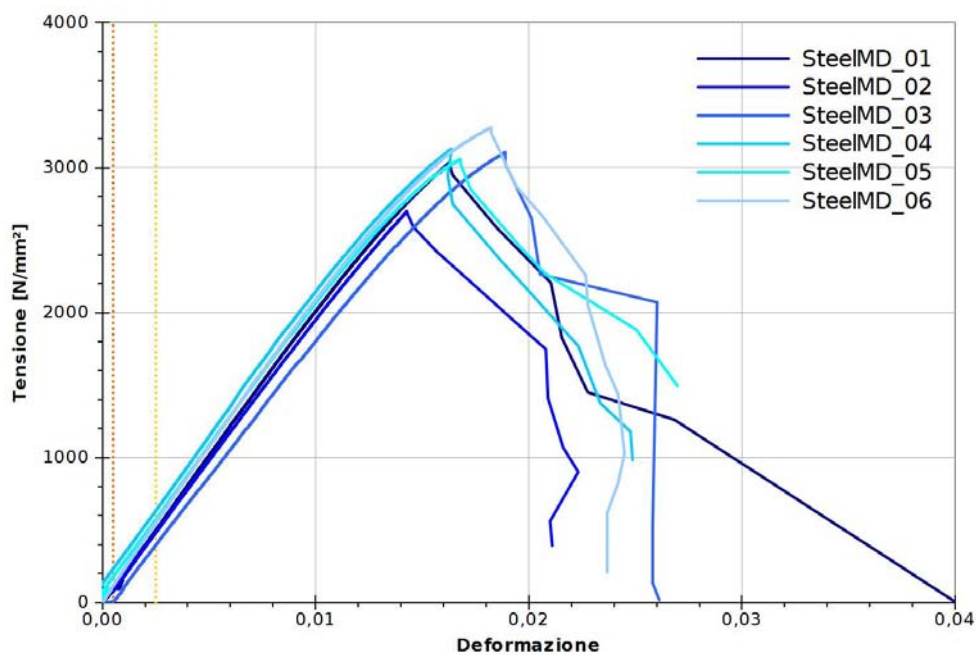


Figura 15: Trazione fibre di acciaio: diagramma tensione-deformazione delle sei prove.

Tabella 8: Trazione fibre di acciaio

Codice campione	Lunghezza l [mm]	Larghezza b [mm]	Spessore t_f [mm]	Carico di rottura P_u [N]	Tensione di rottura f_t [N/mm ²]	Deformazione a rottura ϵ_f
S-01	500	50.85	0.227	35025	3034	1.63%
S-02	500	50.85	0.227	31155	2699	1.43%
S-03	500	50.85	0.227	35835	3105	1.89%
S-04	500	50.85	0.227	36105	3128	1.64%
S-05	500	50.85	0.227	35284	3057	1.68%
S-06	500	50.85	0.227	37808	3276	1.82%
valori medi				35202	3050	1.68%
deviazione standard				2210	191	0.16%
coefficiente di variazione				6.3%	6.3%	9.7%
Valori da scheda tecnica					3070	1.60%
Codice campione				Modulo el. (ϵ 0.5‰-2.5‰) [N/mm ²]	Modulo el. (10%-40% P_u) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60% P_u) [N/mm ²]
S-01				214594	206471	201530
S-02				202614	199237	196951
S-03				198879	188161	187999
S-04				200798	204179	207201
S-05				196446	203285	201368
S-06				217085	210825	205072
valori medi				205069	202026	200020
deviazione standard				8626	7790	6857
coefficiente di variazione				4.2%	3.9%	3.4%
Valore da scheda tecnica				190000		

.2 Risultati delle prove di trazione assiale sulle resine

Nel seguito sono riportati tabelle e diagrammi delle prove di trazione assiale sulle resine, per informazioni sulle modalità di esecuzione delle prove consultare il Paragrafo 4.5.

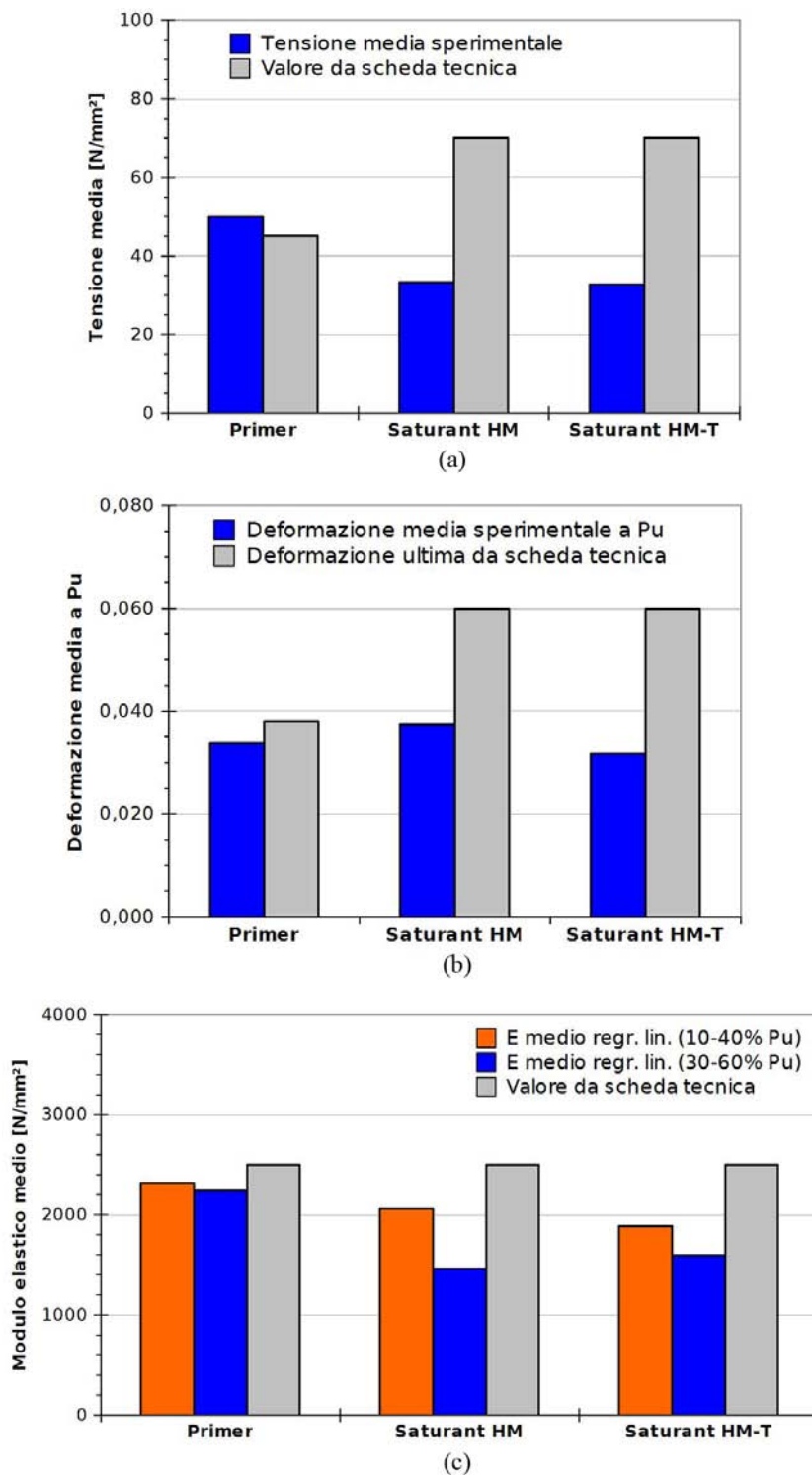


Figura 16: Trazione resine: grafico dei valori medi di (a) tensione, (b) deformazione ultima, (c) modulo elastico.

Tabella 9: Trazione resine: Fidprimer

Codice campione	Larghezza b [mm]	Spessore t [mm]	Carico di rottura P_u [N]	Tensione di rottura f_t [N/mm ²]	Deformazione a rottura ϵ
P-01	13	4	2568	49.4	3.49%
P-02	13	4	3010	57.9	4.14%
P-03	13	4	2749	52.9	4.14%
P-04	13	4	2771	53.3	3.25%
P-05	13	4	2415	46.4	3.41%
P-06	13	4	2911	56.0	3.57%
P-07	13	4	2791	53.7	3.13%
P-08	13	4	2952	56.8	3.74%
P-09	13	4	2920	56.2	4.10%
P-10	13	4	2519	48.4	3.17%
P-12	13	4	2411	46.4	3.41%
valori medi			2729	52.5	3.60%
deviazione standard			218	4.2	0.38%
coefficiente di variazione			8.0%	8.0%	10.7%
Valori da scheda tecnica				45	3.8%
Codice campione				Modulo el. (10%-40% P_u) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60% P_u) [N/mm ²]
P-01				2299	2130
P-02				2522	2186
P-03				2136	1910
P-04				2715	2466
P-05				1987	2146
P-06				2705	2197
P-07				2610	2290
P-08				1748	1921
P-09				1870	1959
P-10				2578	2290
P-12				2650	3155
valori medi				2347	2241
deviazione standard				357	348
coefficiente di variazione				15.2%	15.5%
Valori da scheda tecnica				2500	2500

Tabella 10: Trazione resine: Fidsaturant HM

Codice campione	Larghezza b [mm]	Spessore t [mm]	Carico di rottura P_u [N]	Tensione di rottura f_t [N/mm ²]	Deformazione a rottura ϵ
S-01	13	4	1562	30.0	3.66%
S-02	13	4	1758	33.8	3.98%
S-03	13	4	1570	30.2	3.62%
S-04	13	4	1714	33.0	4.30%
S-05	13	4	1984	38.2	3.57%
S-06	13	4	2008	38.6	3.86%
S-07	13	4	1729	33.2	3.49%
S-08	13	4	1779	34.2	4.26%
S-09	13	4	1520	29.2	3.70%
S-10	13	4	1632	31.4	3.78%
S-12	13	4	1586	30.5	3.29%
valori medi			1713	32.9	3.77%
deviazione standard			164	3	0.31%
coefficiente di variazione			9.6%	9.6%	8.3%
Valori da scheda tecnica				70	6.0%

Codice campione	Modulo el. (10%-40% P_u) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60% P_u) [N/mm ²]	
S-01	1489	1262	
S-02	1720	1150	
S-03	1865	1268	
S-04	1340	1157	
S-05	2087	1785	
S-06	2048	1599	
S-07	2382	1369	
S-08	1341	1209	
S-09	1691	1360	
S-10	2541	1223	
S-12	2164	1329	
valori medi		1879	1337
deviazione standard		405	194
coefficiente di variazione		21.5%	14.5%
Valori da scheda tecnica		2500	2500

Tabella 11: Trazione resine: Fidsaturant HM-T

Codice campione	Larghezza b [mm]	Spessore t [mm]	Carico di rottura P_u [N]	Tensione di rottura f_t [N/mm ²]	Deformazione a rottura ϵ
T-01	13	4	1897	36.5	3.04%
T-02	13	4	1913	36.8	3.53%
T-03	13	4	1709	32.9	3.09%
T-04	13	4	1675	32.2	2.96%
T-05	13	4	1846	35.5	3.70%
T-06	13	4	1891	36.4	3.25%
T-07	13	4	1606	30.9	3.00%
T-08	13	4	1645	31.6	3.17%
T-09	13	4	1530	29.4	3.09%
T-10	13	4	1556	29.9	3.09%
T-12	13	4	1562	30.0	3.04%
valori medi			1712	32.9	3.18%
deviazione standard			149	3	0.23%
coefficiente di variazione			8.7%	8.7%	7.3%
Valori da scheda tecnica				70	6.0%
Codice campione			Modulo el. (10%-40% P_u) [N/mm ²]	Modulo el. (30%-60% P_u) [N/mm ²]	
T-01			2132	1799	
T-02			1906	1672	
T-03			1584	1592	
T-04			1758	1704	
T-05			1293	1481	
T-06			1552	1580	
T-07			2464	1622	
T-08			1671	1123	
T-09			1808	1600	
T-10			2288	1495	
T-12			2055	1696	
valori medi			1865	1578	
deviazione standard			347	177	
coefficiente di variazione			18.6%	11.2%	
Valori da scheda tecnica				2500	2500

Appendice B - Esecuzione delle prove di adesione

In questo capitolo sono raccolte le schede riassuntive di tutte le prove che non sono state già descritte nel Capitolo 5.

.3 Prove di adesione su mattone

SL-Glass-01

Il campione ha presentato una rottura per distacco completo della striscia di rinforzo, con l'asportazione di uno strato omogeneo di substrato. Come si può notare nella Figura 19, la concentrazione di tensione all'estremità caricata e il contatto non perfetto fra testa del provino e apparato di ritenzione, ha provocato il distacco di una porzione cuneiforme di mattone; nelle prove successive, inserendo opportunamente fra mattone e piastra metallica delle sottili lamine di acciaio, questo fenomeno si è di molto limitato.

Tabella 12: Campione SL-Glass-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	160	80124	70000	1141	1400

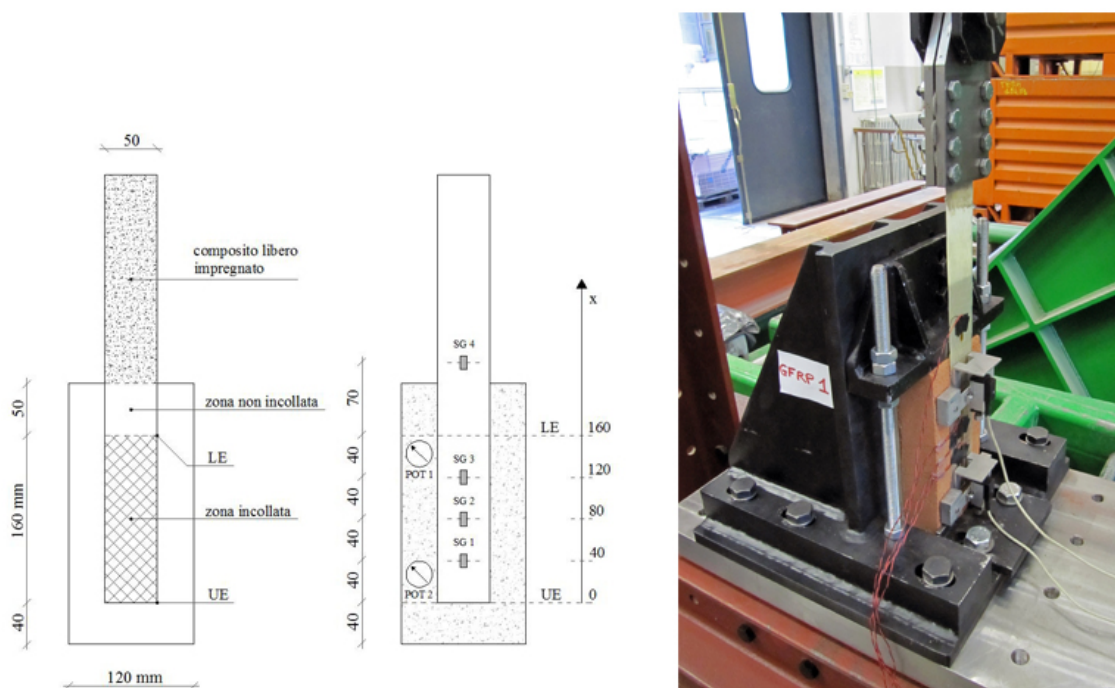


Figura 17: Campione SL-Glass-01: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 13: Campione SL-Glass-01: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	5515	1.07%	0.513	95055	0.633	0.724	0.533

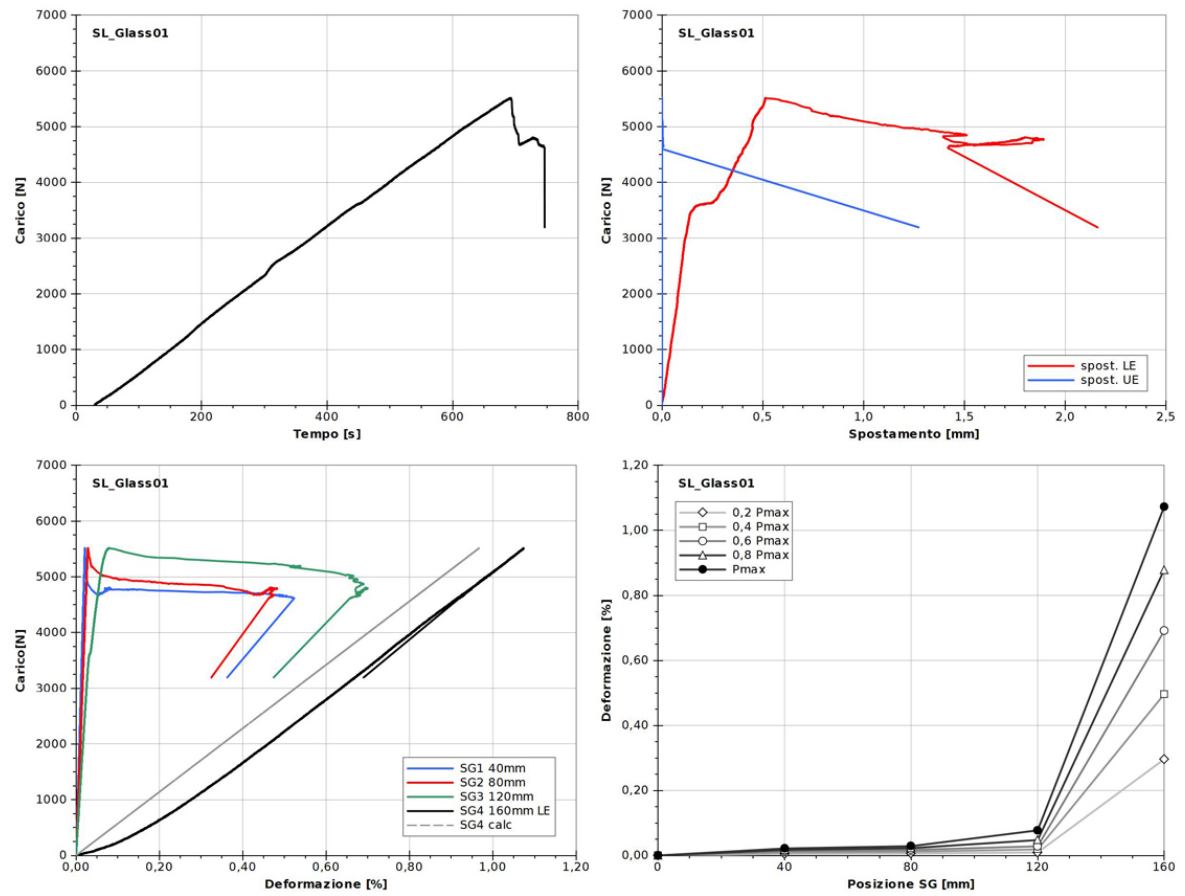


Figura 18: Campione SL-Glass-01: grafici delle principali grandezze analizzate.

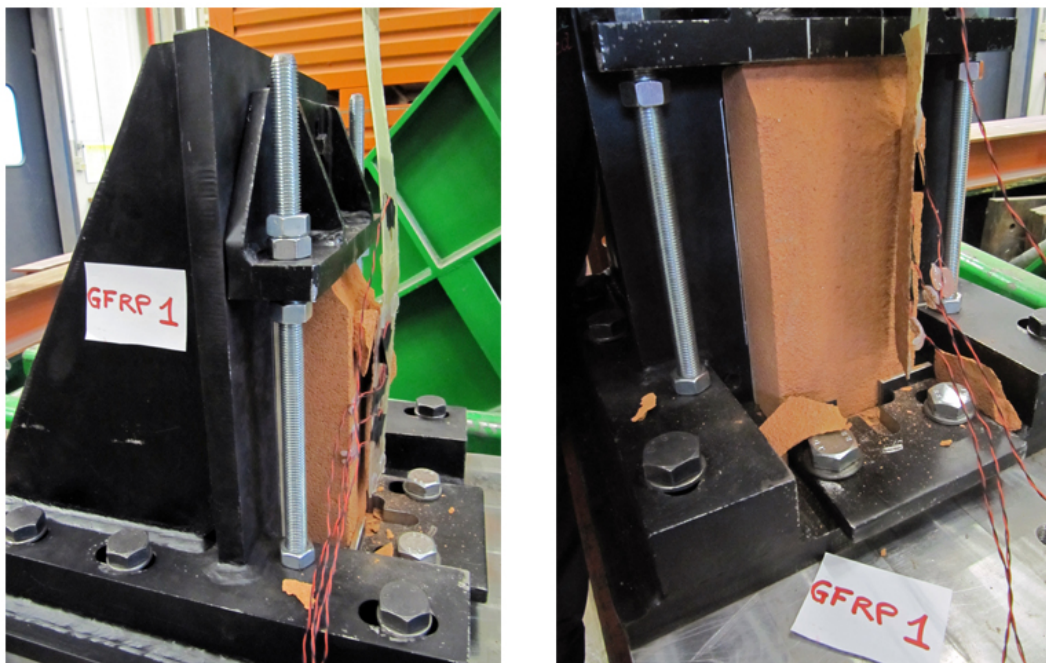


Figura 19: Campione SL-Glass-01: campione dopo la prova.

SL-Glass-03

La prova è proceduta regolarmente, terminando con il distacco completo del rinforzo e l'asportazione di uno strato omogeneo di substrato.

Tabella 14: Campione SL-Glass-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	160	80124	70000	1141	1400

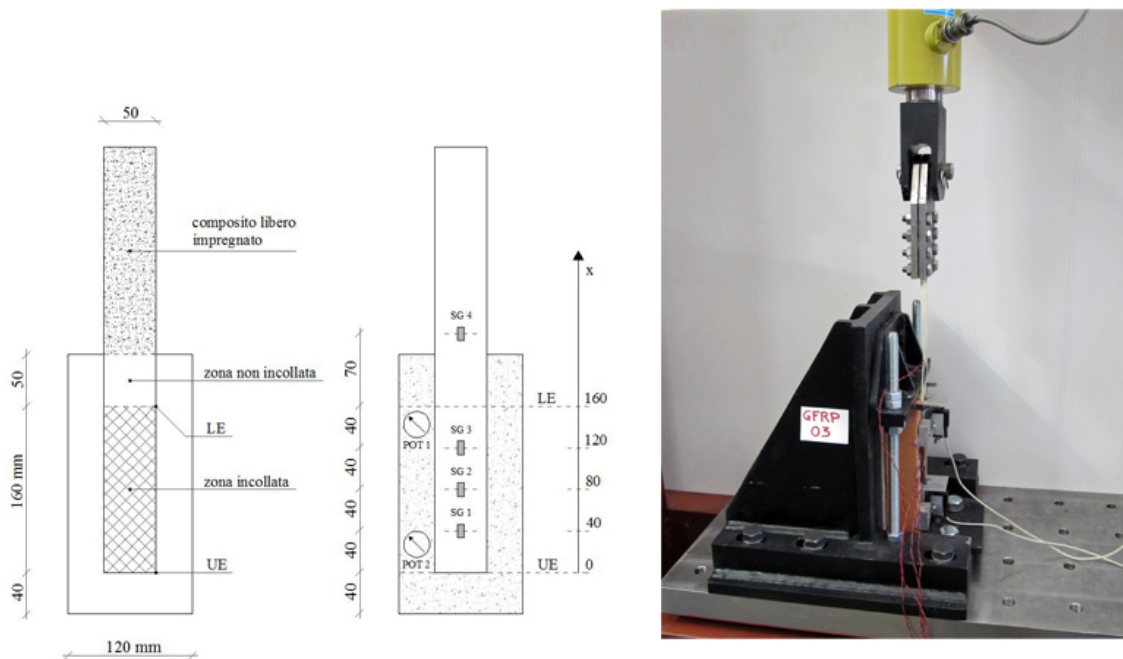


Figura 20: Campione SL-Glass-03: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 15: Campione SL-Glass-03: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	5533	1.03%	0.585	90238	0.637	0.729	0.565

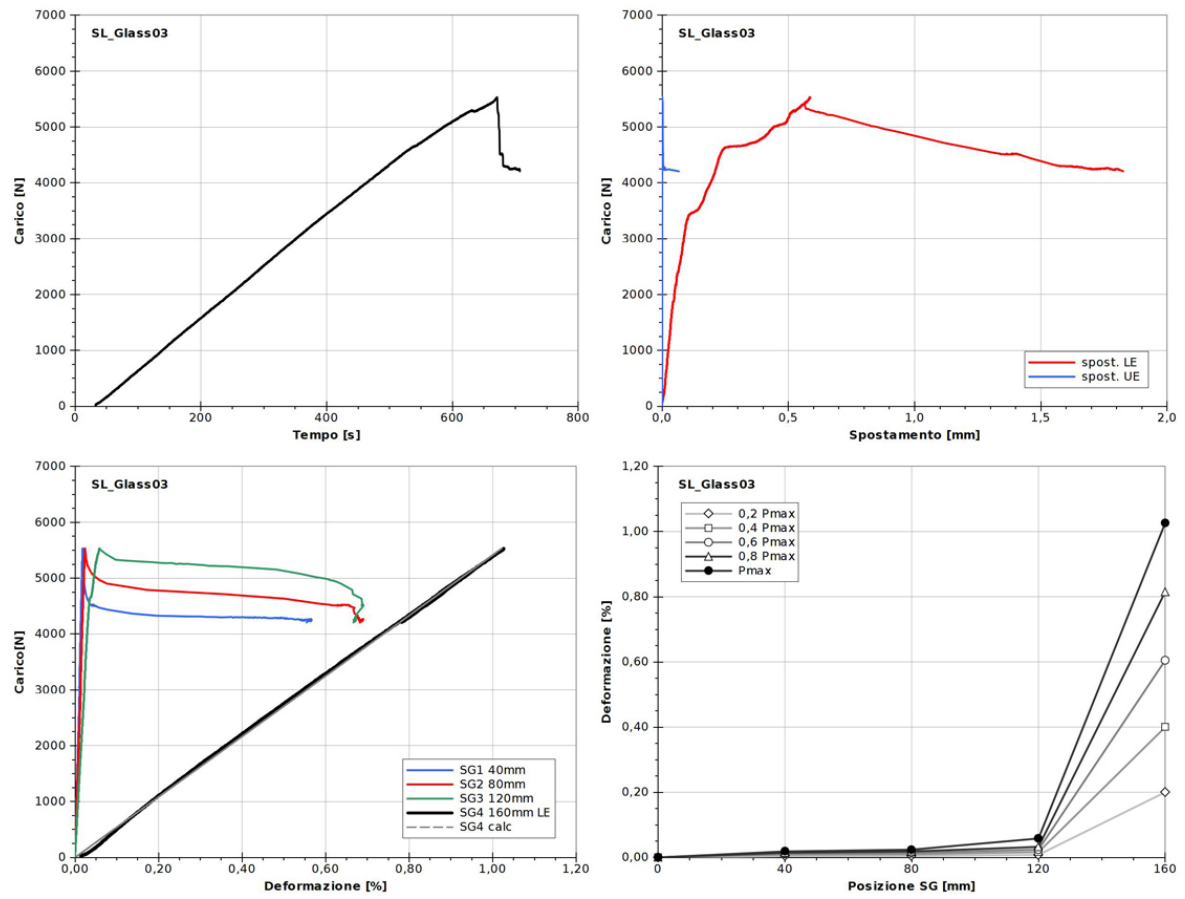


Figura 21: Campione SL-Glass-03: grafici delle principali grandezze analizzate.

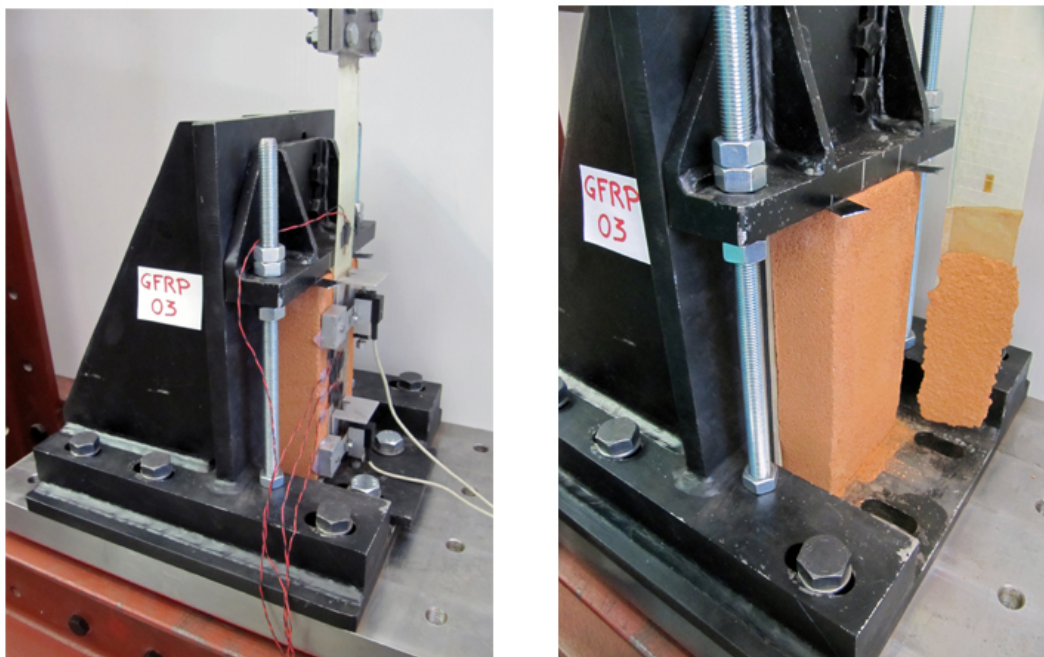


Figura 22: Campione SL-Glass-03: campione dopo la prova.

SL-Glass-05

La rottura è avvenuta per il distacco completo del rinforzo con l'asportazione di uno strato omogeneo di substrato, il carico massimo registrato è stato leggermente inferiore alla media degli altri provini. Come si può notare dal grafico carico-tempo di Figura 24, il completo distacco della striscia di composito non è avvenuto in un'unica soluzione ma in due momenti: dopo la perdita di aderenza di una prima porzione di zona adesiva, con improvvisa perdita di carico e aumento degli scorrimenti, i valori di carico sono tornati a salire fino al distacco improvviso di tutto il rinforzo.

Tabella 16: Campione SL-Glass-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	160	80124	70000	1141	1400

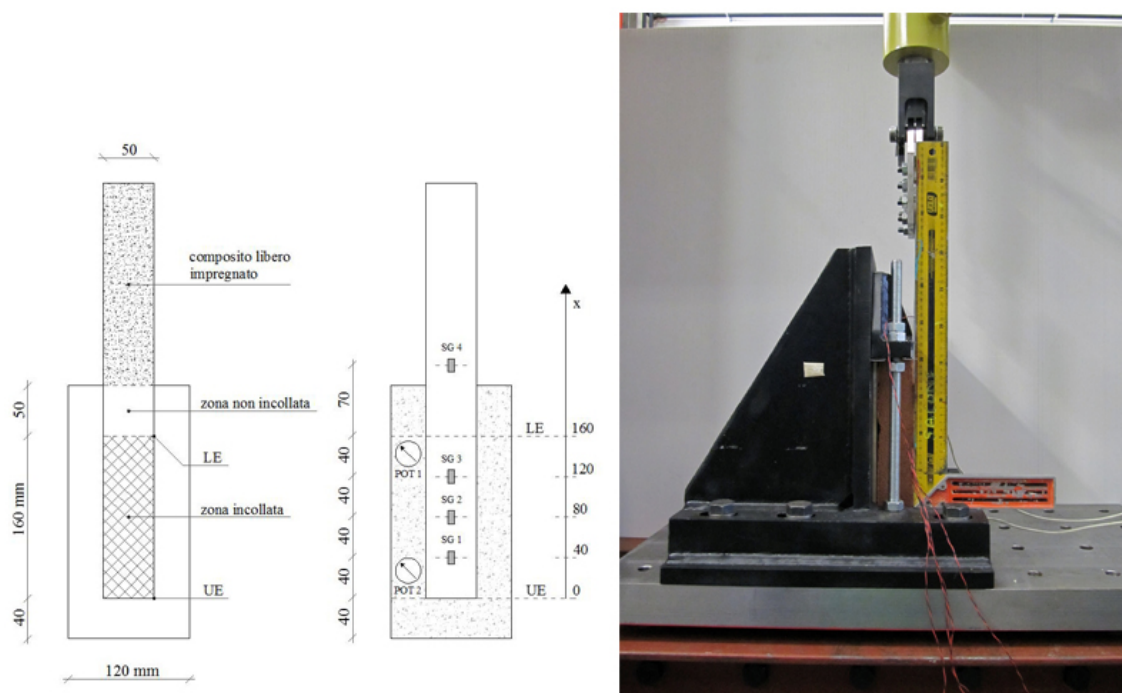


Figura 23: Campione SL-Glass-05: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 17: Campione SL-Glass-05: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	4240	0.83%	0.743	88098	0.374	0.428	0.340

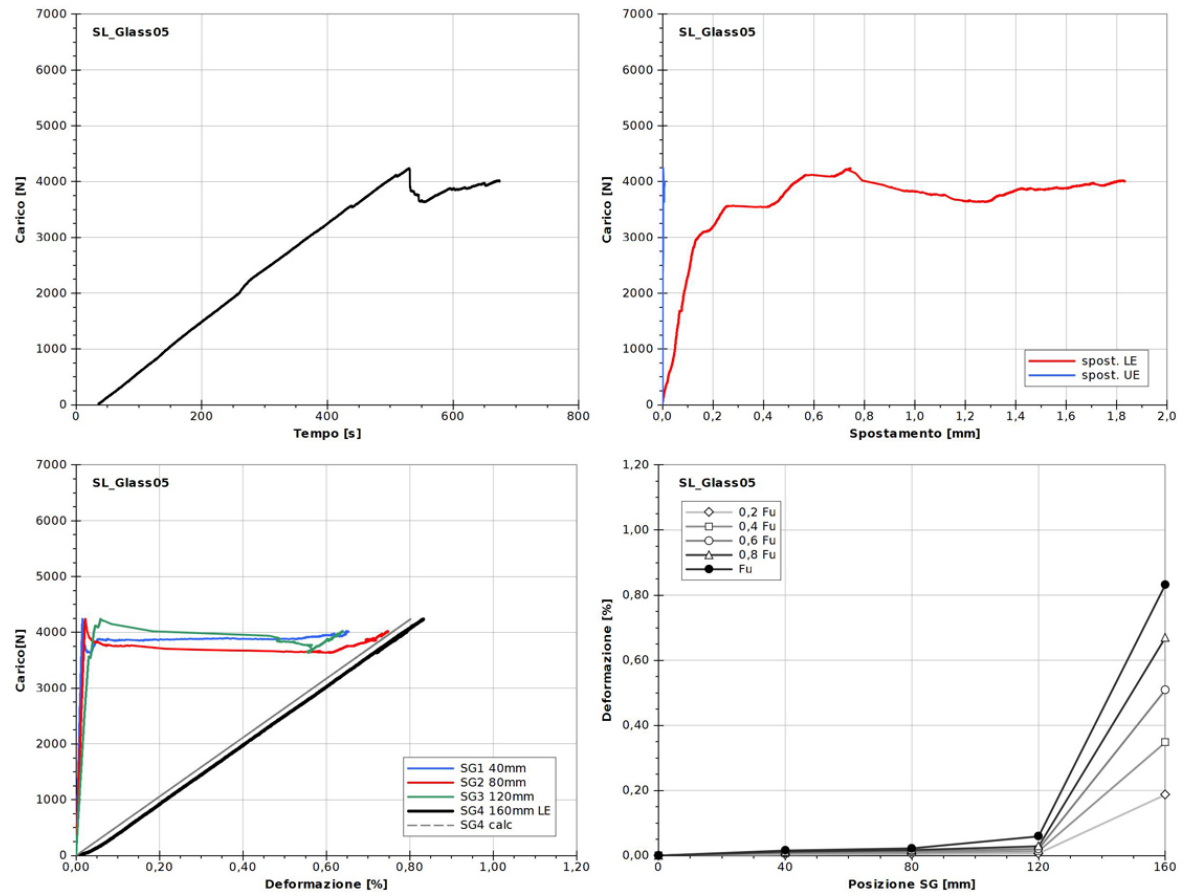


Figura 24: Campione SL-Glass-05: grafici delle principali grandezze analizzate.

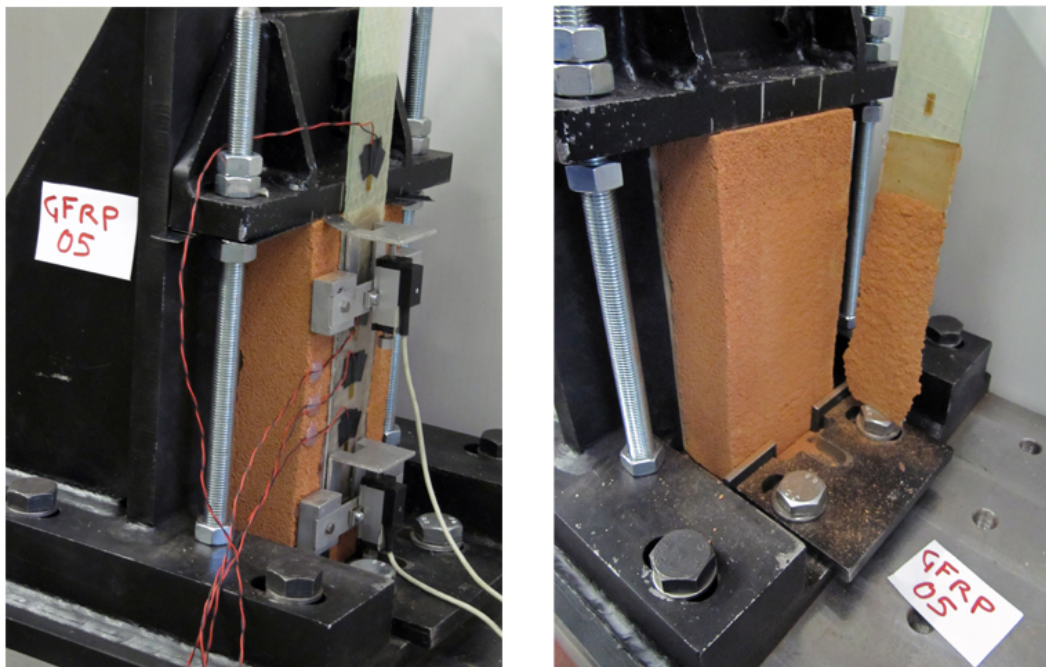


Figura 25: Campione SL-Glass-05: campione dopo la prova.

SL-Carbon-01

Tabella 18: Campione SL-Carbon-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	160	241015	220000	2889	3500

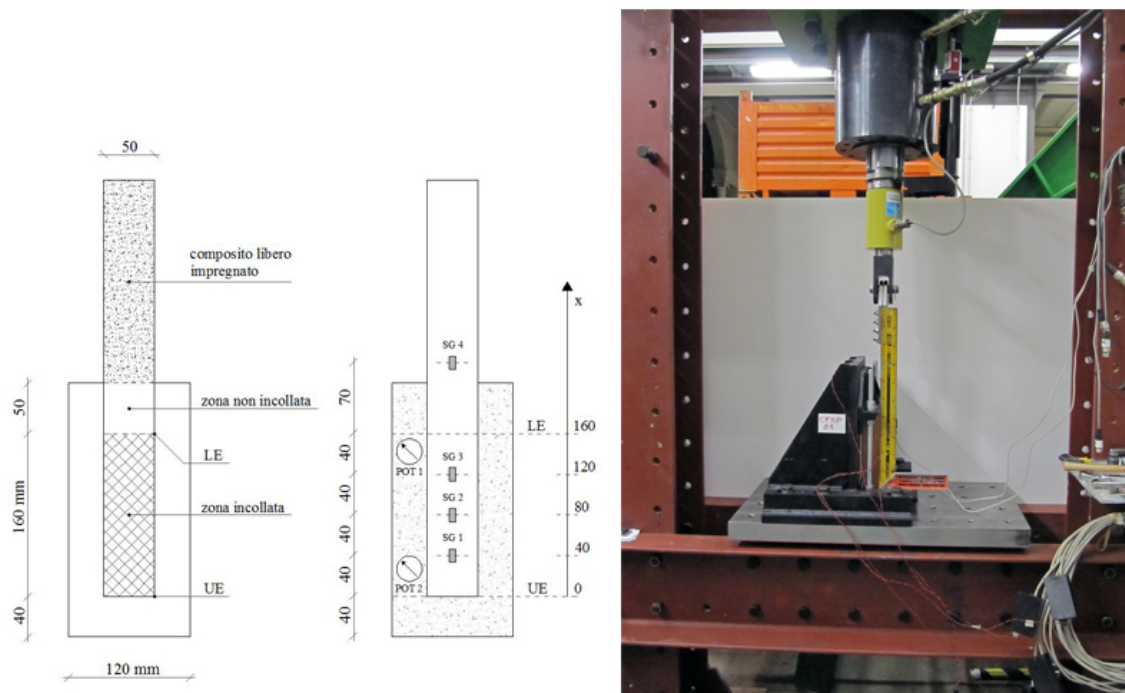


Figura 26: Campione SL-Carbon-01: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 19: Campione SL-Carbon-01: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	7833	0.55%	0.261	259705	0.299	0.328	0.278

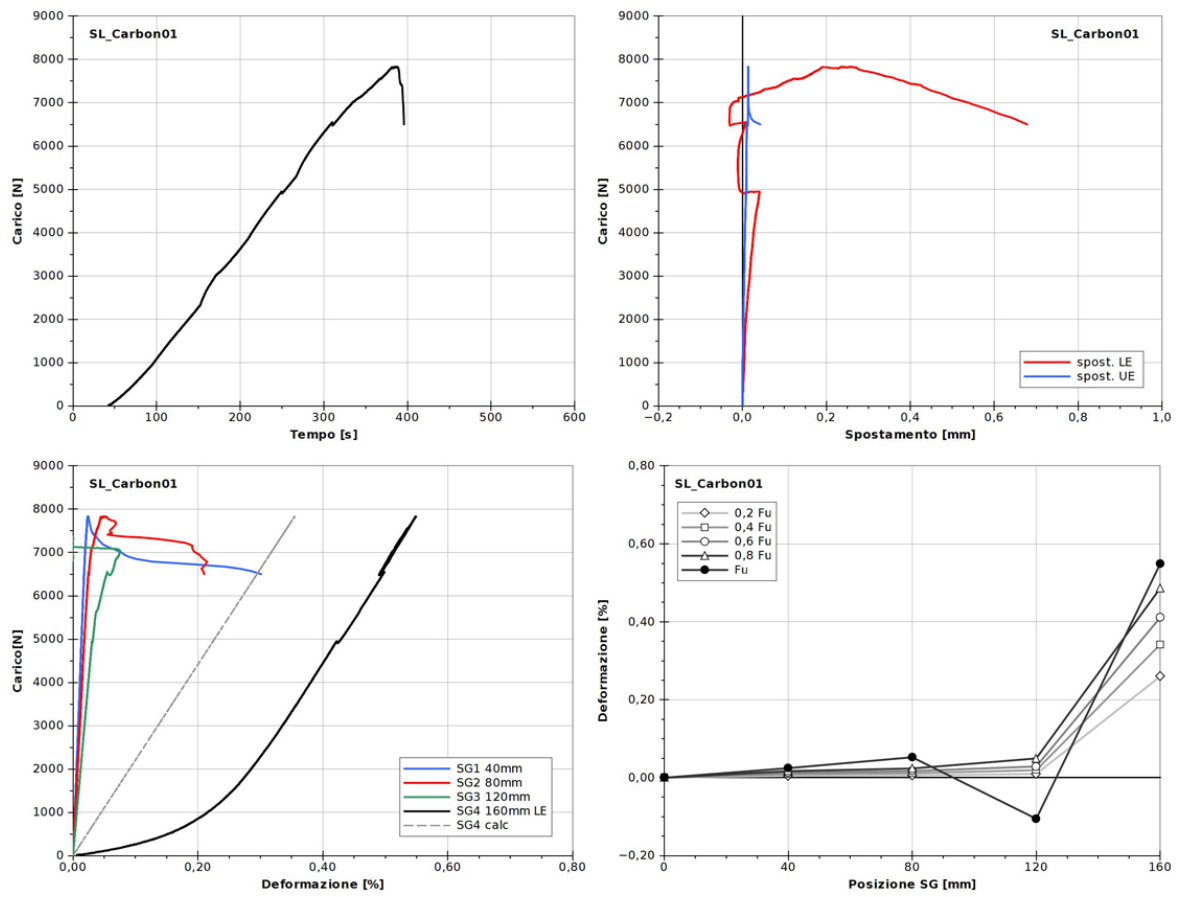


Figura 27: Campione SL-Carbon-01: grafici delle principali grandezze analizzate.

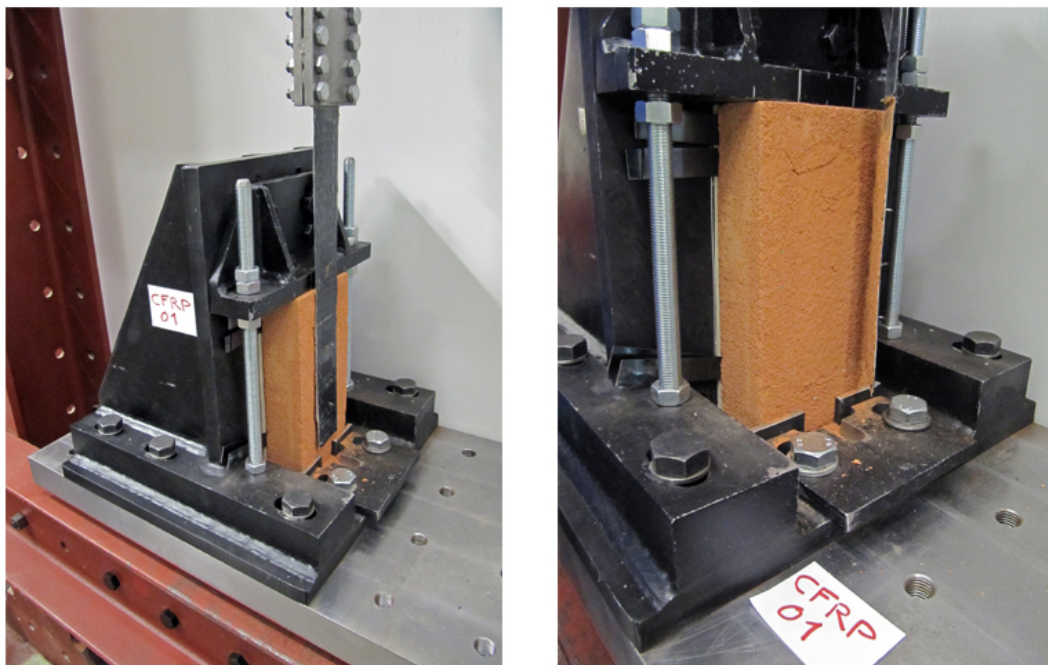


Figura 28: Campione SL-Carbon-01: campione dopo la prova.

SL-Carbon-03

Tabella 20: Campione SL-Carbon-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	160	241015	220000	2889	3500

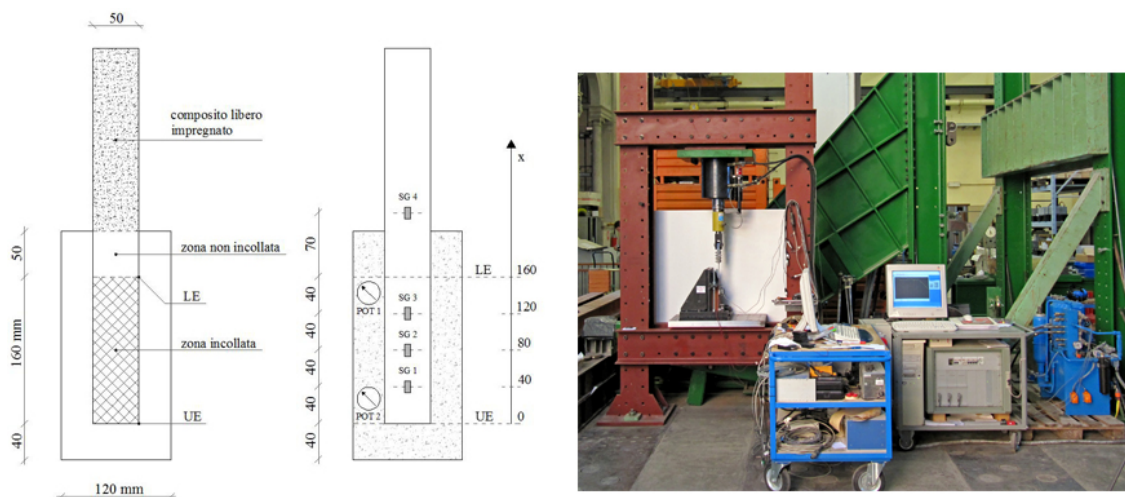


Figura 29: Campione SL-Carbon-03: geometria del provino e veduta della macchina di prova.

Tabella 21: Campione SL-Carbon-03: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	6971	0.58%	0.417	160273	0.237	0.260	0.357

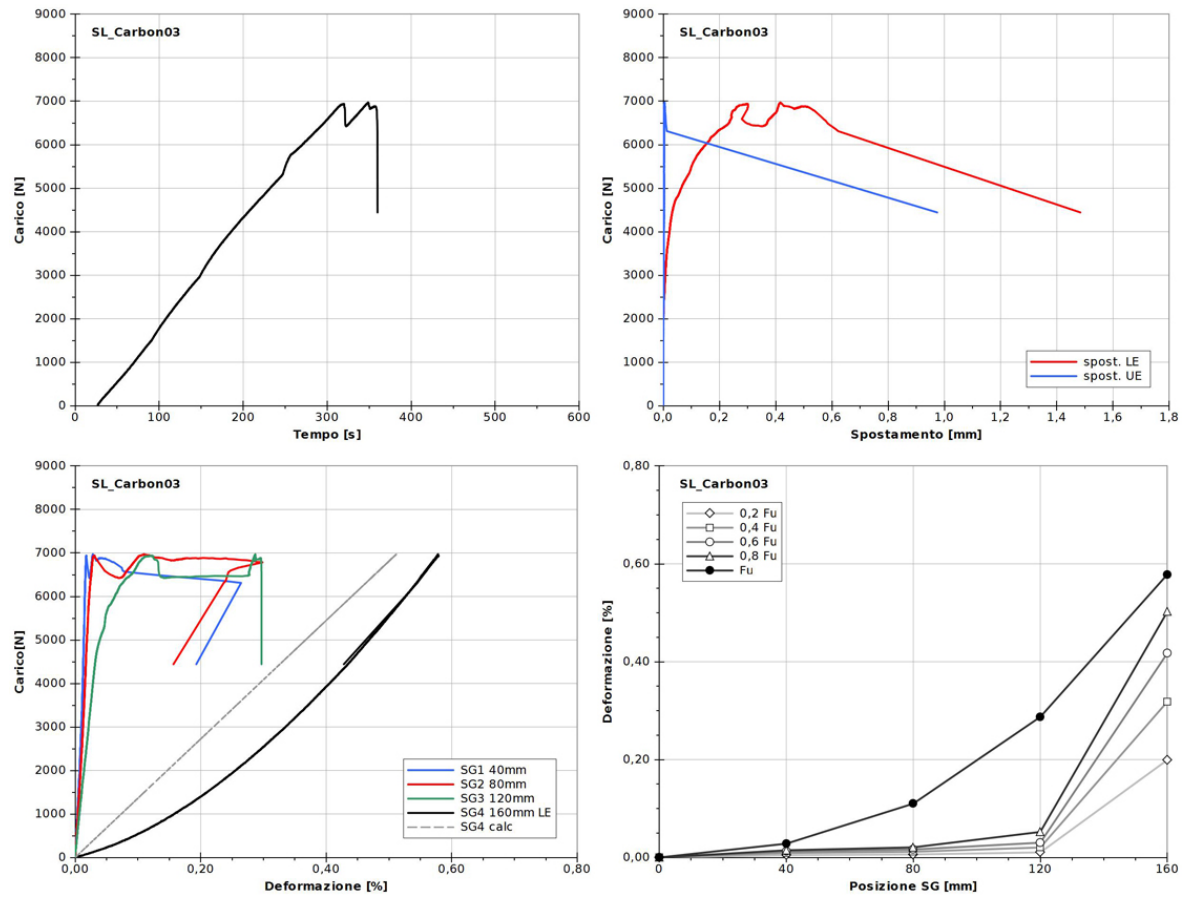


Figura 30: Campione SL-Carbon-03: grafici delle principali grandezze analizzate.

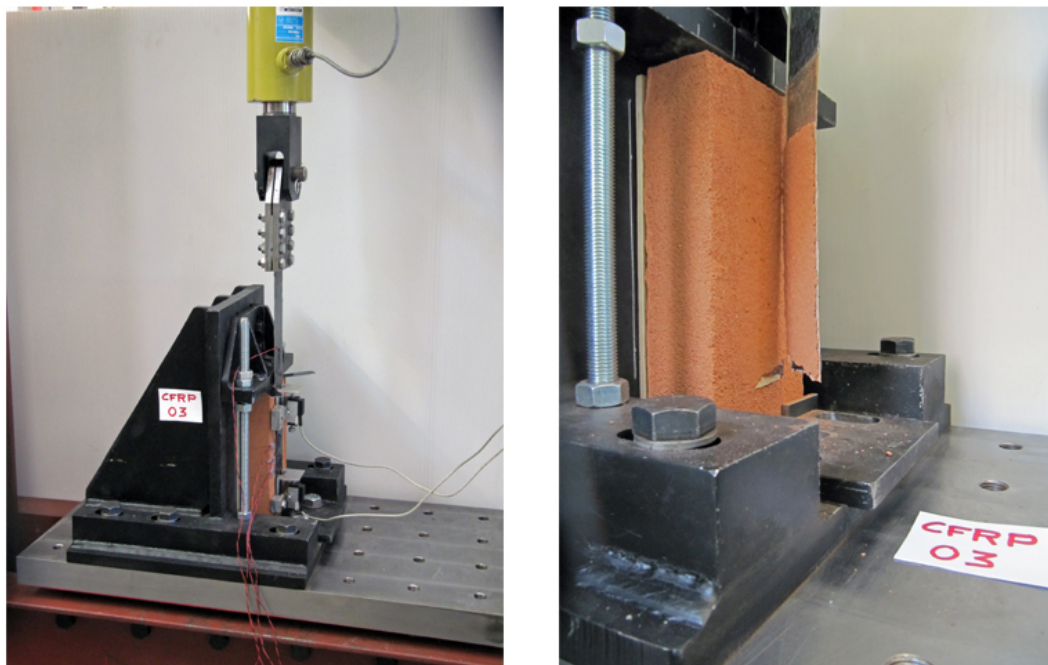


Figura 31: Campione SL-Carbon-03: apparato di prova e campione dopo la rottura.

SL-Carbon-04

Tabella 22: Campione SL-Carbon-04: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	160	241015	220000	2889	3500

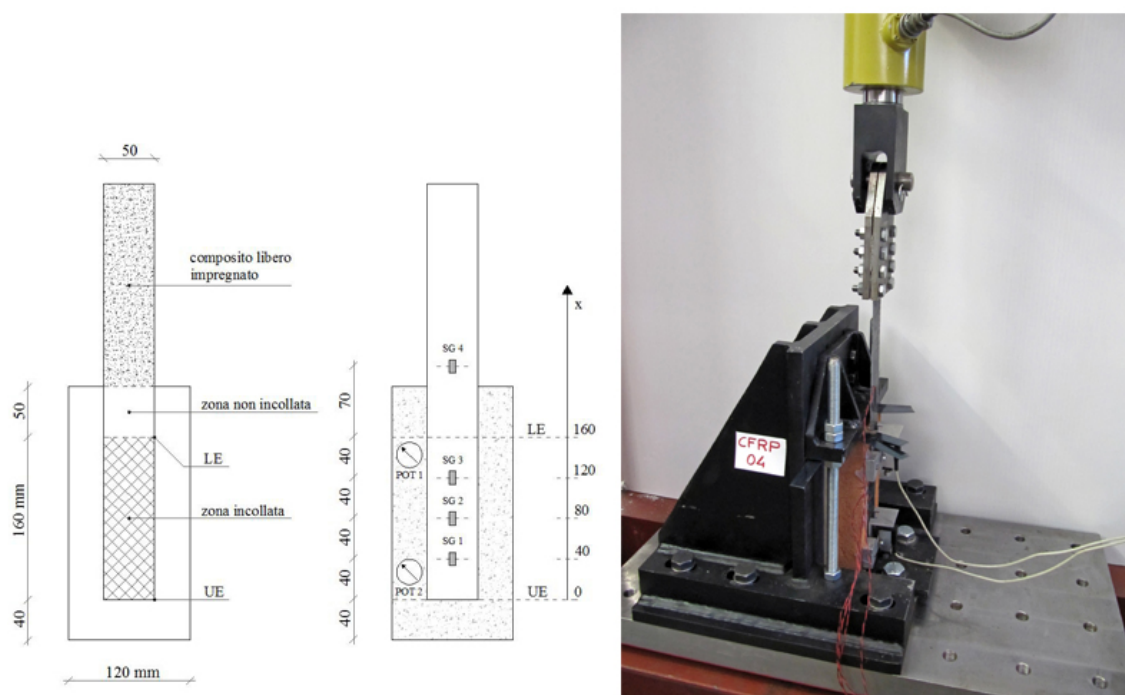


Figura 32: Campione SL-Carbon-04: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 23: Campione SL-Carbon-04: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	7796	0.54%	1.141	220627	0.297	0.325	0.324

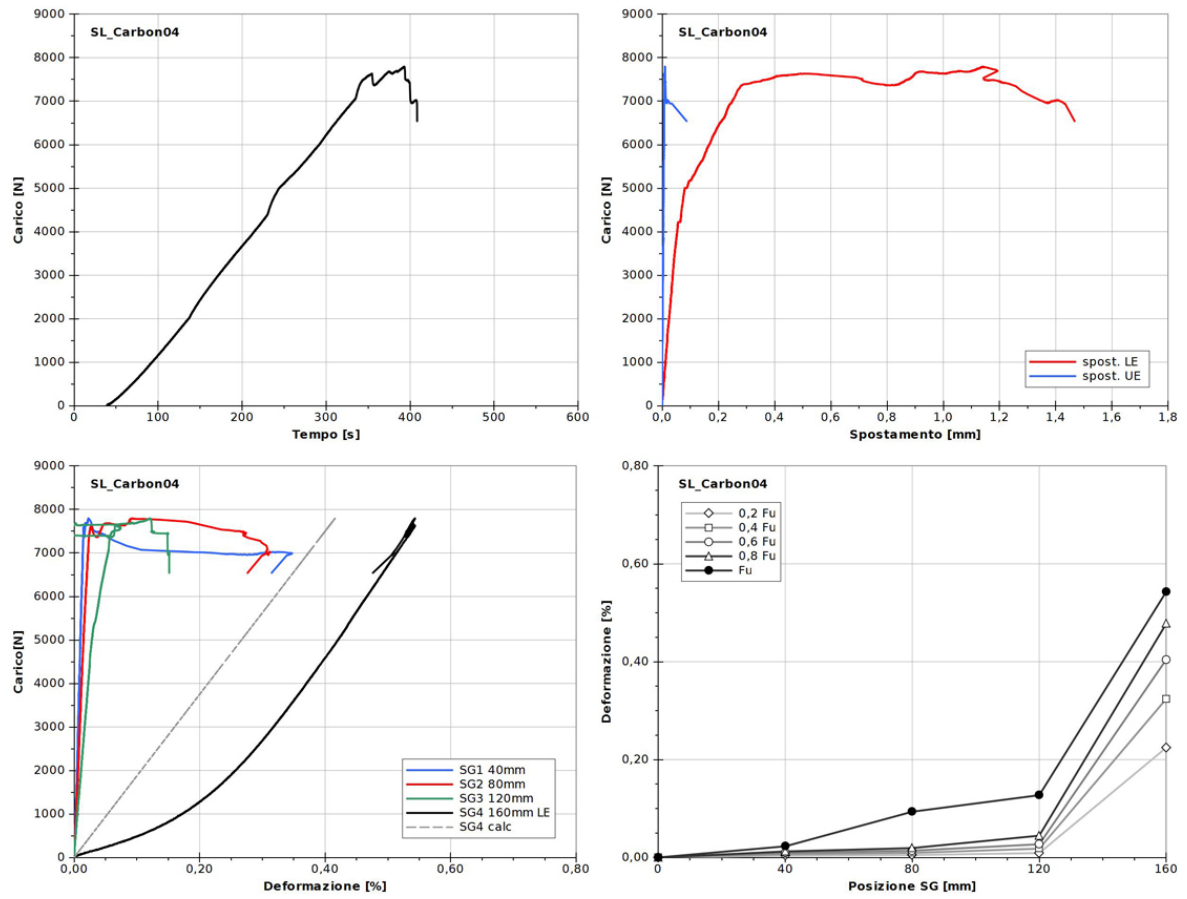


Figura 33: Campione SL-Carbon-04: grafici delle principali grandezze analizzate.

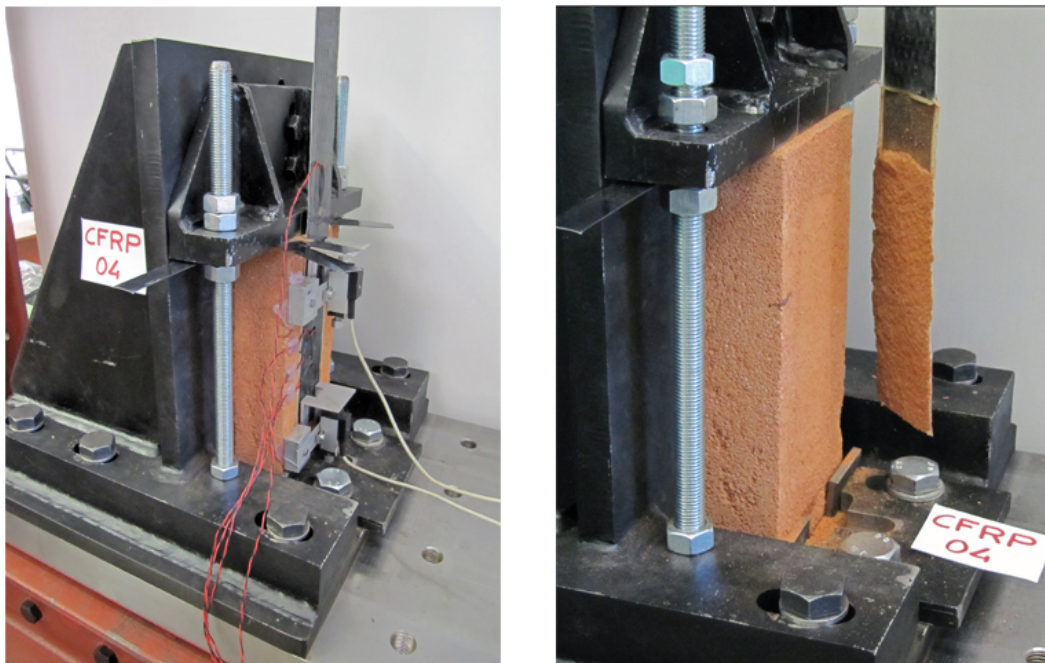


Figura 34: Campione SL-Carbon-04: apparato di prova e campione dopo la rottura.

SL-Carbon-05

Tabella 24: Campione SL-Carbon-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	160	241015	220000	2889	3500

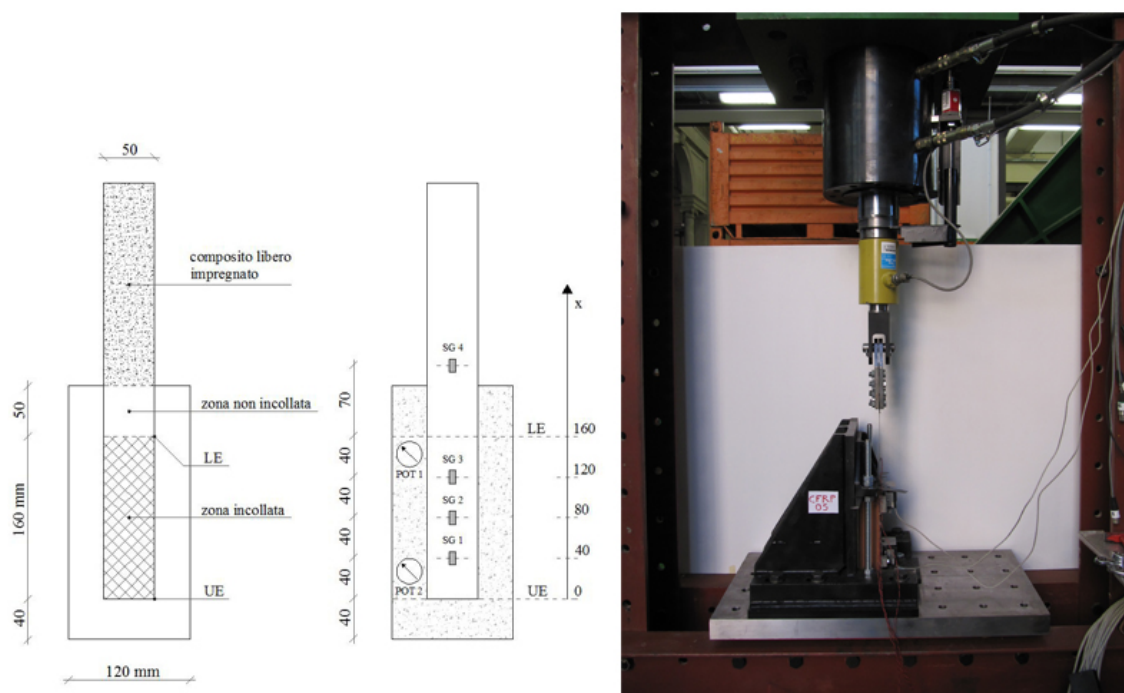


Figura 35: Campione SL-Carbon-05: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 25: Campione SL-Carbon-05: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	7223	0.57%	0.643	179180	0.255	0.279	0.343

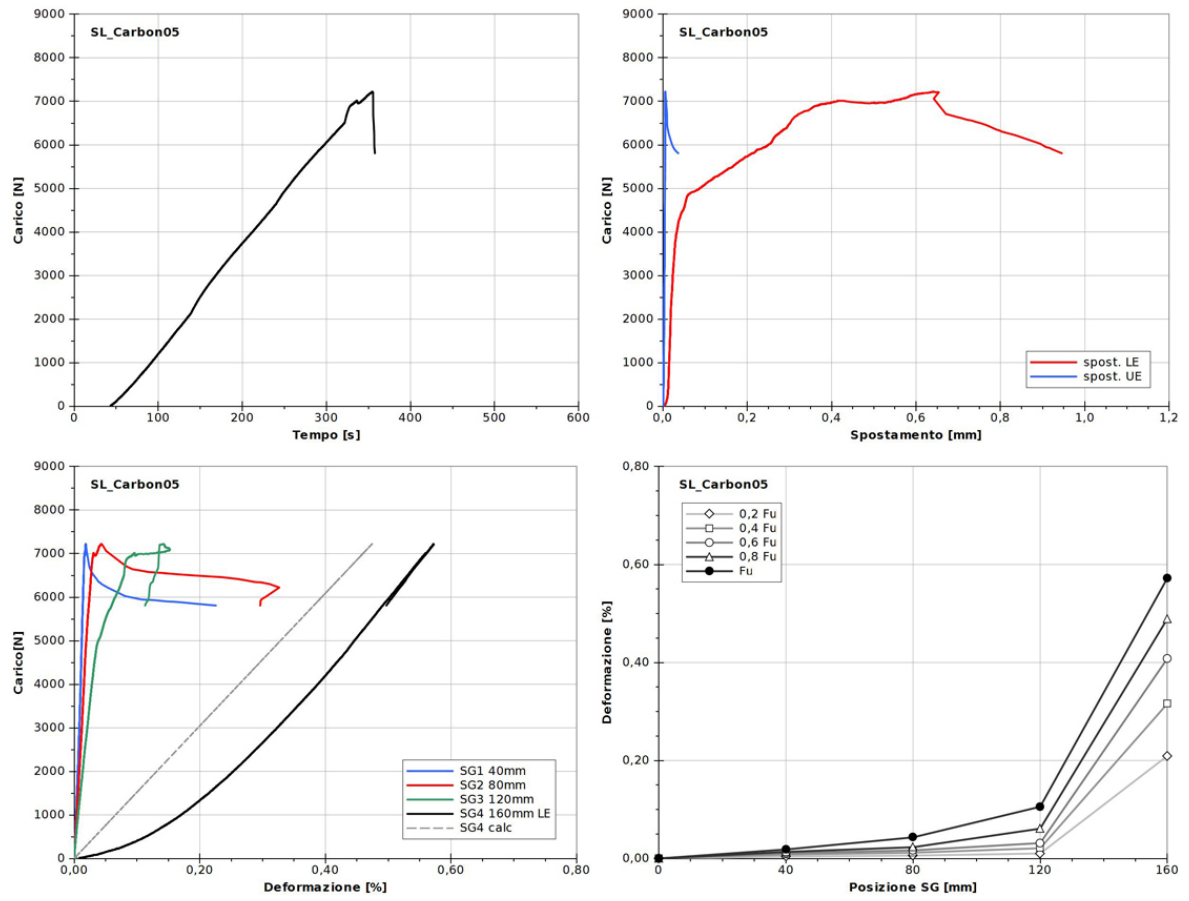


Figura 36: Campione SL-Carbon-05: grafici delle principali grandezze analizzate.

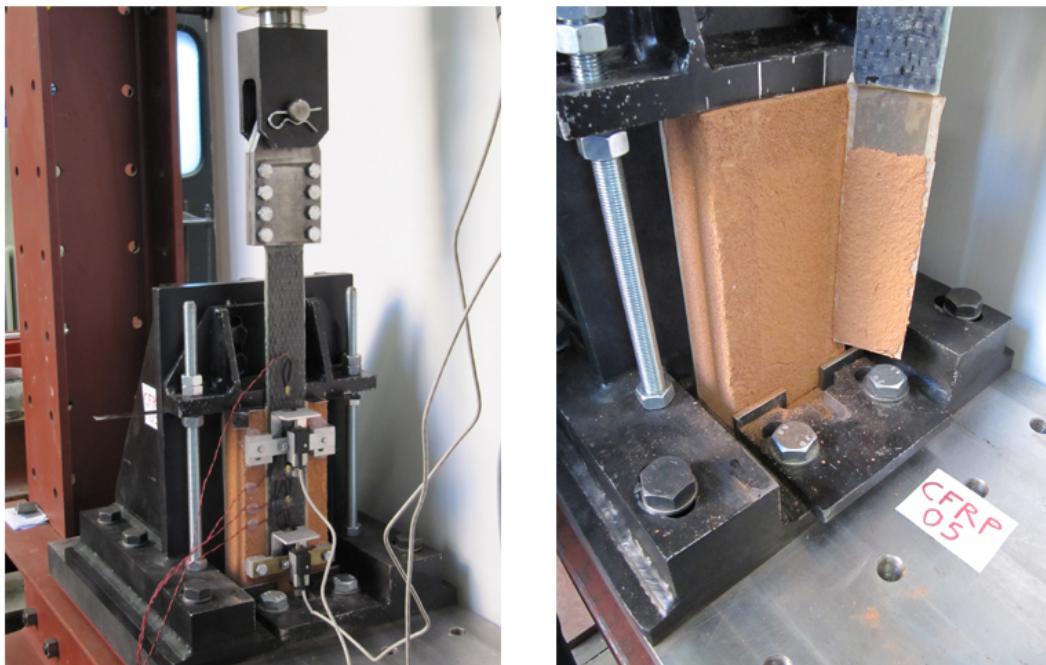


Figura 37: Campione SL-Carbon-05: apparato di prova e campione dopo la rottura.

SL-Basalt-01

Tabella 26: Campione SL-Basalt-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	160	86832	80000	1812	1700

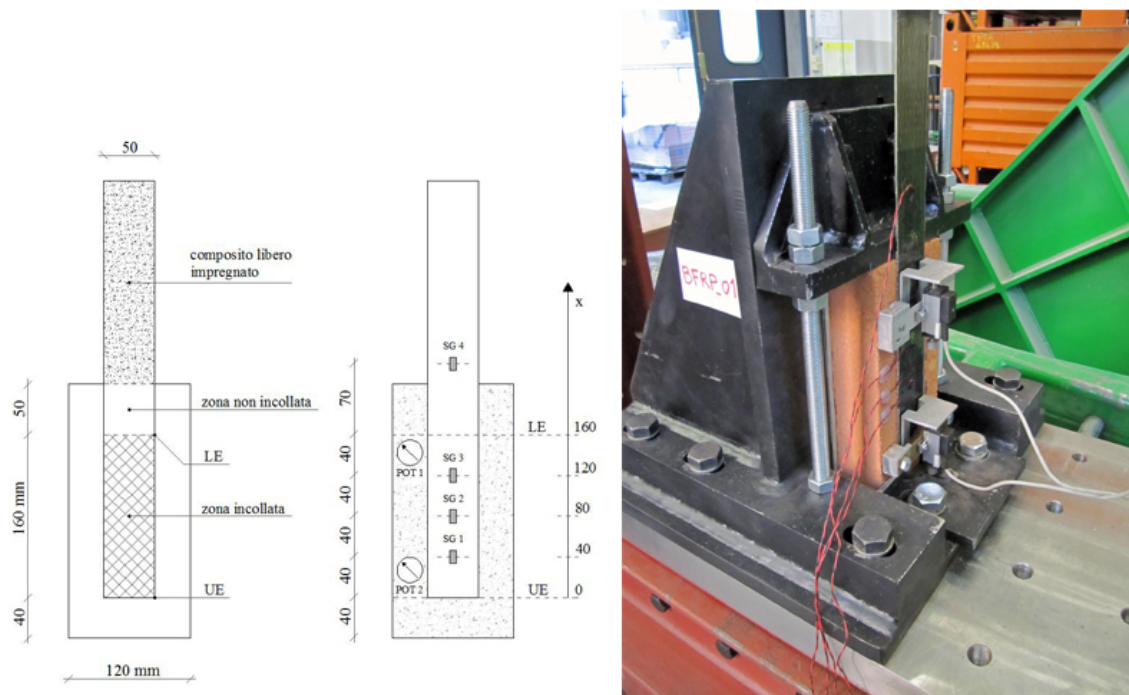


Figura 38: Campione SL-Basalt-01: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 27: Campione SL-Basalt-01: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	5868	0.89%	0.825	92867	0.567	0.615	0.530

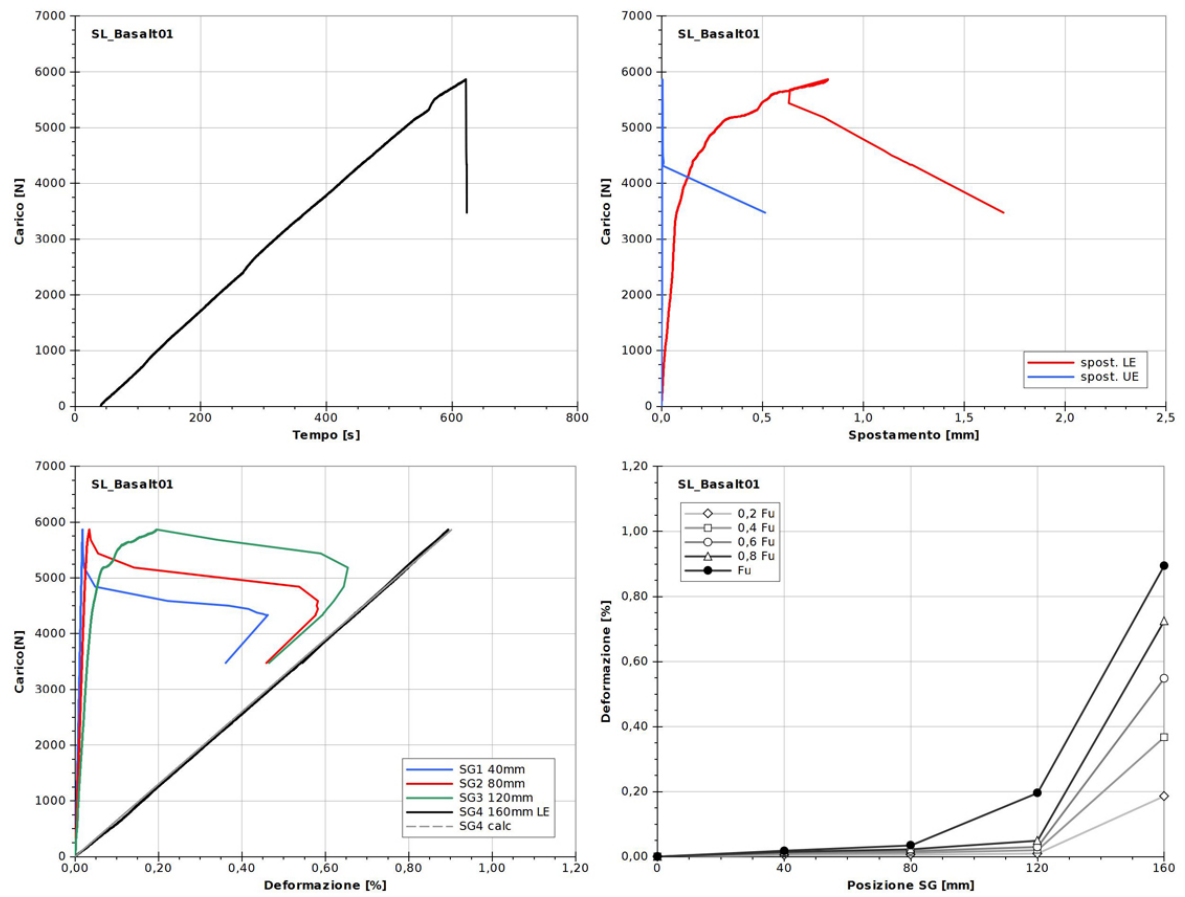


Figura 39: Campione SL-Basalt-01: grafici delle principali grandezze analizzate.

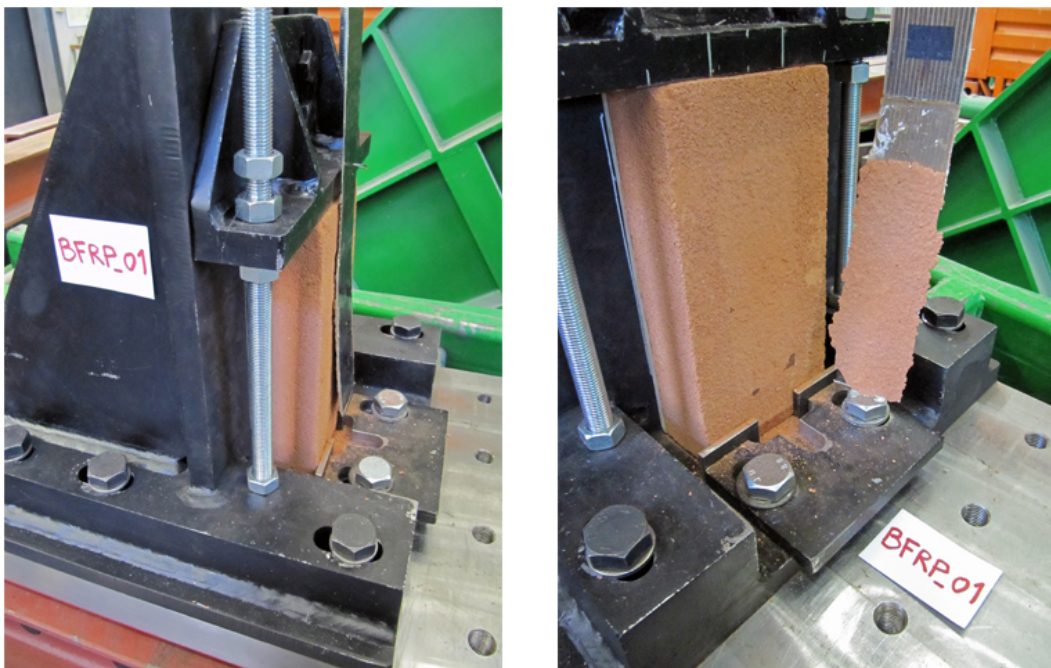


Figura 40: Campione SL-Basalt-01: campione dopo la rottura.

SL-Basalt-02

Tabella 28: Campione SL-Basalt-02: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	160	86832	80000	1812	1700

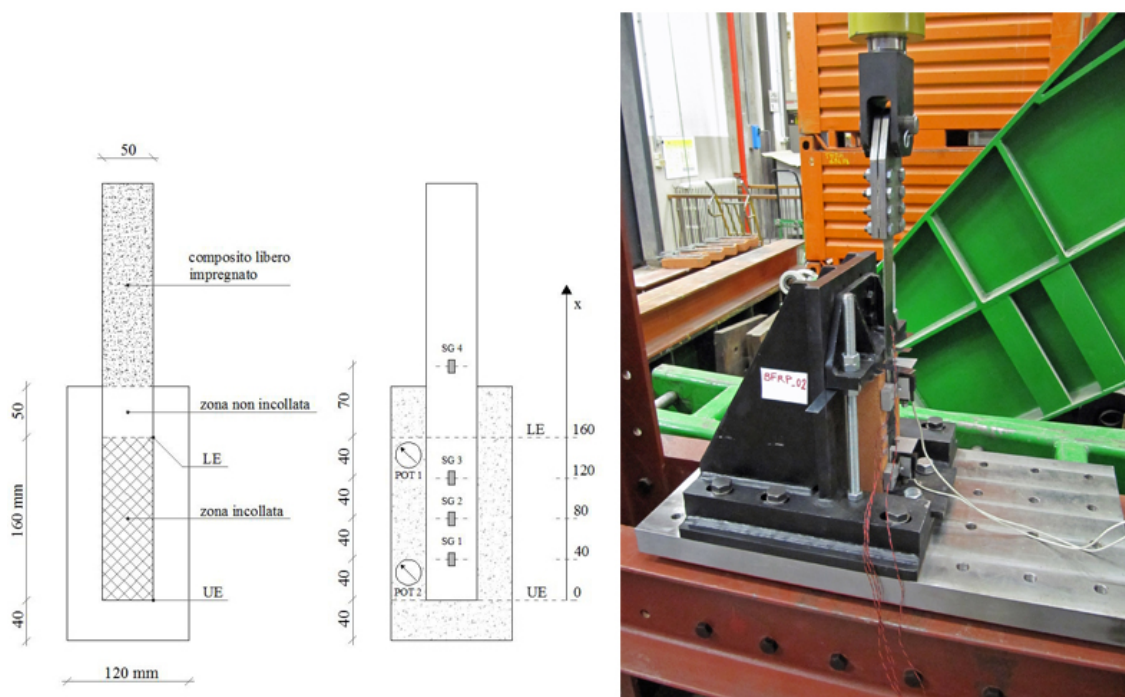


Figura 41: Campione SL-Basalt-02: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 29: Campione SL-Basalt-02: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	5291	0.65%	0.703	119982	0.461	0.500	0.333

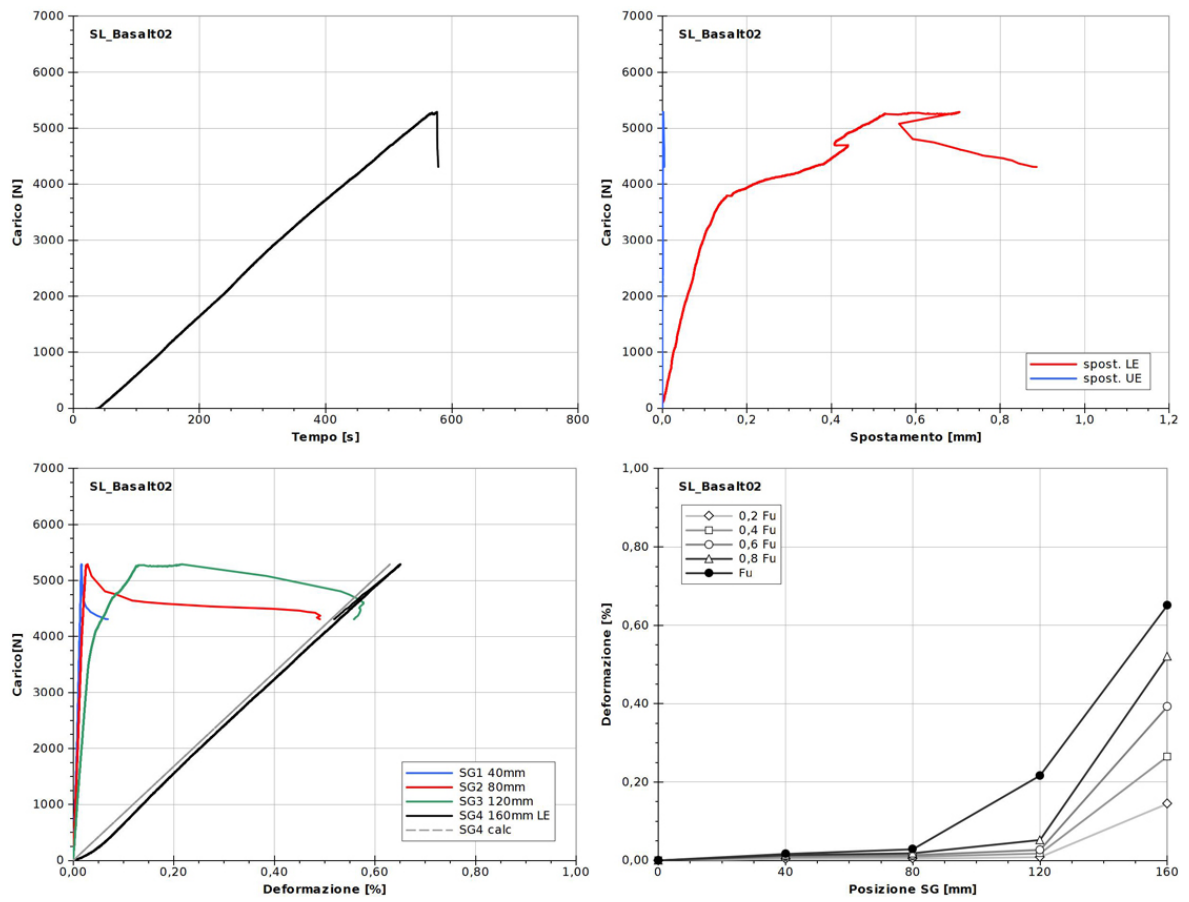


Figura 42: Campione SL-Basalt-02: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 43: Campione SL-Basalt-02: campione dopo la rottura.

SL-Basalt-04

Tabella 30: Campione SL-Basalt-04: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	160	86832	80000	1812	1700

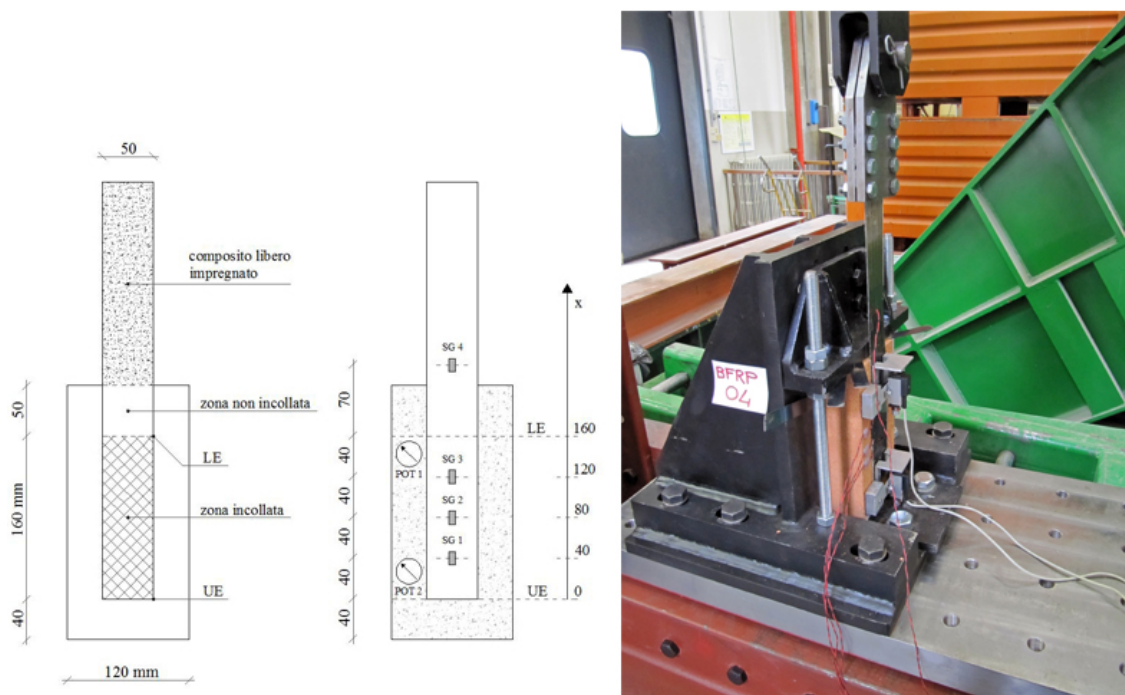


Figura 44: Campione SL-Basalt-04: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 31: Campione SL-Basalt-04: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	5900	1.05%	0.460	93745	0.573	0.622	0.531

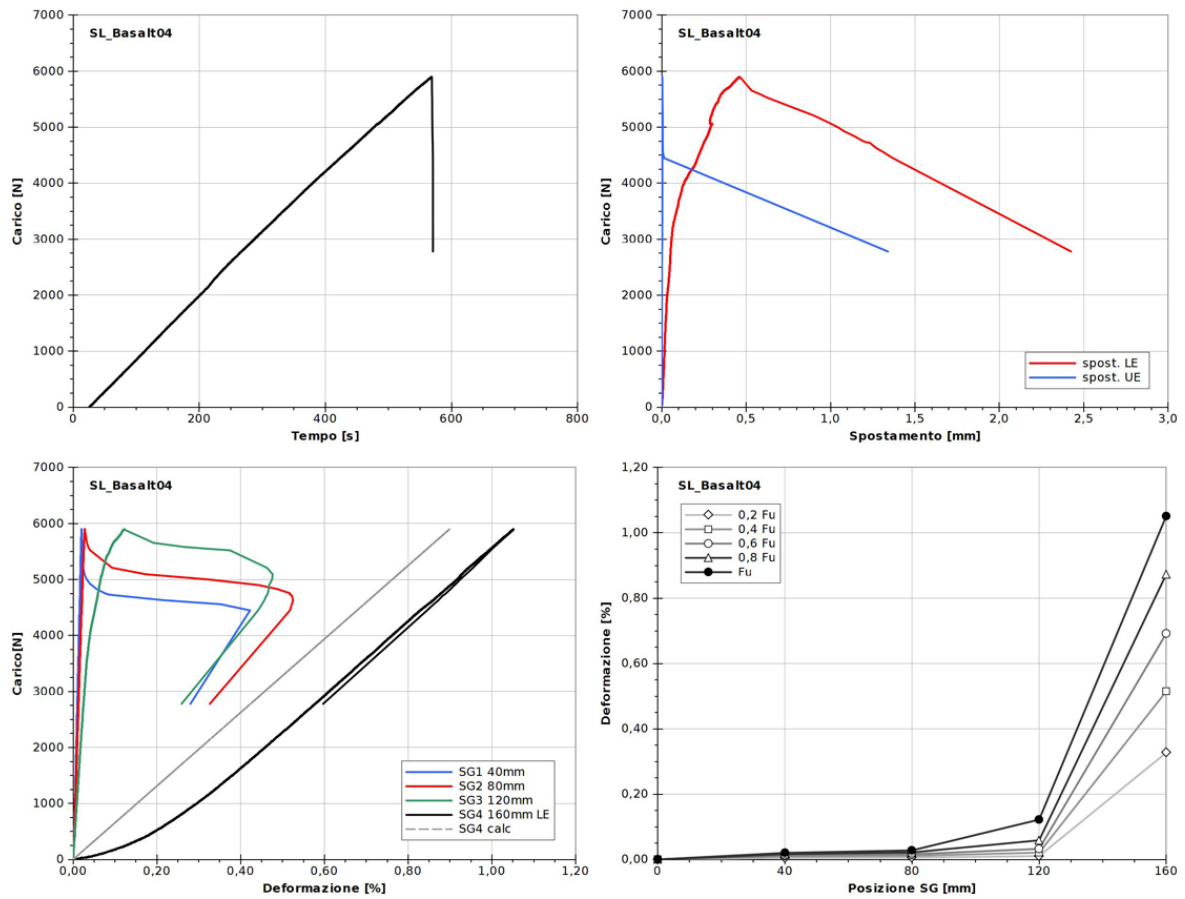


Figura 45: Campione SL-Basalt-04: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 46: Campione SL-Basalt-04: campione dopo la rottura.

SL-Basalt-05

Tabella 32: Campione SL-Basalt-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	160	86832	80000	1812	1700

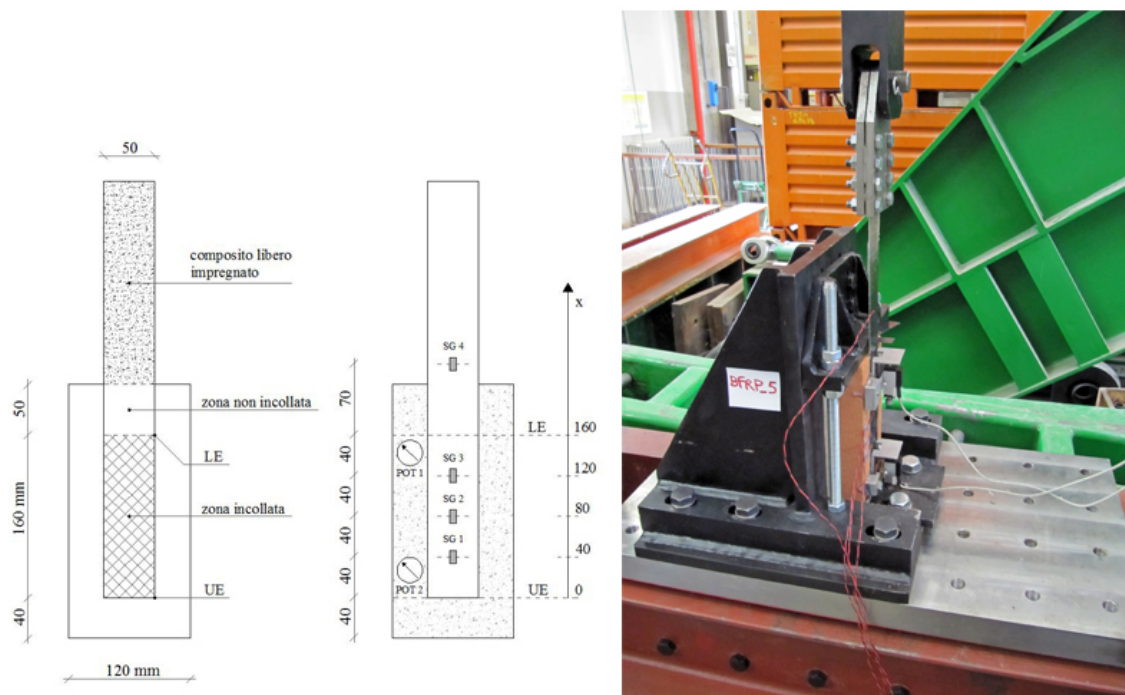


Figura 47: Campione SL-Basalt-05: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 33: Campione SL-Basalt-05: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	5695	1.00%	0.594	91379	0.534	0.579	0.507

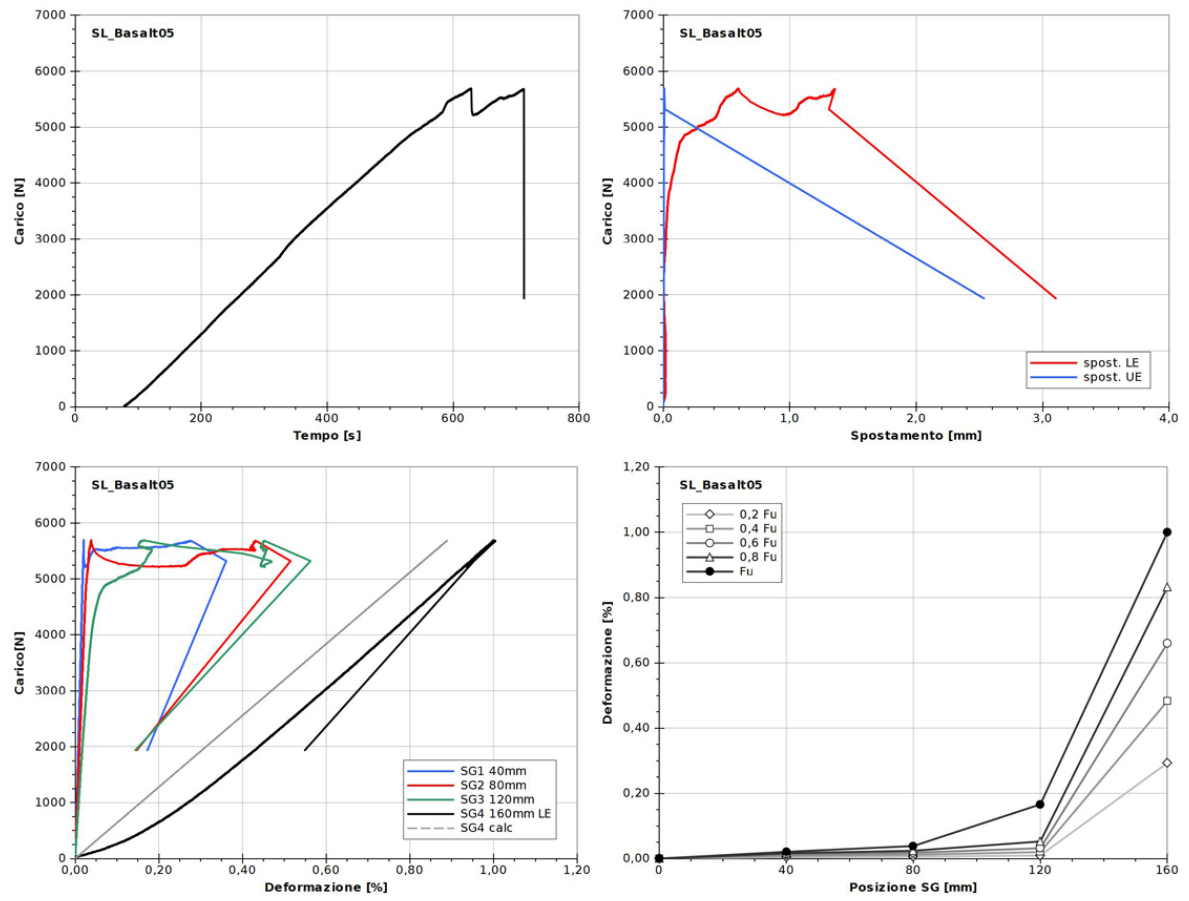


Figura 48: Campione SL-Basalt-05: grafici delle principali grandezze analizzate.

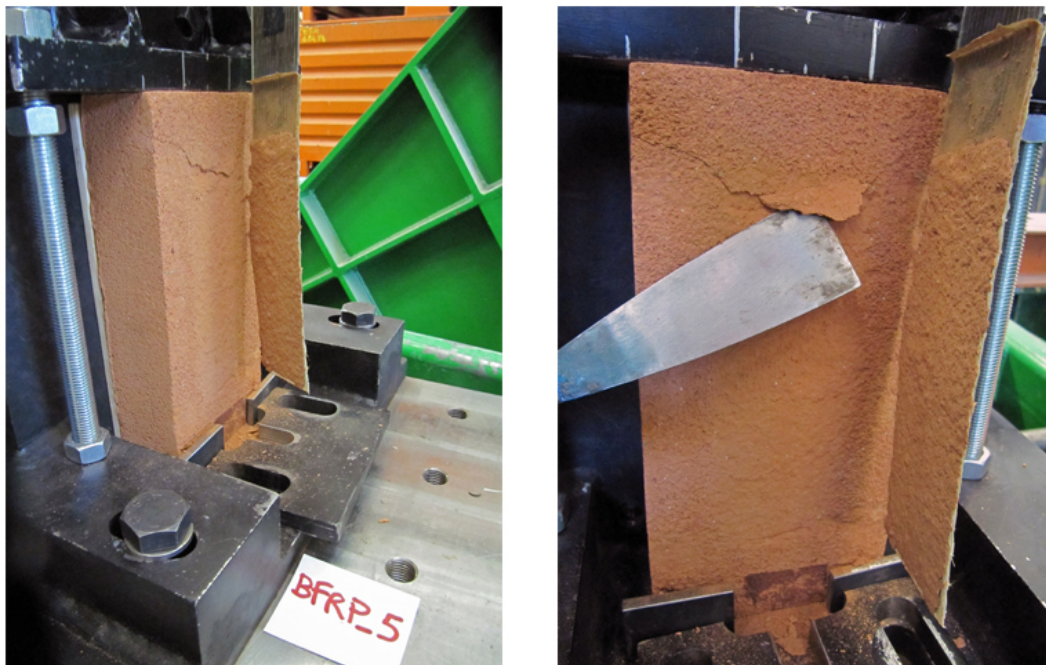


Figura 49: Campione SL-Basalt-05: campione dopo la rottura.

SL-Steel-02

Tabella 34: Campione SL-Steel-02: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	160	200020	190000	3050	3070

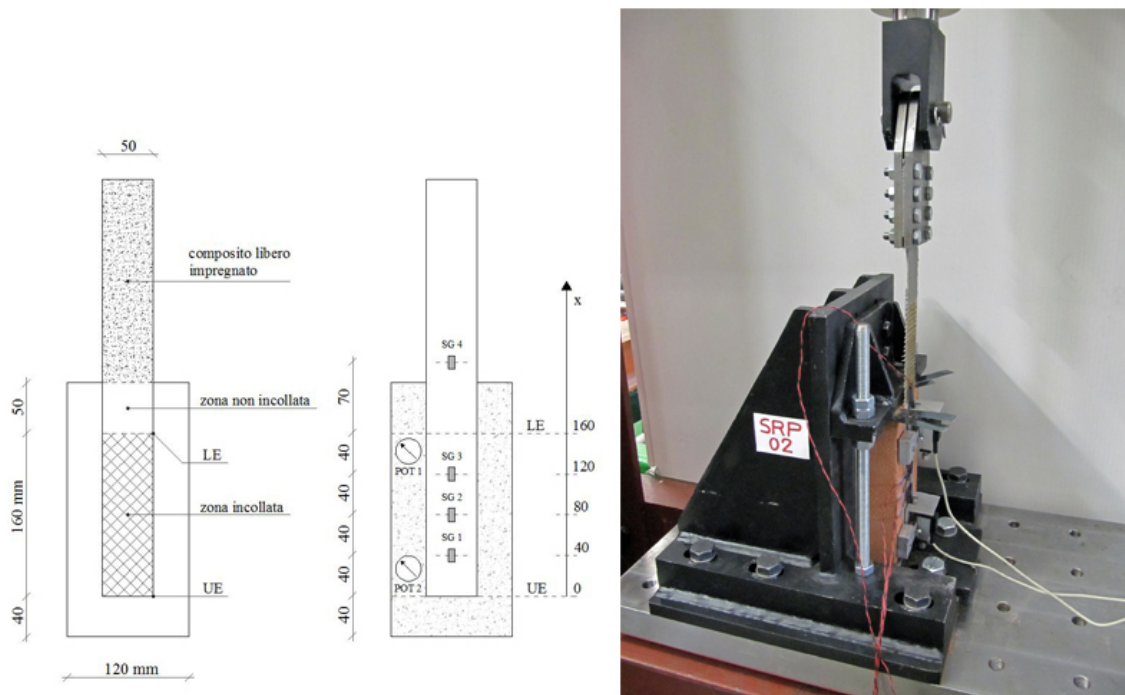


Figura 50: Campione SL-Steel-02: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 35: Campione SL-Steel-02: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	7143	0.24%	0.341	235689	0.225	0.237	0.191

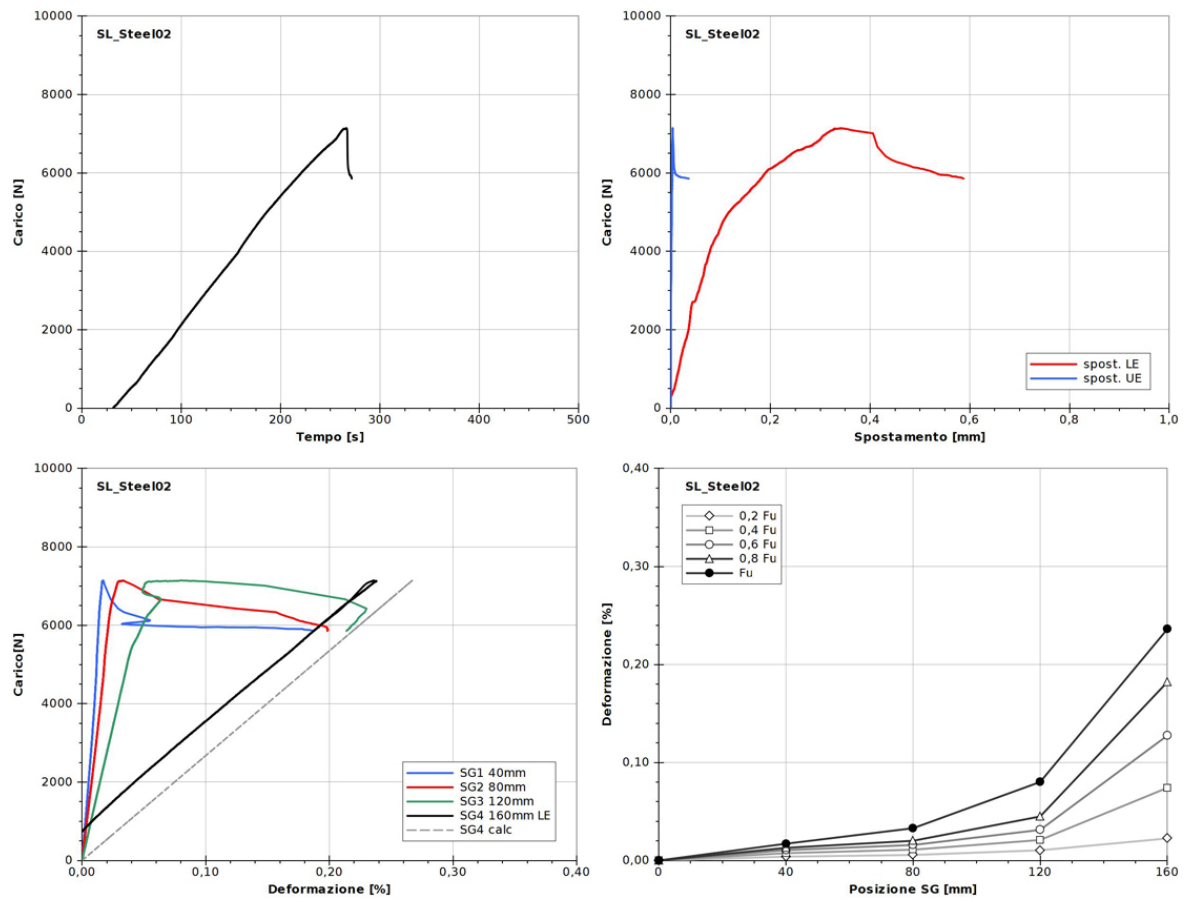


Figura 51: Campione SL-Steel-02: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 52: Campione SL-Steel-02: campione dopo la rottura.

SL-Steel-03

Tabella 36: Campione SL-Steel-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	160	200020	190000	3050	3070

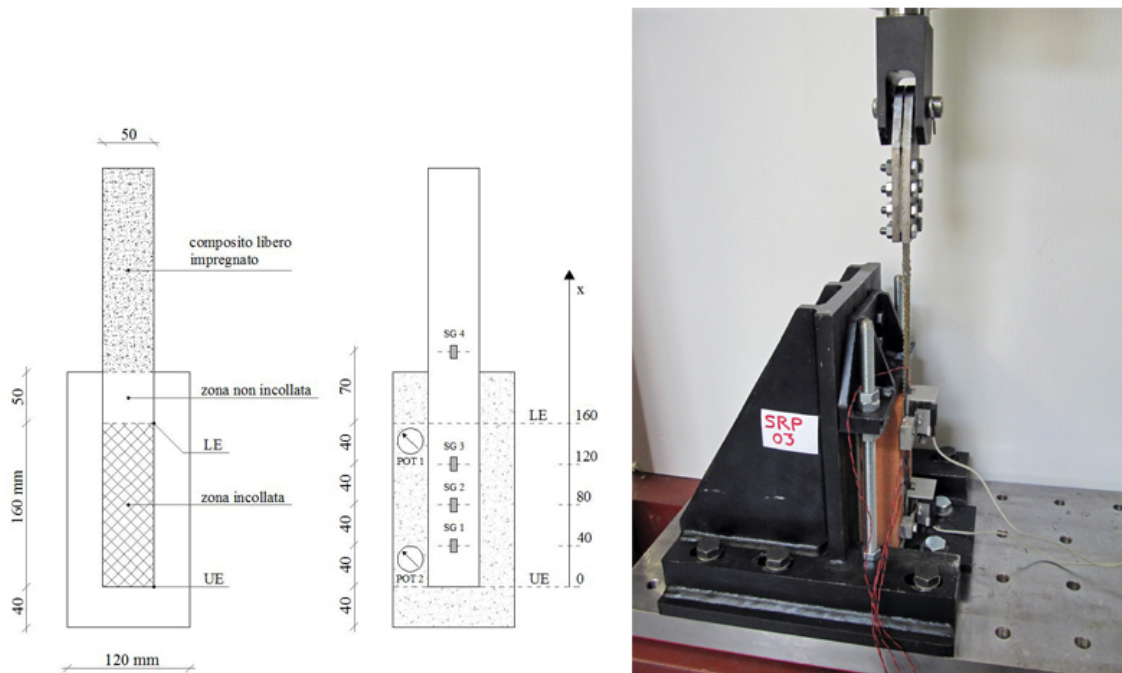


Figura 53: Campione SL-Steel-03: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 37: Campione SL-Steel-03: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	8267	0.28%	0.122	251577	0.301	0.317	0.239

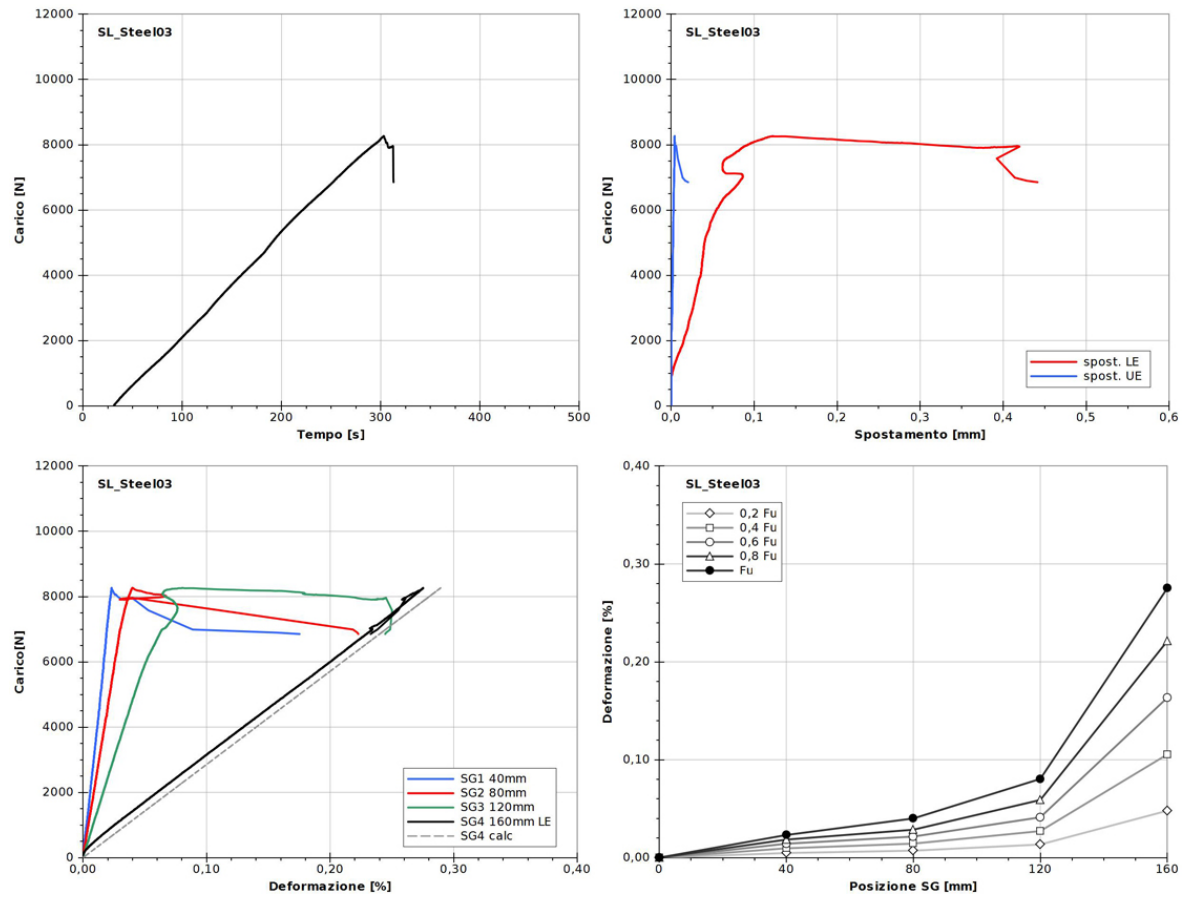


Figura 54: Campione SL-Steel-03: grafici delle principali grandezze analizzate.

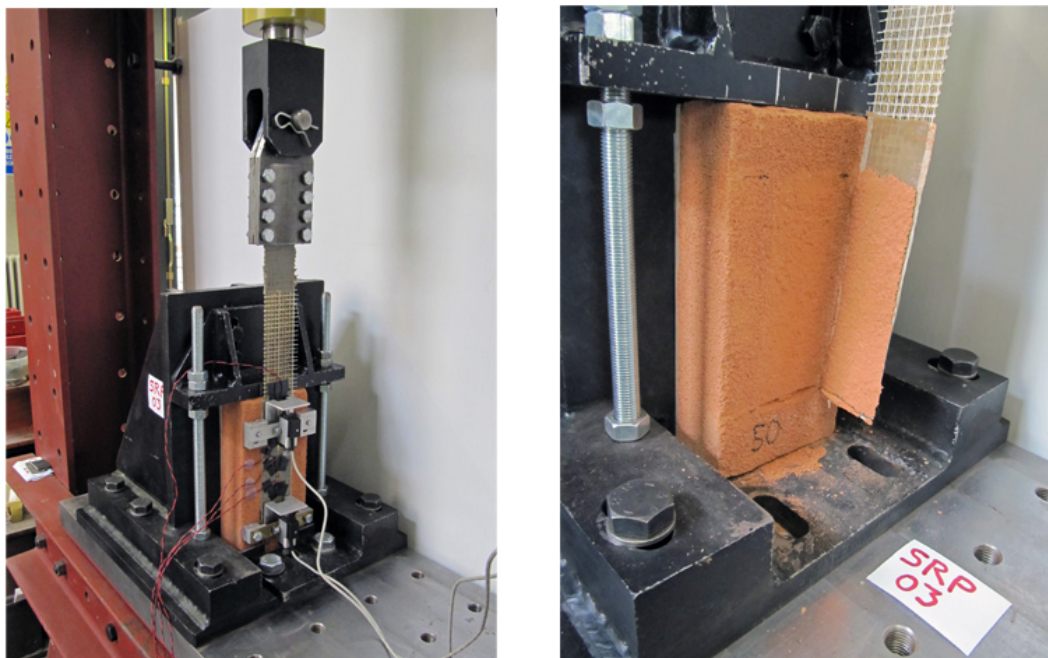


Figura 55: Campione SL-Steel-03: campione dopo la rottura.

SL-Steel-04

Tabella 38: Campione SL-Steel-04: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	160	200020	190000	3050	3070

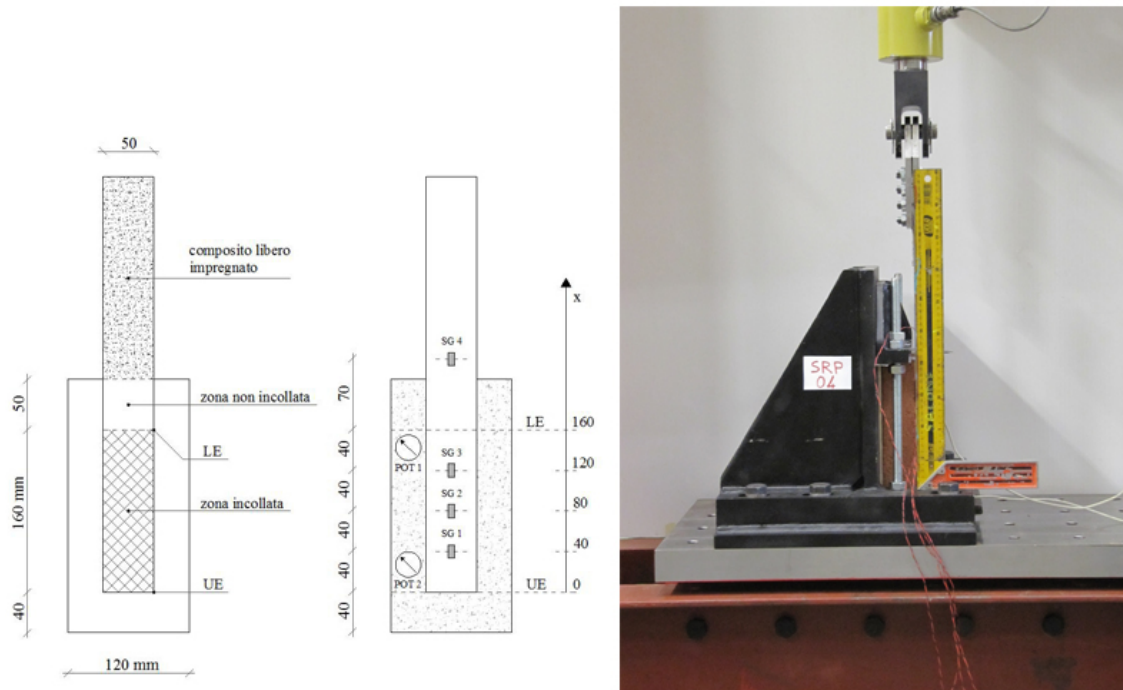


Figura 56: Campione SL-Steel-04: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 39: Campione SL-Steel-04: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	7894	0.25%	0.374	263579	0.274	0.289	0.208

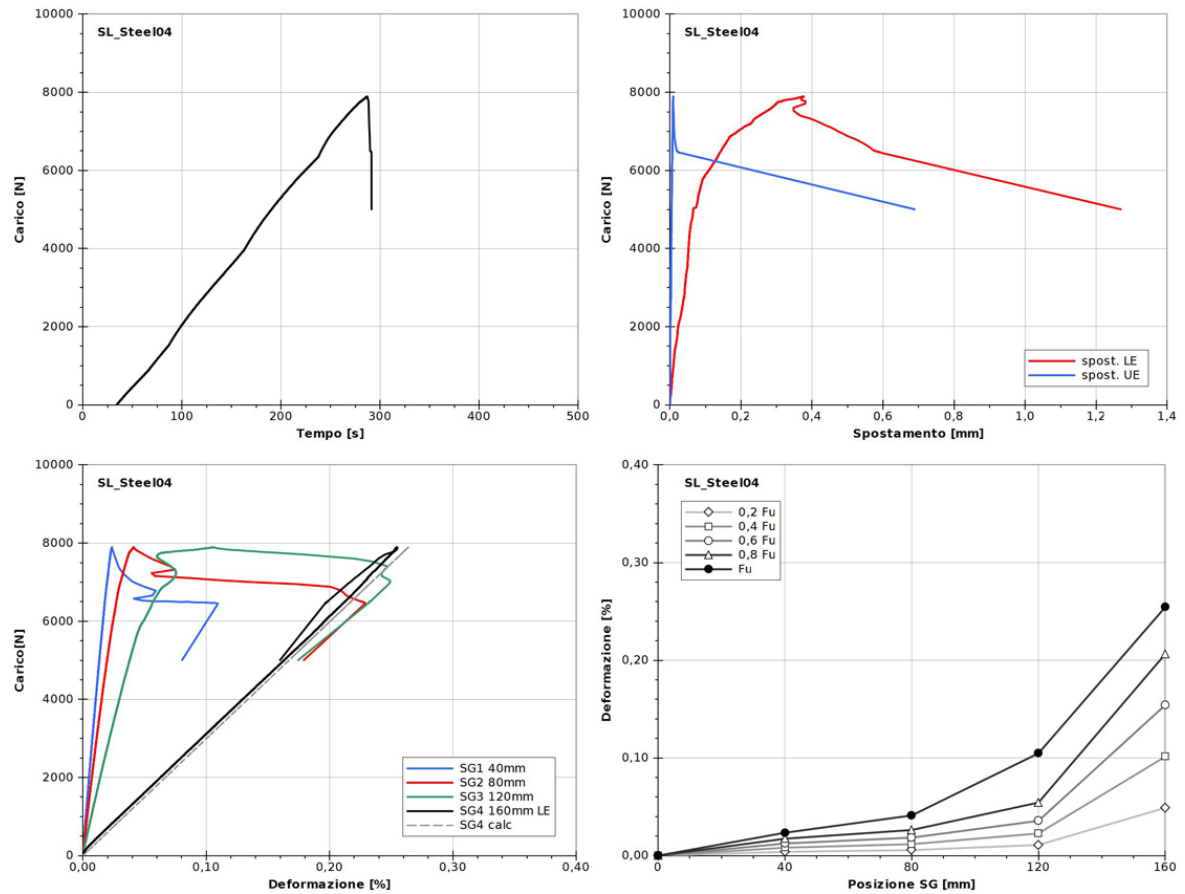


Figura 57: Campione SL-Steel-04: grafici delle principali grandezze analizzate.

SL-Steel-05

Tabella 40: Campione SL-Steel-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	160	200020	190000	3050	3070

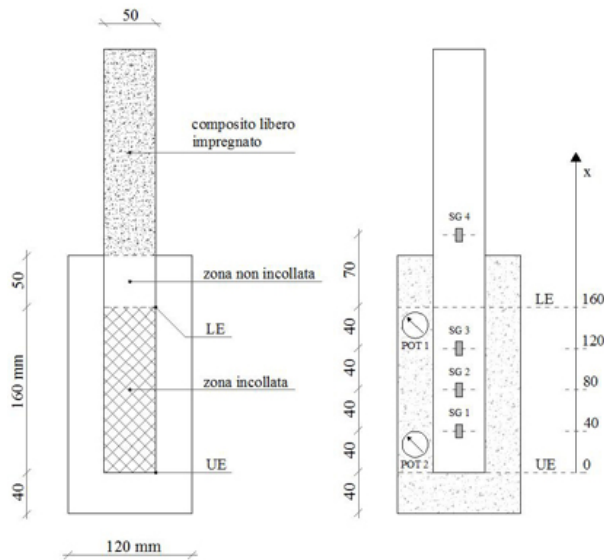


Figura 58: Campione SL-Steel-05: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 41: Campione SL-Steel-05: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	9940	0.37%	0.529	252411	0.435	0.458	0.345

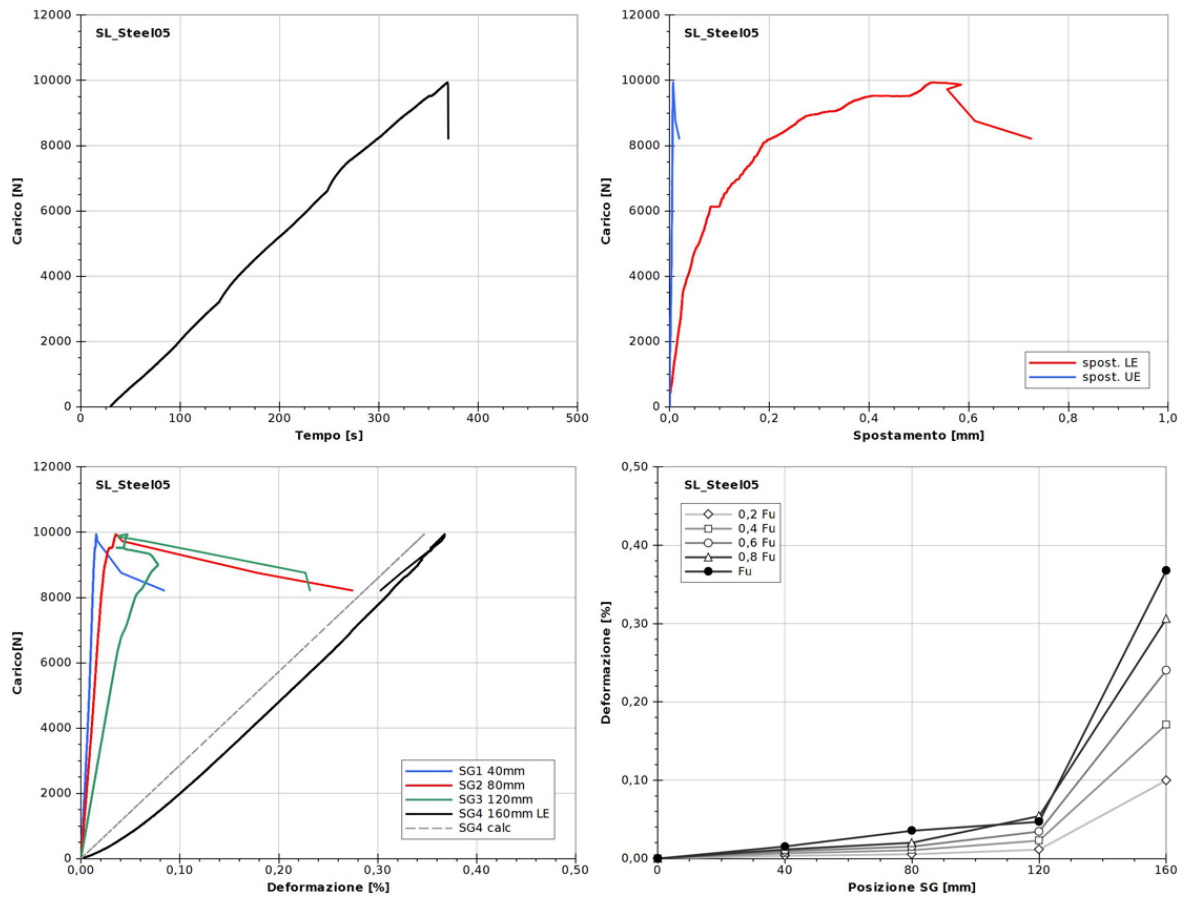


Figura 59: Campione SL-Steel-05: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 60: Campione SL-Steel-05: campione dopo la rottura.

.4 Prove di adesione su blocchi di malta

Malta-G-01f

Tabella 42: Campione Malta-G-01f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	210	80124	70000	1141	1400

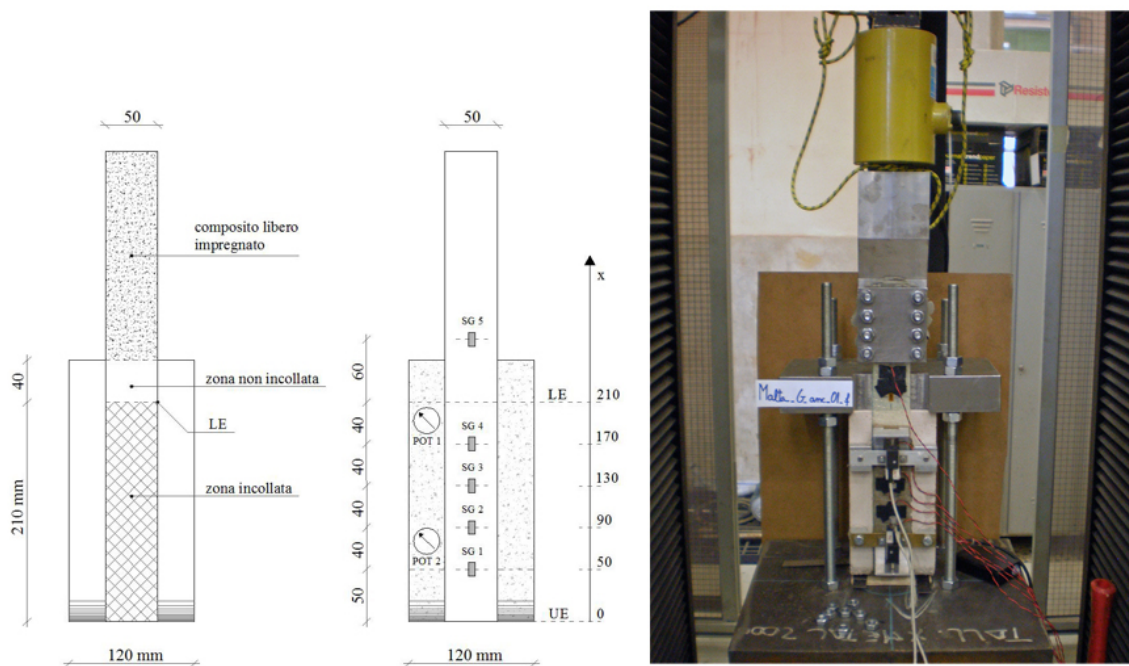


Figura 61: Campione Malta-G-01f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 43: Campione Malta-G-01f: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	2147	0.39%	0.345	88814	0.096	0.110	0.087

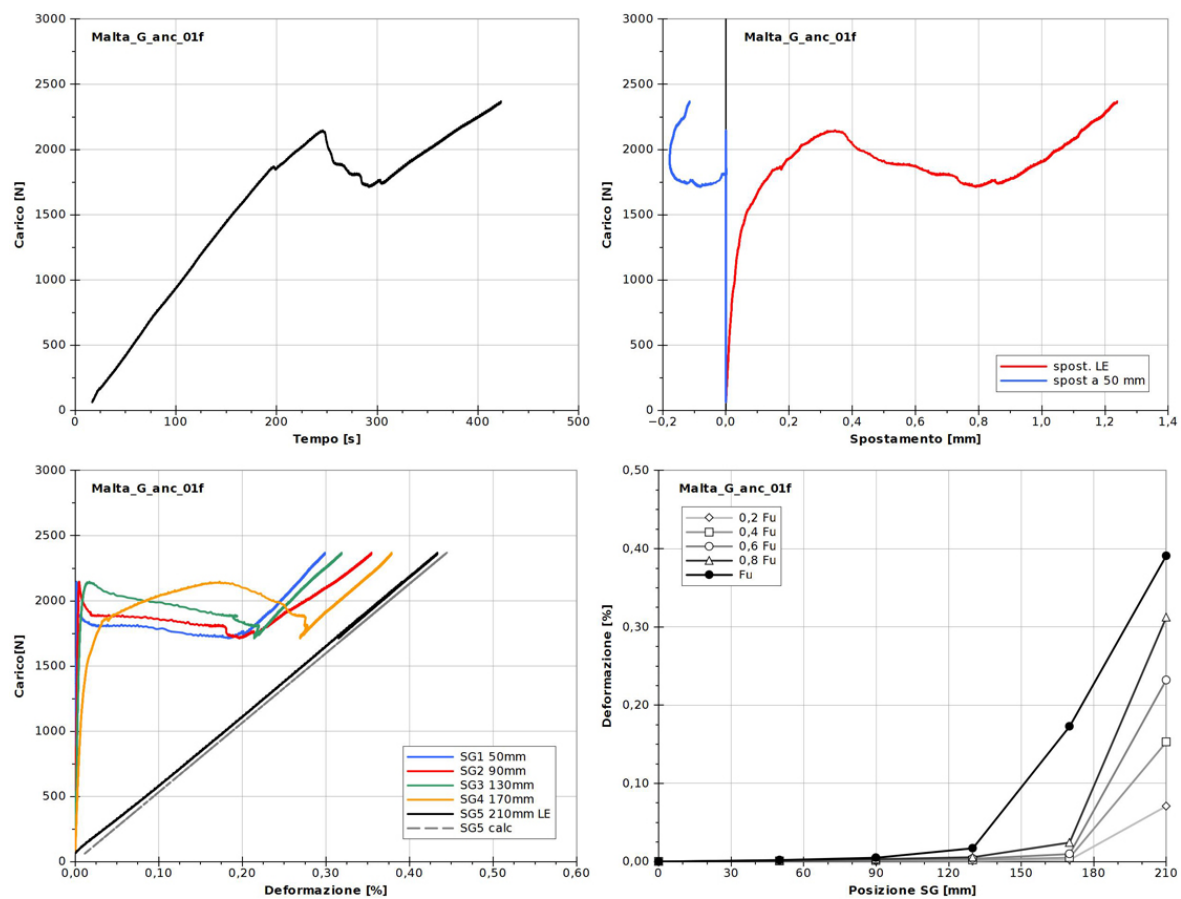


Figura 62: Campione Malta-G-01f: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 63: Campione Malta-G-01f: campione dopo la rottura.

Malta-G-03f

Tabella 44: Campione Malta-G-03f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	210	80124	70000	1141	1400

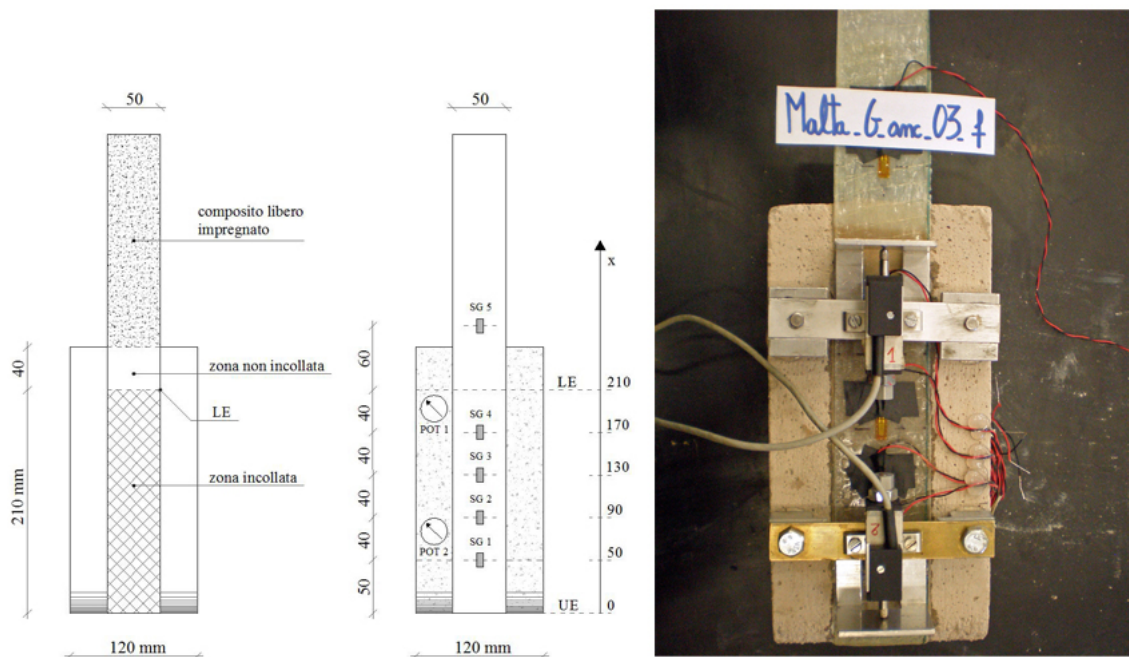


Figura 64: Campione Malta-G-03f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 45: Campione Malta-G-03f: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} [%]	δ_{LE} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	2789	0.49%	0.220	86361	0.162	0.185	0.150

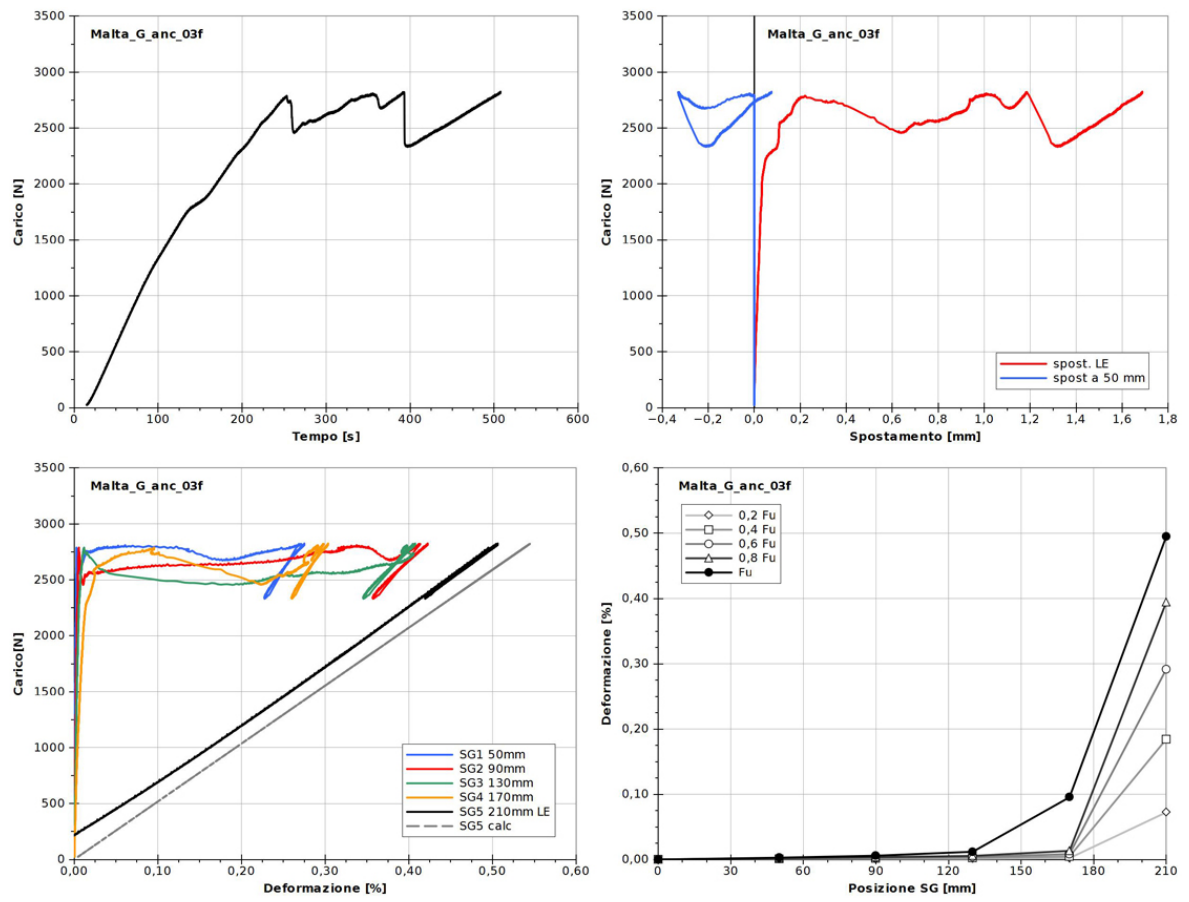


Figura 65: Campione Malta-G-03f: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 66: Campione Malta-G-03f: campione dopo la rottura.

Malta-C-01

Tabella 46: Campione Malta-C-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	220	241015	220000	2889	3500

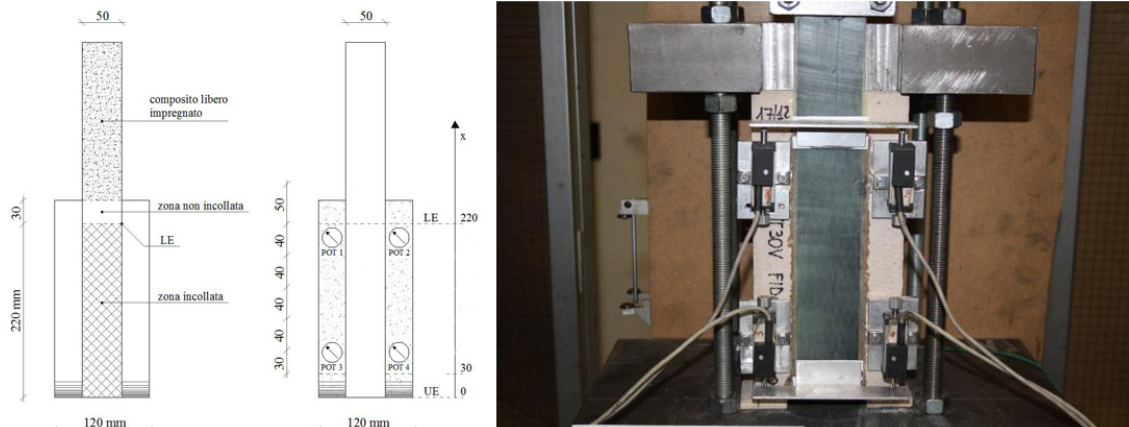


Figura 67: Campione Malta-C-01: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 47: Campione Malta-C-01: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	4302	-	0.676	-	0.090	0.099	-

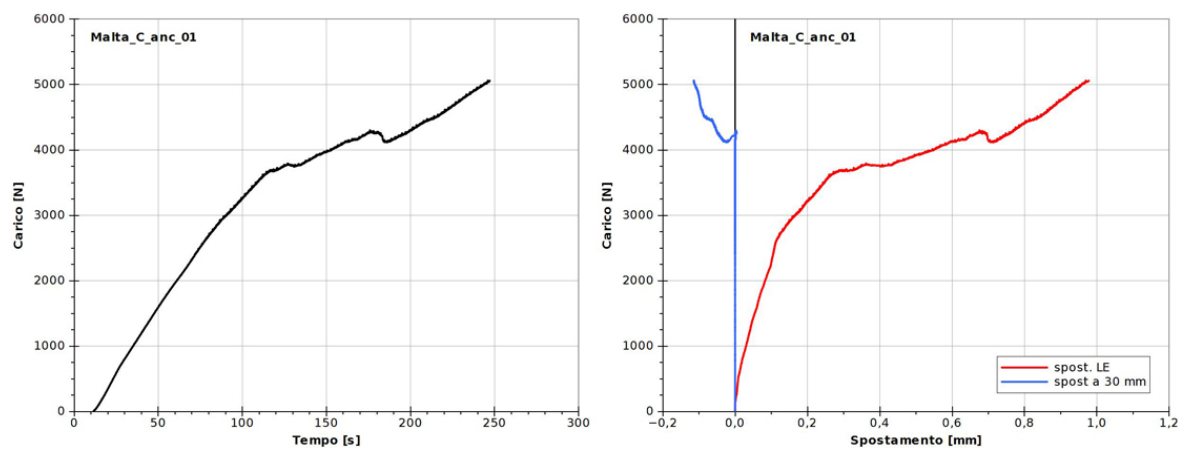


Figura 68: Campione Malta-C-01: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 69: Campione Malta-C-01: campione dopo la rottura.

Malta-C-05

Tabella 48: Campione Malta-C-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	220	241015	220000	2889	3500

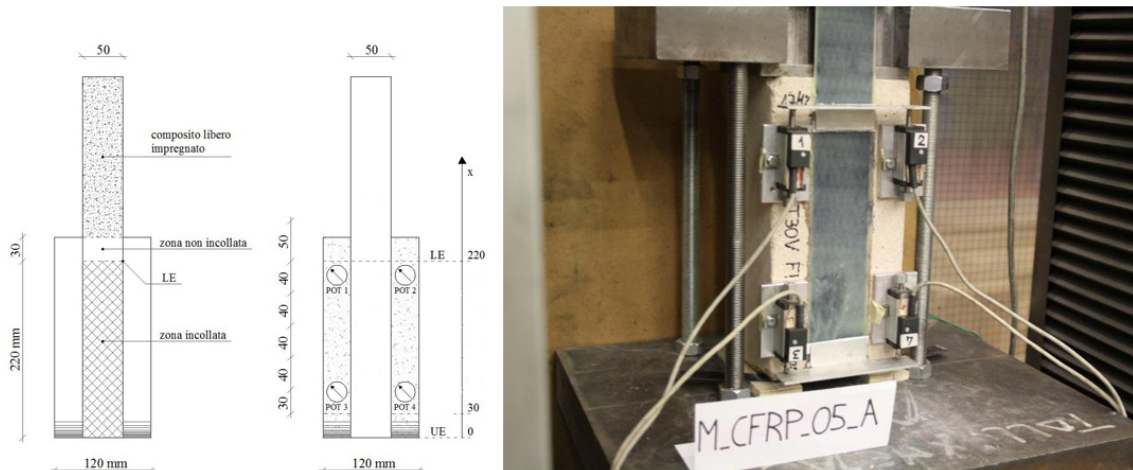


Figura 70: Campione Malta-C-05: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 49: Campione Malta-C-05: risultati della prova.

Distacco	P_{max} [N]	ϵ_{LE} a P_{max} [%]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	$E_{f,sg}$ [N/mm ²]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]	$G_{f,sg}$ [N/mm]
completo	4808	-	0.383	-	0.113	0.124	-

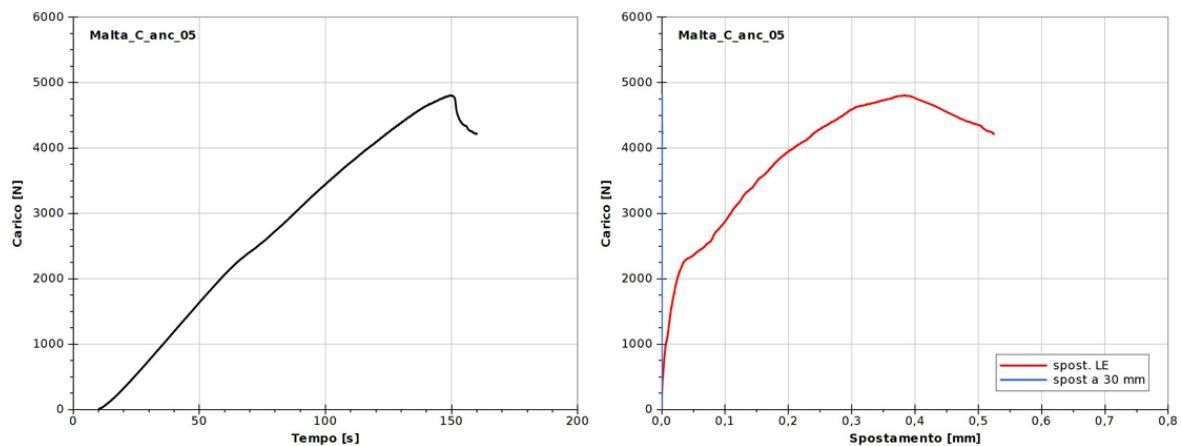


Figura 71: Campione Malta-C-05: grafici delle principali grandezze analizzate.



Figura 72: Campione Malta-C-05: campione dopo la rottura.

.5 Prove di adesione su prismi murari

M-GFRP-065-01r

Tabella 50: Campione M-GFRP-065-01r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	65	80124	70000	1141	1400

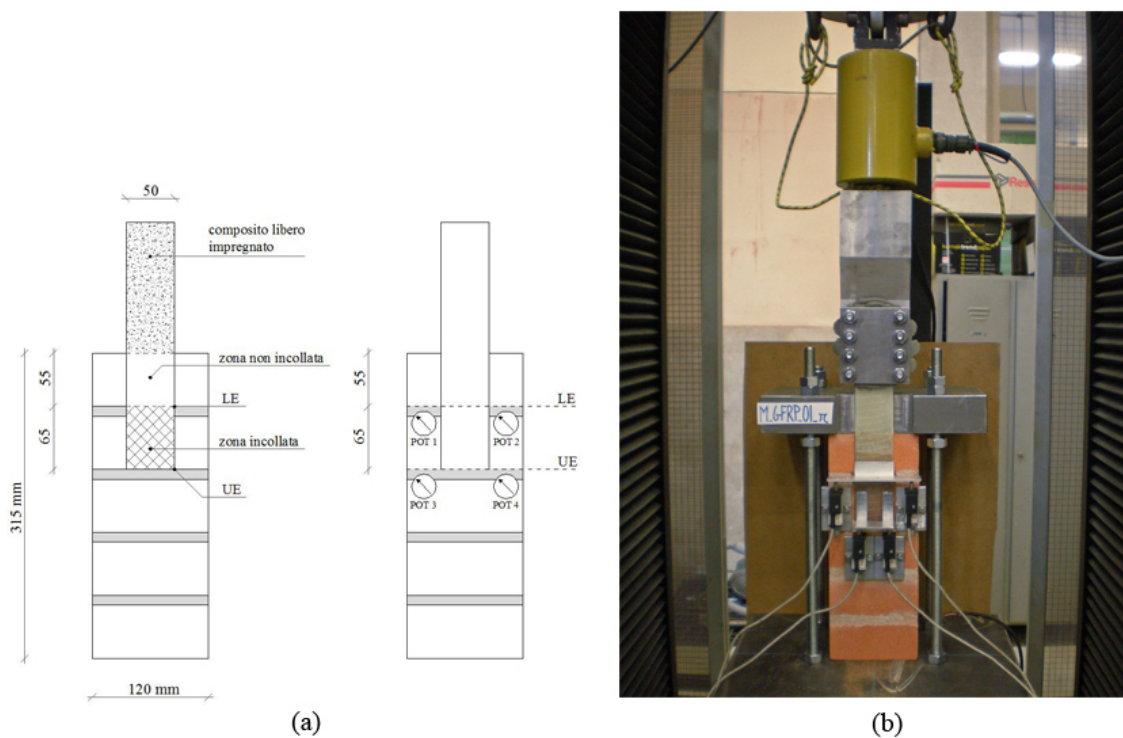


Figura 73: Campione M-GFRP-065-01r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 51: Campione M-GFRP-065-01r: risultati della prova.

P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	\mathbf{a}	P_{max}	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
4104	0.695			684	59.9%	48.9%	0.350	0.401

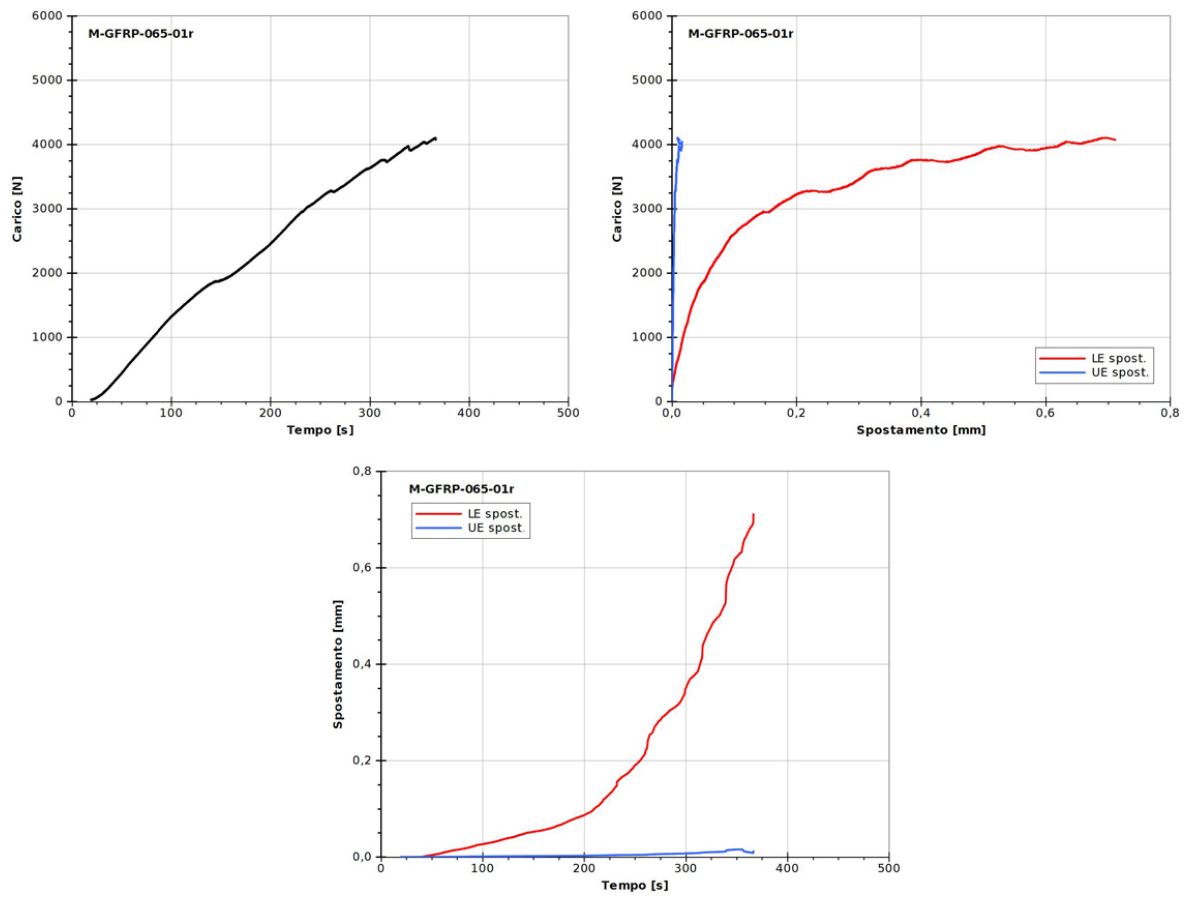


Figura 74: Campione M-GFRP-065-01r: grafici delle principali grandezze analizzate.

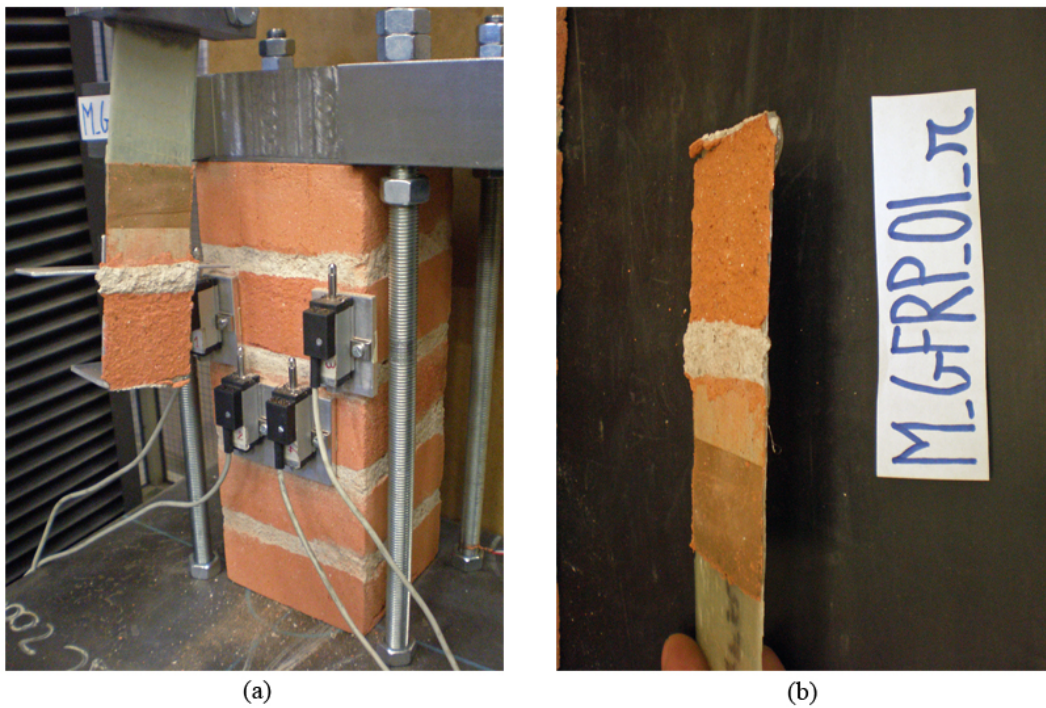


Figura 75: Campione M-GFRP-065-01r: campione dopo la rottura.

M-GFRP-065-05r

Tabella 52: Campione M-GFRP-065-05r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	65	80124	70000	1141	1400

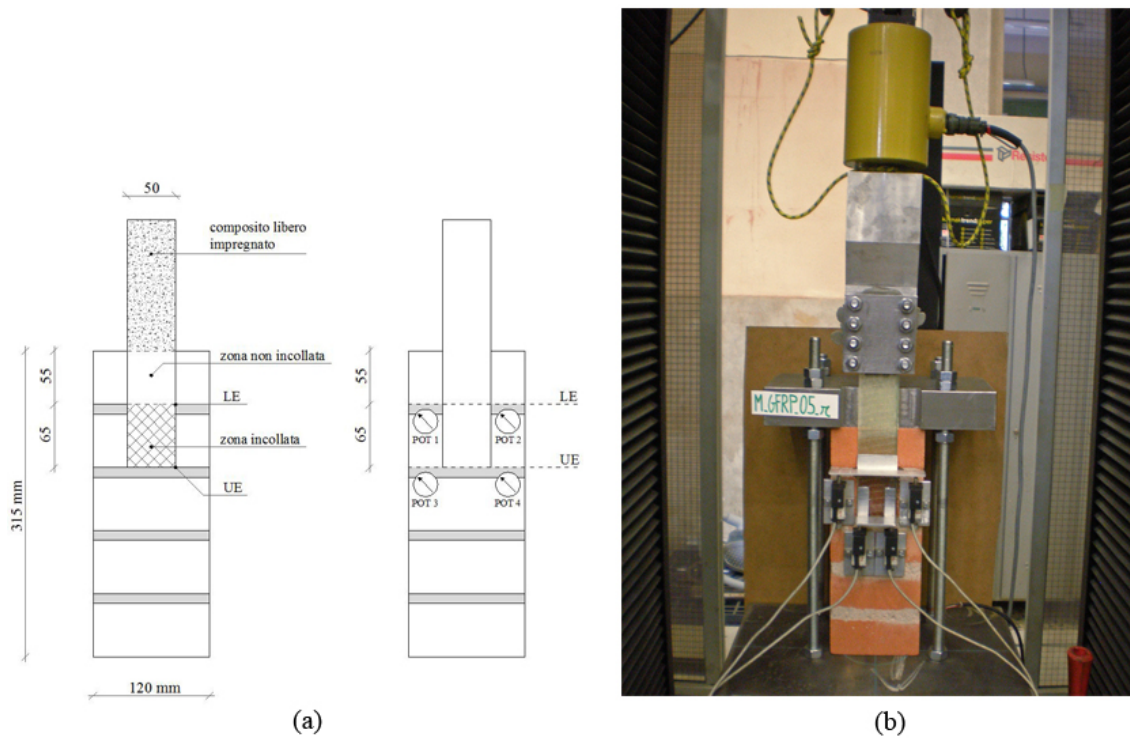


Figura 76: Campione M-GFRP-065-05r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 53: Campione M-GFRP-065-05r: risultati della prova.

P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
4255	0.319		709	709	62.2%	50.7%	0.377	0.431

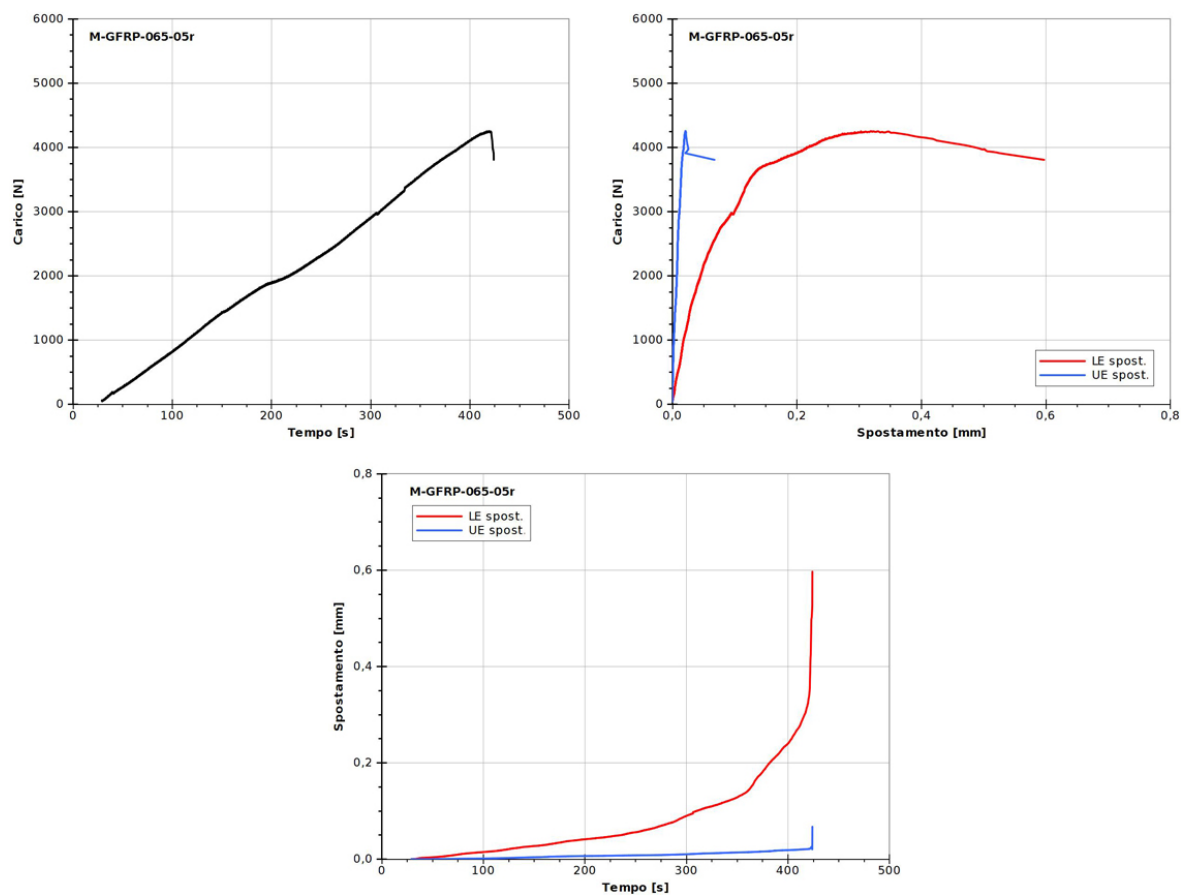


Figura 77: Campione M-GFRP-065-05r: grafici delle principali grandezze analizzate.

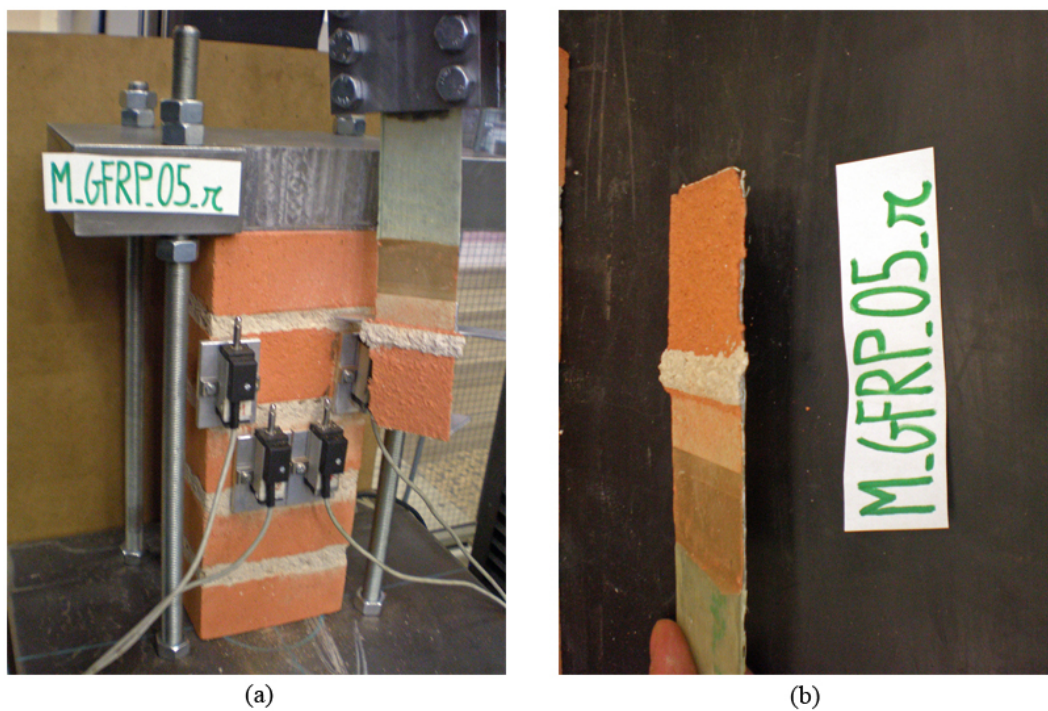


Figura 78: Campione M-GFRP-065-05r: campione dopo la rottura.

M-GFRP-130-02f

Tabella 54: Campione M-GFRP-130-02f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	130	80124	70000	1141	1400

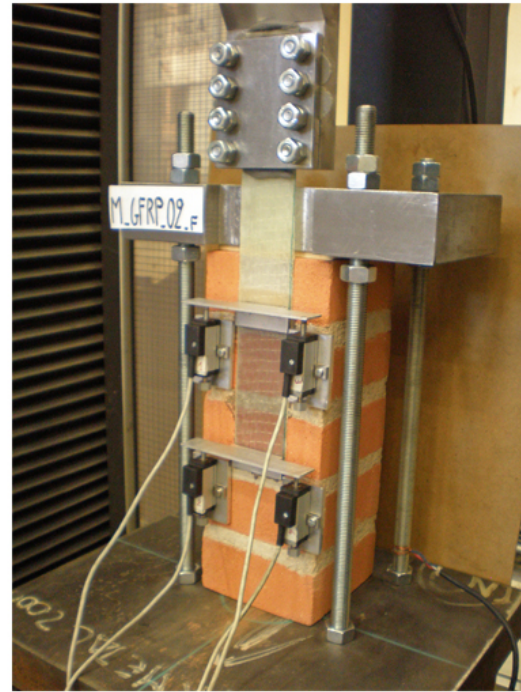
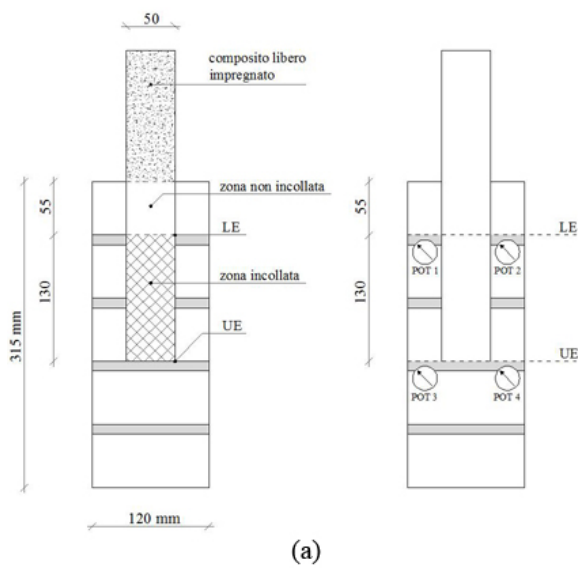


Figura 79: Campione M-GFRP-130-02f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 55: Campione M-GFRP-130-02f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max}	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4982	0.421		830	72.8%	59.3%	0.516	0.591
2° picco	4375	0.608		729	63.9%	52.1%	0.398	0.456

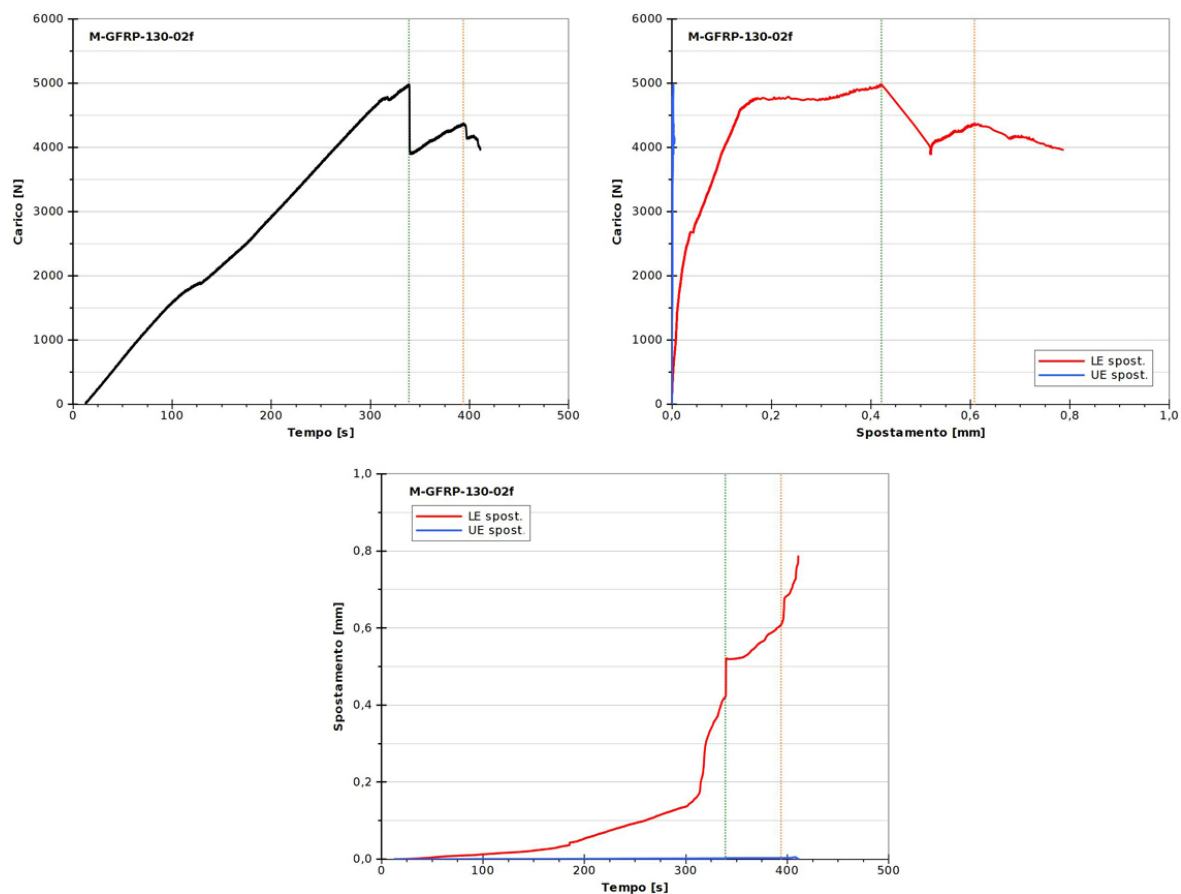


Figura 80: Campione M-GFRP-130-02f: grafici delle principali grandezze analizzate.

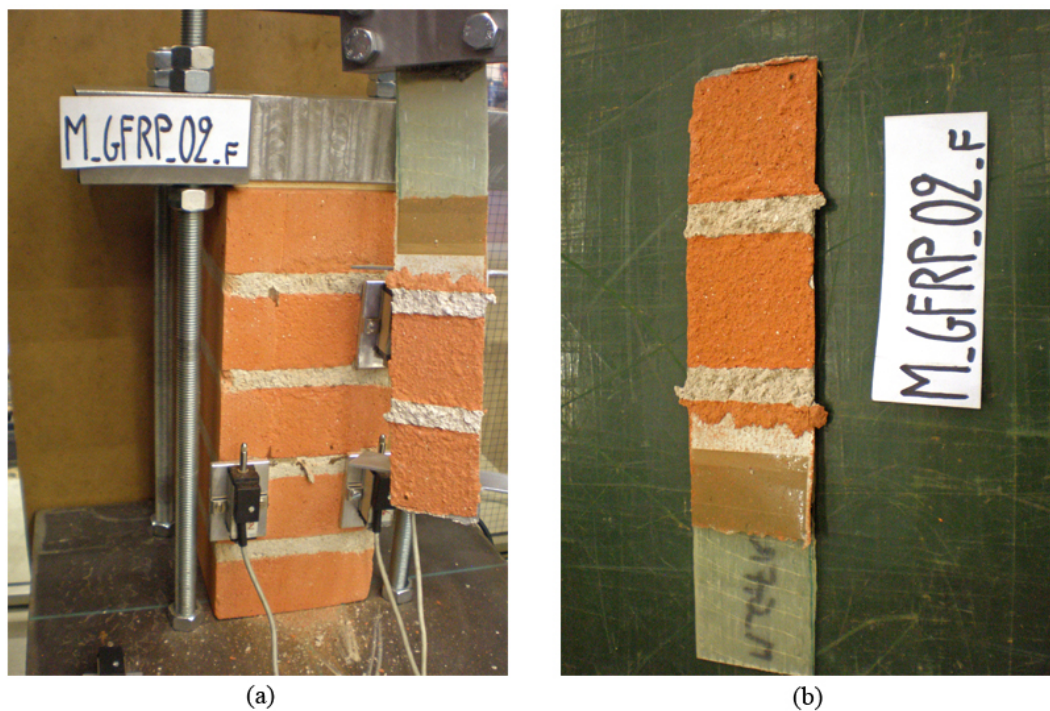


Figura 81: Campione M-GFRP-130-02f: campione dopo la rottura.

M-GFRP-130-03r

Tabella 56: Campione M-GFRP-130-03r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	130	80124	70000	1141	1400

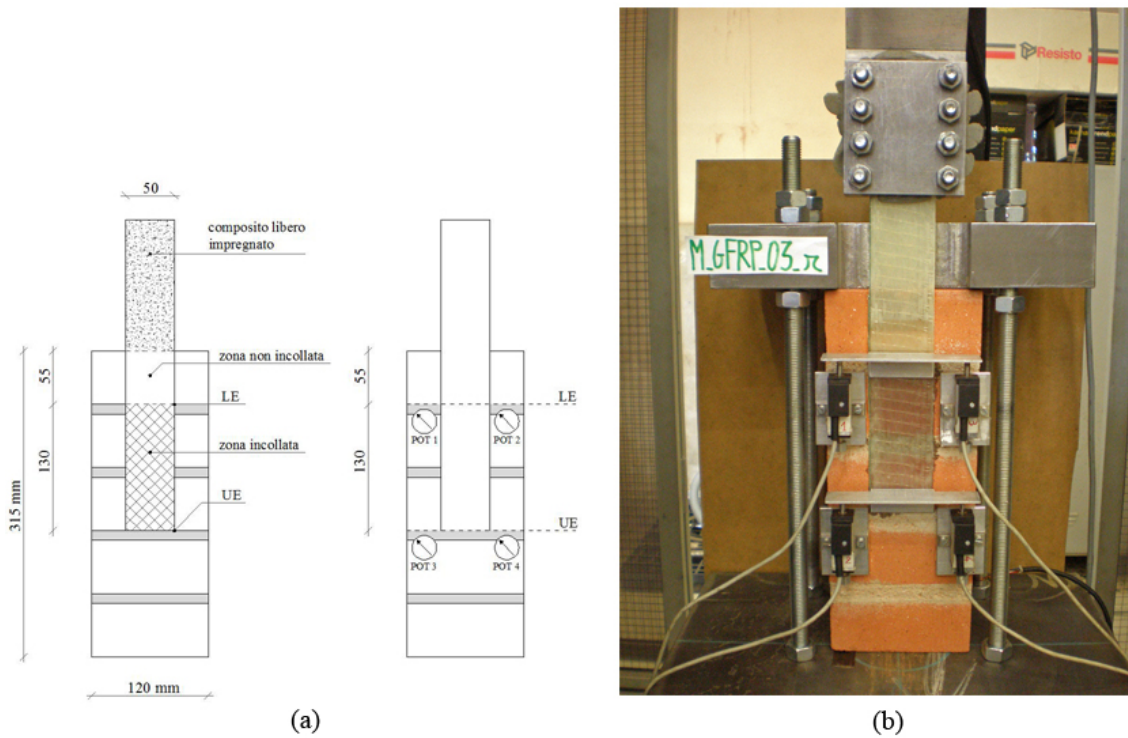


Figura 82: Campione M-GFRP-130-03r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 57: Campione M-GFRP-130-03r: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	3785	0.352		631	55.3%	45.1%	0.298	0.341	
2° picco	3556	1.027		593	51.9%	42.3%	0.263	0.301	

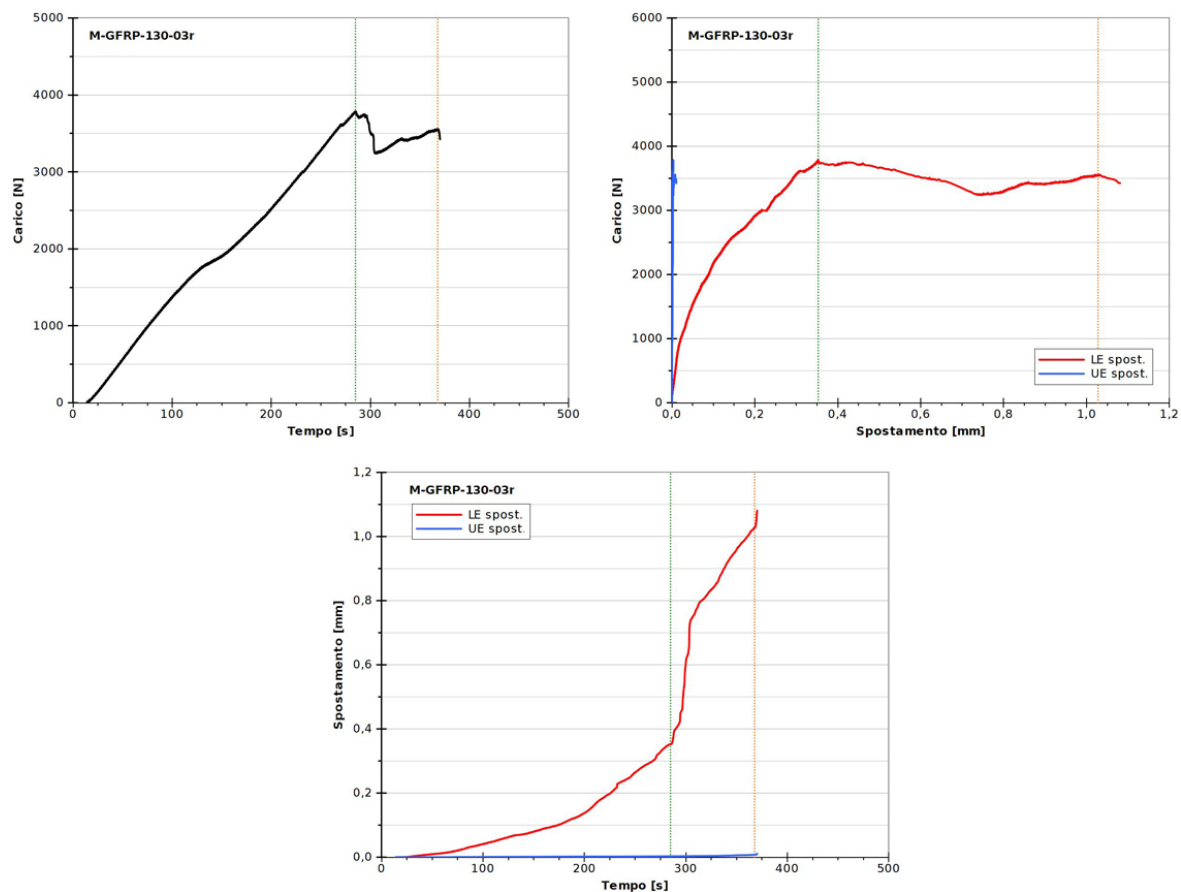


Figura 83: Campione M-GFRP-130-03r: grafici delle principali grandezze analizzate.

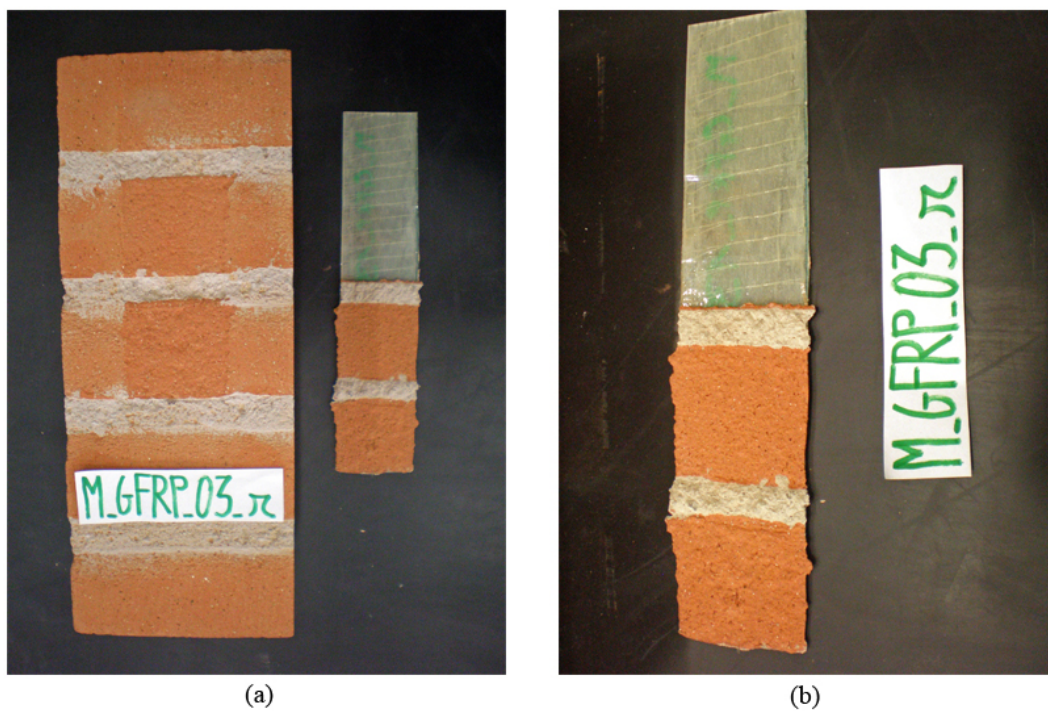


Figura 84: Campione M-GFRP-130-03r: campione dopo la rottura.

M-GFRP-195-03f

Tabella 58: Campione M-GFRP-195-03f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	195	80124	70000	1141	1400

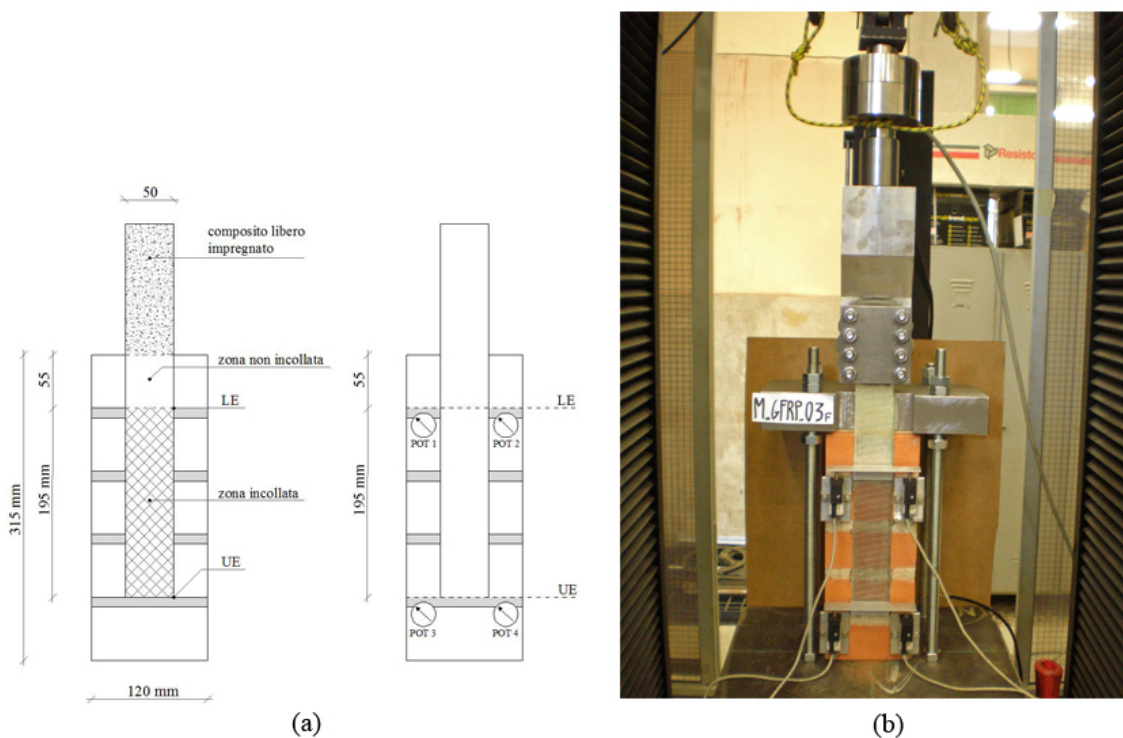


Figura 85: Campione M-GFRP-195-03f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 59: Campione M-GFRP-195-03f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max}	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	5199	0.044		866	75.9%	61.9%	0.562	0.643
2° picco	4336	0.572		723	63.3%	51.6%	0.391	0.448
3° picco	4124	-		687	60.2%	49.1%	0.354	0.405

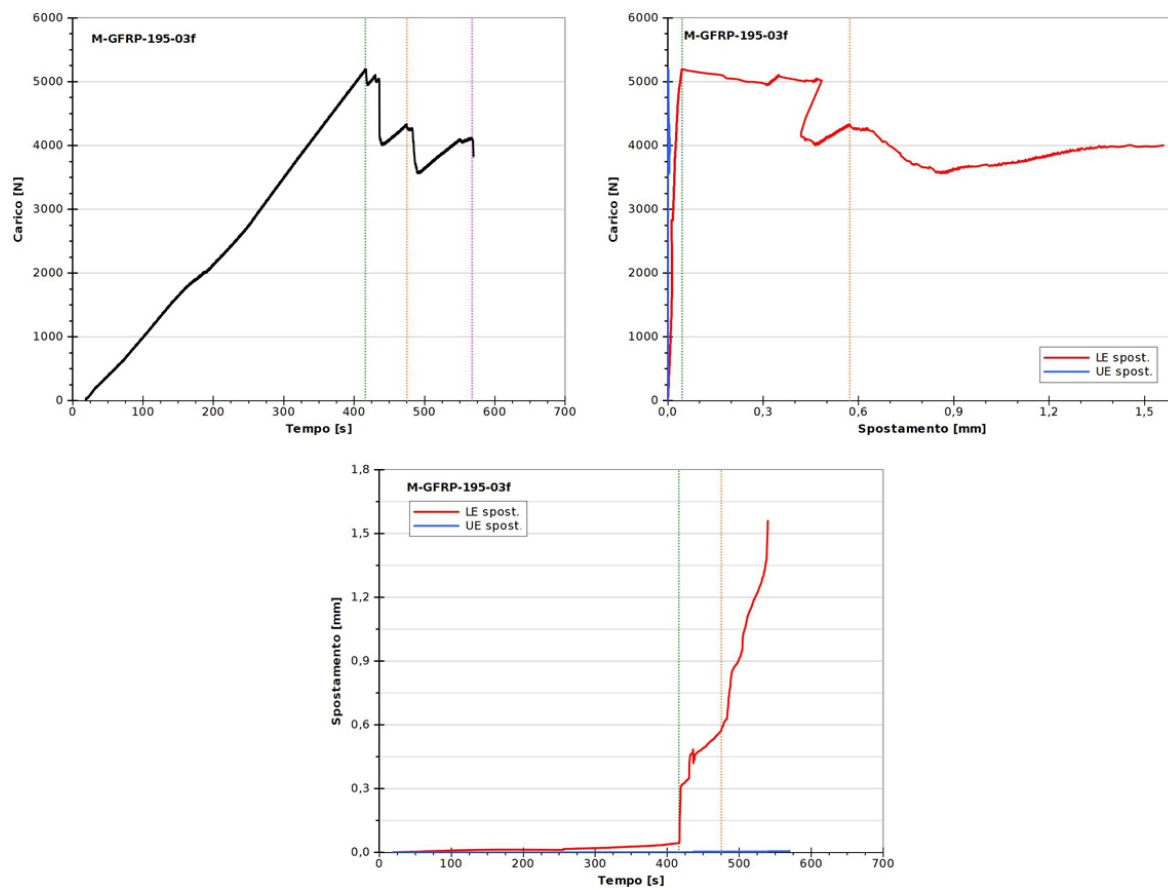


Figura 86: Campione M-GFRP-195-03f: grafici delle principali grandezze analizzate.

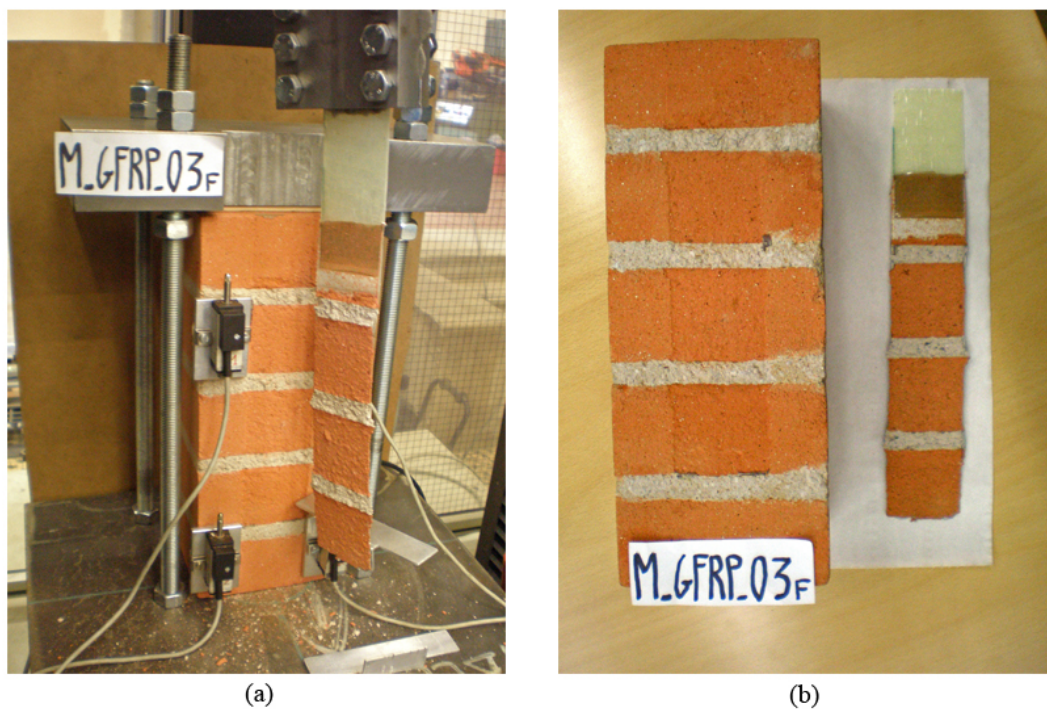


Figura 87: Campione M-GFRP-195-03f: campione dopo la rottura.

M-GFRP-195-05f

Tabella 60: Campione M-GFRP-195-05f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	195	80124	70000	1141	1400

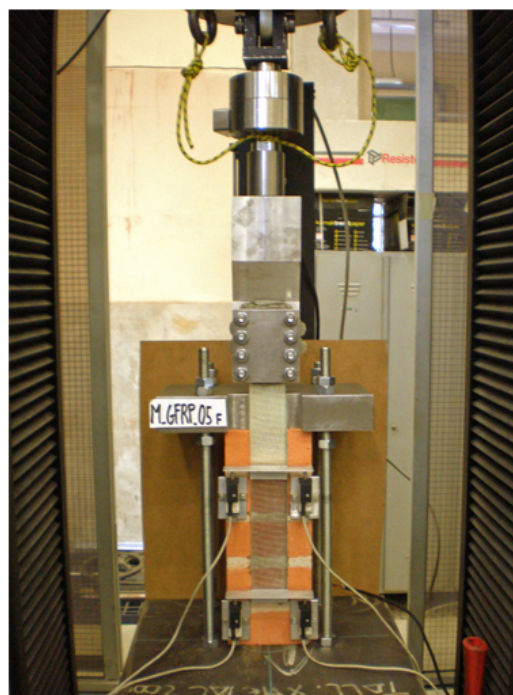
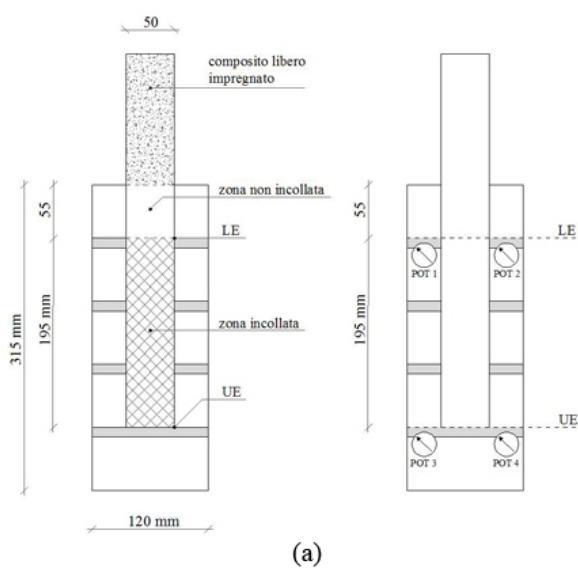


Figura 88: Campione M-GFRP-195-05f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 61: Campione M-GFRP-195-05f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max}	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4744	0.170		791	69.3%	56.5%	0.468	0.536
2° picco	4479	0.679		747	65.4%	53.3%	0.417	0.478
3° picco	4107	1.118		684	60.0%	48.9%	0.351	0.402

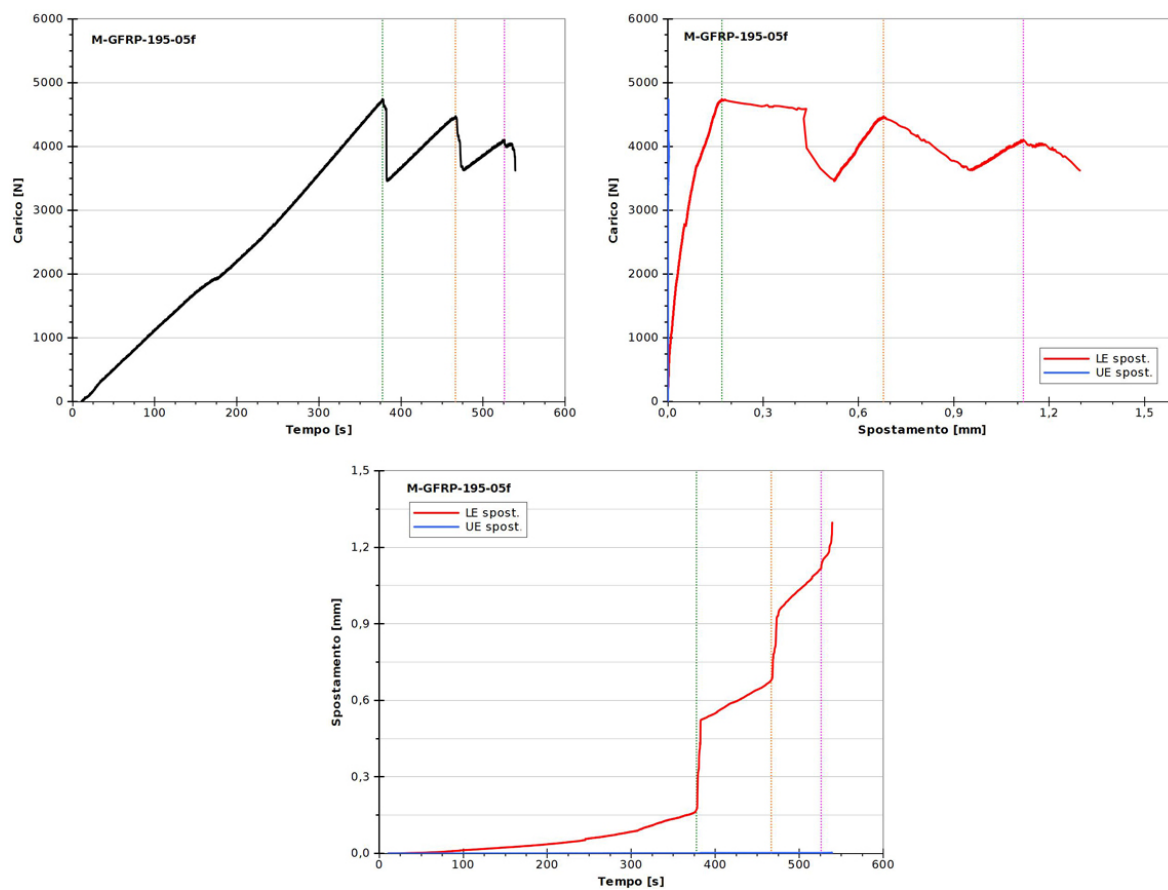


Figura 89: Campione M-GFRP-195-05f: grafici delle principali grandezze analizzate.

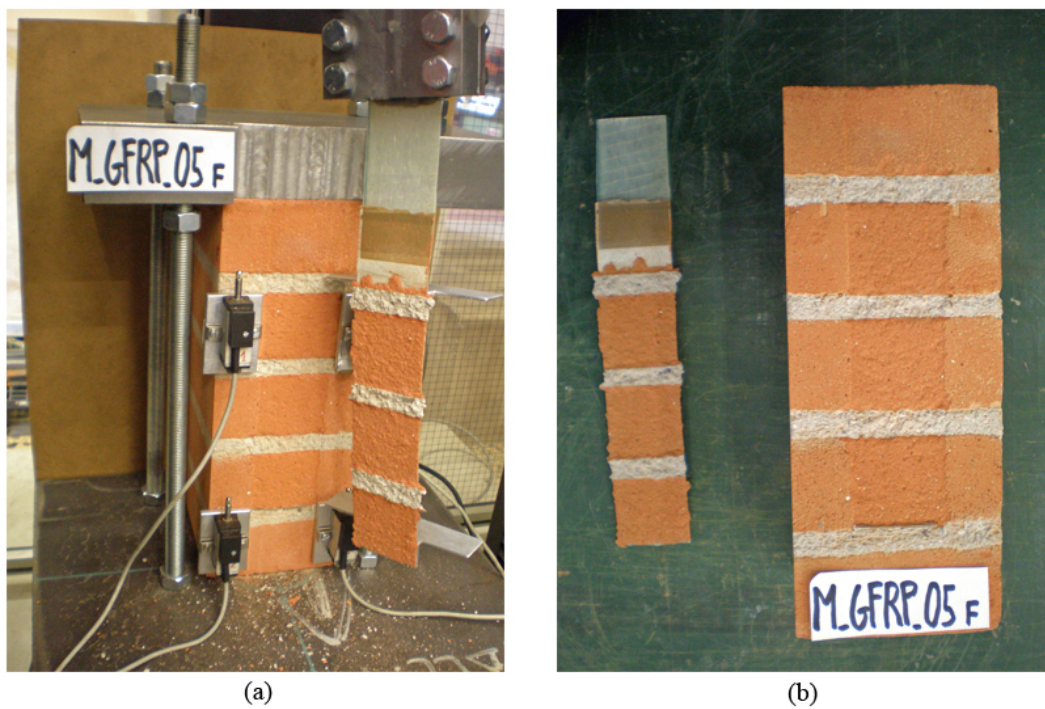


Figura 90: Campione M-GFRP-195-05f: campione dopo la rottura.

M-GFRP-anc-04f

Tabella 62: Campione M-GFRP-anc-04f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	260	80124	70000	1141	1400

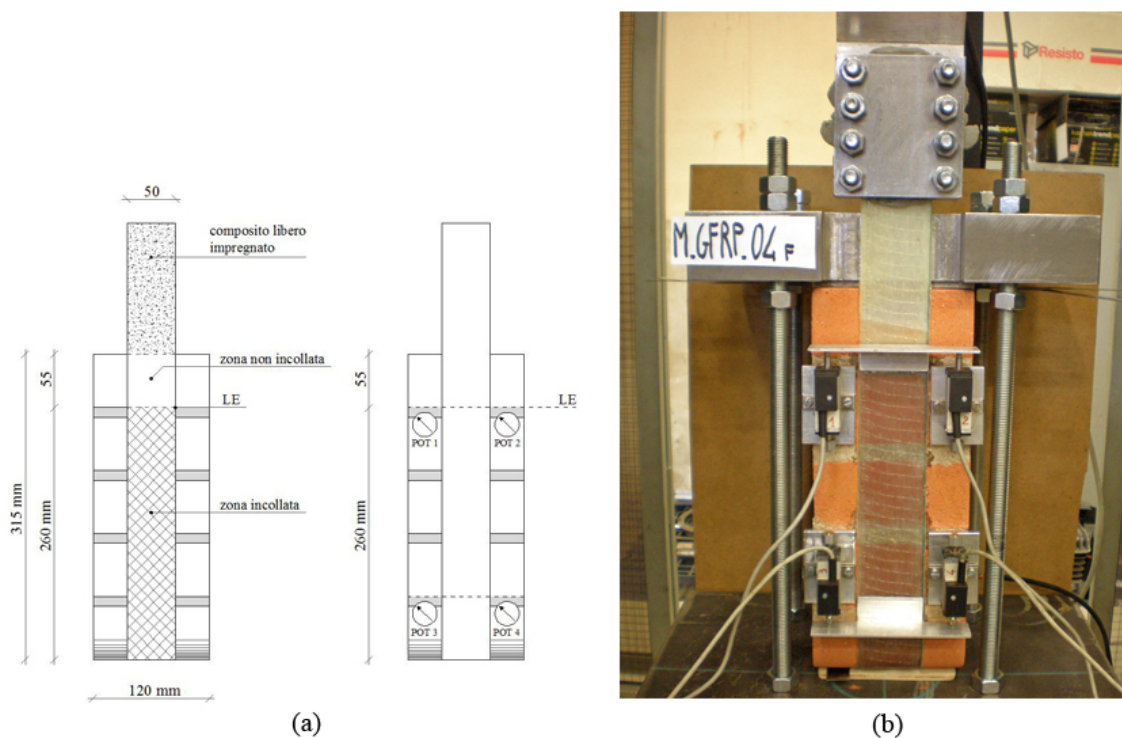


Figura 91: Campione M-GFRP-anc-04f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 63: Campione M-GFRP-anc-04f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4865	0.414		811	71.1%	57.9%	0.492	0.564	
2° picco	4445	0.721		741	64.9%	52.9%	0.411	0.471	
3° picco	4445	1.010		741	64.9%	52.9%	0.411	0.471	
4° picco	4745	1.800		791	69.3%	56.5%	0.468	0.536	

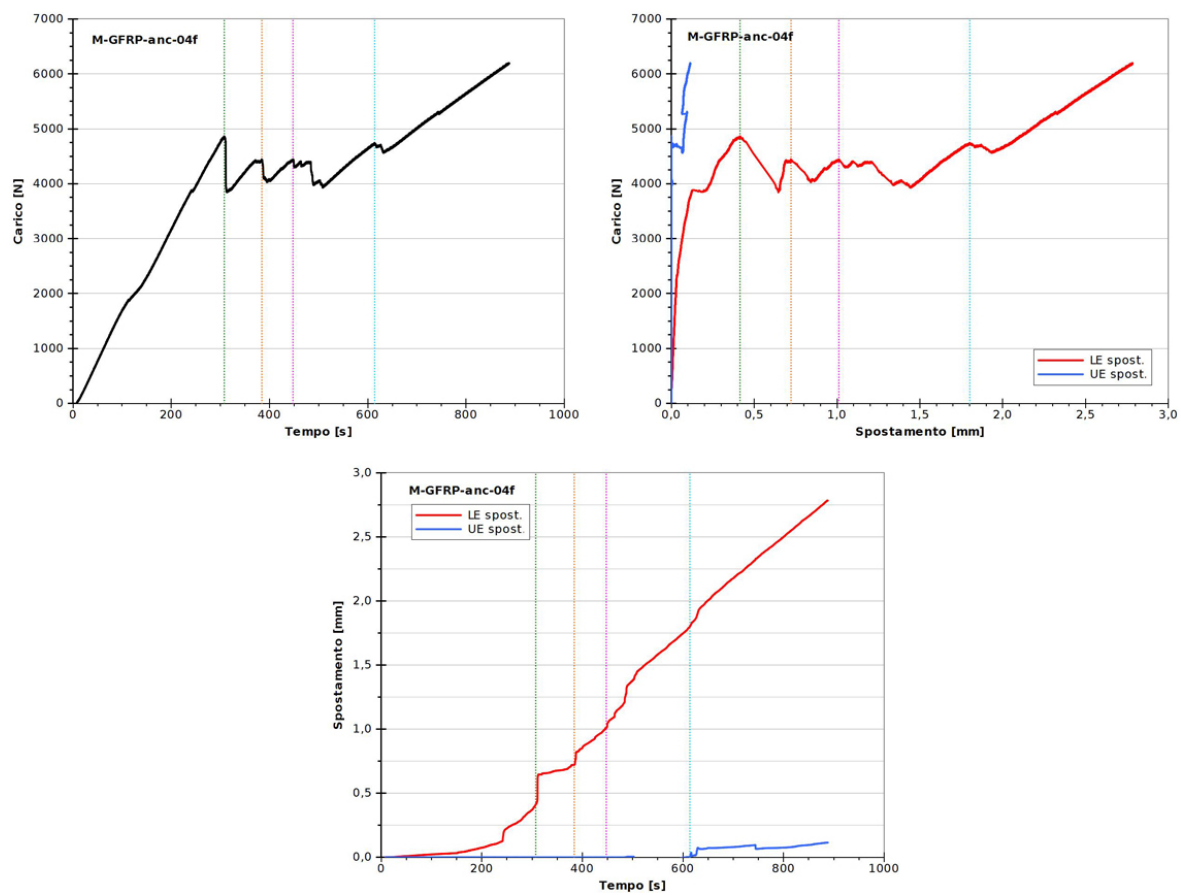


Figura 92: Campione M-GFRP-anc-04f: grafici delle principali grandezze analizzate.

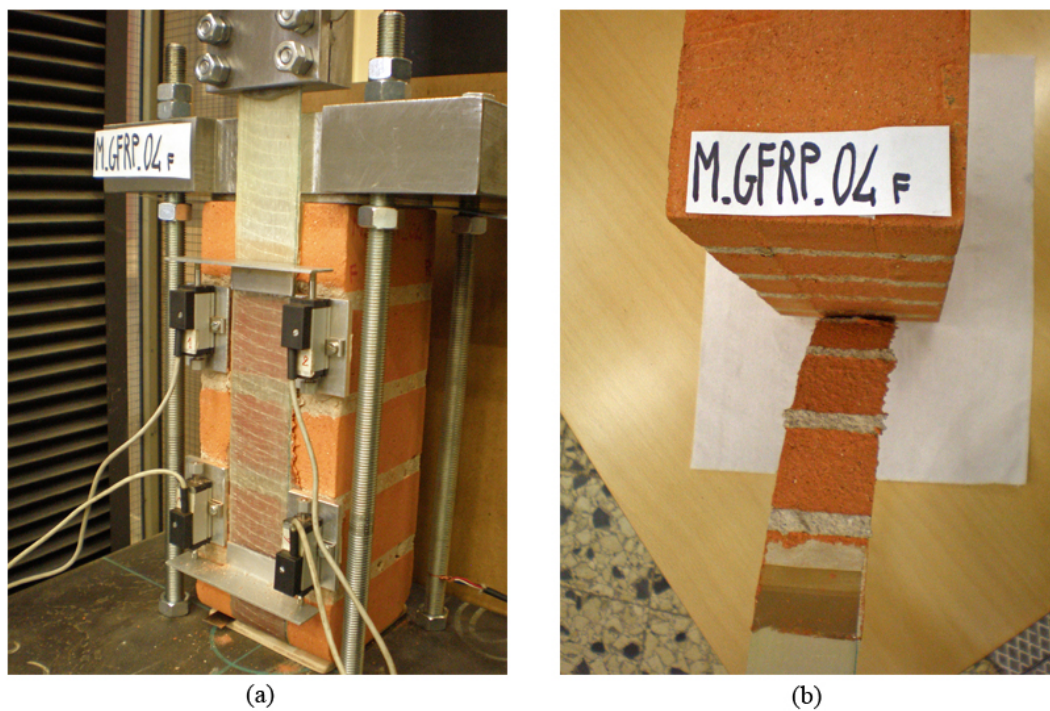


Figura 93: Campione M-GFRP-anc-04f: campione dopo la rottura.

M-GFRP-anc-10f

Tabella 64: Campione M-GFRP-anc-10f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
GFRP	0.120	50	260	80124	70000	1141	1400

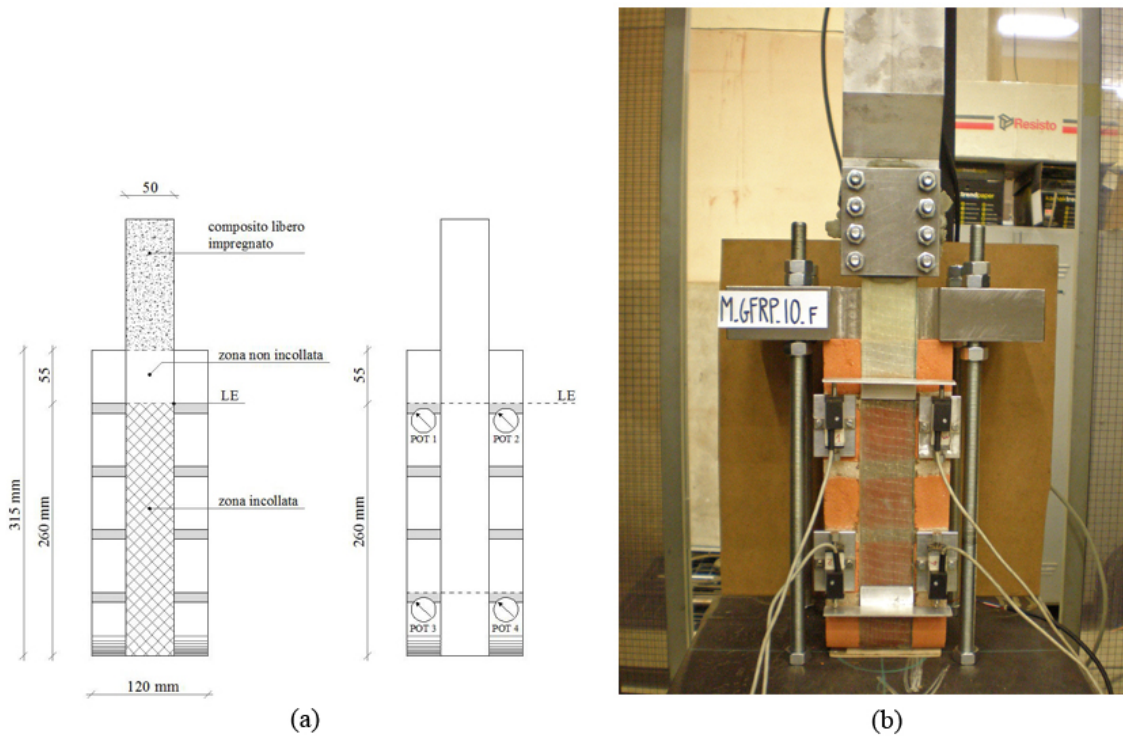


Figura 94: Campione M-GFRP-anc-10f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 65: Campione M-GFRP-anc-10f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	5362	0.388		894	78.3%	63.8%	0.598	0.685	
2° picco	4493	0.947		749	65.6%	53.5%	0.420	0.481	
3° picco	4880	1.549		813	71.3%	58.1%	0.495	0.567	
4° picco	4700	2.096		783	68.7%	56.0%	0.460	0.526	

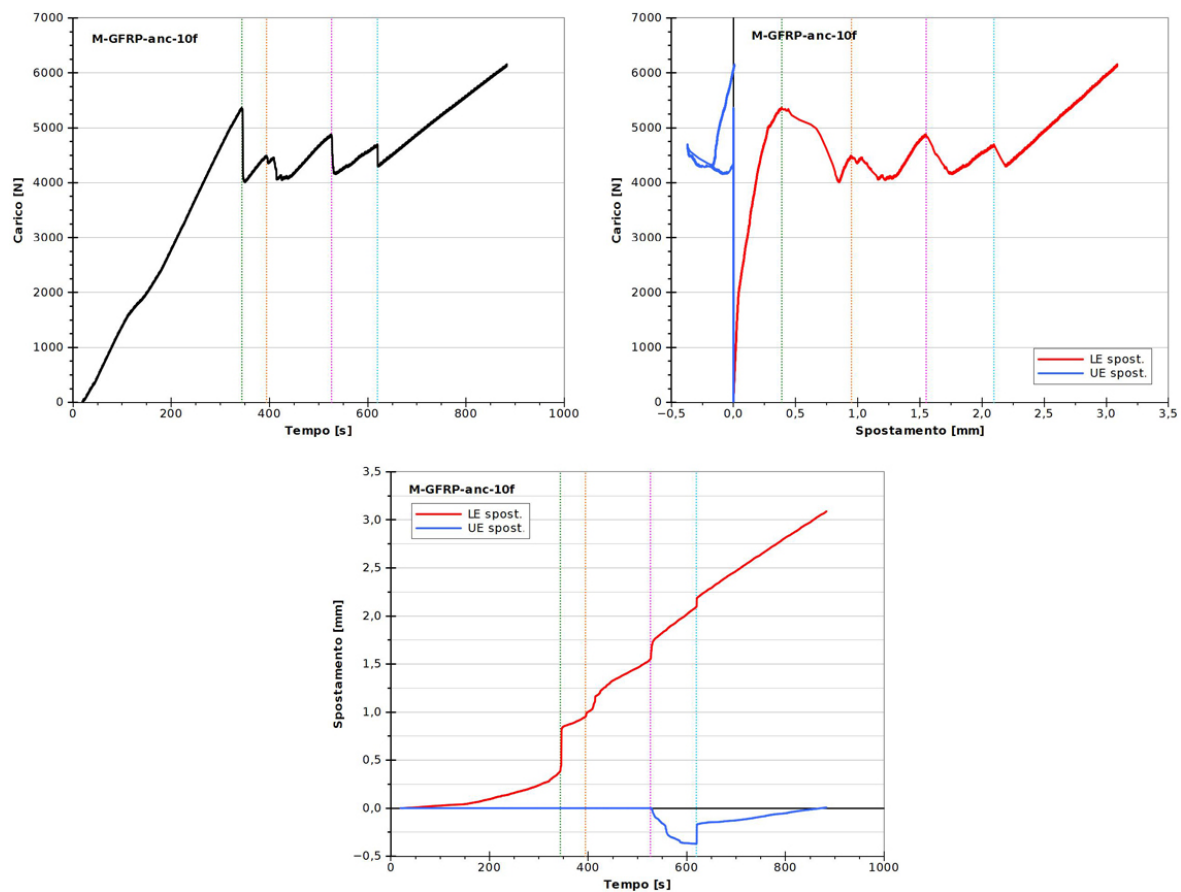


Figura 95: Campione M-GFRP-anc-10f: grafici delle principali grandezze analizzate.

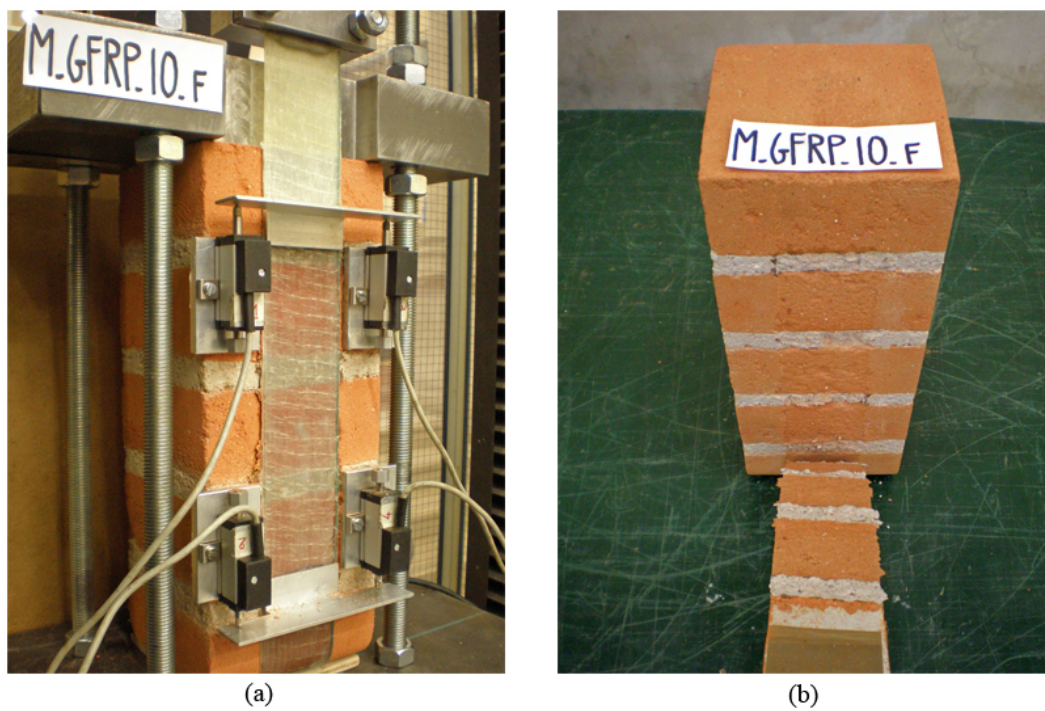


Figura 96: Campione M-GFRP-anc-10f: campione dopo la rottura.

M-CFRP-195-02dx

Tabella 66: Campione M-CFRP-195-02dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	195	241015	220000	2889	3500

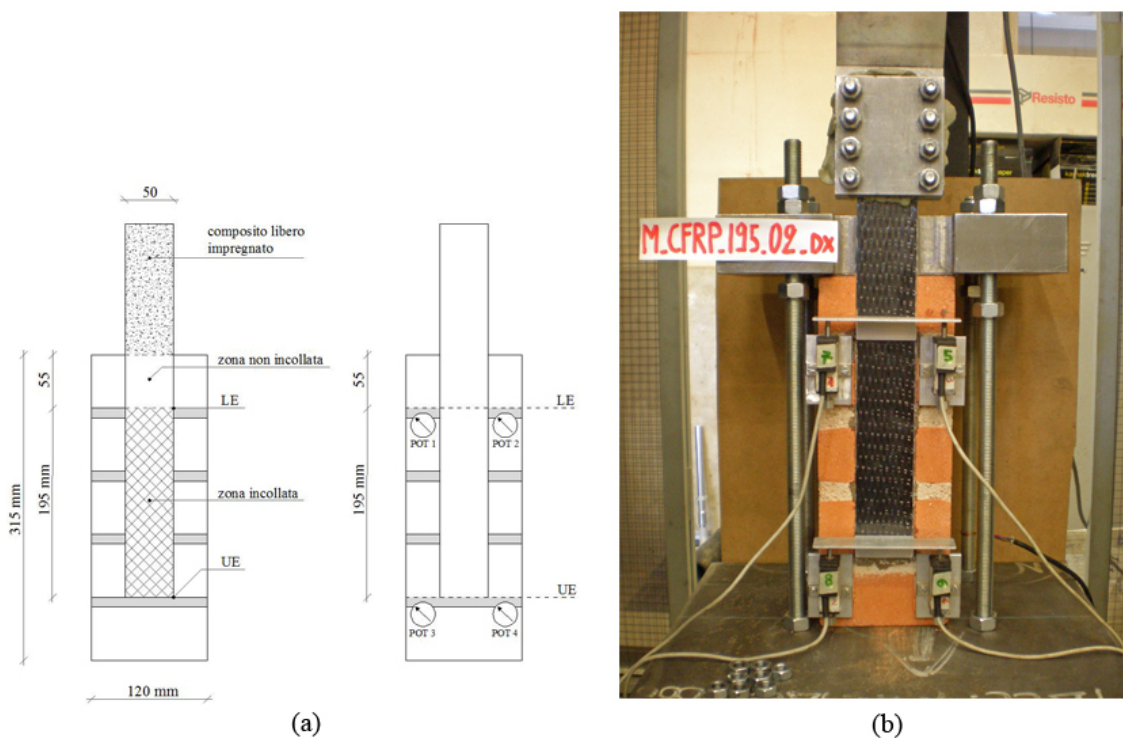


Figura 97: Campione M-CFRP-195-02dx: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 67: Campione M-CFRP-195-02dx: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	6592	0.319		775	26.8%	22.2%	0.212	0.232	
2° picco	6329	0.704		745	25.8%	21.3%	0.196	0.214	
3° picco	6236	1.010		734	25.4%	21.0%	0.190	0.208	

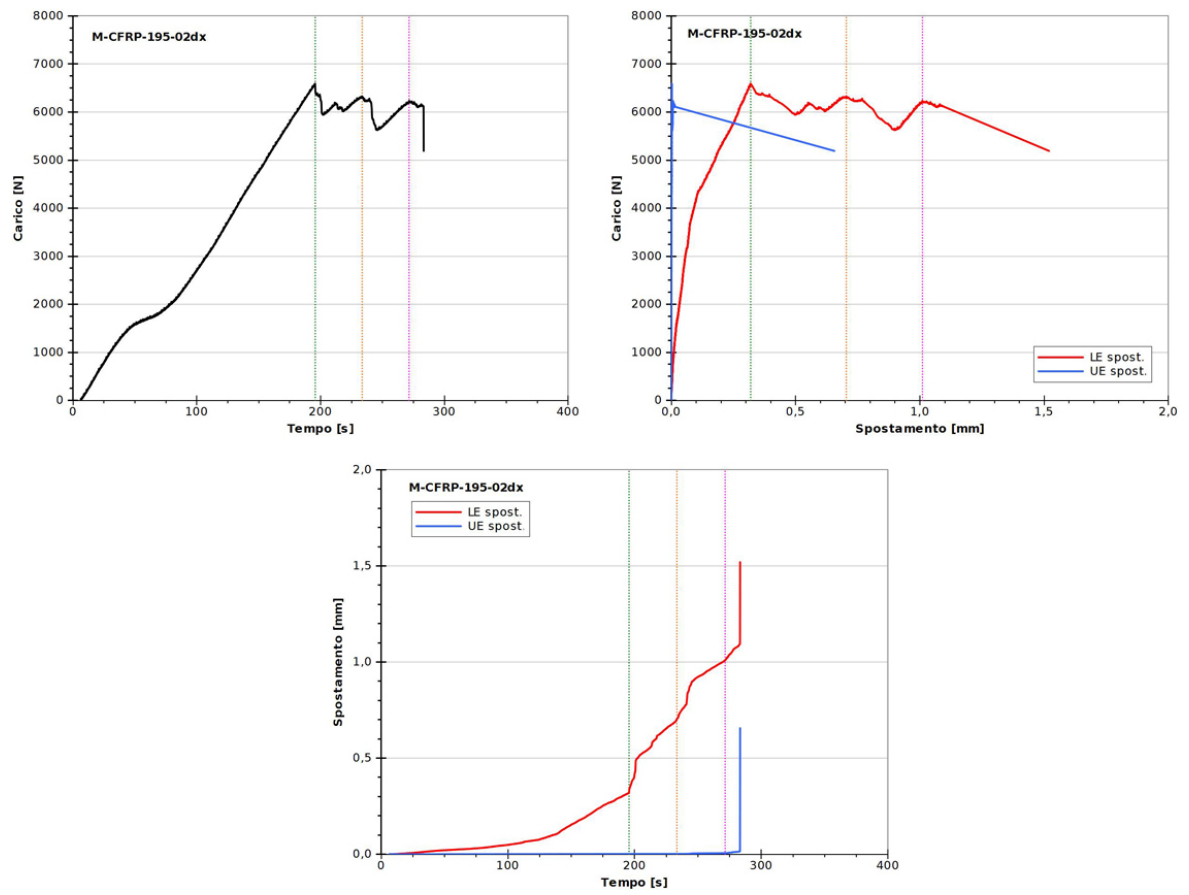


Figura 98: Campione M-CFRP-195-02dx: grafici delle principali grandezze analizzate.

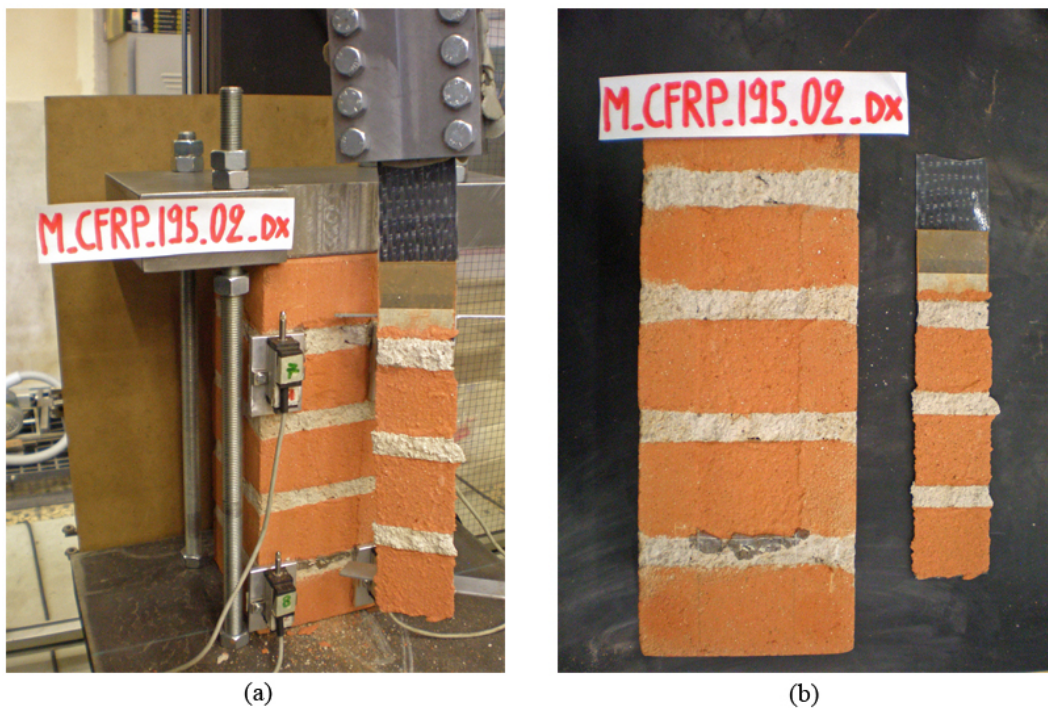


Figura 99: Campione M-CFRP-195-02dx: campione dopo la rottura.

M-CFRP-195-05dx

Tabella 68: Campione M-CFRP-195-05dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	195	241015	220000	2889	3500

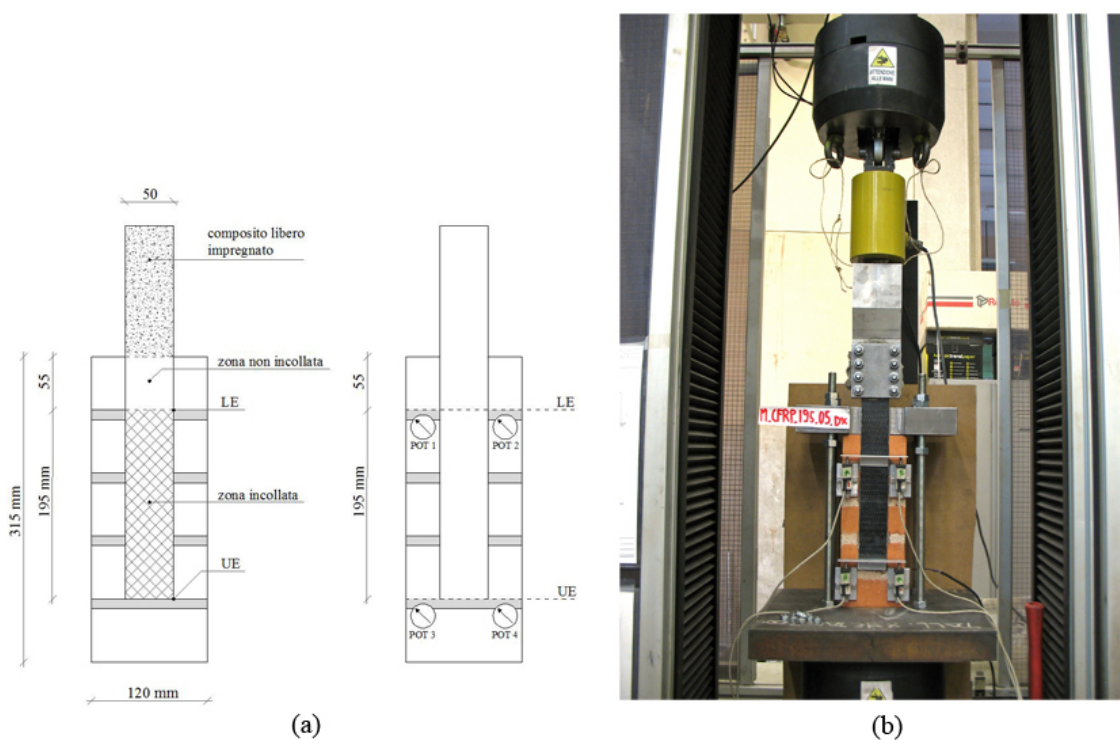


Figura 100: Campione M-CFRP-195-05dx: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 69: Campione M-CFRP-195-05dx: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max}	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	7000	0.545		824	28.4%	23.5%	0.239	0.262
2° picco	7156	0.718		842	29.1%	24.1%	0.250	0.274
3° picco	7224	1.022		850	29.4%	24.3%	0.255	0.279

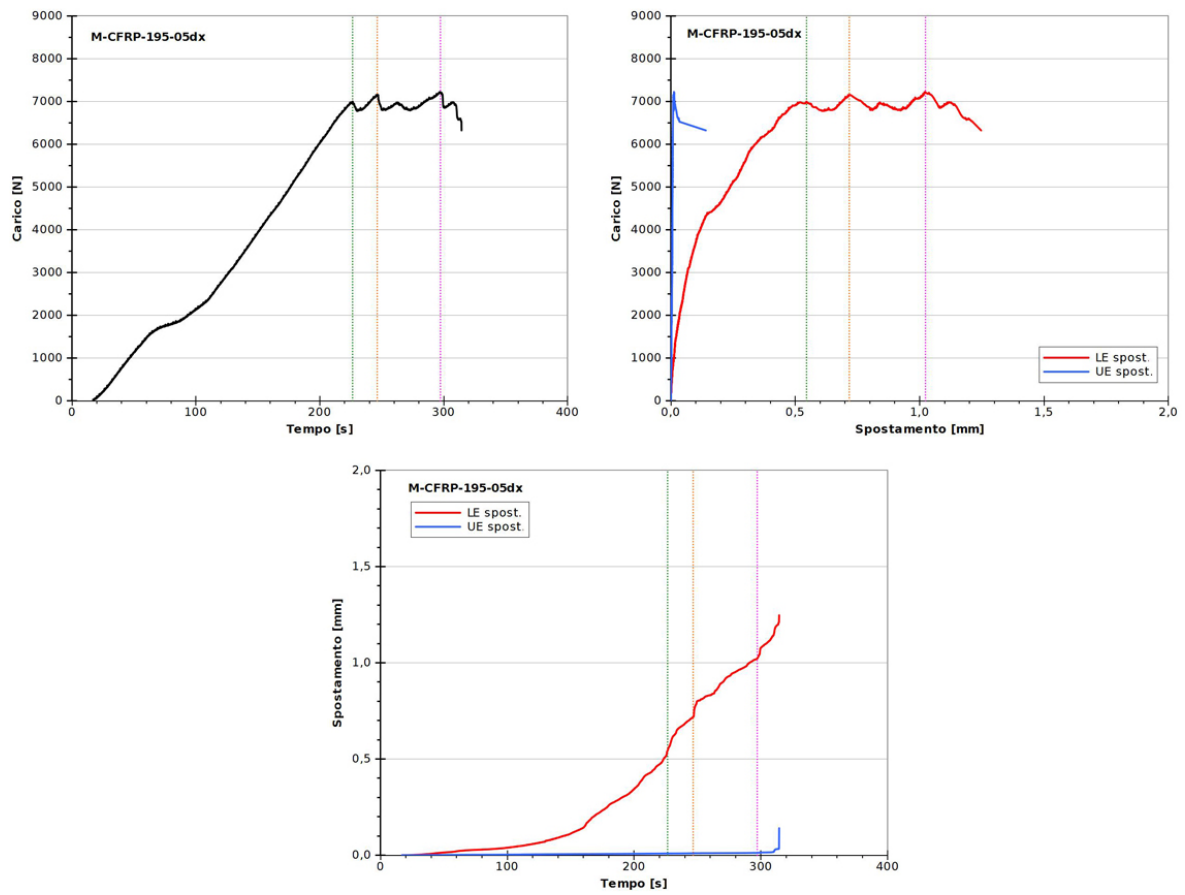


Figura 101: Campione M-CFRP-195-05dx: grafici delle principali grandezze analizzate.

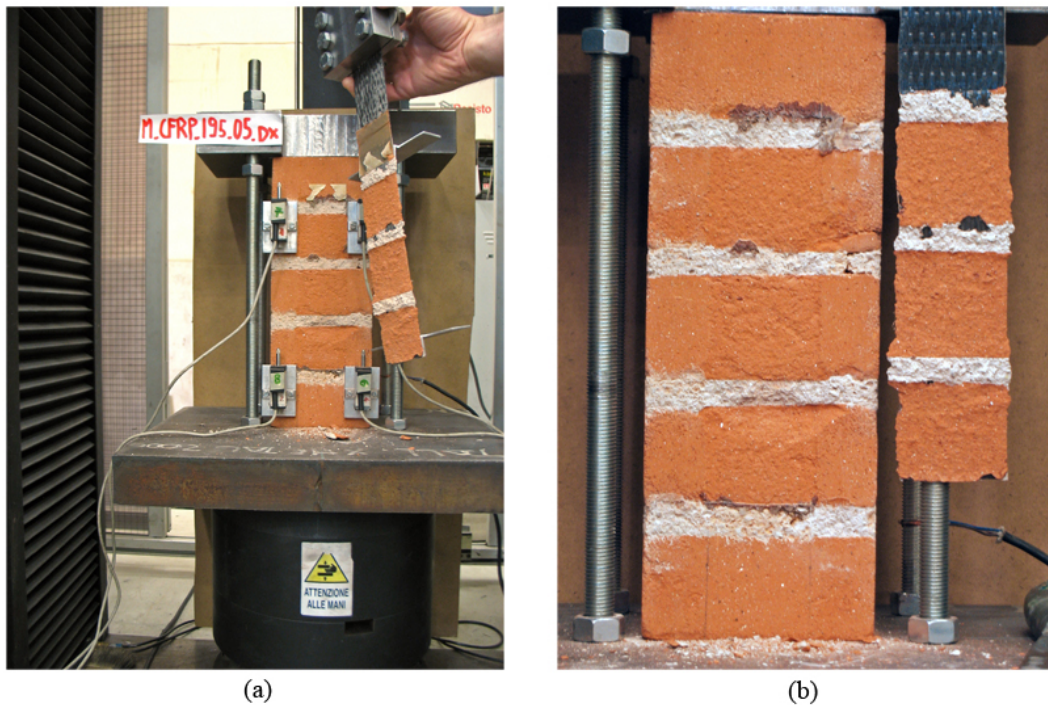


Figura 102: Campione M-CFRP-195-05dx: campione dopo la rottura.

M-CFRP-195-13dx

Tabella 70: Campione M-CFRP-195-13dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	195	241015	220000	2889	3500

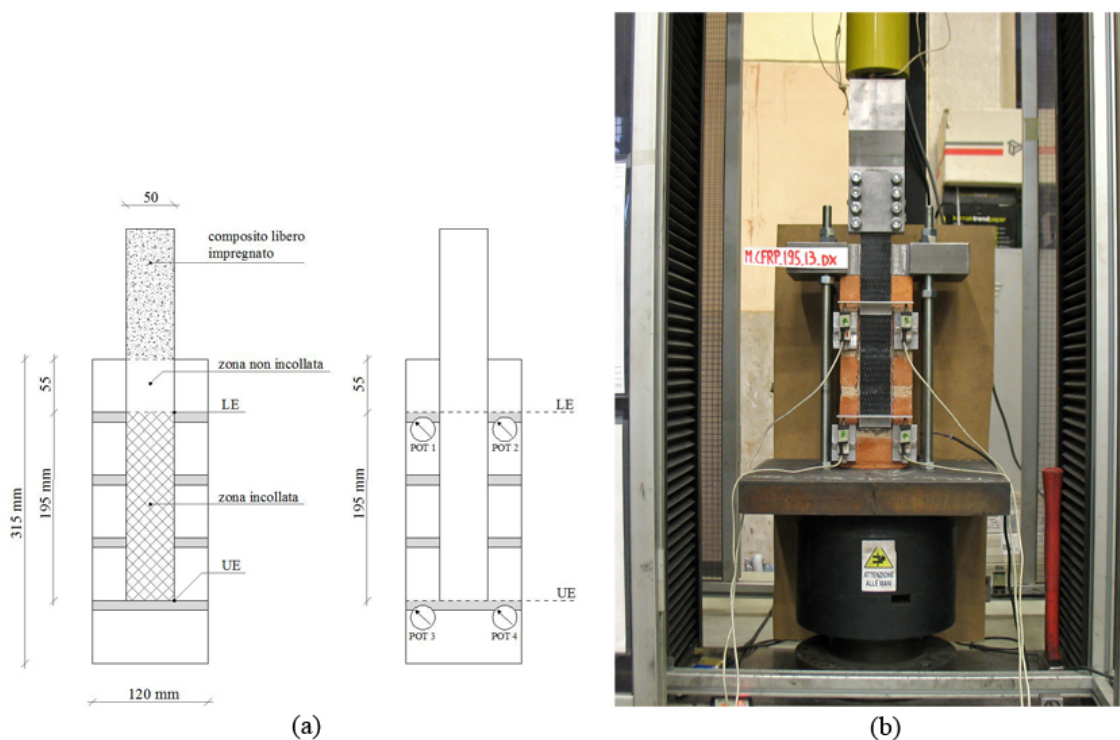


Figura 103: Campione M-CFRP-195-13dx: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 71: Campione M-CFRP-195-13dx: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max}	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	7741	0.313		911	31.5%	26.0%	0.292	0.320
2° picco	6673	0.609		785	27.2%	22.4%	0.217	0.238
3° picco	6629	0.758		780	27.0%	22.3%	0.215	0.235

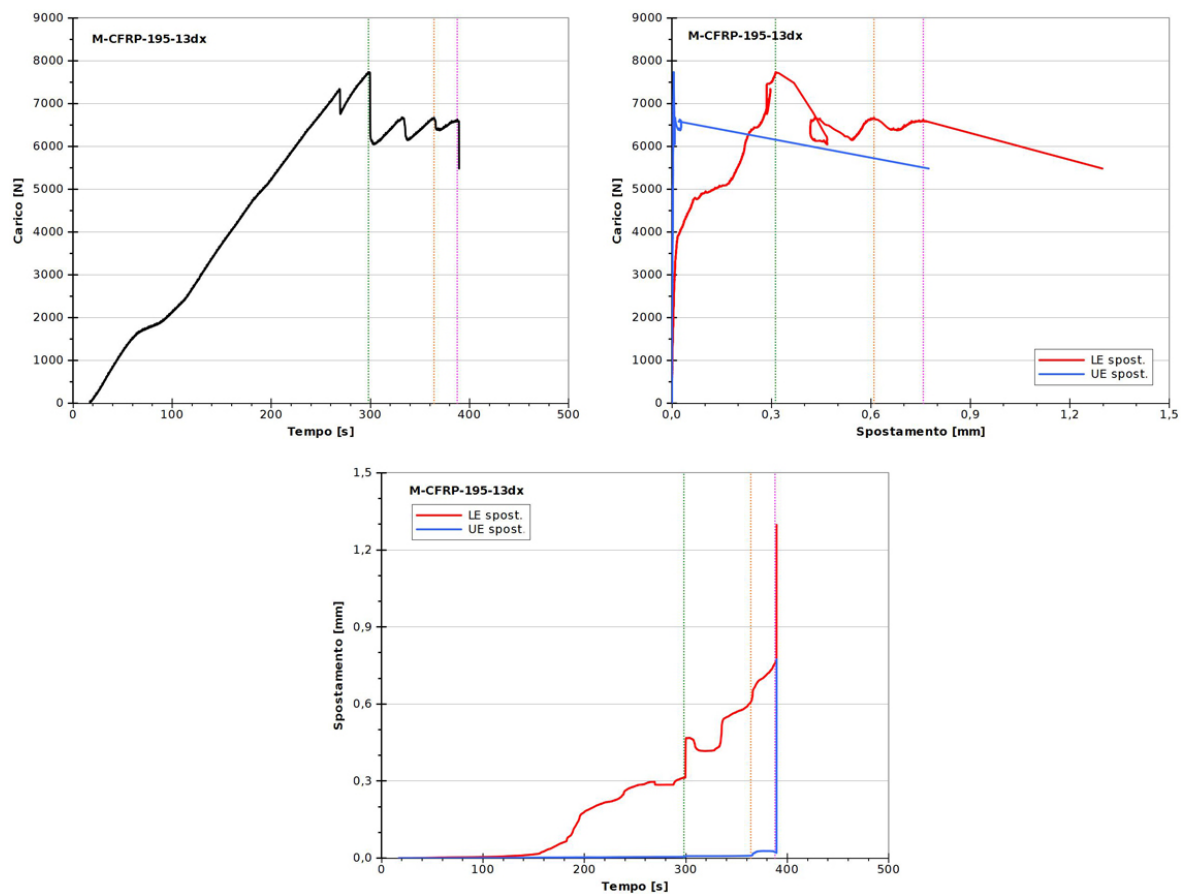


Figura 104: Campione M-CFRP-195-13dx: grafici delle principali grandezze analizzate.

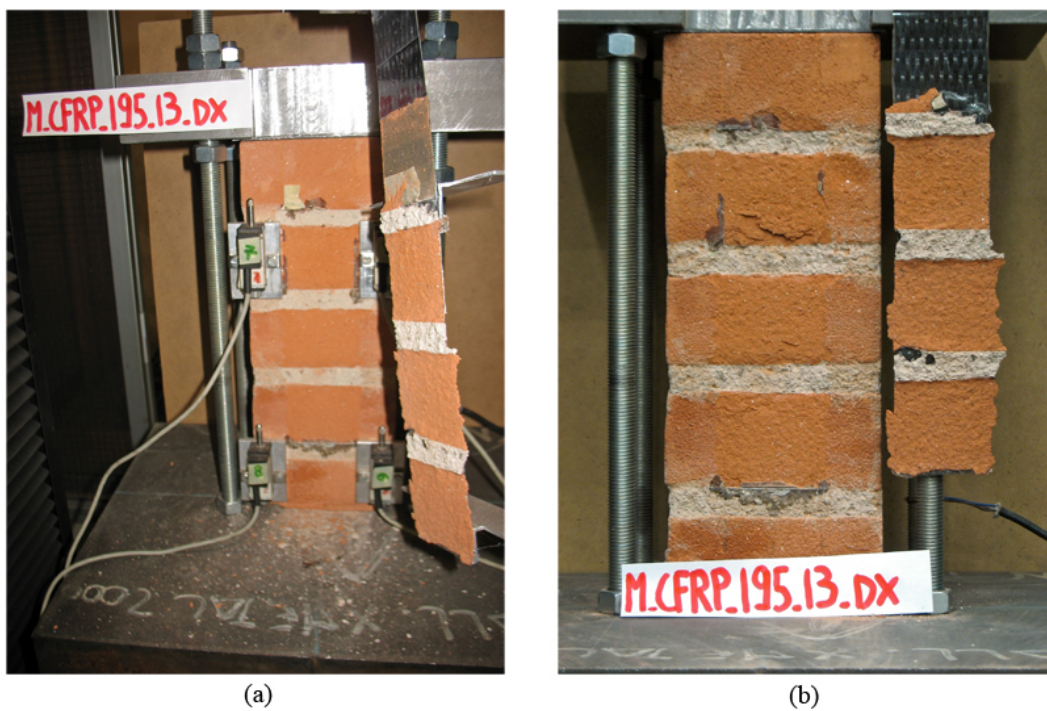


Figura 105: Campione M-CFRP-195-13dx: campione dopo la rottura.

M-CFRP-anc-07r

Tabella 72: Campione M-CFRP-anc-07r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	260	241015	220000	2889	3500

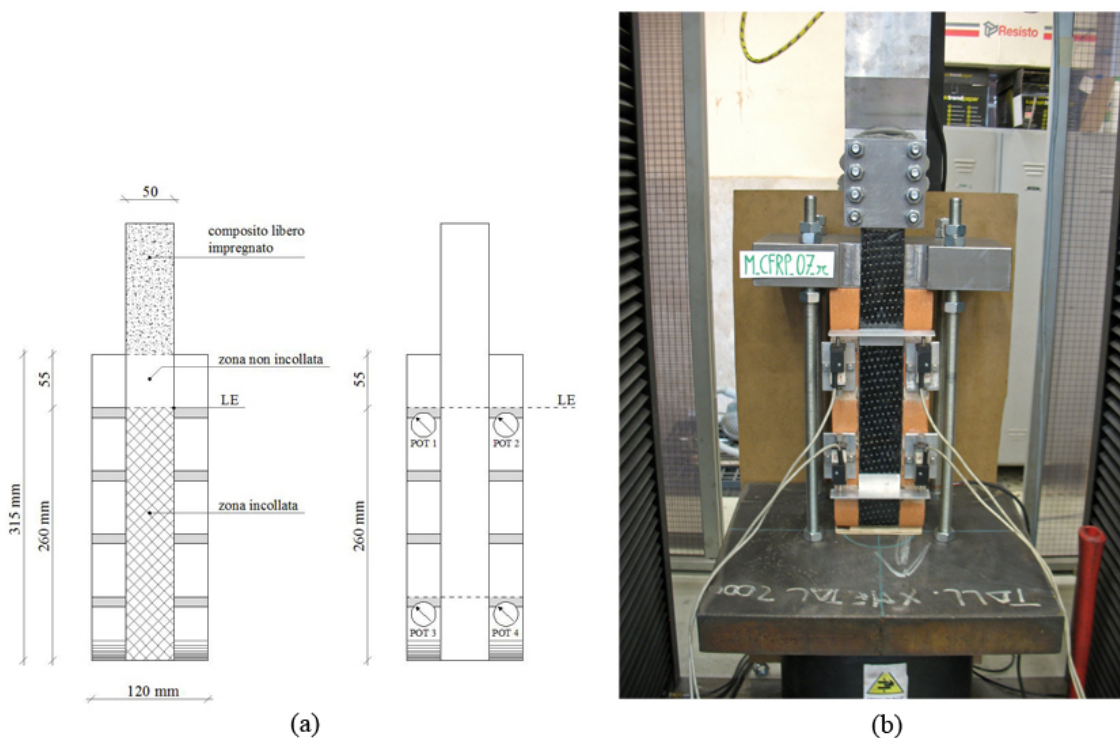


Figura 106: Campione M-CFRP-anc-07r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 73: Campione M-CFRP-anc-07r: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	6318	0.500		743	25.7%	21.2%	0.195	0.213	
2° picco	5501	0.770		647	22.4%	18.5%	0.148	0.162	
3° picco	5161	1.088		607	21.0%	17.3%	0.130	0.142	

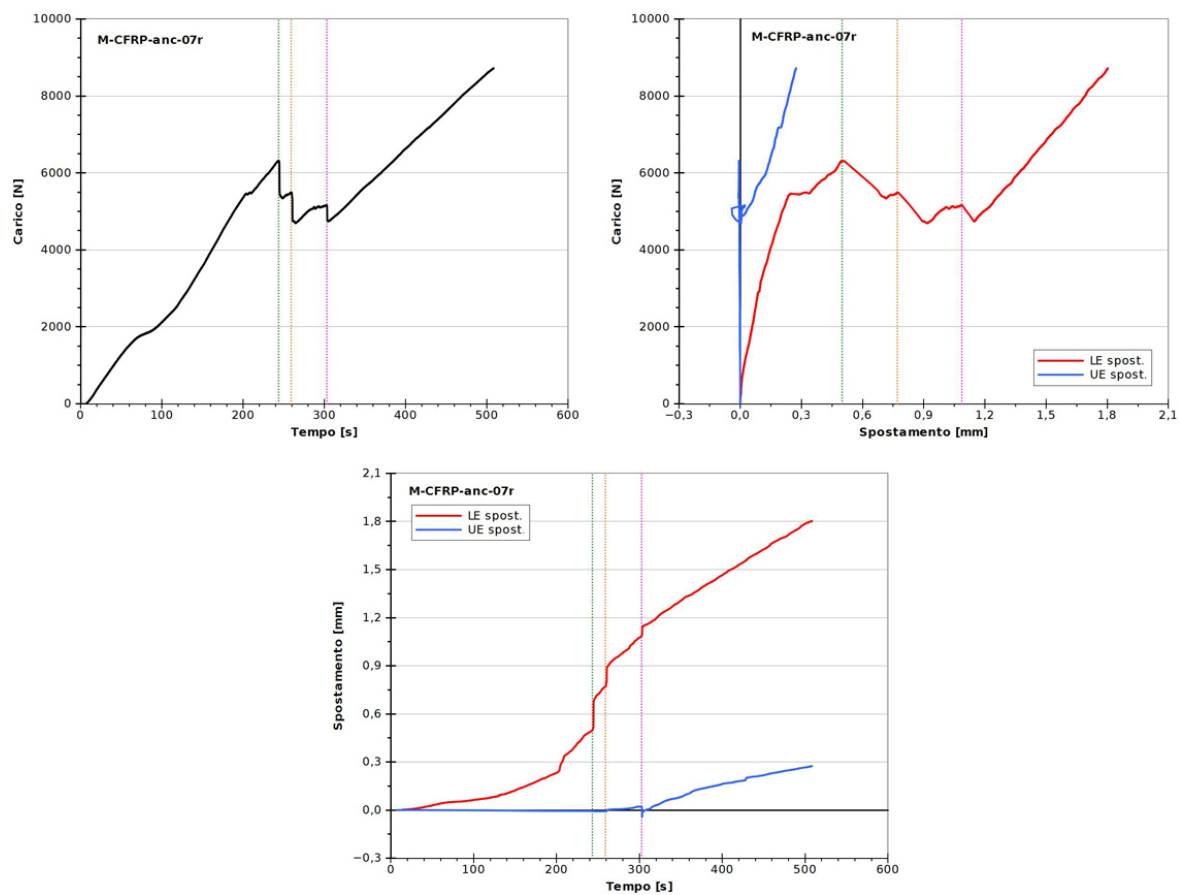


Figura 107: Campione M-CFRP-anc-07r: grafici delle principali grandezze analizzate.

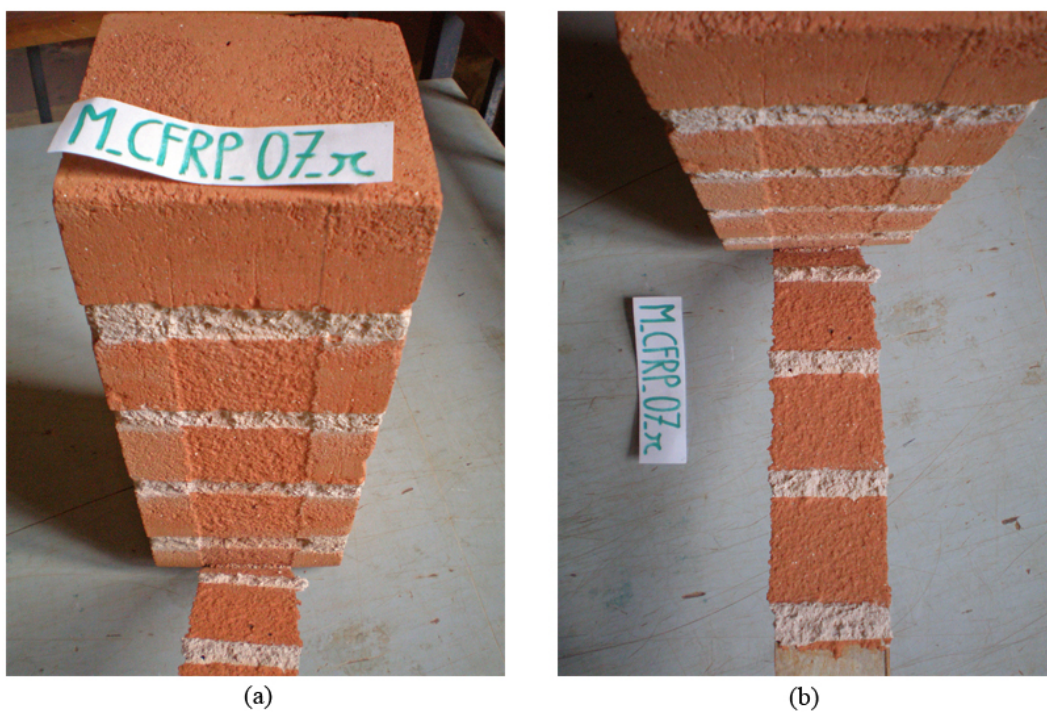


Figura 108: Campione M-CFRP-anc-07r: campione dopo la rottura.

M-CFRP-anc-13f

Tabella 74: Campione M-CFRP-anc-13f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
CFRP	0.170	50	260	241015	220000	2889	3500

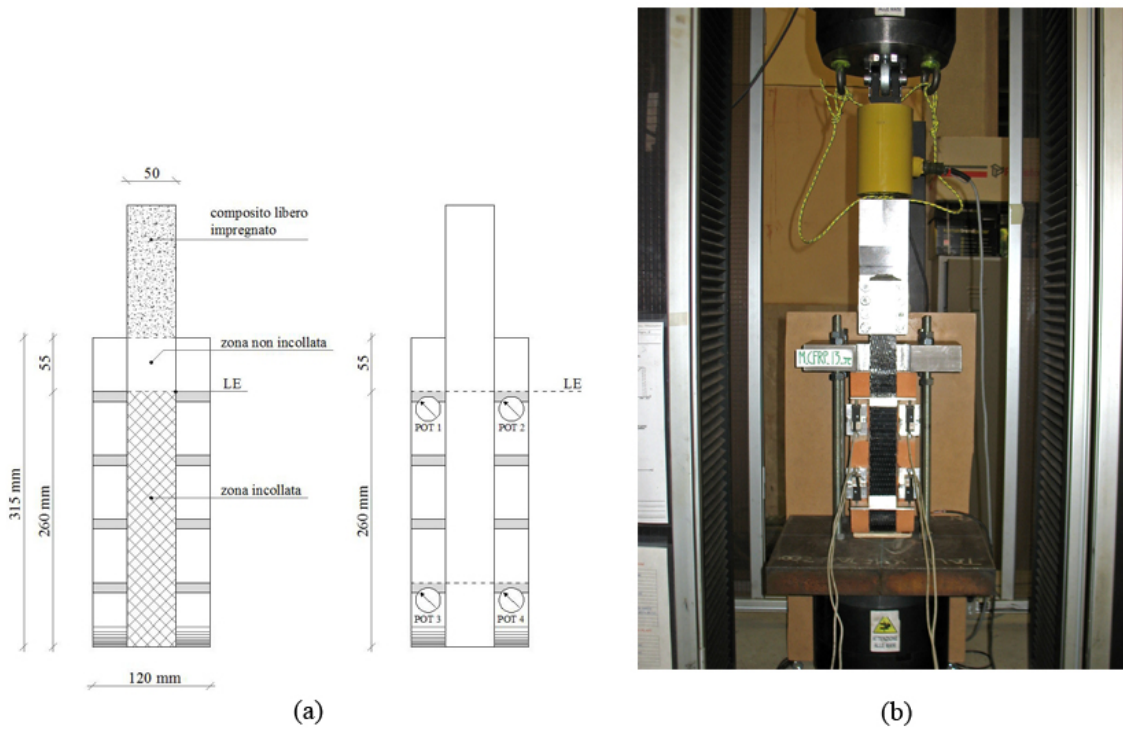


Figura 109: Campione M-CFRP-anc-13f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 75: Campione M-CFRP-anc-13f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	P_{max}	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	6202	0.299		730	25.3%	20.8%	0.188	0.206
2° picco	6706	0.500		789	27.3%	22.5%	0.220	0.240
3° picco	7401	0.849		871	30.1%	24.9%	0.267	0.293

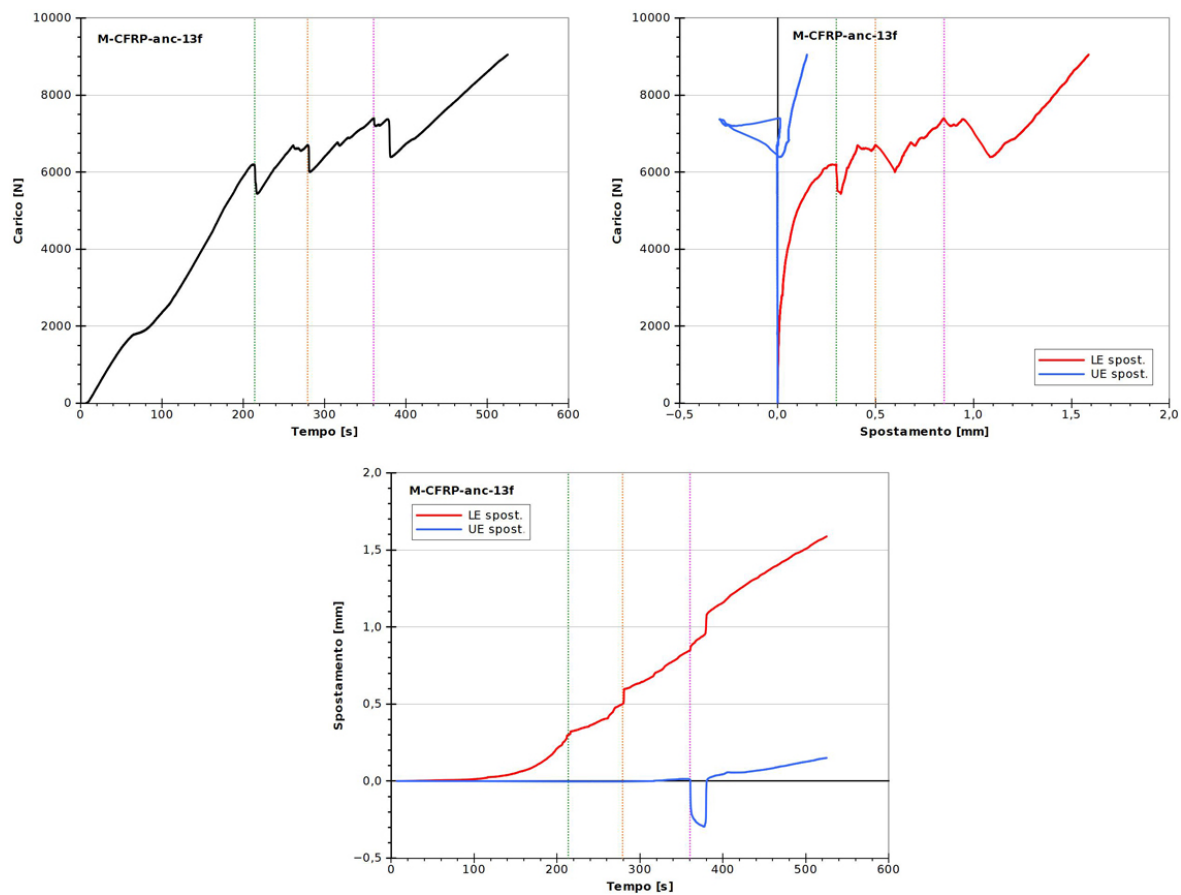


Figura 110: Campione M-CFRP-anc-13f: grafici delle principali grandezze analizzate.

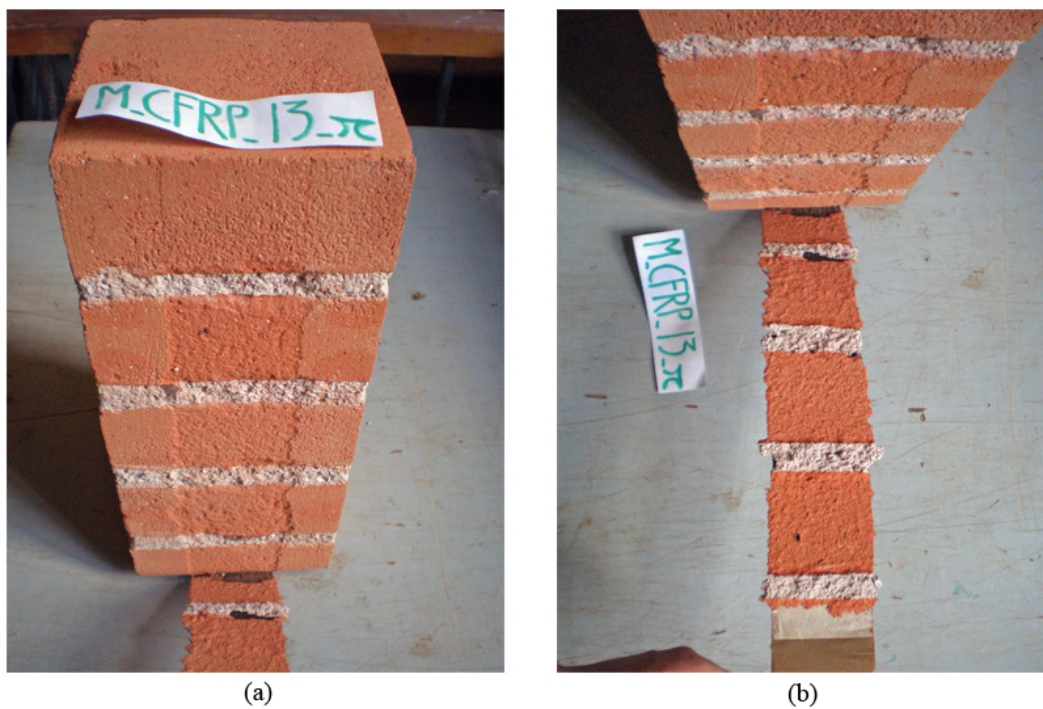


Figura 111: Campione M-CFRP-anc-13f: campione dopo la rottura.

M-BFRP-195-01sx

Tabella 76: Campione M-BFRP-195-01sx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	195	86832	80000	1812	1700

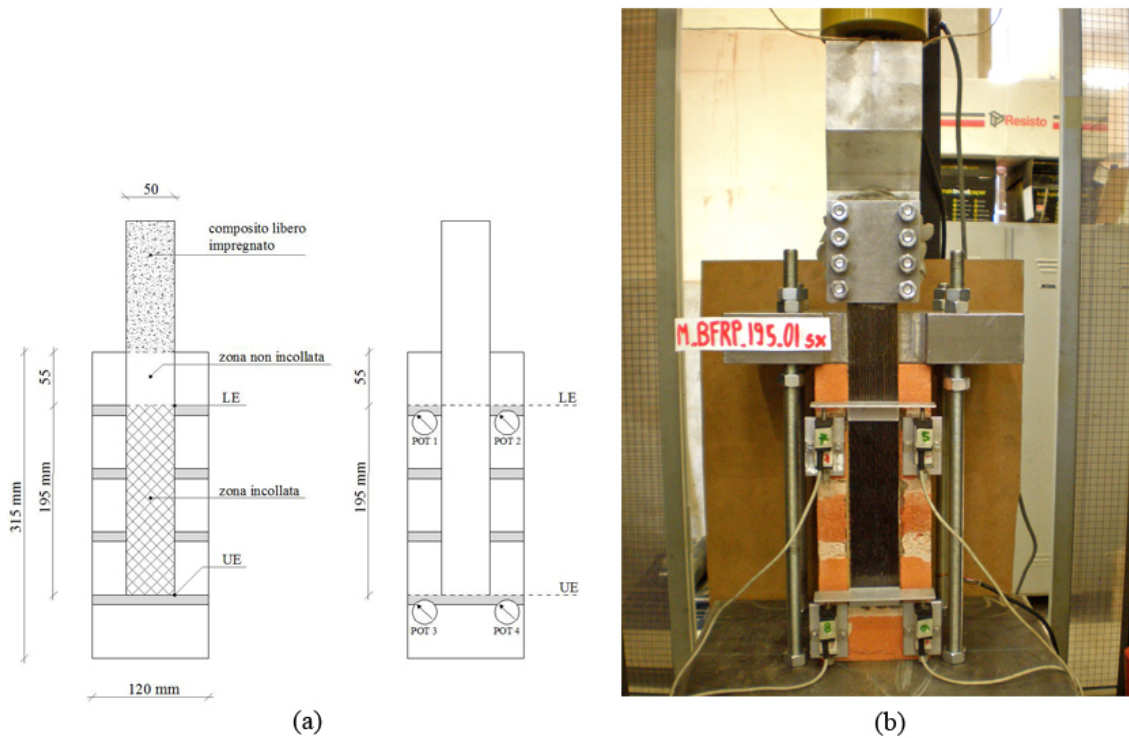


Figura 112: Campione M-BFRP-195-01sx: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 77: Campione M-BFRP-195-01sx: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	5752	0.324		822	45.3%	48.3%	0.544	0.591	
2° picco	4361	0.965		623	34.4%	36.6%	0.313	0.340	
3° picco	4002	1.120		572	31.5%	33.6%	0.263	0.286	

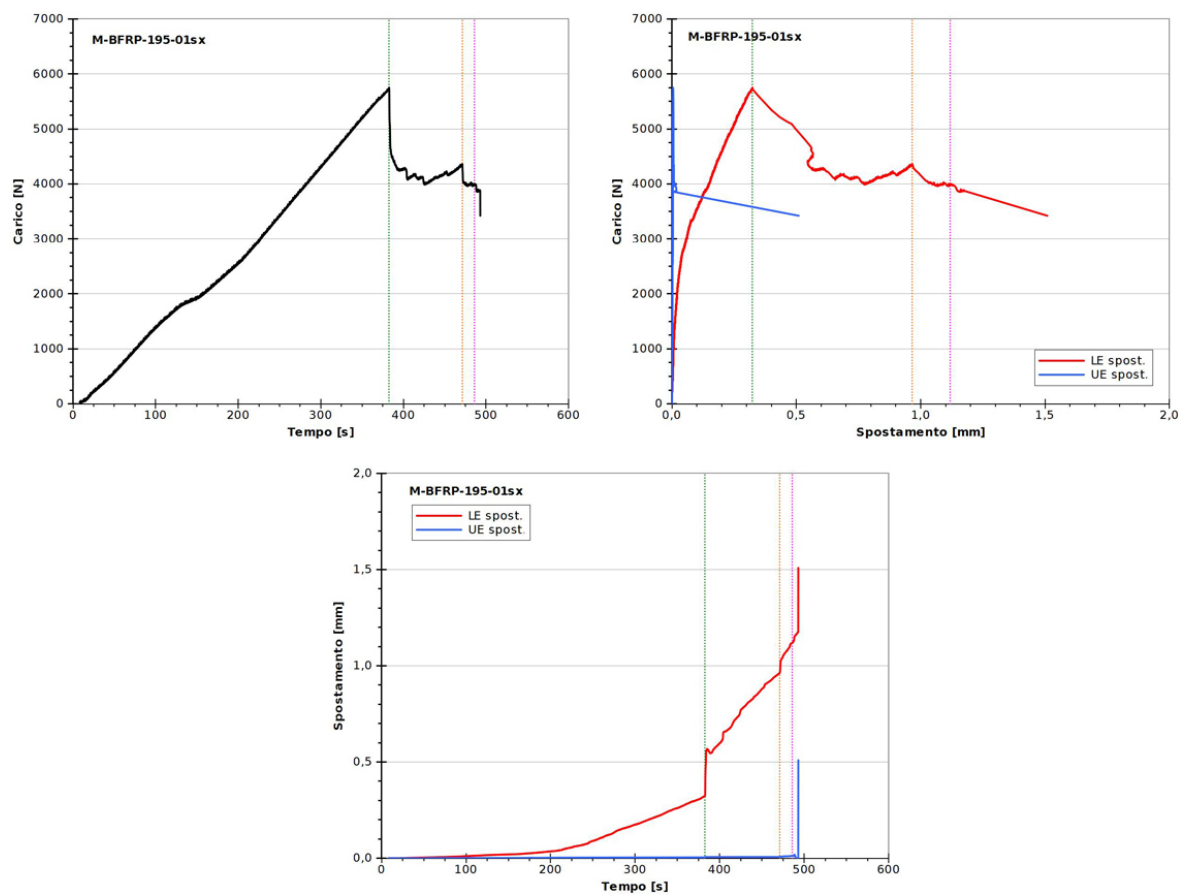


Figura 113: Campione M-BFRP-195-01sx: grafici delle principali grandezze analizzate.

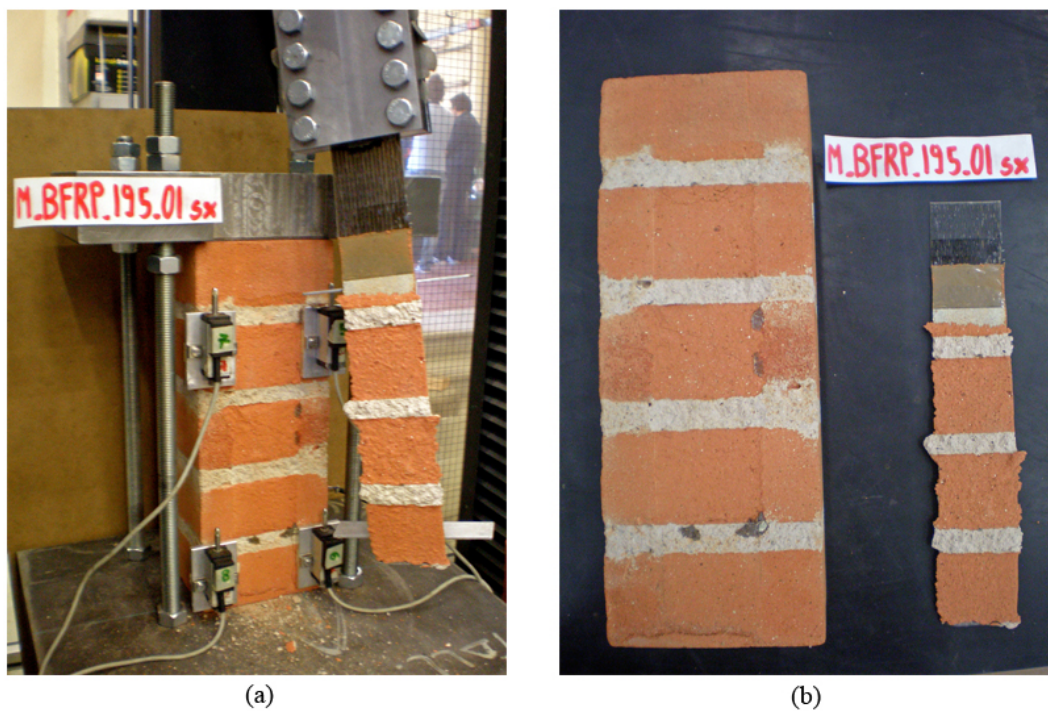


Figura 114: Campione M-BFRP-195-01sx: campione dopo la rottura.

M-BFRP-195-03dx

Tabella 78: Campione M-BFRP-195-03dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	195	86832	80000	1812	1700

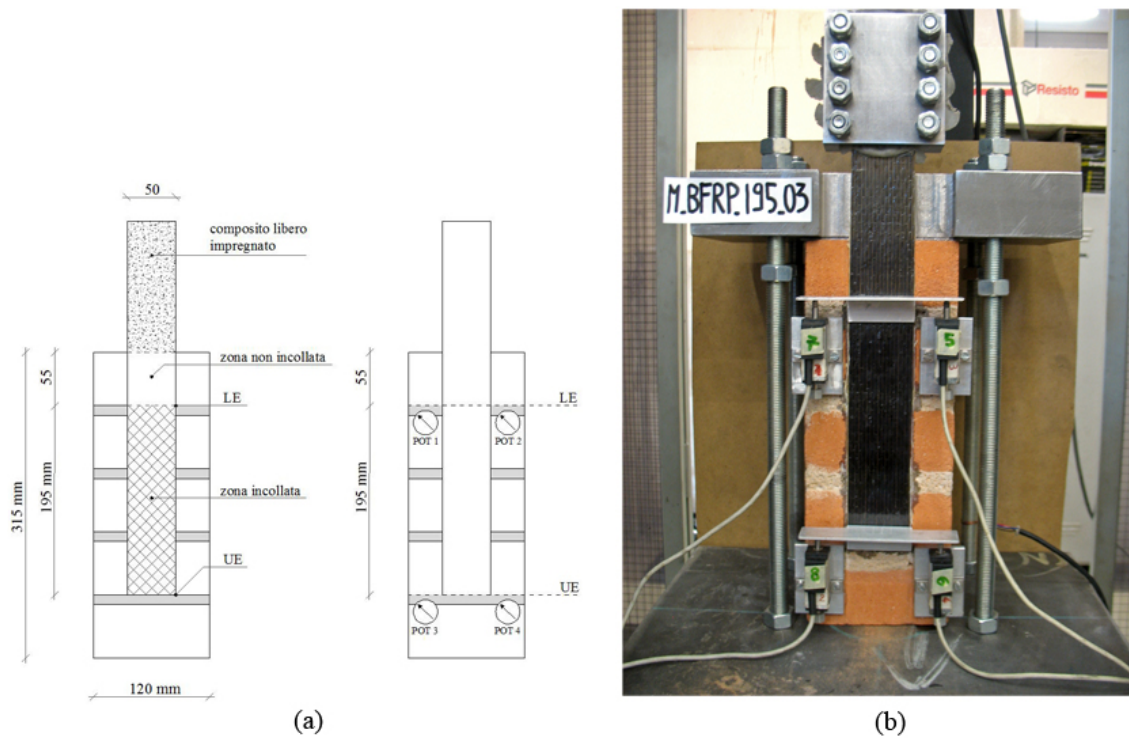


Figura 115: Campione M-BFRP-195-03dx: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 79: Campione M-BFRP-195-03dx: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4937	0.428		705	38.9%	41.5%	0.401	0.435	
2° picco	5027	1.329		718	39.6%	42.2%	0.416	0.451	
3° picco	4935	1.751		705	38.9%	41.5%	0.401	0.435	

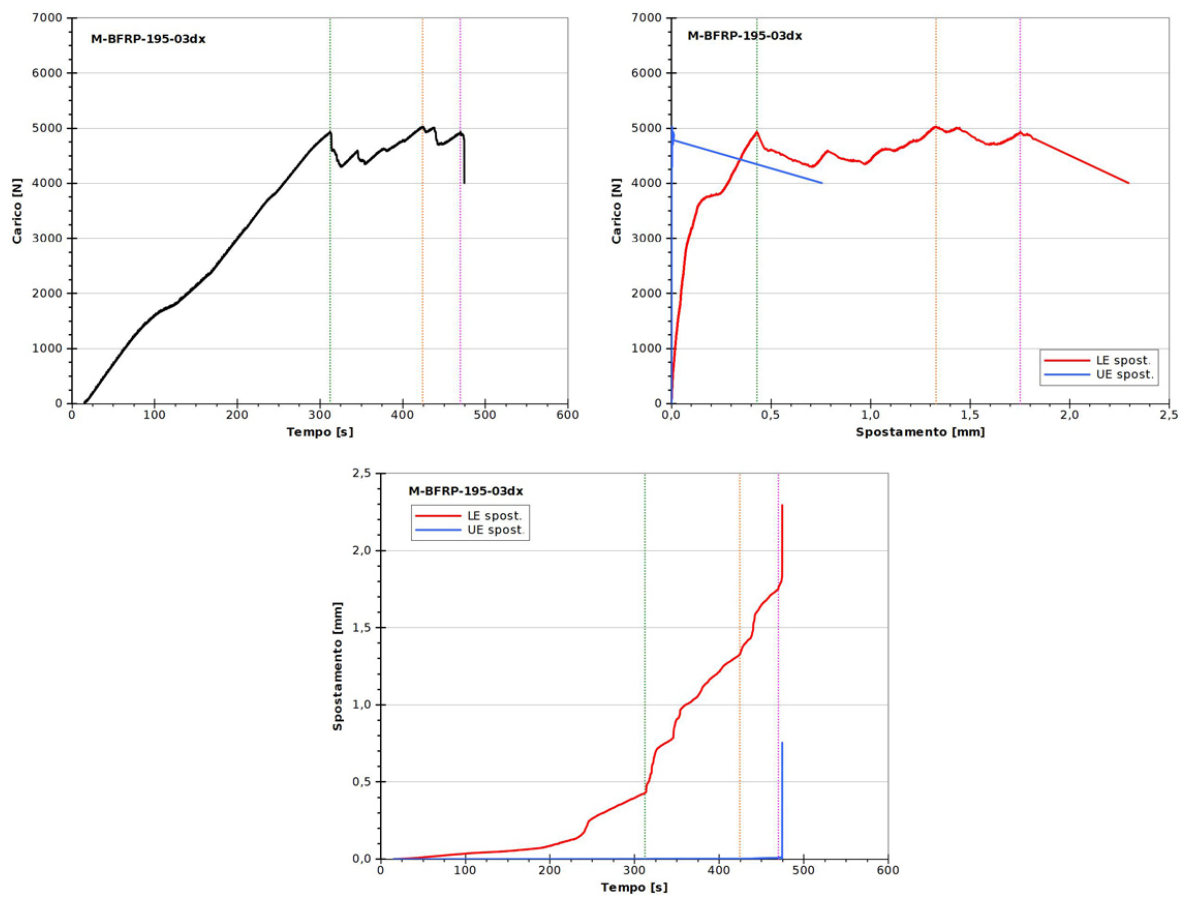


Figura 116: Campione M-BFRP-195-03dx: grafici delle principali grandezze analizzate.

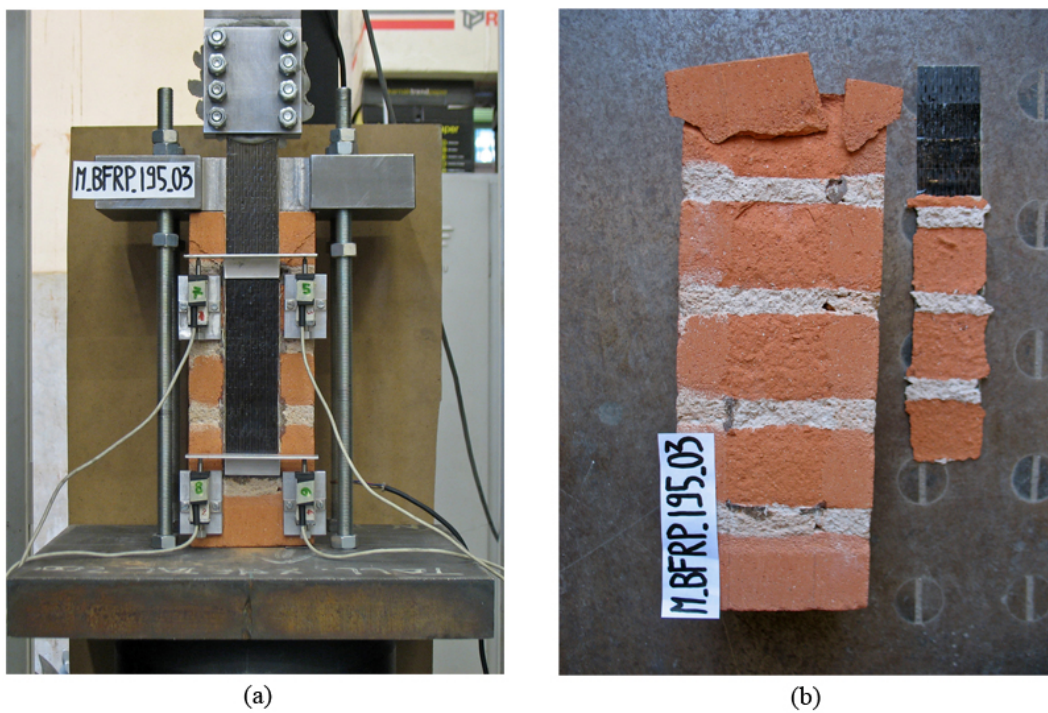


Figura 117: Campione M-BFRP-195-03dx: campione dopo la rottura.

M-BFRP-195-06sx

Tabella 80: Campione M-BFRP-195-06sx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	195	86832	80000	1812	1700

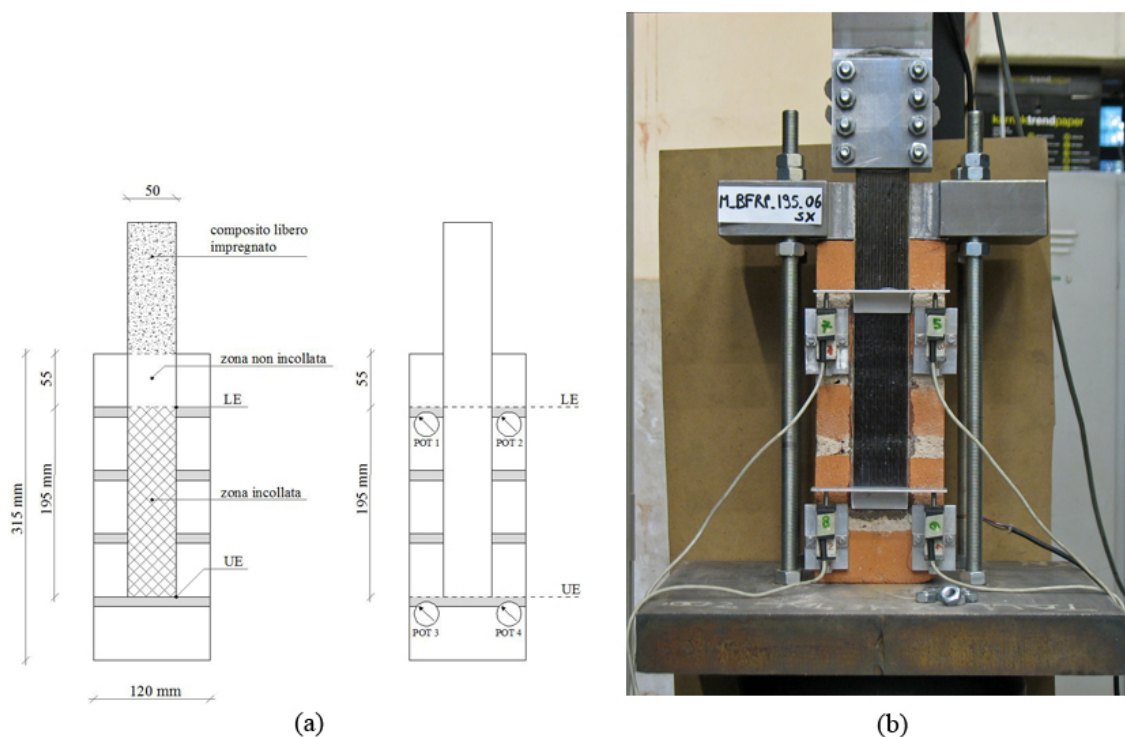


Figura 118: Campione M-BFRP-195-06sx: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 81: Campione M-BFRP-195-06sx: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	5493	0.264	785	43.3%	46.2%	0.496	0.539
2° picco	4859	0.973	694	38.3%	40.8%	0.388	0.422
3° picco	4929	1.507	704	38.9%	41.4%	0.400	0.434

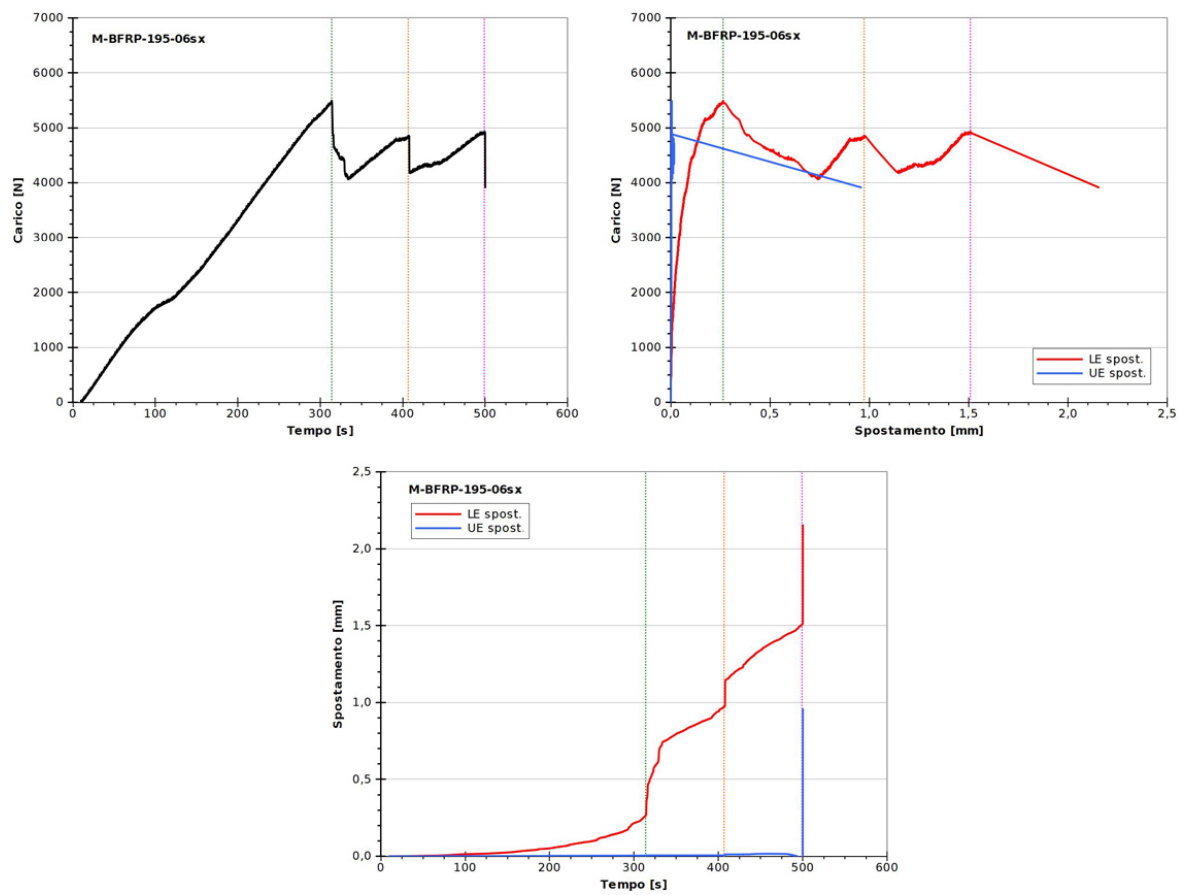


Figura 119: Campione M-BFRP-195-06sx: grafici delle principali grandezze analizzate.

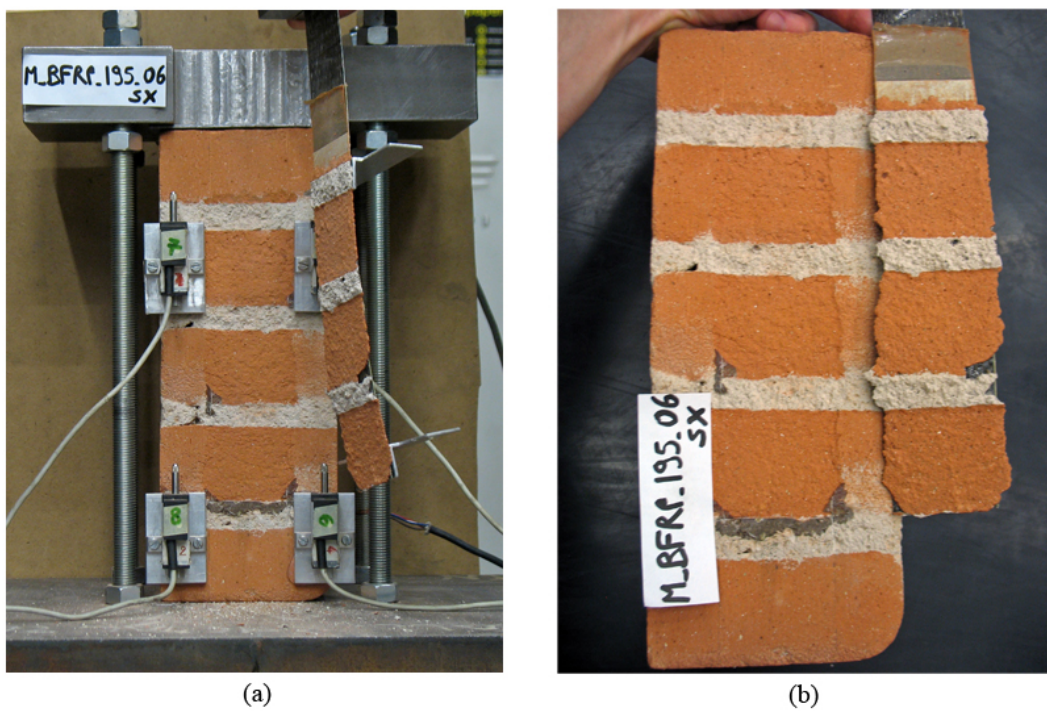


Figura 120: Campione M-BFRP-195-06sx: campione dopo la rottura.

M-BFRP-anc-07f

Tabella 82: Campione M-BFRP-anc-07f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	260	86832	80000	1812	1700

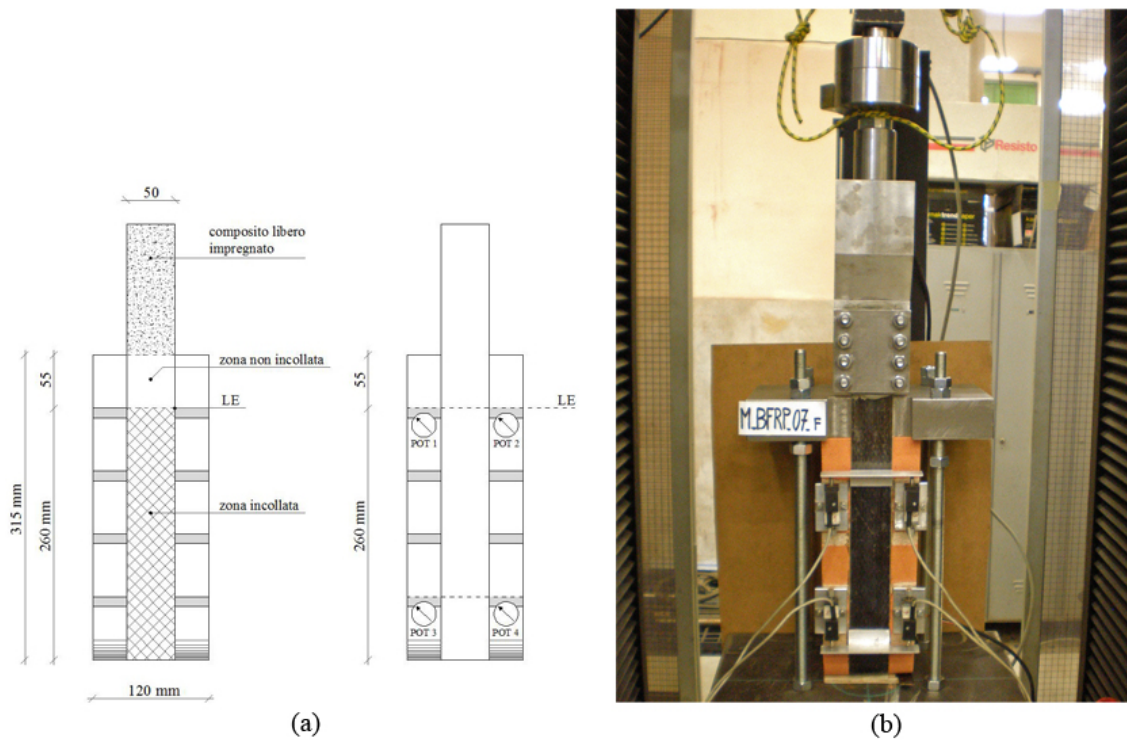


Figura 121: Campione M-BFRP-anc-07f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 83: Campione M-BFRP-anc-07f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4923	0.062		703	38.8%	41.4%	0.399	0.433	
2° picco	4570	0.285		653	36.0%	38.4%	0.344	0.373	
3° picco	4390	0.441		627	34.6%	36.9%	0.317	0.344	
4° picco	4782	0.731		683	37.7%	40.2%	0.376	0.408	

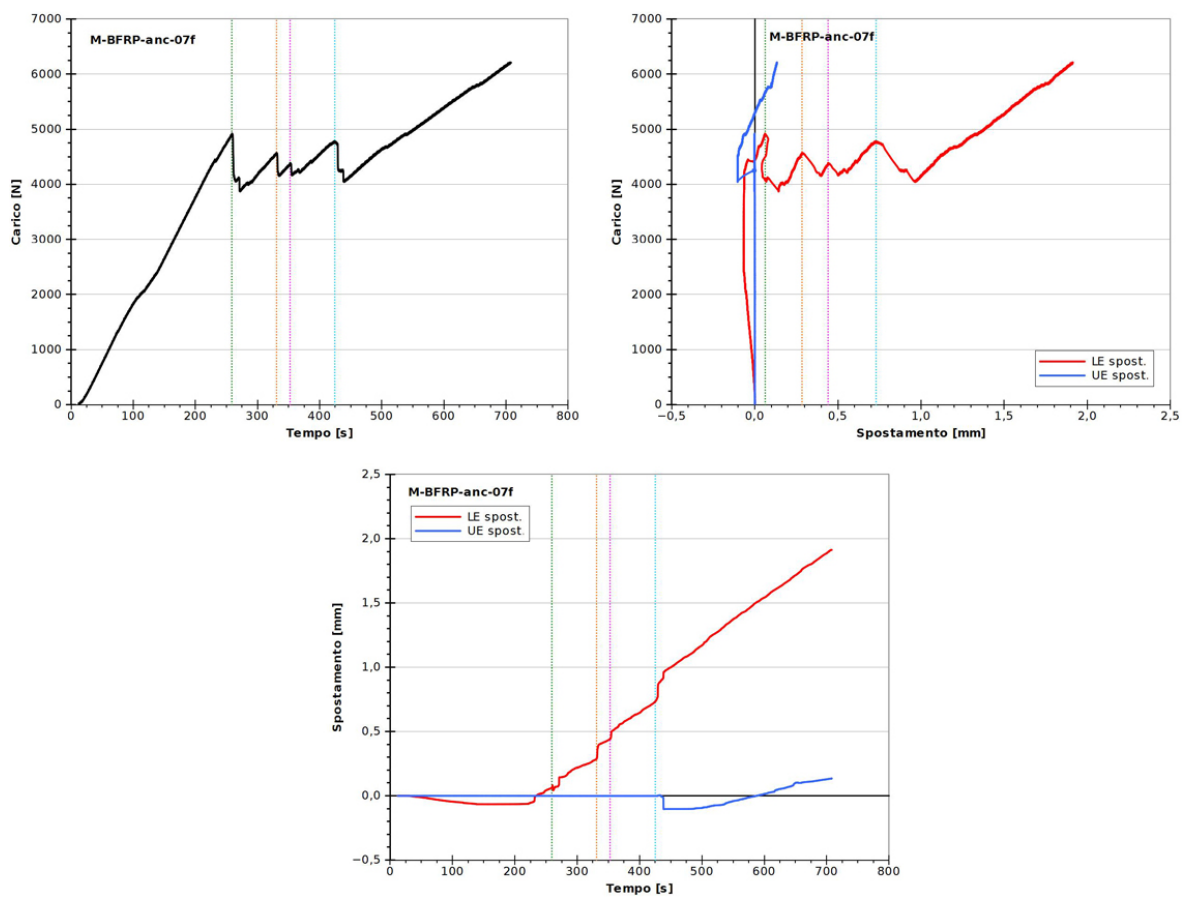


Figura 122: Campione M-BFRP-anc-07f: grafici delle principali grandezze analizzate.

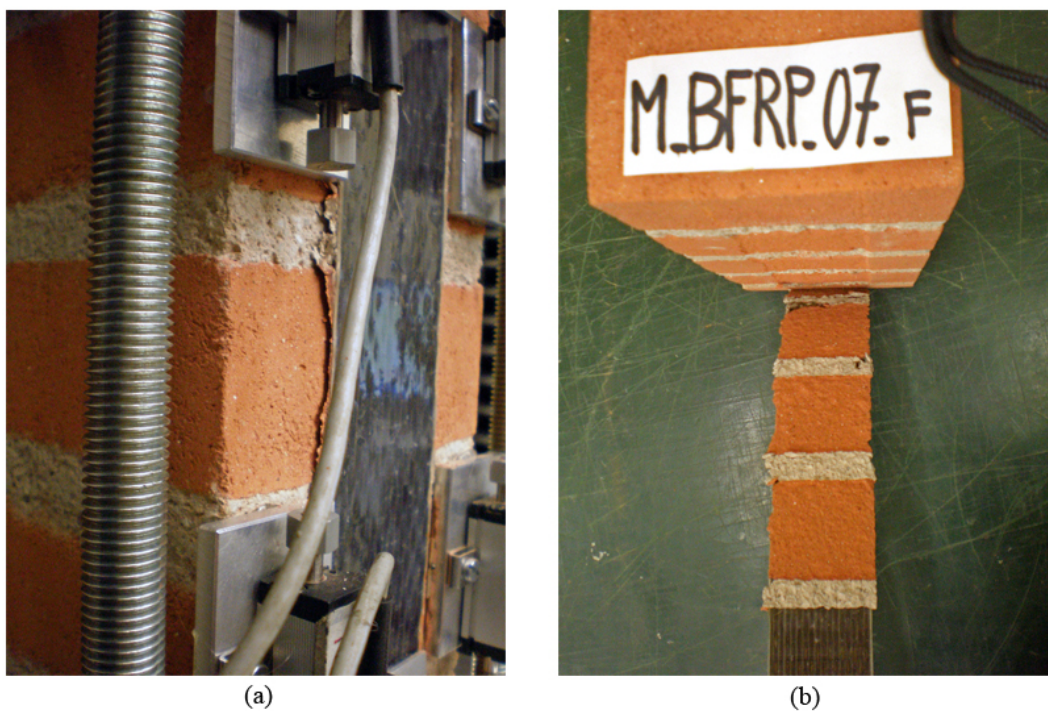


Figura 123: Campione M-BFRP-anc-07f: campione dopo la rottura.

M-BFRP-anc-08f

Tabella 84: Campione M-BFRP-anc-08f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
BFRP	0.140	50	260	86832	80000	1812	1700

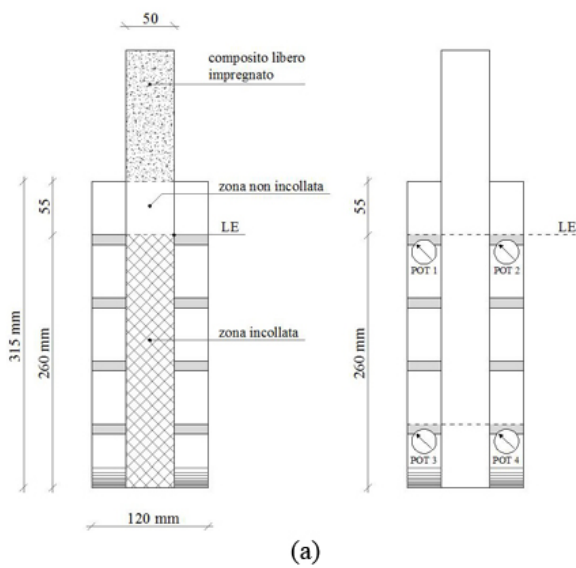


Figura 124: Campione M-BFRP-anc-08f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 85: Campione M-BFRP-anc-08f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	4830	0.291		690	38.1%	40.6%	0.384	0.417	
2° picco	4555	0.802		651	35.9%	38.3%	0.341	0.371	
3° picco	5226	1.523		747	41.2%	43.9%	0.449	0.488	

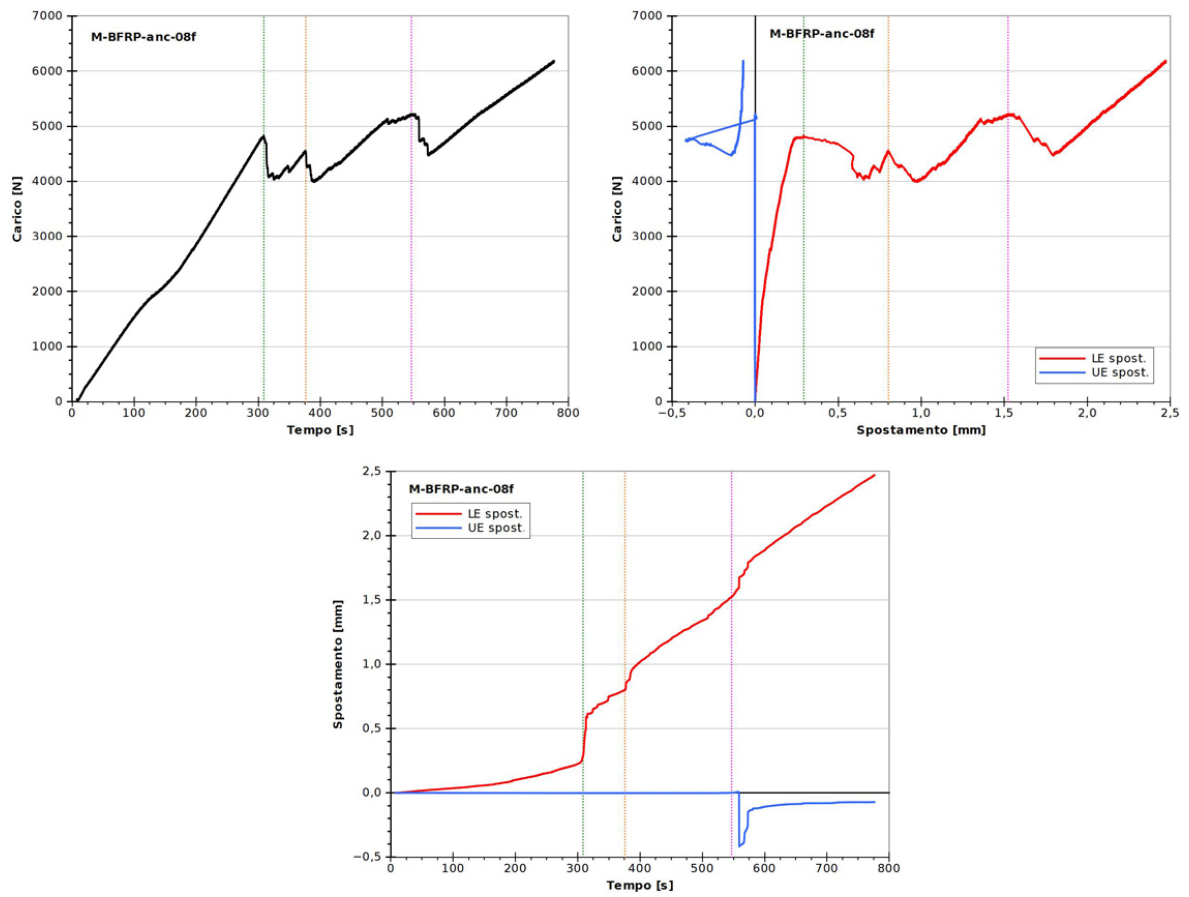


Figura 125: Campione M-BFRP-anc-08f: grafici delle principali grandezze analizzate.

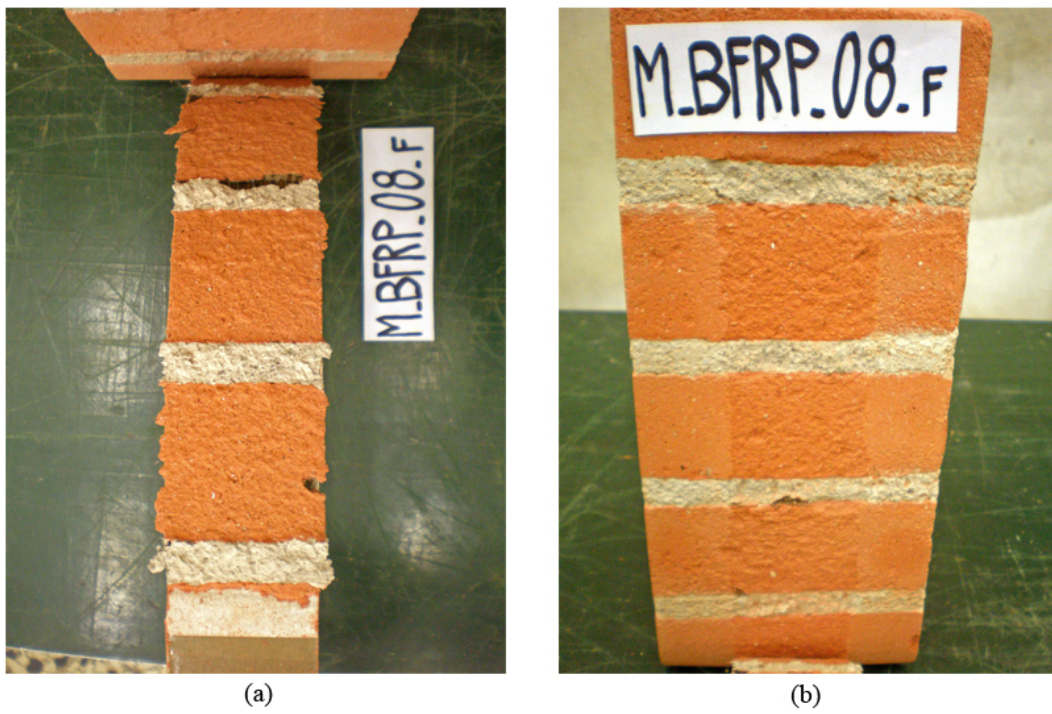


Figura 126: Campione M-BFRP-anc-08f: campione dopo la rottura.

M-SRP-195-08dx

Tabella 86: Campione M-SRP-195-08dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	195	200020	190000	3050	3070

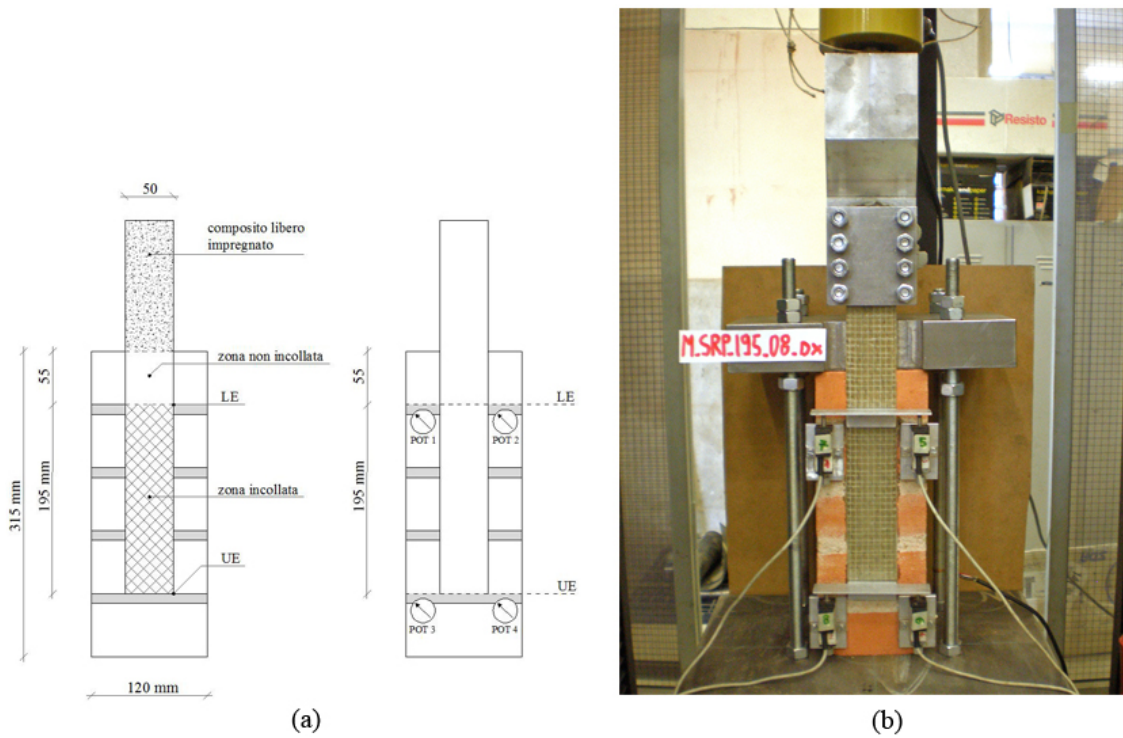


Figura 127: Campione M-SRP-195-08dx: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 87: Campione M-SRP-195-08dx: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	8167	0.316		720	23.6%	23.4%	0.294	0.309	
2° picco	7021	0.504		619	20.3%	20.1%	0.217	0.229	
3° picco	6676	0.700		588	19.3%	19.2%	0.196	0.207	

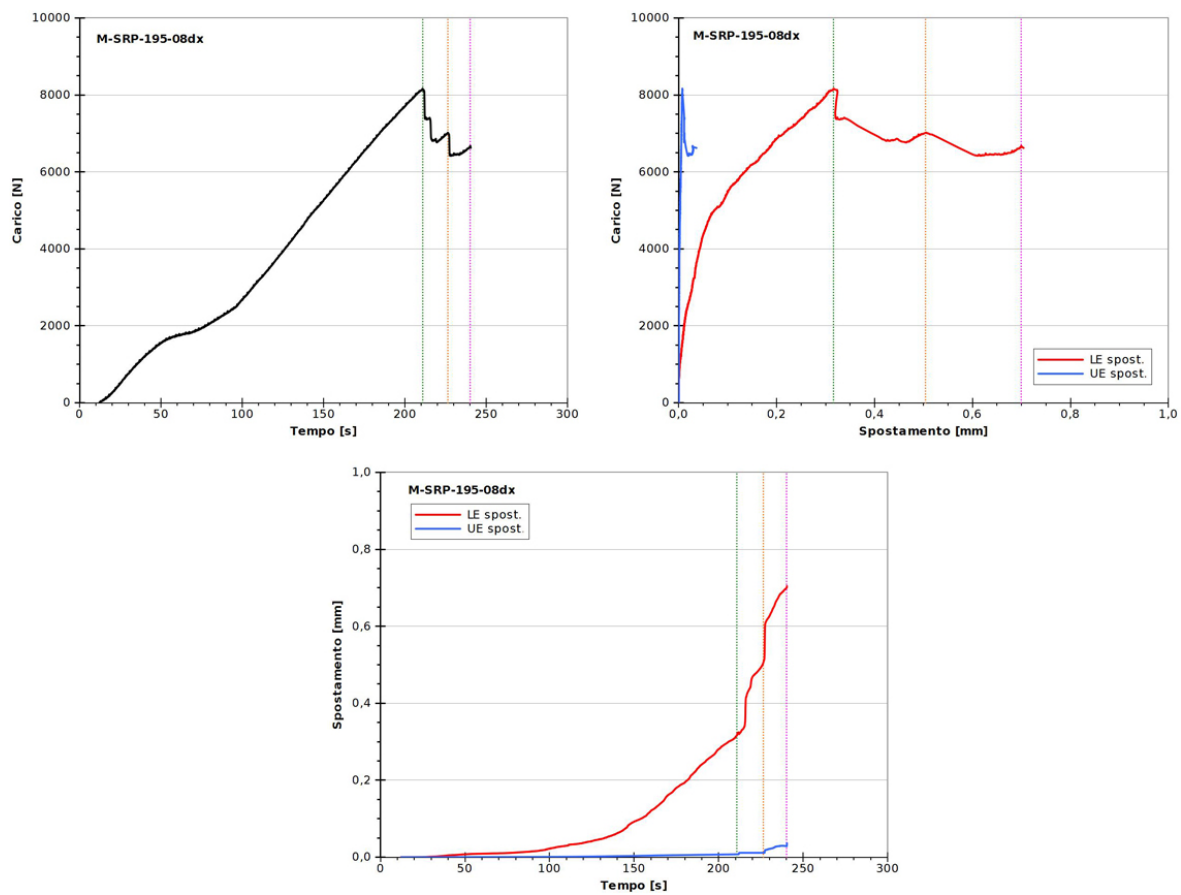


Figura 128: Campione M-SRP-195-08dx: grafici delle principali grandezze analizzate.

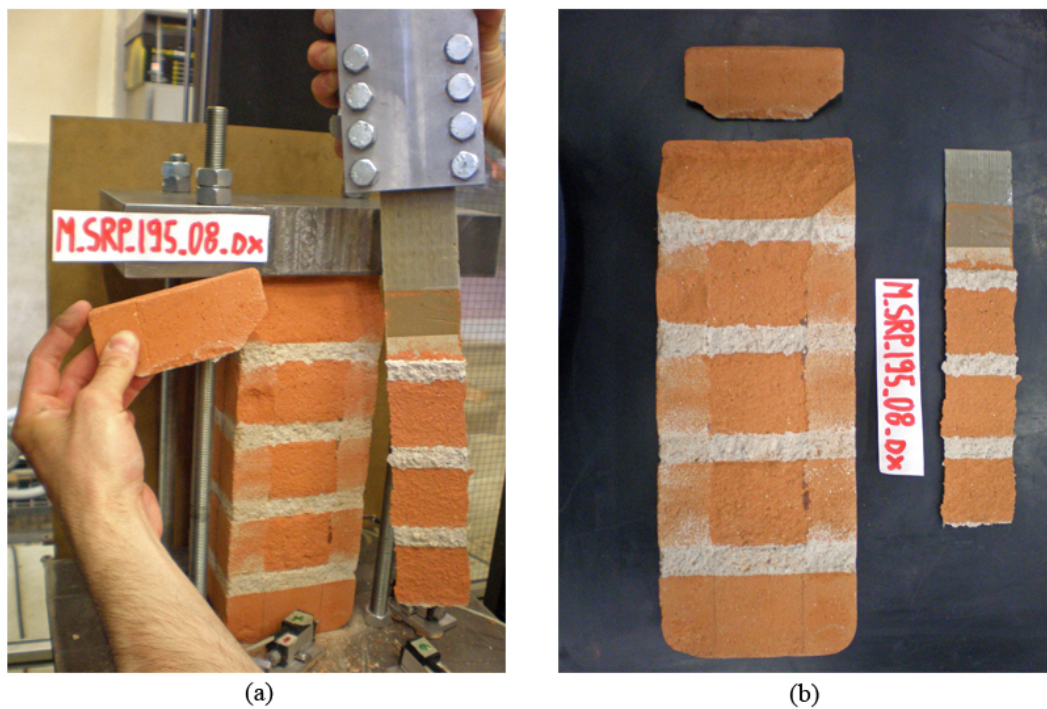


Figura 129: Campione M-SRP-195-08dx: campione dopo la rottura.

M-SRP-195-10r

Tabella 88: Campione M-SRP-195-10r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	195	200020	190000	3050	3070

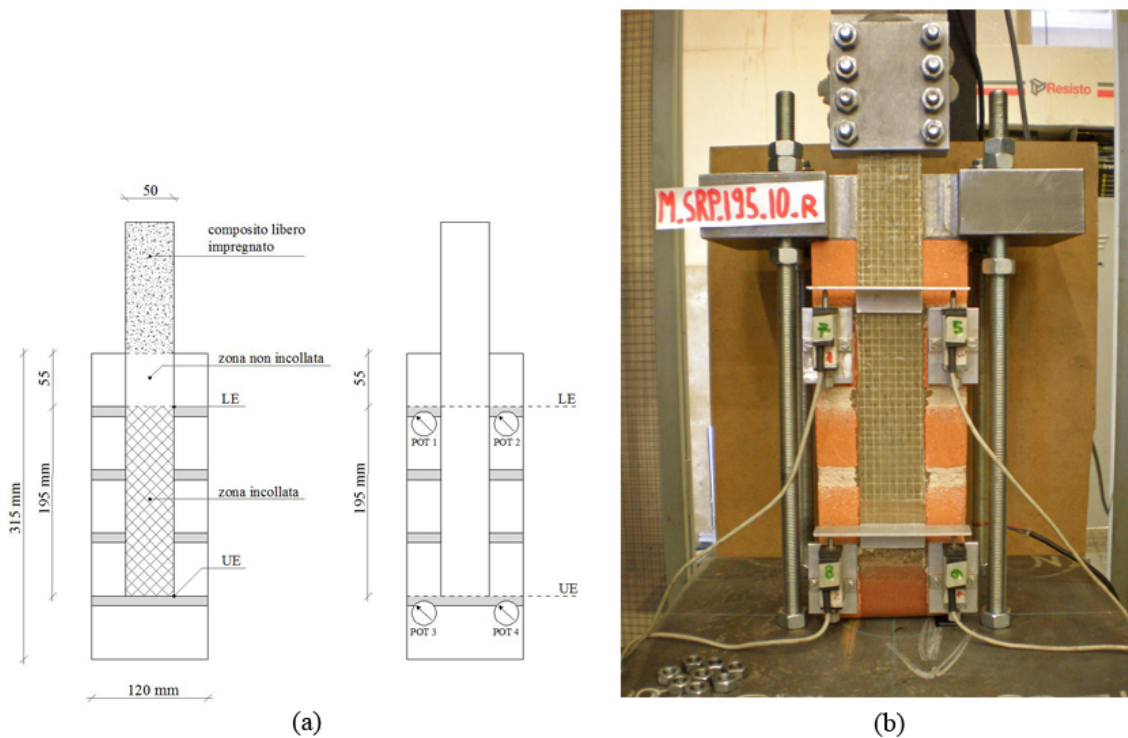


Figura 130: Campione M-SRP-195-10r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 89: Campione M-SRP-195-10r: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	6546	0.220		577	18.9%	18.8%	0.189	0.199	
2° picco	6311	0.439		556	18.2%	18.1%	0.175	0.185	
3° picco	6233	0.675		549	18.0%	17.9%	0.171	0.180	

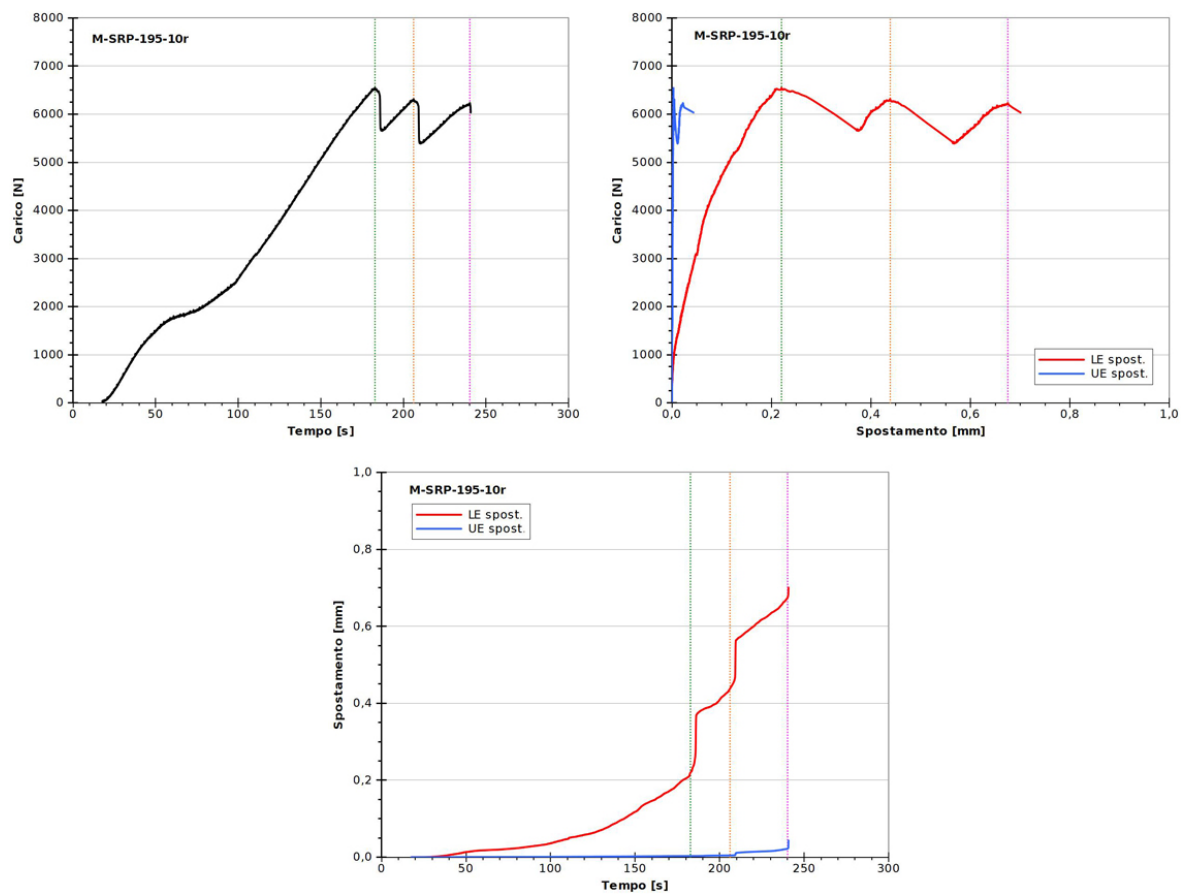


Figura 131: Campione M-SRP-195-10r: grafici delle principali grandezze analizzate.

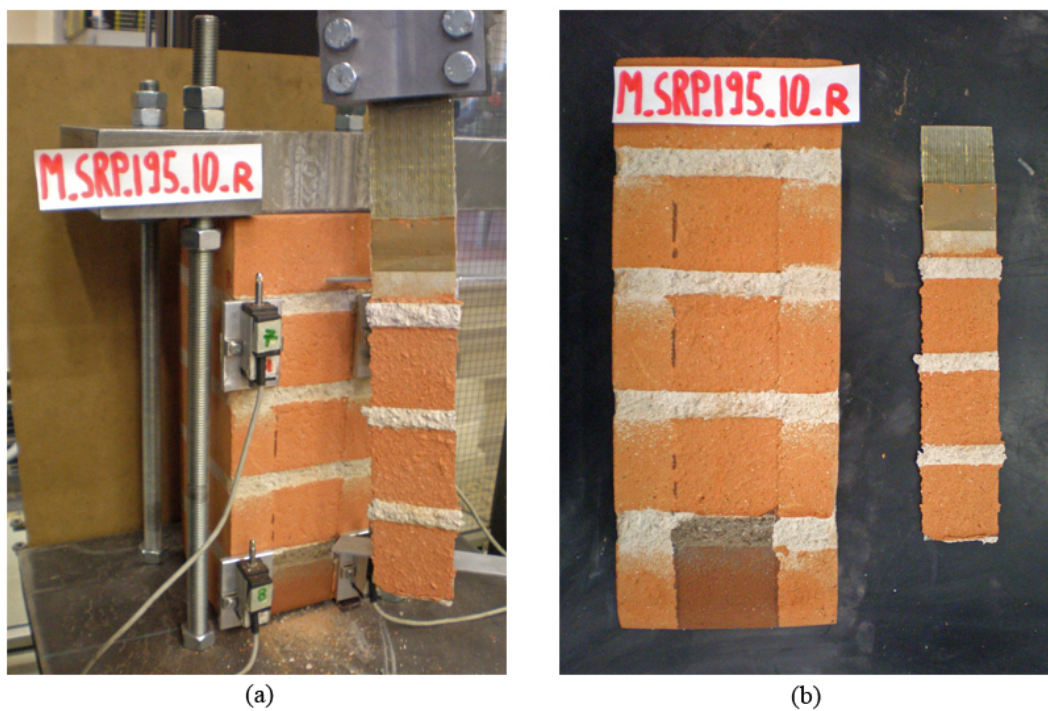


Figura 132: Campione M-SRP-195-10r: campione dopo la rottura.

M-SRP-195-14f

Tabella 90: Campione M-SRP-195-14f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	195	200020	190000	3050	3070

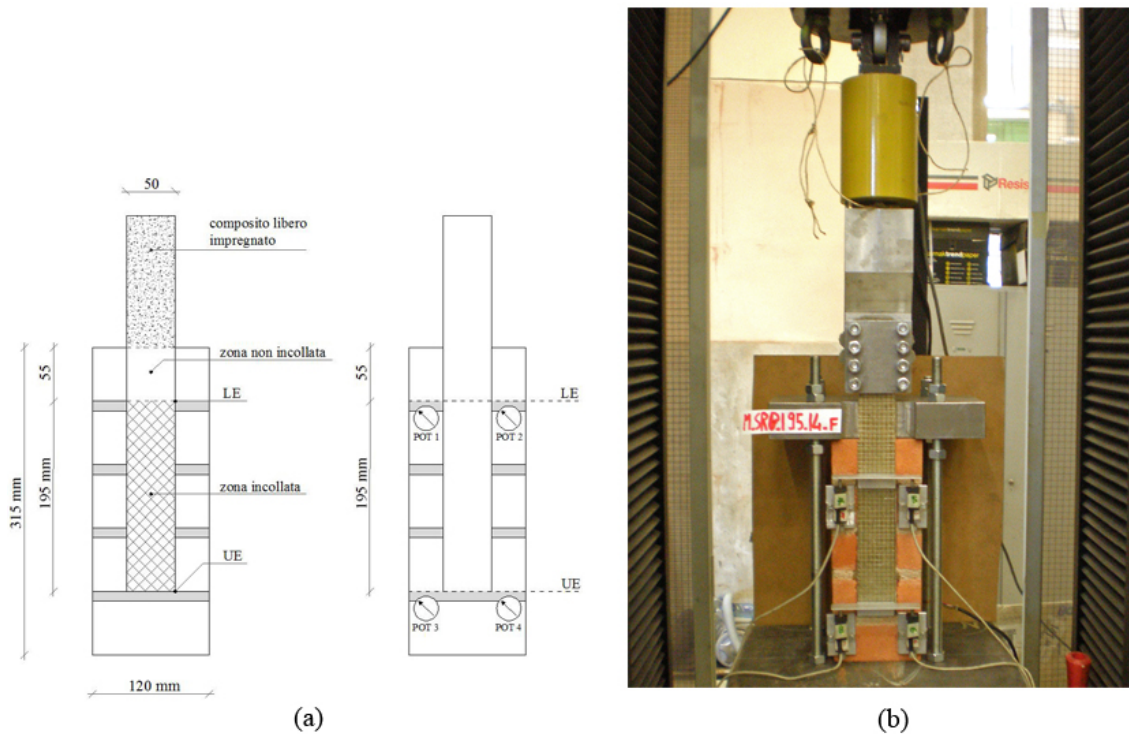


Figura 133: Campione M-SRP-195-14f: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 91: Campione M-SRP-195-14f: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	a	P_{max} [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	8251	0.403		727	23.8%	23.7%	0.300	0.316	
2° picco	7812	0.342		688	22.6%	22.4%	0.269	0.283	
3° picco	8080	0.598		712	23.3%	23.2%	0.288	0.303	

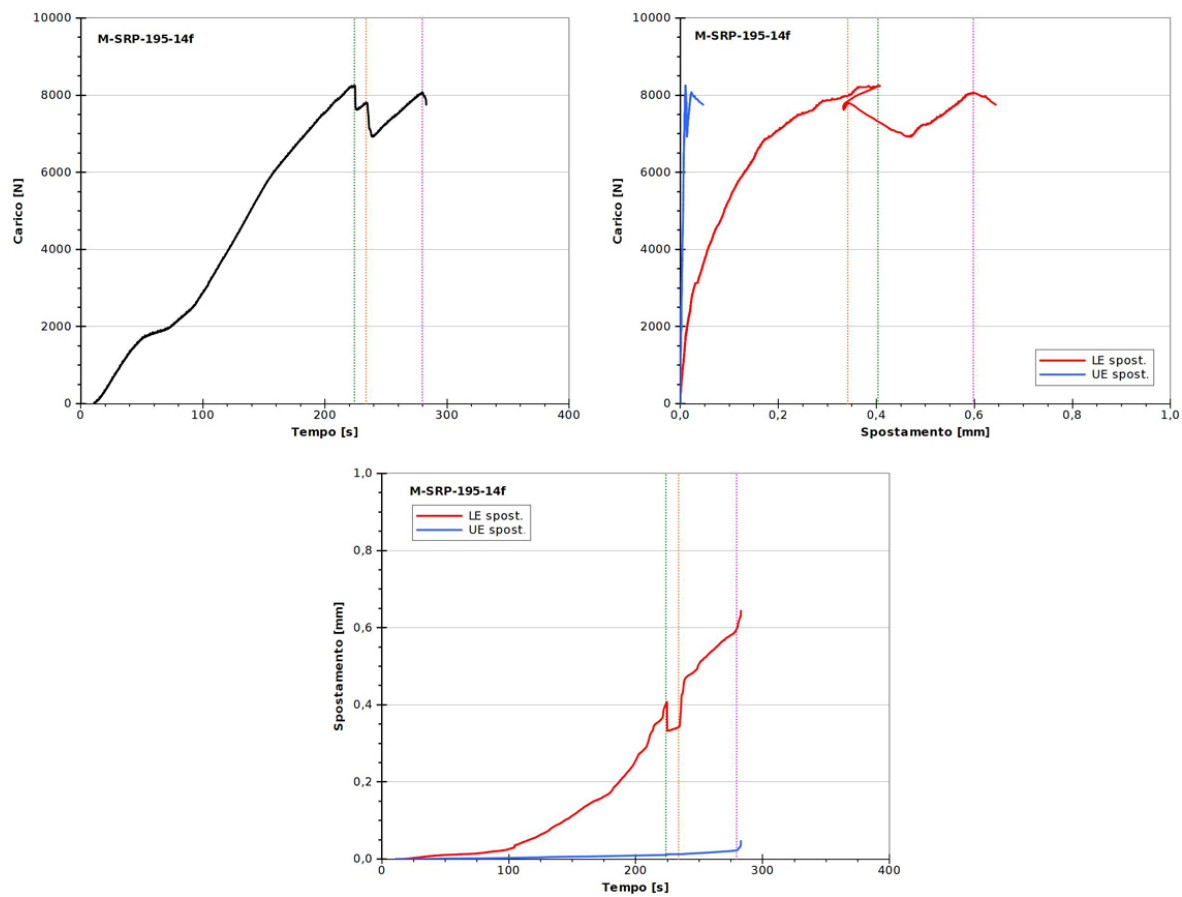


Figura 134: Campione M-SRP-195-14f: grafici delle principali grandezze analizzate.

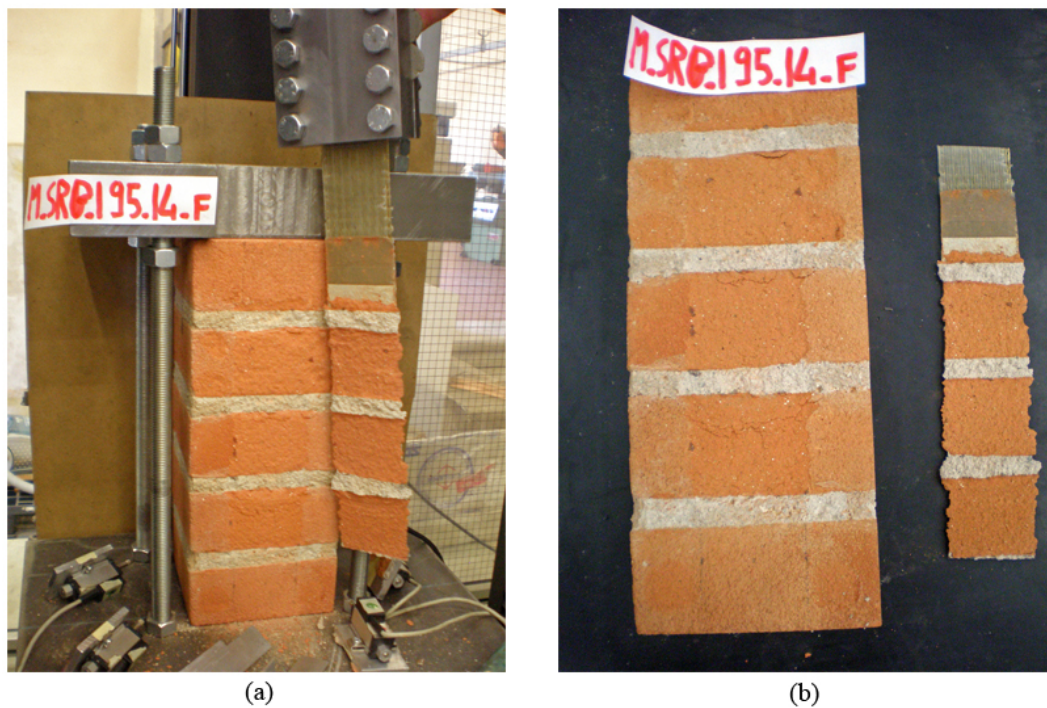


Figura 135: Campione M-SRP-195-14f: campione dopo la rottura.

M-SRP-anc-10sx

Tabella 92: Campione M-SRP-anc-10sx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	195	200020	190000	3050	3070

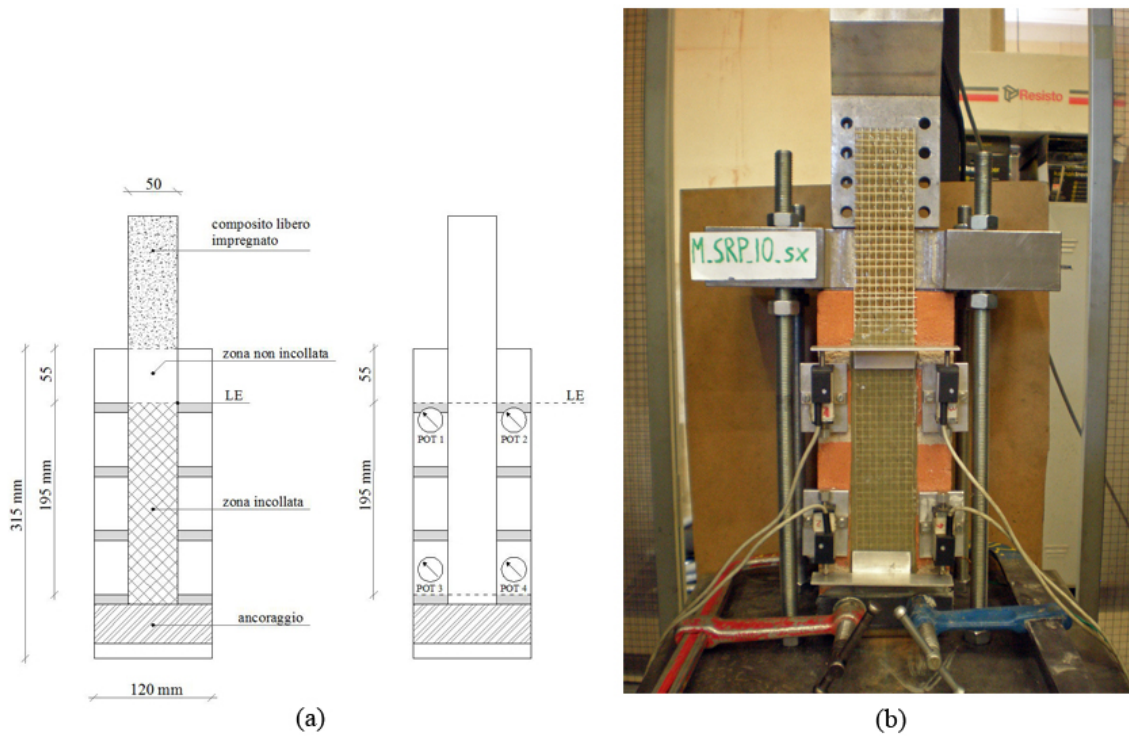


Figura 136: Campione M-SRP-anc-10sx: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 93: Campione M-SRP-anc-10sx: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} a P_{max} [mm]	σ_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	8041	0.310	708	23.2%	23.1%	0.285	0.300
2° picco	7530	0.583	663	21.8%	21.6%	0.250	0.263
3° picco	7918	0.848	698	22.9%	22.7%	0.276	0.291

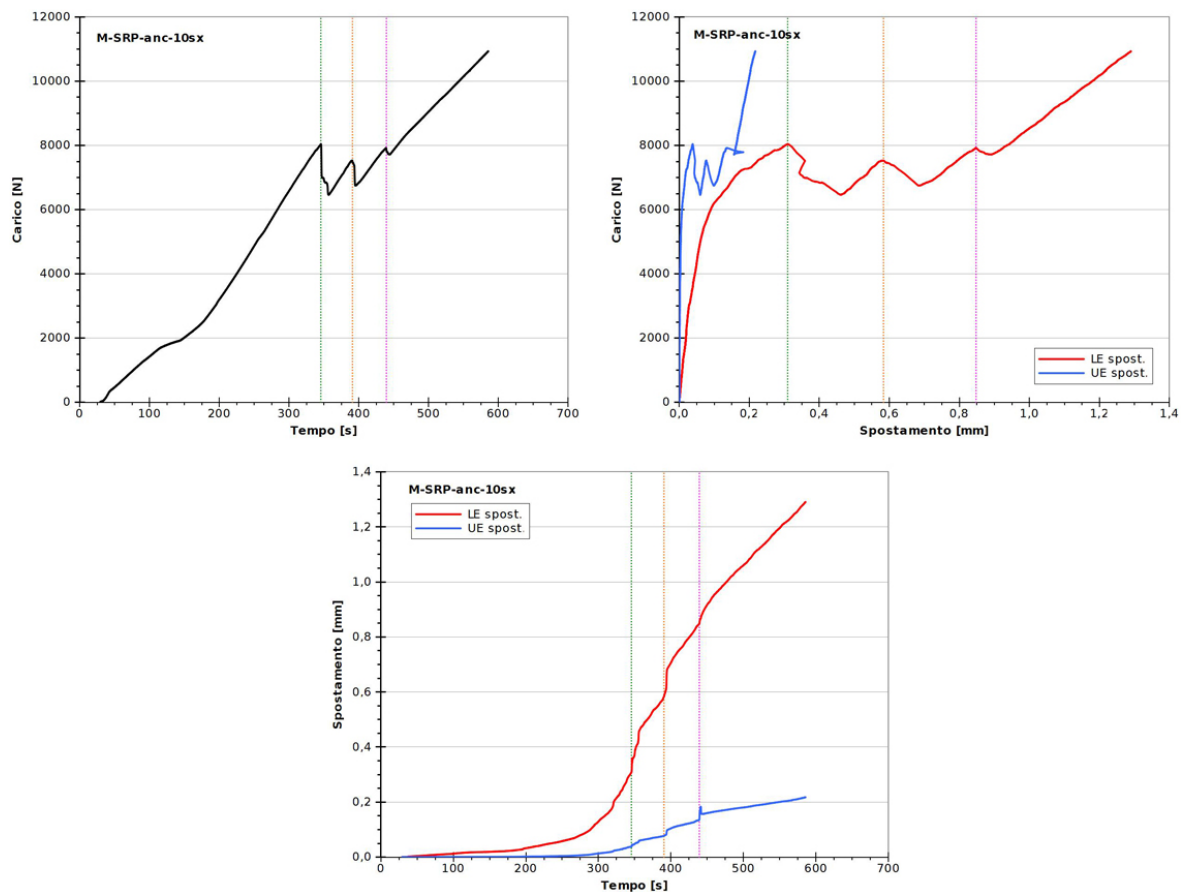


Figura 137: Campione M-SRP-anc-10sx: grafici delle principali grandezze analizzate.

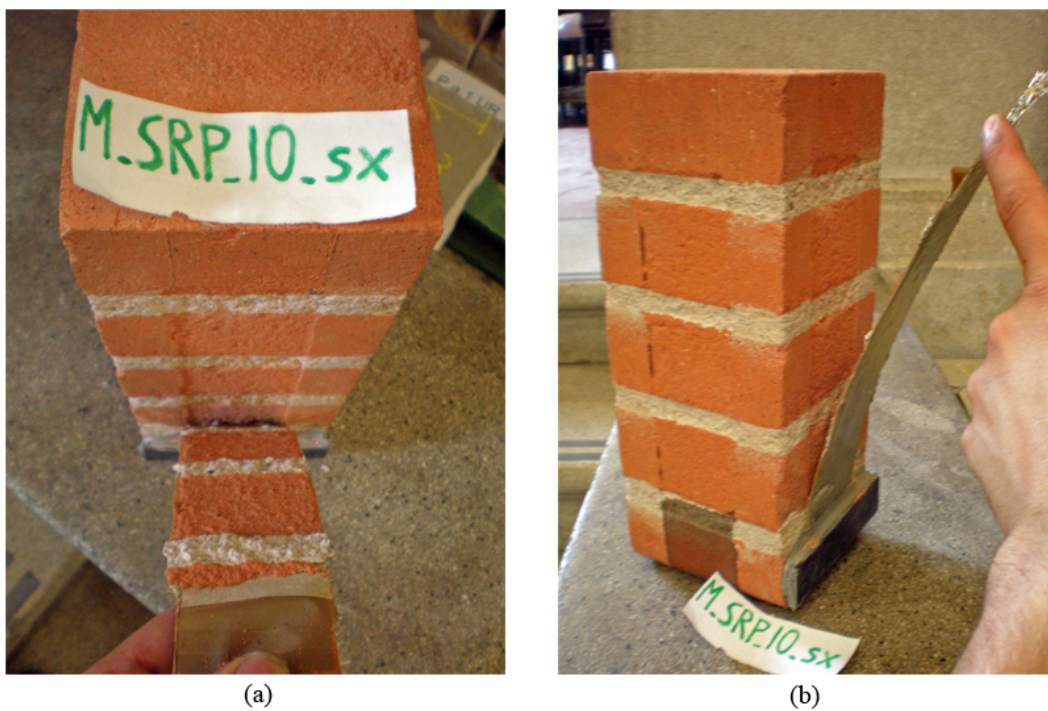


Figura 138: Campione M-SRP-anc-10sx: campione dopo la rottura.

M-SRP-anc-14r

Tabella 94: Campione M-SRP-anc-14r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.

Rinforzo	t_f [mm]	b_f [mm]	L_a [mm]	E_f [N/mm ²]	$E_{f,ds}$ [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	$f_{t,ds}$ [N/mm ²]
SRP	0.227	50	195	200020	190000	3050	3070

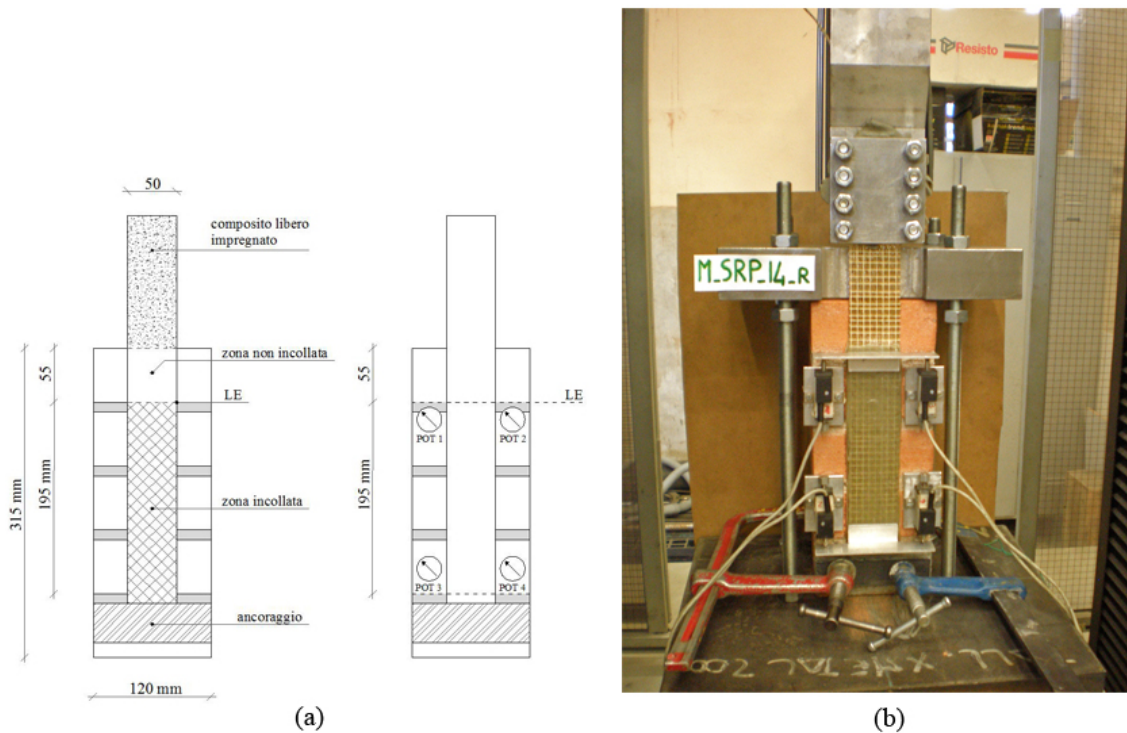


Figura 139: Campione M-SRP-anc-14r: geometria del provino e apparato di prova.

Tabella 95: Campione M-SRP-anc-14r: risultati della prova.

	P_{max} [N]	δ_{LE} [mm]	α	P_{max} [N/mm ²]	$\frac{\sigma_{max}}{f_t}$ [%]	$\frac{\sigma_{max}}{f_{t,ds}}$ [%]	G_f [N/mm]	$G_{f,ds}$ [N/mm]
1° picco	7522	0.241		663	21.7%	21.6%	0.249	0.262
2° picco	6152	0.445		542	17.8%	17.7%	0.167	0.176
3° picco	6959	0.765		613	20.1%	20.0%	0.213	0.225

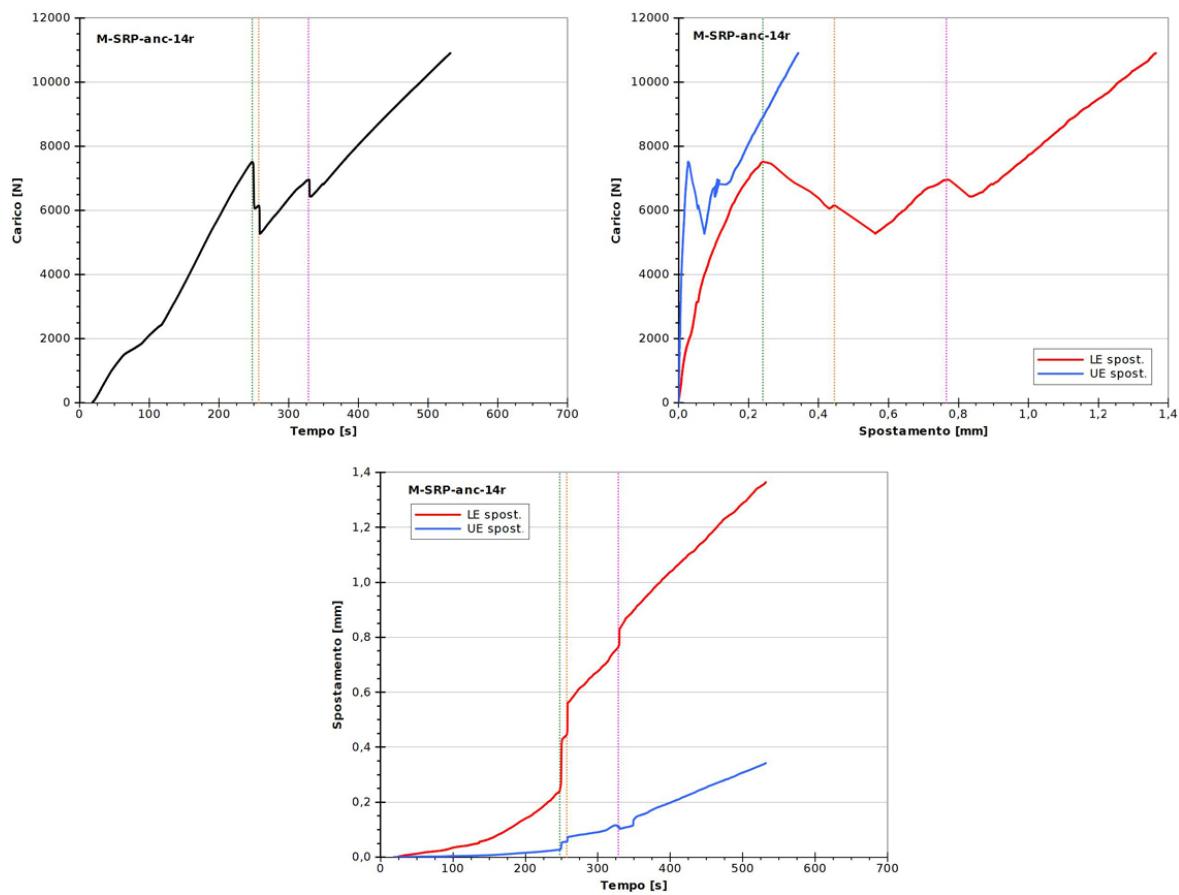


Figura 140: Campione M-SRP-anc-14r: grafici delle principali grandezze analizzate.

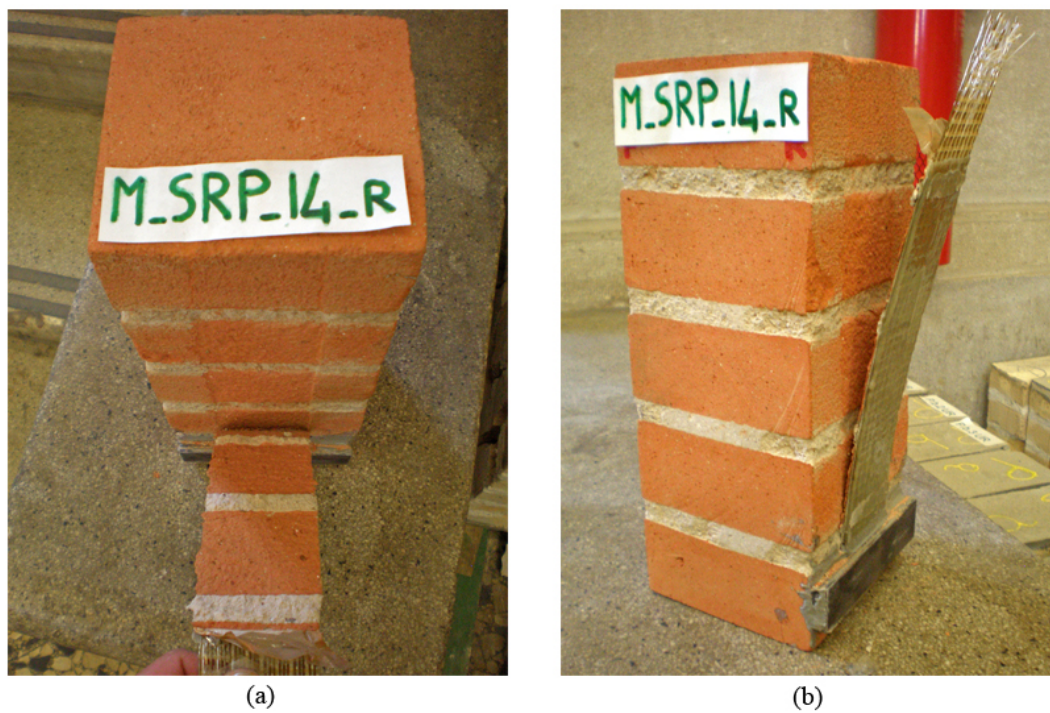


Figura 141: Campione M-SRP-anc-14r: campione dopo la rottura.

Appendice C - Schede tecniche di prodotto

In questo capitolo sono raccolte le schede tecniche fornite dai produttori dei materiali utilizzati nel confezionamento dei provini.

07/11

1 di 1

T30V**MALTA**

pronta a base di FENIX NHL5



T30V è un malta per intonaco, rinzafo, riempimenti e tamponature, realizzazione di giunti in murature faccia a vista e allettamento mattoni a base di calce idraulica naturale FENIX NHL5 ed inerti selezionati con granulometria massima di 4 mm.

T30V è una malta a medio alta resistenza, a basso contenuto di sali idrosolubili e ritiro controllato particolarmente adatta negli interventi di ristrutturazione e risanamento.

T30V è conforme alla UNI EN 998-1 riguardo le "Specifiche per malte per opere murarie – Malte per intonaci interni ed esterni " e soggetta a marcatura CE secondo la normativa vigente.

CAMPO DI APPLICAZIONE

T30V si applica su qualsiasi superficie, in particolare viene utilizzato negli interventi di ristrutturazione in cui sono richieste malte con buone caratteristiche meccaniche, assenza di reattività in presenza di solfati, alta adesione in parete e bassi ritiri. Può essere applicato sia in interno che in esterno.

T30V è una malta con un contenuto estremamente basso di sali solubili, che riduce considerevolmente la formazione di efflorescenze saline sulle murature su cui viene applicata. La tipologia di curva granulometrica adottata ed il rapporto legante inerte sono volti alla riduzione dei ritiri, alla minimizzazione dell'acqua di impasto ed alla ottimizzazione della lavorabilità e facilità applicativa.

Per le sue caratteristiche granulometriche e di composizione **T30V** consente di realizzare intonaci di spessori maggiori rispetto ai normali intonaci pronti a proiezione meccanica.

PREPARAZIONE DELL'IMPASTO

T30V si miscela solo ed esclusivamente con acqua in ragione di circa 5 litri/sacco. L'impasto si può effettuare a mano, con betoniera, coclea impastatrice o con adeguati sistemi automatici di miscelazione con acqua. Evitare tempi di miscelazione superiori ai 3 minuti. Si applica a mano o con macchine intonacatrici adeguate all'applicazione di prodotti con granulometria massima di 4 mm.

APPLICAZIONE

Supporto con intonaco ammalorato:

1. demolizione dell'intonaco ammalorato fino alla messa in luce della muratura originale senza però molestare troppo la struttura;
2. asportazione di polvere ed eventuali parti inconsistenti residue a seguito della demolizione dell'intonaco preesistente;
3. sabbatura della muratura o lavaggio mediante acqua corrente al fine di asportare polvere ed eventuali presenze saline (uno o più cicli di lavaggio all'occorrenza);
4. realizzazione a muratura asciutta di un rinzafo preliminare mediante **T30V** o T30RC con lieve eccesso di acqua al fine di regolarizzare il supporto in previsione dell'applicazione del corpo dell'intonaco;
5. applicazione del corpo dell'intonaco mediante **T30V** impastato con acqua, in una o più mani secondo gli spessori da applicare e nel rispetto dei tempi di attesa tra una mano e l'altra per la corretta maturazione del prodotto;
6. rasatura mediante rasante TASSULLO TA01/02 e finitura TASSULLO TF01/02 a base di calce idraulica naturale ad elevata traspirabilità o finitura colorata minerale TASSULLO o altra finitura o pittura prevista a capitolato purché traspirante.

Supporto nuovo:

1. pulizia del supporto e asportazione di eventuali polvere, parti inconsistenti efflorescenze saline ecc.;
2. realizzazione di un rinzafo preliminare mediante **T30V** con lieve eccesso di acqua al fine di omogeneizzare l'assorbimento d'acqua del supporto in previsione dell'applicazione del corpo dell'intonaco;
3. applicazione del corpo dell'intonaco mediante **T30V** impastato con acqua, in una o più mani secondo gli spessori da applicare e nel rispetto dei tempi di attesa tra una mano e l'altra per la corretta maturazione del prodotto;
4. rasatura mediante rasante TASSULLO TA01/02 e finitura TASSULLO TF01/02 a base di calce idraulica naturale ad elevata traspirabilità o finitura colorata minerale TASSULLO o altra finitura o pittura prevista a capitolato purché traspirante.

TASSULLO MATERIALI S.p.A.
via Nazionale, 157 38010 Tassullo (TN)
Tel: 0463/662100 Fax: 0463/662138
www.tassullo.com - areatecnica@tassullo.it



L'uso del prodotto implica la verifica della sua idoneità all'impiego previsto e l'assunzione delle responsabilità derivanti dall'utilizzo. I dati riportati sono ottenuti da misure di laboratorio. La TASSULLO MATERIALI S.p.A. si riserva di apportare in qualsiasi momento e senza preavviso le varianti ritenute più opportune ai dati tecnici riportati.

T30V

AVVERTENZE

Preparazione del supporto: preparare il supporto all'applicazione asportando polvere, efflorescenze saline, parti inconsistenti, disarmanti, muffe, materiale organico ecc.

Supporti bagnati: non applicare su supporti impregnati di acqua al fine di evitare fenomeni di scarsa adesione.

Supporti molto assorbenti: nel caso di supporti con elevato assorbimento d'acqua è buona norma adottare tutte le precauzioni per evitare una rapida asciugatura della malta. Valutare la necessità di inumidire il supporto prima dell'applicazione della stessa o procedere all'applicazione di una mano di **T30V** a basso spessore come rinzafo prima dell'applicazione del corpo dell'intonaco.

Protezione dal gelo: non applicare **T30V** a temperature inferiori a 5°C. Nei periodi freddi è opportuno provvedere ad una adeguata protezione della malta dal gelo; è sconsigliato l'uso di additivi anticongelanti che potrebbero pregiudicare la lavorabilità della malta.

Alte temperature: in presenza di elevate temperature adottare tutte le precauzioni alla fine di impedire una troppo rapida asciugatura della malta.

Spessori superiori ai 3 cm: per spessori superiori ai 3 cm, soprattutto dove vi siano cambiamenti di sezione o disomogeneità del supporto, è consigliato l'utilizzo di reti in vetroresina o acciaio zincato e la realizzazione dell'intonaco per strati successivi, attendendo l'indurimento dello strato sottostante.

Conservazione: 12 mesi (in confezione originale integra e in luogo coperto ed asciutto).

DATI E CARATTERISTICHE

Compatibilità ambientale

Natura: inorganica


Tipologia di inerte utilizzato: naturale, inorganico

Contenuto in riciclati: nessuno

Smaltimento: in discarica come materiale inerte (rifiuto non pericoloso)

VOC: non contiene materiale organico

Certificazione LEED

	T30V contribuisce all'ottenimento dei crediti LEED per le seguenti aree	Materiali e Risorse (MR)	Qualità Ambientale Interna (QI)
		MR credito 5 (materiali regionali) fino a 2 punti	QI credito 4.1 (materiali basso emissivi) 1 punto

Conformità CE

Conforme alla UNI EN 998-1

DATI TECNICI

Granulometria (UNI EN 1015-1)	da 0 a 4 mm
Acqua d'impasto	ca. 0,16 l/Kg (ca. 5 l/sacchetto)
Peso specifico (UNI EN 1015-10)	1750 ÷ 1850 Kg/m ³
Resa (per intonaco)	ca. 18 Kg/(m ² x cm)
Resistenza a compressione (UNI EN 1015-11)	Classe CS III (3,5 + 7,5 N/mm ²)
Resistenza alla diffusione del vapore (UNI 9233)	μ = 12
pH	> 10,5
Classe di reazione al fuoco	A1

I dati tecnici sono stati ottenuti da una malta preparata in laboratorio mediante miscelazione con miscelatore conforme alla EN 196-1 per 75 secondi a bassa velocità.

FORNITURA

In sacchi da 30 kg.

VOCE DI CAPITOLATO

Malta pronta a base di calce idraulica naturale TASSULLO FENIX conforme alla UNI EN 459-1, classificata NHL5 e soggetta a marcatura CE secondo la normativa vigente ed inerti selezionati con granulometria da 0 a 4 mm tipo TASSULLO T30V, adatta alla realizzazione di intonaci, rinzafo, riempimenti e tamponature, realizzazione di giunti in murature faccia a vista e allettamento mattoni, di peso specifico di 1750 ÷ 1850 Kg/m³, di classe CS III di resistenza a compressione (classificazione secondo UNI EN 998-1), resistenza alla diffusione del vapore (μ) pari a 12, pH > 10.5 e di classe A1 di reazione al fuoco.

TASSULLO MATERIALI S.p.A.
via Nazionale, 157 38010 Tassullo (TN)
Tel: 0463/662100 Fax: 0463/662138
www.tassullo.com - areatecnica@tassullo.it



L'uso del prodotto implica la verifica della sua idoneità all'impiego previsto e l'assunzione delle responsabilità derivanti dall'utilizzo. I dati riportati sono ottenuti da misure di laboratorio. La TASSULLO MATERIALI S.p.A. si riserva di apportare in qualsiasi momento e senza preavviso le varianti ritenute più opportune ai dati tecnici riportati.

FIDPRIMER

RESINA EPOSSIDICA PER LA PREPARAZIONE DI SUPERFICI DI STRUTTURE CHE DEVONO ESSERE RINFORZATE MEDIANTE MATERIALI COMPOSITI FRP O SRP



FIDIA srl
Technical Global Services

Caratteristiche della resina non miscelata

	Colore	Viscosità a 25 °C [mPa·s]	Densità [g/cm ³]	Rapporto di miscelazione		Condizioni di stoccaggio (contenitore sigillato)	
				In volume	In peso	Tempo [mesi]	Temperatura [°C]
Componente A	Incolore	750	1,11	2	2	12	25
Componente B	Paglierino	600	1,00	1	1	12	25
Miscela	Paglierino	650	1,05				

Caratteristiche della resina miscelata

Tempo di lavorabilità [min]	35°C	30
Tempo di gelo [min]	20° C	60
Picco esotermico	Temperatura [°C]	190
Tempo di completa reticolazione [h]	20 °C	5

Caratteristiche della resina reticolata

	Stagionato a 5 gg a 22°C
Temperatura di transizione vetrosa, Tg [°C]	65
Modulo di elasticità a trazione [GPa]	2,5
Resistenza a trazione [MPa]	45
Deformazione a rottura [%]	3,8

*Le proprietà del composito e delle resine sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE**Descrizione:**

FIDPRIMER è un prodotto da impregnazione bicomponente, senza solventi, tixotropica a base di resina epossidica.

Ideale per:

preparazione di superfici per l'installazione di rinforzi strutturali in CA, CAP, Muratura, Pietra naturale e Legno (per l'Acciaio non è necessario l'impiego del FIDPRIMER).

Vantaggi:

facilità di miscelazione e di applicazione;
resistenza agli agenti chimici ed ai condizionamenti atmosferici ed ambientali.

CONFEZIONI

Imballi da kg. 30 (20 kg componente A + 10kg componente B).

QUALITA' E CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDPRIMER

RESINA EPOSSIDICA PER LA PREPARAZIONE DI SUPERFICI DI STRUTTURE CHE DEVONO ESSERE RINFORZATE MEDIANTE MATERIALI COMPOSITI FRP O SRP



FIDIA srl
Technical Global Services

AVVERTENZE

Per applicazioni che comportano l'esposizione a temperature superiori a 70°C, consultare il nostro Servizio Tecnico.

RACCOMANDAZIONI

Indossare l'abbigliamento protettivo (guanti in butile, occhiali protettivi).

MODALITA' DI APPLICAZIONE**1. Preparazione delle superfici**

Trattare, preferibilmente mediante sabbiatura o martellinatura del sottofondo in modo da eliminare ogni parte incoerente, tracce di grasso, disarmanti, vernici, lattime di calcestruzzo superficiale, smog, ecc. e depolverare accuratamente con aria esente da olio e condensa. Pulire le armature metalliche deteriorate da eventuali tracce di ruggine e quindi proteggerle da processi di passivazione e corrosione. Le fessurazioni di dimensioni maggiori a 0,25mm devono essere stabilizzate mediante iniezione con prodotti a base di resine epossidiche (ved. FIDPUTTY). Tenore massimo di umidità della superficie non superiore al 4%.

2. Miscelazione resina

Versare il componente B nel componente A, impastare a fondo per 5 minuti a bassa velocità fino a quando il prodotto risulta omogeneo. Per avere un post-life più lungo si può suddividere il materiale impastato in quantità parziali più piccole, o si possono raffreddare i due componenti prima di procedere con la miscelazione.

3. Applicazione

Trattare il FIDPRIMER che verrà applicato alla superficie, in maniera regolare, per mezzo di un pennello o rullo.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDSATURANT HM

RESINA EPOSSIDICA BICOMPONENTE AD ALTO MODULO PER
L'IMPREGNAZIONE IN SITU DI TESSUTI DI RINFORZO



FIDIA srl
Technical Global Services

Caratteristiche della resina non miscelata							
	Colore	Viscosità a 25 °C [mPa·s]	Densità [g/cm ³]	Rapporto di miscelazione		Condizioni di stoccaggio (contenitore sigillato)	
				In volume	In peso	Tempo [mesi]	Temperatura [°C]
Componente A	Lattescente	350.000	0,97	2	2	12	20
Componente B	Incolore	850	1,2	1	1	12	20
Miscela	Lattescente	12.000	1,1				

Caratteristiche della resina miscelata			Caratteristiche della resina reticolata	
Tempo di lavorabilità [min]	35°C	15	Stagionato a 5 gg a 22°C	
Tempo di gelo [min]	20° C	50	Temperatura di transizione vetrosa, Tg [°C]	65
Picco esotermico	Temperatura [°C]	160	Modulo di elasticità a trazione [GPa]	2,5
Tempo di completa reticolazione [h]	20 °C	15	Resistenza a trazione [MPa]	70
			Deformazione a rottura [%]	6,0

*Le proprietà del composito e delle resine sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE*Descrizione*

FIDSATURANT HM è un prodotto da impregnazione bicomponente, senza solventi, a base di resina epossidica del sistema FIDFORTIFICA.

Ideale per l'impregnazione con la tecnica manual layup di tessuti per il rinforzo e consolidamento di strutture in CA, CAP, Muratura, Legno ed Acciaio.

Vantaggi:

- applicazione semplice con spazzola, cazzuola, spatola, talocchia e rullo da impregnazione;
- elevata stabilità su superfici verticali e sopratesta;
- buona resistenza meccanica;
- strato fine;
- senza solventi.

CONFEZIONI

Imballi da kg. 30 (20 kg componente A + 10kg componente B).

QUALITA' E CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA Tel +39 075.5271550 Fax +39 075.5298077
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5170096 Fax +39 075.5177546
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDSATURANT HM

RESINA EPOSSIDICA BICOMPONENTE AD ALTO MODULO PER
L'IMPREGNAZIONE IN SITU DI TESSUTI DI RINFORZO



FIDIA srl
Technical Global Services

AVVERTENZE

Per applicazioni che comportano l'esposizione a temperature superiori a 70°C, consultare il nostro Servizio Tecnico.

RACCOMANDAZIONI

Indossare l'abbigliamento protettivo (guanti in butile, occhiali protettivi).

MODALITA' DI APPLICAZIONE*1. Preparazione delle superfici*

Trattare, preferibilmente mediante sabbiatura o martellinatura il sottofondo in modo da eliminare ogni parte incoerente, tracce di grasso, disarmanti, vernici, lattime di calcestruzzo superficiale, smog, ecc. e depolverare accuratamente con aria esente da olio e condensa.

Per applicazione su metallo togliere ogni traccia di ruggine, vernice, grasso, ecc. ricorrendo alla sabbiatura a metallo bianco, smerigliatura o accurata pulizia meccanica.

Per poliestere, resine epossidiche e materiali sintetici e vetosi in genere, ricorrere alla smerigliatura della superficie.

Assicurarsi che il sottofondo all'atto della posa si presenti pulito, compatto e asciutto.

2. Miscelazione dei componenti

Per la preparazione dell'adesivo aggiungere il componente B al componente A della singola confezione e miscelare mediante l'apposito agitatore ad ancora montato su di un trapano a bassa velocità (ca. 200 giri/minuto) per includere la minore quantità di aria possibile, fino a perfetta omogeneizzazione: si otterrà una pasta di colore omogeneo grigio chiaro.

3. Applicazione dell'adesivo

- applicazione della resina miscelata sul sottofondo preparato con cazzuola dentata, spazzola o spatola;
- stesura del tessuto sullo strato di resine applicato, nella direzione di progetto;
- pressare il tessuto nella resina con l'utilizzo di un rullo da impregnazione, fino a quando la resina fuoriesce dai fasci di fibre e ripartire il materiale per ottenere una struttura omogenea.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA Tel +39 075.5271550 Fax +39 075.5298077
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5170096 Fax +39 075.5177546
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDSATURANT HM-T

RESINA EPOSSIDICA BICOMPONENTE AD ALTO MODULO TISSIOTROPICA PER L'IMPREGNAZIONE IN SITU DI TESSUTI DI RINFORZO IN ACCIAIO



Caratteristiche della resina non miscelata							
	Colore	Viscosità a 25 °C [mPa·s]	Densità [g/cm ³]	Rapporto di miscelazione		Condizioni di stoccaggio	
				In volume	In peso	Tempo [mesi]	Temperatura [°C]
Componente A	Lattescente	350.000	0,97	2	2	12	20
Componente B	Nero	300.000	1,2	1	1	12	20
Miscela	Grigio scuro	300.000	1,1				

Caratteristiche della resina miscelata			Caratteristiche della resina reticolata	
Tempo di lavorabilità [min]	35°C	15	Stagionato a 5 gg a 22°C	
Tempo di gelo [min]	20° C	50	Temperatura di transizione vetrosa, Tg [°C]	65
Picco esotermico	Temperatura [°C]	160	Modulo di elasticità a trazione [GPa]	2,5
Tempo di completa reticolazione [h]	20 °C	15	Resistenza a trazione [MPa]	70
			Deformazione a rottura [%]	6,0

*Le proprietà del composito e delle resine sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE*Descrizione*

FIDSATURANT HM-T è un prodotto da impregnazione bicomponente, senza solventi, a base di resina epossidica del sistema FIDFORTIFICA.

Ideale per l'impregnazione con la tecnica manual layup di tessuti in acciaio per il rinforzo e consolidamento di strutture in CA, CAP, Muratura, Legno ed Acciaio.

Vantaggi:

- applicazione semplice con spazzola, cazzuola, spatola, talocchia e rullo da impregnazione;
- elevata stabilità su superfici verticali e sopratesta;
- buona resistenza meccanica;
- strato fine;
- senza solventi.

CONFEZIONI

Imballi da kg. 30 (20 kg componente A + 10kg componente B).

QUALITA' E CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDSATURANT HM-T

RESINA EPOSSIDICA BICOMPONENTE AD ALTO MODULO TISSIOTROPICA PER L'IMPREGNAZIONE IN SITU DI TESSUTI DI RINFORZO IN ACCIAIO



FIDIA srl
Technical Global Services

AVVERTENZE

Per applicazioni che comportano l'esposizione a temperature superiori a 70°C, consultare il nostro Servizio Tecnico.

RACCOMANDAZIONI

Indossare l'abbigliamento protettivo (guanti in butile, occhiali protettivi).

MODALITA' DI APPLICAZIONE*1. Preparazione delle superfici*

Trattare, preferibilmente mediante sabbiatura o martellinatura il sottofondo in modo da eliminare ogni parte incoerente, tracce di grasso, disarmanti, vernici, lattime di calcestruzzo superficiale, smog, ecc. e depolverare accuratamente con aria esente da olio e condensa.

Per applicazione su metallo togliere ogni traccia di ruggine, vernice, grasso, ecc. ricorrendo alla sabbiatura a metallo bianco, smerigliatura o accurata pulizia meccanica.

Per poliestere, resine epossidiche e materiali sintetici e vetosi in genere, ricorrere alla smerigliatura della superficie.

Assicurarsi che il sottofondo all'atto della posa si presenti pulito, compatto e asciutto.

2. Miscelazione dei componenti

Per la preparazione dell'adesivo aggiungere il componente B al componente A della singola confezione e miscelare mediante l'apposito agitatore ad ancora montato su di un trapano a bassa velocità (ca. 200 giri/minuto) per includere la minore quantità di aria possibile, fino a perfetta omogeneizzazione: si otterrà una pasta di colore omogeneo grigio chiaro.

3. Applicazione dell'adesivo

- applicazione della resina miscelata sul sottofondo preparato con cazzuola dentata, spazzola o spatola;
- stesura del tessuto sullo strato di resine applicato, nella direzione di progetto;
- pressare il tessuto nella resina con l'utilizzo di un rullo da impregnazione, fino a quando la resina fuoriesce dai fasci di fibre e ripartire il materiale per ottenere una struttura omogenea.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

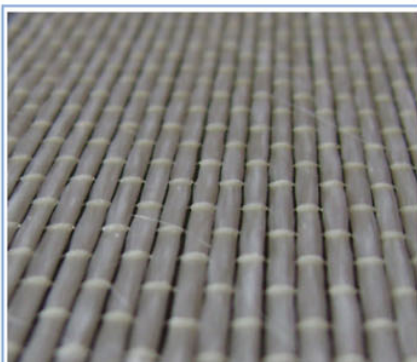
Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDGLASS UNIDIR 300 HS73®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI VETRO PER IL RINFORZO STRUTTURALE

**FIDIA** srl
Technical Global Services**Proprietà geometriche e meccaniche*****Fibra secca (singolo filamento)**

Tensione caratteristica a trazione, σ_{fibra}	2000 MPa
Modulo elastico, E_{fibra}	73 GPa
Deformazione a rottura, ϵ_{fibra}	3,50 %
Densità	2,50 g/cm ³

Tessuto impregnato (valori per il calcolo)

Titolo filato	1200 Tex
n° fili/cm	2,50 Fili/cm
Massa (comprensivo di termosaldatura)	320 g/m ²
Spessore equivalente del rinforzo FRP, t_r	0,120 mm
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, f_{fk}	1400 MPa
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, E_r	70 GPa
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, ϵ_r	2,32 %

Aggiornamento al 30 giugno 2009

*Le proprietà del tessuto impregnato con resina FIDSATURANT sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati". Il sistema così realizzato, impiegando inoltre le resine FIDPUTTY e FIDPRIMER per la preparazione del substrato, garantiscono un sistema classificato di TIPO A, come riportato nel documento CNR-DT 200/2004 al cap.2 paragrafo 2.5. La resistenza e la deformazione caratteristica vengono calcolate come la media meno tre volte la deviazione standard.

CARATTERISTICHE MATERIALE**Descrizione**

FIDGLASS UNIDIR 300 HS73 è un tessuto costituito da fibre di vetro unidirezionali, realizzato tramite termosaldatura, processo che impedisce la sfilacciatura delle fibre e che ne migliora-facilita l'installazione in cantiere. È un tessuto adatto per rinforzare elementi in muratura e legno, incrementandone la resistenza al taglio, flessione e compressione.

Ideale per:

- rinforzi di travi e solai alle sollecitazioni di flessione o di taglio;
- il confinamento di pilastri per incrementare la resistenza a compressione;
- rinforzi di strutture in seguito ad aumenti di carico (adeguamento statico);
- adeguamento sismico;
- rimediare a difetti di progetto o costruzione;
- rinforzo di strutture modificate a causa di nuove esigenze architettoniche o di utilizzo;
- limitare gli stati fessurativi.

Vantaggi:

- sistema di rinforzo resistente alla corrosione;
- durabilità e leggerezza;
- adattabile a sagome complesse;
- peso trascurabile;
- incremento trascurabile di spessore;
- esteticamente non invasivo;
- facilità d'installazione;
- buona resistenza agli alcali;
- capacità di sopportare elevate deformazioni.

CONFEZIONI

Il tessuto viene solitamente prodotto con dimensioni di circa 100, 200 o 500 mm di larghezza, mentre la lunghezza dipende dall'elemento da rinforzare. A seconda delle necessità di cantiere, il tessuto può essere confezionato su misura in modo da ridurre i tempi di installazione.

RACCOMANDAZIONI

Maneggiando il tessuto indossare indumenti protettivi ed occhiali ed attenersi alle istruzioni concernenti le modalità di applicazione del materiale.

Inalazione: respirare aria pulita e risciacquare la bocca.

Contatto con pelle: non è richiesta alcuna misura speciale.

Contatto con occhi: risciacquare abbondantemente per almeno 15 minuti; in caso di utilizzo di lenti a contatto, rimuoverle e sciacquarle per altri 5/10 minuti. Se si avverte ancora fastidio affidarsi alle cure mediche.

Ingestione: risciacquare la bocca bevendo dell'acqua e indurre il rigetto. Affidarsi poi alle cure mediche.

Stoccaggio in cantiere: conservare in luogo coperto ed asciutto e lontano da sostanze che ne possano compromettere un'ottimale aderenza alla matrice.

ESEMPI DI APPLICAZIONE

Per conoscere progetti di rinforzo strutturale mediante tessuti in vetro consultare la sezione Applicazioni al sito www.fidiaglobalservice.com.

QUALITA' & CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale, su richiesta, è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA Tel +39 075.5271550 Fax +39 075.5298077
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5170096 Fax +39 075.5177546
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDGLASS UNIDIR 300 HS73®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI VETRO PER IL RINFORZO STRUTTURALE

**FIDIA** srl
Technical Global Services**MODALITA' DI APPLICAZIONE***Preparazione del sottofondo*

Pulire il substrato, tramite spazzolatura o sabbiatura, da polveri, grassi e parti incoerenti. Pulire le armature da eventuali tracce di ruggine e sigillare possibili fessurazioni mediante iniezioni.

Rasatura della superficie

Eeguire la rasatura della superficie sino a 1 cm al fine di eliminare eventuali asperità e materiali incoerenti.

Applicazione di primer

Stendere sulla superficie, a pennello o a rullo, uno strato di primer ed attendere la sua maturazione per circa 2/3 ore. Livellare la superficie mediante stucco epossidico (putty).

Stesura resina primo strato

Dopo un'ulteriore lisciatura della superficie, applicare una prima mano di resina adesivo-impregnante.

Stesura del tessuto

Assicurandosi che lo strato sia ancora "fresco", applicare il tessuto prestando attenzione a non formare grinze, spianandolo manualmente oppure passando il rullo che elimina le eventuali bolle d'aria.

Impregnazione del tessuto

Manualmente o per mezzo di una macchina, impregnare il tessuto precedentemente tagliato nelle dimensioni richieste.

Finitura

Applicare una seconda mano di resina e terminare con un ulteriore spolvero di sabbia su resina; procedere infine con l'applicazione di una pittura epossidica e poliuretanica per la protezione del sistema di rinforzo.

NOTE LEGALI

I consigli tecnici che FIDIA S.r.l. Technical Global Services fornisce, verbalmente o per iscritto come assistenza al cliente o all'applicatore in base alle sue esperienze, corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono impegnativi e non dimostrano alcuna relazione legale contrattuale né obbligo accessorio col contratto di compravendita. Essi non dispensano l'acquirente dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto concerne la loro idoneità relativamente all'uso previsto. Per il resto sono valide le nostre condizioni commerciali. Diffonibilità dall'originale predetto per contenuto e/o utilizzo non implicherà alcuna responsabilità da parte dell'azienda FIDIA S.r.l. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che la presente scheda e gli eventuali valori riportati siano validi per la partita di prodotto di suo interesse e non siano superati in quanto sostituiti da edizioni successive e/o nuove formulazioni del prodotto. Nel dubbio, contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA Tel +39 075.5271550 Fax +39 075.5298077
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5170096 Fax +39 075.5177546
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDCARBON UNIDIR 300 HS240®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI CARBONIO AD ALTA RESISTENZA
PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services

**Proprietà geometriche e meccaniche*****Fibra secca (singolo filamento)**

Tensione caratteristica a trazione, σ_{fibra}	4800 MPa
Modulo elastico, E_{fibra}	240 GPa
Deformazione a rottura, ϵ_{fibra}	2,00 %
Densità	1,78 g/cm ³

Tessuto impregnato (valori per il calcolo)

Titolo filato	800 Tex
n° filili/cm	4,00 Filili/cm
Massa (comprensivo di termosaldatura)	320 g/m ²
Spessore equivalente del rinforzo FRP, t_r	0,170 mm
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, f_{fk}	3500 MPa
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, E_r	220 GPa
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, ϵ_r	1,45 %

Aggiornamento al 30 giugno 2009

*Le proprietà del tessuto impregnato con resina FIDSATURANT sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati". Il sistema così realizzato, impiegando inoltre le resine FIDPUTTY e FIDPRIMER per la preparazione del substrato, garantiscono un sistema classificato di TIPO A, come riportato nel documento CNR-DT 200/2004 al cap.2 paragrafo 2.5. La resistenza e la deformazione caratteristica vengono calcolate come la media meno tre volte la deviazione standard.

CARATTERISTICHE MATERIALE**Descrizione**

FIDCARBON UNIDIR 300 HS240 è un tessuto costituito da fibre di carbonio unidirezionali ad alta resistenza, realizzato tramite termosaldatura, processo che impedisce la sfilacciatura delle fibre e che ne migliora-facilita l'installazione in cantiere. È un tessuto adatto per rinforzare elementi in CA, CAP, muratura, legno ed acciaio, incrementandone la resistenza al taglio, flessione e compressione.

Ideale per:

- rinforzi di travi e solai alle sollecitazioni di flessione o di taglio;
- il confinamento di pilastri per incrementare la resistenza a compressione;
- rinforzi di strutture in seguito ad aumenti di carico (adeguamento statico);
- adeguamento sismico;
- rimediare a difetti di progetto o costruzione;
- rinforzo di strutture modificate a causa di nuove esigenze architettoniche o di utilizzo;
- limitare gli stati fessurativi.

Vantaggi:

- sistema di rinforzo resistente alla corrosione;
- elevata resistenza a fatica;
- durabilità e leggerezza;
- adattabile a sagome complesse;
- peso trascurabile;
- incremento trascurabile di spessore;
- esteticamente non invasivo;
- facilità d'installazione.

CONFEZIONI

Il tessuto viene solitamente prodotto con dimensioni di circa 100, 200 o 500 mm di larghezza, mentre la lunghezza dipende dall'elemento da rinforzare. A seconda delle necessità di cantiere, il tessuto può essere confezionato su misura in modo da ridurre i tempi di installazione.

RACCOMANDAZIONI

Maneggiando il tessuto indossare indumenti protettivi ed occhiali ed attenersi alle istruzioni concernenti le modalità di applicazione del materiale.

Inalazione: respirare aria pulita e risciacquare la bocca.

Contatto con pelle: non è richiesta alcuna misura speciale.

Contatto con occhi: risciacquare abbondantemente per almeno 15 minuti; in caso di utilizzo di lenti a contatto, rimuoverle e sciacquarle per altri 5/10 minuti. Se si avverte ancora fastidio affidarsi alle cure mediche.

Ingestione: risciacquare la bocca bevendo dell'acqua e indurre il rigetto. Affidarsi poi alle cure mediche.

Stoccaggio in cantiere: conservare in luogo coperto ed asciutto e lontano da sostanze che ne possano compromettere un'ottimale aderenza alla matrice.

ESEMPI DI APPLICAZIONE

Per conoscere progetti di rinforzo strutturale mediante tessuti in carbonio consultare la sezione Applicazioni al sito www.fidiaglobalservice.com.

QUALITA' & CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale, su richiesta, è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA Tel +39 075.5271550 Fax +39 075.5298077
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5170096 Fax +39 075.5177546
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDCARBON UNIDIR 300 HS240®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI CARBONIO AD ALTA RESISTENZA
PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services

MODALITA' DI APPLICAZIONE*Preparazione del sottofondo*

Pulire il substrato, tramite spazzolatura o sabbiatura, da polveri, grassi e parti incoerenti. Pulire le armature da eventuali tracce di ruggine e sigillare possibili fessurazioni mediante iniezioni.

Rasatura della superficie

Eseguire la rasatura della superficie sino a 1 cm al fine di eliminare eventuali asperità e materiali incoerenti.

Applicazione di primer

Stendere sulla superficie, a pennello o a rullo, uno strato di primer ed attendere la sua maturazione per circa 2/3 ore. Livellare la superficie mediante stucco epossidico (putty).

Stesura resina primo strato

Dopo un'ulteriore lisciatura della superficie, applicare una prima mano di resina adesivo-impregnante.

Stesura del tessuto

Assicurandosi che lo strato sia ancora "fresco", applicare il tessuto prestando attenzione a non formare grinze, spianandolo manualmente oppure passando il rullo che elimina le eventuali bolle d'aria.

Impregnazione del tessuto

Manualmente o per mezzo di una macchina, impregnare il tessuto precedentemente tagliato nelle dimensioni richieste.

Finitura

Applicare una seconda mano di resina e terminare con un ulteriore spolvero di sabbia su resina; procedere infine con l'applicazione di una pittura epossidica e poliuretanica per la protezione del sistema di rinforzo.

NOTE LEGALI

I consigli tecnici che FIDIA S.r.l. Technical Global Services fornisce, verbalmente o per iscritto come assistenza al cliente o all'applicatore in base alle sue esperienze, corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono impegnativi e non dimostrano alcuna relazione legale contrattuale né obbligo accessorio col contratto di compravendita. Essi non dispensano l'acquirente dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto concerne la loro idoneità relativamente all'uso previsto. Per il resto sono valide le nostre condizioni commerciali. Diffornità dall'originale predetto per contenuto e/o utilizzo non implicherà alcuna responsabilità da parte dell'azienda FIDIA S.r.l. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che la presente scheda e gli eventuali valori riportati siano validi per la partita di prodotto di suo interesse e non siano superati in quanto sostituiti da edizioni successive e/o nuove formulazioni del prodotto. Nel dubbio, contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA Tel +39 075.5271550 Fax +39 075.5298077
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5170096 Fax +39 075.5177546
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDBASALT UNIDIR 400 C95®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI BASALTO PER IL RINFORZO STRUTTURALE

**Proprietà geometriche e meccaniche*****Fibra secca (singolo filamento)**

Tensione caratteristica a trazione, σ_{fibra}	3080 MPa
Modulo elastico, E_{fibra}	95 GPa
Deformazione a rottura, ϵ_{fibra}	3,15 %
Densità	2,8 g/cm ³

Tessuto impregnato (valori per il calcolo)

Titolo filato	1200 Tex
n° fili/cm	3,3 Fili/cm
Massa	396 g/m ²
Spessore equivalente del rinforzo FRP, t_f	0,140 mm
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, f_{fk}	1700 MPa
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, E_f	80 GPa
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, ϵ_f	2,12 %
Aggiornamento al 18 marzo 2010	

*Le proprietà del tessuto impregnato con resina FIDSATURANT sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati". Il sistema così realizzato, impiegando inoltre le resine FIDPUTTY e FIDPRIMER per la preparazione del substrato, garantiscono un sistema classificato di **TIPO A**, come riportato nel documento CNR-DT 200/2004 al cap.2 paragrafo 2.5. La resistenza e la deformazione caratteristica vengono calcolate come la media meno tre volte la deviazione standard.

CARATTERISTICHE MATERIALE**Descrizione**

FIDBASALT UNIDIR 400 C95 è un tessuto unidirezionale costituito da fibre di basalto prodotte dalla fusione e successiva filatura di rocce vulcaniche. Il tessuto è termosaldato con fili di poliestere per evitare sfilacciamenti e facilitarne la posa in cantiere. È un tessuto adatto per rinforzare elementi in CA, CAP e muratura e viene impiegato per la protezione di elementi sottoposti ad impatti violenti grazie alla sua tenacità.

Ideale per:

- strutture soggette ad azioni dinamiche e impatti violenti;
- adeguamento sismico;
- rinforzi di travi e solai alle sollecitazioni di flessione o di taglio;
- il confinamento di pilastri per incrementare la resistenza a compressione;
- rimediare a difetti di progetto o costruzione;
- rinforzo di strutture modificate a causa di nuove esigenze architettoniche o di utilizzo;

Vantaggi:

- resistente ad usura per sfregamento;
- non suscettibile a fenomeni di idrolisi;
- sistema di rinforzo resistente alla corrosione;
- elevata tenacità, resistente ad urti e impatti violenti;
- elevata resistenza a fatica, urti, vibrazioni ed elevata stabilità termica;
- durabilità e leggerezza;
- incremento trascurabile di spessore;
- scarsa conducibilità termica ed elettrica;
- trasparente alla radiazione elettromagnetica.

CONFEZIONI

Il tessuto viene solitamente prodotto con dimensioni di circa 100, 200 e 500 mm di larghezza, mentre la lunghezza dipende dall'elemento da rinforzare. A seconda delle necessità di cantiere, il tessuto può essere confezionato su misura in modo da ridurre i tempi di installazione.

RACCOMANDAZIONI

Maneggiando il tessuto indossare indumenti protettivi ed occhiali ed attenersi alle istruzioni concernenti le modalità di applicazione del materiale.

Inalazione: respirare aria pulita e risciacquare la bocca.

Contatto con pelle: non è richiesta alcuna misura speciale.

Contatto con occhi: risciacquare abbondantemente per almeno 15 minuti; in caso di utilizzo di lenti a contatto, rimuoverle e sciacquarle per altri 5/10 minuti. Se si avverte ancora fastidio affidarsi alle cure mediche.

Ingestione: risciacquare la bocca bevendo dell'acqua e indurre il rigetto. Affidarsi poi alle cure mediche.

Stoccaggio in cantiere: conservare in luogo coperto ed asciutto e lontano da sostanze che ne possano compromettere un'ottimale aderenza alla matrice.

ESEMPI DI APPLICAZIONE

Per conoscere progetti di rinforzo strutturale mediante tessuti in fibra di basalto consultare la sezione Applicazioni al sito www.fidiaglobalservice.com.

QUALITA' & CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale, su richiesta, è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDBASALT UNIDIR 400 C95®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI BASALTO PER IL RINFORZO STRUTTURALE

**FIDIA** srl
Technical Global Services**MODALITA' DI APPLICAZIONE***Preparazione del sottofondo*

Pulire il substrato, tramite spazzolatura o sabbiatura, da polveri, grassi e parti incoerenti. Pulire le armature da eventuali tracce di ruggine e sigillare possibili fessurazioni mediante iniezioni.

Rasatura della superficie

Eeguire la rasatura della superficie sino a 1 cm al fine di eliminare eventuali asperità e materiali incoerenti.

Applicazione di primer

Stendere sulla superficie, a pennello o a rullo, uno strato di primer ed attendere la sua maturazione per circa 2/3 ore. Livellare la superficie mediante stucco epossidico (putty).

Stesura resina primo strato

Dopo un'ulteriore lisciatura della superficie, applicare una prima mano di resina adesivo-impregnante.

Stesura del tessuto

Assicurandosi che lo strato sia ancora "fresco", applicare il tessuto prestando attenzione a non formare grinze, spianandolo manualmente oppure passando il rullo che elimina le eventuali bolle d'aria.

Impregnazione del tessuto

Manualmente o per mezzo di una macchina, impregnare il tessuto precedentemente tagliato nelle dimensioni richieste.

Finitura

Applicare una seconda mano di resina e terminare con un ulteriore spolvero di sabbia su resina; procedere infine con l'applicazione di una pittura epossidica e poliuretanica per la protezione del sistema di rinforzo.

NOTE LEGALI

I consigli tecnici che FIDIA S.r.l. Technical Global Services fornisce, verbalmente o per iscritto come assistenza al cliente o all'applicatore in base alle sue esperienze, corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono impegnativi e non dimostrano alcuna relazione legale contrattuale né obbligo accessorio col contratto di compravendita. Essi non dispensano l'acquirente dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto concerne la loro idoneità relativamente all'uso previsto. Per il resto sono valide le nostre condizioni commerciali. Diffornità dall'originale predetto per contenuto e/o utilizzo non implicherà alcuna responsabilità da parte dell'azienda FIDIA S.r.l. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che la presente scheda e gli eventuali valori riportati siano validi per la partita di prodotto di suo interesse e non siano superati in quanto sostituiti da edizioni successive e/o nuove formulazioni del prodotto. Nel dubbio, contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

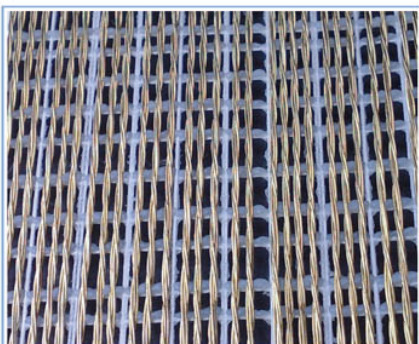
FIDSTEEL 3X2-B 12-12-500 HARDWIRE™

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI ACCIAIO UHTSS AD ALTISSIMA RESISTENZA RIVESTITO CON OTTONE PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services

HARDWIRE
COMPOSITE ARMOR SYSTEMS



*Le proprietà del composito e delle resine sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati". La resistenza e la deformazione caratteristica vengono calcolate come la media meno tre volte la deviazione standard.

Proprietà geometriche e meccaniche*

Filo	
Tensione caratteristica a trazione, σ_{filo}	3200 MPa
Modulo elastico, E_{filo}	206 GPa
Area, A_{filo}	0,096 mm ²
Nastro	
Area effettiva di un trefolo (5 fili), A_{trefolo}	0,481 mm ²
n° trefoli/cm	4,72 trefoli/cm
Massa (comprensivo di termosaldatura)	1800 g/m ²
Spessore equivalente del rinforzo FRP, t_{nastro}	0,227 mm
Carico di rottura caratteristico di un trefolo	1476 N
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, f_{nastro}	3070 MPa
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, E_{nastro}	190 GPa
Deformazione caratteristica a rottura FRP, ϵ_{nastro}	1,60 %

Aggiornamento al 26 febbraio 2010

Al fini del calcolo del sistema di rinforzo utilizzare le proprietà del nastro sopra riportate indipendentemente dal tipo di matrice scelta (malta o resina). Tali valori e specifiche per il calcolo potranno variare in base alle specifiche esigenze di progetto. Il tipo di matrice garantisce la durabilità nel tempo del sistema di rinforzo e condiziona il solo legame di aderenza fra quest'ultimo e il substrato.

Contattare gli ingegneri di FIDIA per determinare i valori e le specifiche di calcolo appropriate.

CARATTERISTICHE MATERIALE**Descrizione**

Il tessuto in acciaio FIDSTEEL 3X2-B 12-12-500 HARDWIRE™ a media densità rappresenta un sistema di rinforzo strutturale formato da trefoli di acciaio ad alta resistenza rivestiti con ottone, impregnabile con matrice cementizia o epossidica secondo le necessità. Il trefolo 3x2 è costituito avvolgendo tra loro 5 filamenti - 3 filamenti rettilinei, più 2 che si attorcigliano su questi con un elevato angolo di avvolgimento. Il rinforzo è un trefolo molto maneggevole che combina in se ottime proprietà meccaniche e di installazione. Questa tipologia di nastro a media densità si rivela particolarmente adatto per il rinforzo di elementi in CA, CAP quando impregnati con resina epossidica mentre risulta più adatto a strutture in muratura quando impregnato con malta cementizia. La nomenclatura indica:

- 3X2, la tipologia del trefolo;
- 12, la densità (12 wpi = 4,72 trefoli/cm);
- 12, la larghezza del nastro (12 inches = 305 mm);
- 500, la lunghezza del nastro (500 ft = 152 m).
- B, brass (ottone, lega di rame al 64% e zinco al 36%) tipologia di rivestimento del filo per migliorarne la durabilità.

Ideale per strutture in muratura

- il rinforzo di archi, volte e cupole soggetti a fessurazioni;
- incrementare la resistenza a compressione e a taglio di paramenti murari;
- ripristinare la resistenza a flessione e a presso flessione di pannelli murari contro il ribaltamento;
- vincolare maschi murari tramite fasce di piano;
- il consolidamento di volte e cupole soggette a fessurazioni;
- il consolidamento di colonne in muratura prevalentemente compresse.

Ideale per strutture in CA e CAP

- aumentare il confinamento e la resistenza all'impatto di elementi presso-inflessi; flessibilità di ancoraggio e facilità di installazione;
- ripristinare le proprietà di sezioni in CA a seguito della corrosione dell'armatura esistente; elevate resistenze a taglio e a flessione;
- il rinforzo di pareti e la loro difesa contro impatti violenti causati da detriti volanti
- facilità d'installazione.

CONFEZIONI

Il tessuto viene solitamente fornito in rotoli da 305 mm (1 ft) di larghezza e 152 m (500 ft) di lunghezza. Il peso di ciascun rotolo, comprensivo della bobina, è di circa 93 Kg.

RACCOMANDAZIONI

Maneggiando il tessuto indossare indumenti protettivi ed occhiali ed attenersi alle istruzioni concernenti le modalità di applicazione del materiale.

Contatto con pelle: non è richiesta alcuna misura speciale.

Stoccaggio in cantiere: conservare in luogo coperto ed asciutto e lontano da sostanze che ne possano compromettere l'integrità

ESEMPI DI APPLICAZIONE

Per conoscere progetti di rinforzo strutturale mediante tessuti in acciaio consultare la sezione Applicazioni al sito www.fidiaglobalservice.com.

QUALITA' & CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale, su richiesta, è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDSTEEL 3X2-B 12-12-500 HARDWIRE™

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI ACCIAIO UHTSS AD ALTISSIMA
RESISTENZA RIVESTITO CON OTTONE PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services



HARDWIRE
COMPOSITE ARMOR SYSTEMS

MODALITA' DI APPLICAZIONE*1) Preparazione del sottofondo*

Spazzolare il substrato da polveri, grassi e parti incoerenti. Pulire le armature da eventuali tracce di ruggine e sigillare possibili fessurazioni mediante iniezioni.

2) Rasatura della superficie

Eeguire la rasatura della superficie sino a 1 cm al fine di eliminare eventuali asperità e materiali incoerenti.

In caso il tessuto venga impregnato con resina, proseguire con le fasi (3), (4), (5), (6) e (7).

Nel caso in cui, invece, venga utilizzata la malta, procedere con le fasi (5), (6) e (7).

3) Applicazione del primer di aggrappo

Stendere sulla superficie, a pennello o a rullo, uno strato di primer ed attendere la sua maturazione per circa 2/3 ore.

4) Stesura resina epossidica primo strato

Applicare una prima mano di resina adesivo-impregnante.

5) Stesura del tessuto

Assicurandosi che lo strato sia ancora "fresco", applicare il tessuto prestando attenzione a non formare grinze, spianandolo manualmente oppure passando il rullo che elimina le eventuali bolle d'aria.

6) Impregnazione del tessuto

Manualmente o per mezzo di una macchina, impregnare il tessuto precedentemente tagliato nelle dimensioni richieste.

7) Finitura

Applicare una seconda mano di resina e terminare con un ulteriore spolvero di sabbia su resina; procedere infine con l'applicazione di una pittura epossidica e poliuretana, indispensabile per la protezione del sistema di rinforzo.

NOTE LEGALI

I consigli tecnici che FIDIA S.r.l. Technical Global Services fornisce, verbalmente o per iscritto come assistenza al cliente o all'applicatore in base alle sue esperienze, corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono impegnativi e non dimostrano alcuna relazione legale contrattuale né obbligo accessorio col contratto di compravendita. Essi non dispensano l'acquirente dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto concerne la loro idoneità relativamente all'uso previsto. Per il resto sono valide le nostre condizioni commerciali. Diffornità dall'originale predetto per contenuto e/o utilizzo non implicherà alcuna responsabilità da parte dell'azienda FIDIA S.r.l. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che la presente scheda e gli eventuali valori riportati siano validi per la partita di prodotto di suo interesse e non siano superati in quanto sostituiti da edizioni successive e/o nuove formulazioni del prodotto. Nel dubbio, contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

Elenco delle figure

1.1	La ziqqurat di Ur (c. 2125 a.C.)(Watkin 1990)	1
1.2	Murature miste in pietrame e mattoni e muratura con cordolo in cls (Carbone et al. 2001)	3
1.3	Classificazione delle murature in base all'apparecchiatura muraria (Carbone et al. 2001).	4
1.4	Andamento delle fessurazioni in un elemento di muratura (a sinistra) e formazione di pilastri indipendenti (a destra) (Carbone et al. 2001).	6
1.5	Resistenza della muratura in funzione della resistenza del mattone (a dx) e della malta (a sx) (Carbone et al. 2001).	7
1.6	Resistenza della muratura in funzione della densità del mattone (a dx) e del rapporto tra spessore del giunto h_m e altezza del laterizio h_b (a sx) (Carbone et al. 2001).	7
1.7	Tensioni nel complesso mattoni-malta (Carbone et al. 2001).	9
1.8	Dominio di sicurezza di un mattone sottoposto a compressione verticale e trazione orizzontale (Carbone et al. 2001).	11
1.9	Criterio di rottura di Hilsdorf per la muratura in compressione semplice (Carbone et al. 2001).	11
1.10	Modalità di rottura di un pannello murario (Tomazevic 2000).	13
1.11	Criterio di crisi per trazione di un pannello murario (Hendry 1986).	15
2.1	Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito (<i>CNR-DT 200/2004</i> 2008).	18
2.2	Perdita di aderenza tra rinforzo e substrato.	23
2.3	Different bond specimens (Nakaba et al. 2001)	24
2.4	Classification of bond tests (Yao, Teng e Chen 2005)	24
2.5	Alcuni esempi di prove di adesione eseguite su prismi in muratura: (a) Basilio 2007, (b) Carloni e Subramaniam 2009, (c) Carrara, Ferretti e Freddi 2013	25
2.6	Esempi di set-up per prove di tipo SL (a) e DL (b) (Valluzzi et al. 2012)	26
2.7	Forza massima trasmissibile da un rinforzo di FRP (<i>CNR-DT R1 200/2013</i> 2013).	28
2.8	Calibrazione sperimentale: (a) laterizi, (b) pietre naturali-tufi, (c) pietre naturali-calcarenite e pietra leccese.	33
2.9	Esempio di legame di aderenza " $\tau_b - s$ " (<i>CNR-DT R1 200/2013</i> 2013)	33
3.1	Programma generale	35
3.2	Preparazione dei provini in malta: (a) malta utilizzata, (b) miscelatrice, (c)-(d) casseri utilizzati.	39

3.3	Provini in malta: (a) provini prismatici 160x40x40 <i>mm</i> , (b) incollaggio dei mattoni in malta, (c) particolare degli spigoli arrotondati, (d) blocchi unici 110x120x250 <i>mm</i>	40
3.4	Confezionamento dei prismi murari.	41
3.5	Confezionamento dei prismi murari: (a) prisma appena confezionato, (b) taglio dei prismi, (c) arrotondamento spigoli, (d) dimensioni medie di un pilastrino.	42
3.6	Configurazione dei provini: (a) SL mattone in laterizio, (b) SL blocco di malta con fibra di vetro, (c) SL blocco di malta con fibra di carbonio.	43
3.7	Configurazione dei pilastrini in muratura con le diverse lunghezze di adesione: (a) 65 <i>mm</i> , (b) 130 <i>mm</i> , (c) 195 <i>mm</i> , (d) 260 <i>mm</i> con ancoraggio.	44
3.8	Fasi di applicazione del rinforzo al substrato: (a) mascheratura dei provini, (b) applicazione del primer, (c) posizionamento del tessuto, (d) impregnazione finale.	45
3.9	Fasi di applicazione del rinforzo in fibra di acciaio: (a) mascheratura e applicazione primer, (b) applicazione rinforzo e impregnazione, (c) applicazione dell'ancoraggio.	46
3.10	Configurazione estensimetri (strain gauges): (a) SL mattone in laterizio, (b) SL blocco di malta con fibra di vetro, (c) SL blocco di malta con fibra di carbonio.	47
3.11	Applicazione degli estensimetri (strain gauges).	48
3.12	Configurazione potenziometri: (a) su blocco di malta, (b) su pilastrino in muratura.	48
4.1	Prova a flessione: (a) macchina di prova, (b) posizionamento del provino, (c) rottura.	50
4.2	Prova a flessione: immagini dei campioni dopo la rottura.	50
4.3	Prova a compressione semplice: (a) pressa utilizzata, (b) un provino dopo la prova.	51
4.4	Prova di splitting su mattone: (a) pressa utilizzata, (b) esecuzione della prova, (c) campione dopo la prova.	53
4.5	Prove di pull-off: (a) configurazione della prova, (b) tipologie di rottura (<i>ASTM C1583-04</i> 2004).	54
4.6	Prove di pull-off: (a) preparazione provini, (b) incisione tramite fresa, (c) incollaggio del tassello.	54
4.7	Prove di pull-off: (a) attrezzatura utilizzata, (b) campioni dopo la prova.	55
4.8	Determinazione del modulo elastico: (a) cicli di carico, (b) diagramma tensione-deformazione relativo al campione S8-08.	56
4.9	Determinazione del modulo elastico: (a) macchina utilizzata, (b) strumentazione provino.	57
4.10	Prova a flessione: (a) set-up di prova, (b) provini dopo la rottura, (c) macchina "Officine Galileo", (d) posizionamento provino.	59
4.11	Prova a compressione semplice dei blocchi di malta: (a) esecuzione della prova, (b) rottura del provino, (c) particolare della tipica rottura a "clessidra".	59
4.12	Prova a compressione semplice dei prismi di malta: (a) esecuzione della prova, (b) rottura del provino, (c) particolare della tipica rottura a "clessidra".	60
4.13	Compressione strumentata dei prismi in malta: (a) set-up di prova, (b) rottura del provino.	62

4.14	Prismi in malta: diagramma tensione-deformazione delle prove a compressione strumentata.	62
4.15	Splitting su campioni di malta: (a) set-up di prova, (b) rottura campione, (c) campioni dopo la prova.	63
4.16	Modulo elastico della malta: (a) campione durante la prova, (b) diagramma carico-tempo.	65
4.17	Modulo elastico della malta: diagramma tensione-deformazione delle tre prove.	65
4.18	Splitting muratura: (a) apparato di prova, (b) campione fratturato.	67
4.19	Splitting muratura: campioni ricomposti dopo la prova.	67
4.20	Compressione dei prismi in muratura: (a) strumentazione provino, (b) apparato di prova, (c) esecuzione della prova.	68
4.21	Compressione dei prismi in muratura: campioni dopo la prova.	68
4.22	Compressione dei prismi in muratura: diagramma tensione-deformazione delle tre prove.	69
4.23	Trazioni sui compositi: (a) tipologie di compositi testati, (b) set-up di prova.	70
4.24	Trazioni sui compositi, campioni dopo le prove: (a) vetro, (b) basalto, (c) carbonio, (d) acciaio.	71
4.25	Trazioni sulle resine: (a) confezionamento, (b) apparato di prova.	72
4.26	Trazioni sulle resine, alcuni campioni dopo le prove: (a) Fidprimer, (b) Fidsaturant HM, (c) Fidsaturant HM-T.	73
5.1	Set-up per il portale: (a) vista frontale, (b) particolare del sistema di ritenzione del campione.	77
5.2	Set-up per macchina universale Galdabini Sun 60: (a) vista frontale della macchina, (b) schematizzazione dell'apparato di prova, vista frontale e laterale.	77
5.3	Campione SL-Glass-02: geometria del provino.	79
5.4	Campione SL-Glass-02: grafici delle principali grandezze analizzate.	80
5.5	Campione SL-Glass-02: (a) apparato di prova, (b) campione dopo la prova.	81
5.6	Campione SL-Glass-04: geometria del provino e apparato di prova.	81
5.7	Campione SL-Glass-04: grafici delle principali grandezze analizzate.	82
5.8	Campione SL-Glass-04: (a) apparato di prova, (b) campione dopo la prova.	83
5.9	Campione SL-Carbon-02: geometria del provino.	83
5.10	Campione SL-Carbon-02: grafici delle principali grandezze analizzate.	84
5.11	Campione SL-Carbon-02: (a) apparato di prova, (b) campione dopo la prova.	85
5.12	Campione SL-Basalt-03: geometria del provino e apparato di prova.	86
5.13	Campione SL-Basalt-03: grafici delle principali grandezze analizzate.	87
5.14	Campione SL-Basalt-03: campione dopo la rottura.	87
5.15	Campione SL-Steel-01: geometria del provino e apparato di prova.	88
5.16	Campione SL-Steel-01: grafici delle principali grandezze analizzate.	88
5.17	Campione SL-Steel-01: campione dopo la rottura.	89
5.18	Prove di adesione su mattone: esempi di rotture riscontrate.	91
5.19	Prove di adesione su mattone: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro.	92
5.20	Prove di adesione su mattone: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.	93
5.21	Prove di adesione su mattone: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto.	94
5.22	Prove di adesione su mattone: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio.	95

5.23	Prove di adesione su mattone: schema della disposizione degli strain-gauges e sistema di riferimento adottato.	96
5.24	Prove di adesione su mattone: esempi di profili di deformazione per le quattro tipologie di rinforzo.	97
5.25	Prove di adesione su mattone: deformazioni dell'estremità caricata corrispondenti al carico massimo.	98
5.26	Prove di adesione su mattone: moduli elastici calcolati durante le prove di adesione.	99
5.27	Prove di adesione su mattone: energia di frattura, $G_{f,sg}$	100
5.28	Prove di adesione su blocchi di malta: tipologie di provino utilizzate, (a) con fibre di vetro, (b) con fibre di carbonio.	102
5.29	Campione Malta-G-02f: geometria del provino e apparato di prova.	104
5.30	Campione Malta-G-02f: grafici delle principali grandezze analizzate.	105
5.31	Campione Malta-G-02f: campione dopo la rottura.	105
5.32	Campione Malta-C-03: geometria del provino e apparato di prova.	106
5.33	Campione Malta-C-03: grafici delle principali grandezze analizzate.	107
5.34	Campione Malta-C-03: campione dopo la rottura.	107
5.35	Prove di adesione su blocchi di malta: esempi di rotture riscontrate.	108
5.36	Prove di adesione su blocchi di malta: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro.	109
5.37	Prove di adesione su blocchi di malta: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.	110
5.38	Prove di adesione su blocchi di malta: schema della disposizione degli strain-gauges e sistema di riferimento adottato, (a) per rinforzo in fibra di vetro, (b) per rinforzo in fibra di carbonio.	111
5.39	Prove di adesione su blocchi di malta: esempi di profili di deformazione, (a) fibre di vetro, (b) fibre di carbonio.	112
5.40	Prove di adesione su blocchi di malta: deformazioni dell'estremità caricata e moduli elastici dei campioni rinforzati con fibre di vetro.	112
5.41	Prove di adesione su blocchi di malta: energia di frattura $G_{f,sg}$ dei campioni rinforzati con fibre di vetro.	113
5.42	Prove di adesione su murature: lunghezze di adesione adottate.	115
5.43	Campione M-GFRP-065-01f: geometria del provino e apparato di prova.	117
5.44	Campione M-GFRP-065-01f: grafici delle principali grandezze analizzate.	118
5.45	Campione M-GFRP-065-01f: campione dopo la rottura.	118
5.46	Campione M-GFRP-130-06r: geometria del provino e apparato di prova.	119
5.47	Campione M-GFRP-130-06r: grafici delle principali grandezze analizzate.	120
5.48	Campione M-GFRP-130-06r: campione dopo la rottura.	120
5.49	Campione M-GFRP-195-02r: geometria del provino e apparato di prova.	121
5.50	Campione M-GFRP-195-02r: grafici delle principali grandezze analizzate.	122
5.51	Campione M-GFRP-195-02r: campione dopo la rottura.	122
5.52	Campione M-GFRP-anc-06f: geometria del provino e apparato di prova.	123
5.53	Campione M-GFRP-anc-06f: grafici delle principali grandezze analizzate.	124
5.54	Campione M-GFRP-anc-06f: campione dopo la rottura.	124
5.55	Campione M-CFRP-anc-08r: geometria del provino e apparato di prova.	125
5.56	Campione M-CFRP-anc-08r: grafici delle principali grandezze analizzate.	126
5.57	Campione M-CFRP-anc-08r: campione dopo la rottura.	126
5.58	Campione M-BFRP-anc-09f: geometria del provino e apparato di prova.	127
5.59	Campione M-BFRP-anc-09f: grafici delle principali grandezze analizzate.	128

5.60	Campione M-BFRP-anc-09f: campione dopo la rottura.	128
5.61	Campione M-SRP-anc-13r: geometria del provino e apparato di prova. . . .	129
5.62	Campione M-SRP-anc-13r: grafici delle principali grandezze analizzate. . .	130
5.63	Campione M-SRP-anc-13r: campione dopo la rottura.	130
5.64	Prove di adesione su murature: esempi di rotture riscontrate.	131
5.65	Prove di adesione su murature: esempio di curva carico-tempo di un campione con lunghezza di adesione di 195 mm.	132
5.66	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 65 mm.	134
5.67	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 130 mm.	135
5.68	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 195 mm.	136
5.69	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 260 mm.	137
5.70	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio e lunghezza di adesione di 195 mm.	138
5.71	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio e lunghezza di adesione di 260 mm.	139
5.72	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto e lunghezza di adesione di 195 mm.	140
5.73	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto e lunghezza di adesione di 260 mm.	141
5.74	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio e lunghezza di adesione di 195 mm.	142
5.75	Prove di adesione su murature: curve e diagrammi relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio e lunghezza di adesione di 195 mm e ancoraggio finale.	143
5.76	Prove di adesione su murature: istogramma dei valori medi di energia di frattura per tipologia di rinforzo.	144
6.1	Modalità di rottura: (a) tipologie di rotture riscontrate, (b) esempio di distacco parziale.	146
6.2	Resistenze e spostamenti, ottenuti nelle prove su singolo mattone, per varie tipologie di rinforzo: (a) curve carico-tempo per vetro e carbonio, (b) curve carico-tempo per basalto e acciaio, (c) istogramma dei valori medi di carico massimo, (d) istogramma degli spostamenti medi LE a P_{max}	147

6.3	Resistenze e spostamenti, ottenuti nelle prove su blocco di malta, per le due tipologie di rinforzo utilizzate: (a) curve carico-tempo per vetro e carbonio, (b) istogramma dei valori medi di carico massimo, (c) istogramma degli spostamenti medi LE a P_{max}	149
6.4	Resistenze nelle prove su prismi in muratura: (a) curve carico-tempo per vetro e carbonio, (b) curve carico-tempo per basalto e acciaio, (c) istogramma dei valori medi di carico di picco.	150
6.5	Spostamenti nelle prove su prismi in muratura: (a) curve carico-spostamento per vetro e carbonio, (b) curve carico-spostamento per basalto e acciaio, (c) istogramma degli spostamenti medi LE corrispondenti al carico di primo picco.	151
6.6	Confronto fra diverse tipologie di substrato nel caso di rinforzo in fibra di vetro: (a) curve carico-tempo, (b) curve carico-spostamento, (c) istogramma dei valori medi di carico massimo, (d) istogramma dei valori medi di spostamento all'estremità caricata.	153
6.7	Confronto fra diverse tipologie di substrato nel caso di rinforzo in fibra di carbonio: (a) curve carico-tempo, (b) curve carico-spostamento, (c) istogramma dei valori medi di carico massimo, (d) istogramma dei valori medi di spostamento all'estremità caricata.	154
6.8	Confronto fra diverse lunghezze di adesione: (a) curve carico-tempo per provini con $L_a = 65mm$ e $L_a = 130mm$, (b) curve carico-tempo per provini con $L_a = 195mm$ e $L_a = 260mm$, (c) curve carico-spostamento per provini con $L_a = 65mm$ e $L_a = 130mm$, (d) curve carico-spostamento per provini con $L_a = 195mm$ e $L_a = 260mm$	155
6.9	Confronto fra diverse lunghezze di adesione: istogramma con i valori di carico massimo per tutte le prove.	156
6.10	Confronto fra diverse lunghezze di adesione: istogramma con i valori di spostamento all'estremità caricata per tutte le prove.	156
6.11	Esempio di superficie di rottura per un campione con L_a pari a $65 mm$; è facilmente visibile l'ispessimento di materiale in corrispondenza del giunto di malta.	158
12	Trazione fibre di vetro: diagramma tensione-deformazione delle sei prove.	166
13	Trazione fibre di basalto: diagramma tensione-deformazione delle sei prove.	166
14	Trazione fibre di carbonio: diagramma tensione-deformazione delle sei prove.	167
15	Trazione fibre di acciaio: diagramma tensione-deformazione delle sei prove.	168
16	Trazione resine: grafico dei valori medi di (a) tensione, (b) deformazione ultima, (c) modulo elastico.	170
17	Campione SL-Glass-01: geometria del provino e apparato di prova.	176
18	Campione SL-Glass-01: grafici delle principali grandezze analizzate.	177
19	Campione SL-Glass-01: campione dopo la prova.	177
20	Campione SL-Glass-03: geometria del provino e apparato di prova.	178
21	Campione SL-Glass-03: grafici delle principali grandezze analizzate.	179
22	Campione SL-Glass-03: campione dopo la prova.	179
23	Campione SL-Glass-05: geometria del provino e apparato di prova.	180
24	Campione SL-Glass-05: grafici delle principali grandezze analizzate.	181
25	Campione SL-Glass-05: campione dopo la prova.	181
26	Campione SL-Carbon-01: geometria del provino e apparato di prova.	182
27	Campione SL-Carbon-01: grafici delle principali grandezze analizzate.	183

28	Campione SL-Carbon-01: campione dopo la prova.	183
29	Campione SL-Carbon-03: geometria del provino e veduta della macchina di prova.	184
30	Campione SL-Carbon-03: grafici delle principali grandezze analizzate.	185
31	Campione SL-Carbon-03: apparato di prova e campione dopo la rottura.	185
32	Campione SL-Carbon-04: geometria del provino e apparato di prova.	186
33	Campione SL-Carbon-04: grafici delle principali grandezze analizzate.	187
34	Campione SL-Carbon-04: apparato di prova e campione dopo la rottura.	187
35	Campione SL-Carbon-05: geometria del provino e apparato di prova.	188
36	Campione SL-Carbon-05: grafici delle principali grandezze analizzate.	189
37	Campione SL-Carbon-05: apparato di prova e campione dopo la rottura.	189
38	Campione SL-Basalt-01: geometria del provino e apparato di prova.	190
39	Campione SL-Basalt-01: grafici delle principali grandezze analizzate.	191
40	Campione SL-Basalt-01: campione dopo la rottura.	191
41	Campione SL-Basalt-02: geometria del provino e apparato di prova.	192
42	Campione SL-Basalt-02: grafici delle principali grandezze analizzate.	193
43	Campione SL-Basalt-02: campione dopo la rottura.	193
44	Campione SL-Basalt-04: geometria del provino e apparato di prova.	194
45	Campione SL-Basalt-04: grafici delle principali grandezze analizzate.	195
46	Campione SL-Basalt-04: campione dopo la rottura.	195
47	Campione SL-Basalt-05: geometria del provino e apparato di prova.	196
48	Campione SL-Basalt-05: grafici delle principali grandezze analizzate.	197
49	Campione SL-Basalt-05: campione dopo la rottura.	197
50	Campione SL-Steel-02: geometria del provino e apparato di prova.	198
51	Campione SL-Steel-02: grafici delle principali grandezze analizzate.	199
52	Campione SL-Steel-02: campione dopo la rottura.	199
53	Campione SL-Steel-03: geometria del provino e apparato di prova.	200
54	Campione SL-Steel-03: grafici delle principali grandezze analizzate.	201
55	Campione SL-Steel-03: campione dopo la rottura.	201
56	Campione SL-Steel-04: geometria del provino e apparato di prova.	202
57	Campione SL-Steel-04: grafici delle principali grandezze analizzate.	203
58	Campione SL-Steel-05: geometria del provino e apparato di prova.	204
59	Campione SL-Steel-05: grafici delle principali grandezze analizzate.	205
60	Campione SL-Steel-05: campione dopo la rottura.	205
61	Campione Malta-G-01f: geometria del provino e apparato di prova.	206
62	Campione Malta-G-01f: grafici delle principali grandezze analizzate.	207
63	Campione Malta-G-01f: campione dopo la rottura.	207
64	Campione Malta-G-03f: geometria del provino e apparato di prova.	208
65	Campione Malta-G-03f: grafici delle principali grandezze analizzate.	209
66	Campione Malta-G-03f: campione dopo la rottura.	209
67	Campione Malta-C-01: geometria del provino e apparato di prova.	210
68	Campione Malta-C-01: grafici delle principali grandezze analizzate.	210
69	Campione Malta-C-01: campione dopo la rottura.	211
70	Campione Malta-C-05: geometria del provino e apparato di prova.	212
71	Campione Malta-C-05: grafici delle principali grandezze analizzate.	212
72	Campione Malta-C-05: campione dopo la rottura.	213
73	Campione M-GFRP-065-01r: geometria del provino e apparato di prova.	214
74	Campione M-GFRP-065-01r: grafici delle principali grandezze analizzate.	215
75	Campione M-GFRP-065-01r: campione dopo la rottura.	215

76	Campione M-GFRP-065-05r: geometria del provino e apparato di prova. . .	216
77	Campione M-GFRP-065-05r: grafici delle principali grandezze analizzate. .	217
78	Campione M-GFRP-065-05r: campione dopo la rottura.	217
79	Campione M-GFRP-130-02f: geometria del provino e apparato di prova. . .	218
80	Campione M-GFRP-130-02f: grafici delle principali grandezze analizzate. .	219
81	Campione M-GFRP-130-02f: campione dopo la rottura.	219
82	Campione M-GFRP-130-03r: geometria del provino e apparato di prova. . .	220
83	Campione M-GFRP-130-03r: grafici delle principali grandezze analizzate. .	221
84	Campione M-GFRP-130-03r: campione dopo la rottura.	221
85	Campione M-GFRP-195-03f: geometria del provino e apparato di prova. . .	222
86	Campione M-GFRP-195-03f: grafici delle principali grandezze analizzate. .	223
87	Campione M-GFRP-195-03f: campione dopo la rottura.	223
88	Campione M-GFRP-195-05f: geometria del provino e apparato di prova. . .	224
89	Campione M-GFRP-195-05f: grafici delle principali grandezze analizzate. .	225
90	Campione M-GFRP-195-05f: campione dopo la rottura.	225
91	Campione M-GFRP-anc-04f: geometria del provino e apparato di prova. . .	226
92	Campione M-GFRP-anc-04f: grafici delle principali grandezze analizzate. .	227
93	Campione M-GFRP-anc-04f: campione dopo la rottura.	227
94	Campione M-GFRP-anc-10f: geometria del provino e apparato di prova. . .	228
95	Campione M-GFRP-anc-10f: grafici delle principali grandezze analizzate. .	229
96	Campione M-GFRP-anc-10f: campione dopo la rottura.	229
97	Campione M-CFRP-195-02dx: geometria del provino e apparato di prova. .	230
98	Campione M-CFRP-195-02dx: grafici delle principali grandezze analizzate. .	231
99	Campione M-CFRP-195-02dx: campione dopo la rottura.	231
100	Campione M-CFRP-195-05dx: geometria del provino e apparato di prova. .	232
101	Campione M-CFRP-195-05dx: grafici delle principali grandezze analizzate. .	233
102	Campione M-CFRP-195-05dx: campione dopo la rottura.	233
103	Campione M-CFRP-195-13dx: geometria del provino e apparato di prova. .	234
104	Campione M-CFRP-195-13dx: grafici delle principali grandezze analizzate. .	235
105	Campione M-CFRP-195-13dx: campione dopo la rottura.	235
106	Campione M-CFRP-anc-07r: geometria del provino e apparato di prova. . .	236
107	Campione M-CFRP-anc-07r: grafici delle principali grandezze analizzate. .	237
108	Campione M-CFRP-anc-07r: campione dopo la rottura.	237
109	Campione M-CFRP-anc-13f: geometria del provino e apparato di prova. . .	238
110	Campione M-CFRP-anc-13f: grafici delle principali grandezze analizzate. .	239
111	Campione M-CFRP-anc-13f: campione dopo la rottura.	239
112	Campione M-BFRP-195-01sx: geometria del provino e apparato di prova. .	240
113	Campione M-BFRP-195-01sx: grafici delle principali grandezze analizzate. .	241
114	Campione M-BFRP-195-01sx: campione dopo la rottura.	241
115	Campione M-BFRP-195-03dx: geometria del provino e apparato di prova. .	242
116	Campione M-BFRP-195-03dx: grafici delle principali grandezze analizzate. .	243
117	Campione M-BFRP-195-03dx: campione dopo la rottura.	243
118	Campione M-BFRP-195-06sx: geometria del provino e apparato di prova. .	244
119	Campione M-BFRP-195-06sx: grafici delle principali grandezze analizzate. .	245
120	Campione M-BFRP-195-06sx: campione dopo la rottura.	245
121	Campione M-BFRP-anc-07f: geometria del provino e apparato di prova. . .	246
122	Campione M-BFRP-anc-07f: grafici delle principali grandezze analizzate. .	247
123	Campione M-BFRP-anc-07f: campione dopo la rottura.	247
124	Campione M-BFRP-anc-08f: geometria del provino e apparato di prova. . .	248

125	Campione M-BFRP-anc-08f: grafici delle principali grandezze analizzate. . .	249
126	Campione M-BFRP-anc-08f: campione dopo la rottura.	249
127	Campione M-SRP-195-08dx: geometria del provino e apparato di prova. . .	250
128	Campione M-SRP-195-08dx: grafici delle principali grandezze analizzate. . .	251
129	Campione M-SRP-195-08dx: campione dopo la rottura.	251
130	Campione M-SRP-195-10r: geometria del provino e apparato di prova. . . .	252
131	Campione M-SRP-195-10r: grafici delle principali grandezze analizzate. . .	253
132	Campione M-SRP-195-10r: campione dopo la rottura.	253
133	Campione M-SRP-195-14f: geometria del provino e apparato di prova. . . .	254
134	Campione M-SRP-195-14f: grafici delle principali grandezze analizzate. . . .	255
135	Campione M-SRP-195-14f: campione dopo la rottura.	255
136	Campione M-SRP-anc-10sx: geometria del provino e apparato di prova. . . .	256
137	Campione M-SRP-anc-10sx: grafici delle principali grandezze analizzate. . .	257
138	Campione M-SRP-anc-10sx: campione dopo la rottura.	257
139	Campione M-SRP-anc-14r: geometria del provino e apparato di prova. . . .	258
140	Campione M-SRP-anc-14r: grafici delle principali grandezze analizzate. . .	259
141	Campione M-SRP-anc-14r: campione dopo la rottura.	259

Elenco delle tabelle

1.1	Classificazione delle murature in base agli elementi utilizzati (Carbone et al. 2001).	2
1.2	Classificazione delle murature in base alla tipologia strutturale (Carbone et al. 2001).	3
1.3	Classificazione delle murature in base all'apparecchiatura muraria (Carbone et al. 2001).	4
1.4	Formule di derivazione empirica per la determinazione della resistenza della muratura (Carbone et al. 2001).	8
2.1	Confronto tra le proprietà delle fibre e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione (valori indicativi) (<i>CNR-DT 200/2004</i> 2008)	19
2.2	Proprietà fisiche e meccaniche di due tipi di fibra di vetro (Minguzzi 1998) .	20
2.3	Proprietà fisiche e meccaniche delle fibre di carbonio (Minguzzi 1998)	21
2.4	Proprietà fisiche e meccaniche delle fibre di basalto (dati ricavati da scheda tecnica di prodotto "Fidia srl")	21
2.5	Proprietà fisiche e meccaniche delle resine epossidiche (Minguzzi 1998)	22
2.6	Modelli predittivi basati sulla definizione di una tensione tangenziale media	29
2.7	Modelli predittivi basati sull'espressione diretta del carico ultimo	29
2.8	Modelli predittivi basati sulla stima dell'energia di frattura. Parte 1	30
2.9	Modelli predittivi basati sulla stima dell'energia di frattura. Parte 2	31
3.1	Programma sperimentale di caratterizzazione dei materiali	37
3.2	Programma sperimentale delle prove di adesione	38
4.1	Proprietà meccaniche misurate (CoV tra parentesi), mattoni A6R55W	49
4.2	Flessione su tre punti, mattoni A6R55W	51
4.3	Compressione semplice, mattoni A6R55W	52
4.4	Splitting, mattoni A6R55W	53
4.5	Pull-off, mattoni A6R55W	55
4.6	Modulo elastico, mattoni A6R55W	57
4.7	Proprietà meccaniche misurate (CoV tra parentesi), malta T30V	58
4.8	Flessione su tre punti, malta T30V	60
4.9	Compressione semplice, malta T30V	61
4.10	Compressione strumentata, malta T30V	63
4.11	Splitting, malta T30V	64
4.12	Modulo elastico, malta T30V	64
4.13	Proprietà meccaniche misurate (CoV tra parentesi), prismi murari	66
4.14	Splitting muratura	66
4.15	Compressione strumentata, prismi in muratura.	69

4.16	Trazione assiale sui compositi: valori medi dei risultati sperimentali.	71
4.17	Trazione assiale sulle resine: valori medi dei risultati sperimentali.	73
5.1	Programma sperimentale delle prove di adesione su mattone.	78
5.2	Campione SL-Glass-02: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	79
5.3	Campione SL-Glass-02: risultati della prova.	80
5.4	Campione SL-Glass-04: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	82
5.5	Campione SL-Glass-04: risultati della prova.	82
5.6	Campione SL-Carbon-02: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	84
5.7	Campione SL-Carbon-02: risultati della prova.	84
5.8	Campione SL-Basalt-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	85
5.9	Campione SL-Basalt-03: risultati della prova.	85
5.10	Campione SL-Steel-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	86
5.11	Campione SL-Steel-01: risultati della prova.	86
5.12	Prove di adesione su mattone: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro.	92
5.13	Prove di adesione su mattone: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.	93
5.14	Prove di adesione su mattone: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto.	94
5.15	Prove di adesione su mattone: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio.	95
5.16	Prove di adesione su mattone: valori relativi a deformazioni e rigidezze dei campioni rinforzati con fibra di vetro.	97
5.17	Prove di adesione su mattone: valori relativi a deformazioni e rigidezze dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.	98
5.18	Prove di adesione su mattone: valori relativi a deformazioni e rigidezze dei campioni rinforzati con fibra di basalto.	99
5.19	Prove di adesione su mattone: valori relativi a deformazioni e rigidezze dei campioni rinforzati con fibra di acciaio.	100
5.20	Prove di adesione su mattone: energia di frattura.	101
5.21	Programma sperimentale delle prove di adesione su blocchi di malta.	103
5.22	Campione Malta-G-02f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	103
5.23	Campione Malta-G-02f: risultati della prova.	104
5.24	Campione Malta-C-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	106
5.25	Campione Malta-C-03: risultati della prova.	106
5.26	Prove di adesione su blocchi di malta: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro.	110
5.27	Prove di adesione su blocchi di malta: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio.	111
5.28	Prove di adesione su blocchi di malta: valori relativi a deformazioni e rigidezze.	113
5.29	Prove di adesione su blocchi di malta: energia di frattura.	114

5.30	Programma sperimentale delle prove di adesione su murature	116
5.31	Campione M-GFRP-065-01f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	117
5.32	Campione M-GFRP-065-01f: risultati della prova.	118
5.33	Campione M-GFRP-130-06r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	119
5.34	Campione M-GFRP-130-06r: risultati della prova.	120
5.35	Campione M-GFRP-195-02r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	121
5.36	Campione M-GFRP-195-02r: risultati della prova.	122
5.37	Campione M-GFRP-anc-06f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	123
5.38	Campione M-GFRP-anc-06f: risultati della prova.	124
5.39	Campione M-CFRP-anc-08r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	125
5.40	Campione M-CFRP-anc-08r: risultati della prova.	125
5.41	Campione M-BFRP-anc-09f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	127
5.42	Campione M-BFRP-anc-09f: risultati della prova.	128
5.43	Campione M-SRP-anc-13r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	129
5.44	Campione M-SRP-anc-13r: risultati della prova.	130
5.45	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 65 mm. . .	134
5.46	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 130 mm. .	135
5.47	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 195 mm. .	136
5.48	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di vetro e lunghezza di adesione di 260 mm. .	137
5.49	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio e lunghezza di adesione di 195 mm.	138
5.50	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di carbonio e lunghezza di adesione di 260 mm.	139
5.51	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto e lunghezza di adesione di 195 mm.	140
5.52	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di basalto e lunghezza di adesione di 260 mm.	141
5.53	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio e lunghezza di adesione di 195 mm.	142
5.54	Prove di adesione su murature: valori relativi a resistenze e spostamenti dei campioni rinforzati con fibra di acciaio e lunghezza di adesione di 195 mm e ancoraggio finale.	143
5.55	Prove di adesione su murature: valori medi di energia di frattura per tipologia di rinforzo.	144
6.1	Prove di adesione su mattone: risultati sperimentali per tutte le tipologie di rinforzo utilizzate.	148

6.2	Prove di adesione su mattone: risultati sperimentali per tutte le tipologie di rinforzo utilizzate.	149
6.3	Prove di adesione su murature: risultati sperimentali per le prove con lunghezza di adesione di 195 mm e quelle con ancoraggio, per tutte le tipologie di rinforzo utilizzate.	152
6.4	Confronto dei risultati sperimentali per prove con diversa lunghezza di adesione.	157
5	Trazione fibre di vetro	165
6	Trazione fibre di basalto	167
7	Trazione fibre di carbonio	168
8	Trazione fibre di acciaio	169
9	Trazione resine: Fidprimer	171
10	Trazione resine: Fidsaturant HM	172
11	Trazione resine: Fidsaturant HM-T	173
12	Campione SL-Glass-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	176
13	Campione SL-Glass-01: risultati della prova.	176
14	Campione SL-Glass-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	178
15	Campione SL-Glass-03: risultati della prova.	178
16	Campione SL-Glass-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	180
17	Campione SL-Glass-05: risultati della prova.	180
18	Campione SL-Carbon-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	182
19	Campione SL-Carbon-01: risultati della prova.	182
20	Campione SL-Carbon-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	184
21	Campione SL-Carbon-03: risultati della prova.	184
22	Campione SL-Carbon-04: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	186
23	Campione SL-Carbon-04: risultati della prova.	186
24	Campione SL-Carbon-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	188
25	Campione SL-Carbon-05: risultati della prova.	188
26	Campione SL-Basalt-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	190
27	Campione SL-Basalt-01: risultati della prova.	190
28	Campione SL-Basalt-02: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	192
29	Campione SL-Basalt-02: risultati della prova.	192
30	Campione SL-Basalt-04: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	194
31	Campione SL-Basalt-04: risultati della prova.	194
32	Campione SL-Basalt-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	196
33	Campione SL-Basalt-05: risultati della prova.	196

34	Campione SL-Steel-02: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	198
35	Campione SL-Steel-02: risultati della prova.	198
36	Campione SL-Steel-03: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	200
37	Campione SL-Steel-03: risultati della prova.	200
38	Campione SL-Steel-04: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	202
39	Campione SL-Steel-04: risultati della prova.	202
40	Campione SL-Steel-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	204
41	Campione SL-Steel-05: risultati della prova.	204
42	Campione Malta-G-01f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	206
43	Campione Malta-G-01f: risultati della prova.	206
44	Campione Malta-G-03f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	208
45	Campione Malta-G-03f: risultati della prova.	208
46	Campione Malta-C-01: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	210
47	Campione Malta-C-01: risultati della prova.	210
48	Campione Malta-C-05: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	212
49	Campione Malta-C-05: risultati della prova.	212
50	Campione M-GFRP-065-01r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	214
51	Campione M-GFRP-065-01r: risultati della prova.	214
52	Campione M-GFRP-065-05r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	216
53	Campione M-GFRP-065-05r: risultati della prova.	216
54	Campione M-GFRP-130-02f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	218
55	Campione M-GFRP-130-02f: risultati della prova.	218
56	Campione M-GFRP-130-03r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	220
57	Campione M-GFRP-130-03r: risultati della prova.	220
58	Campione M-GFRP-195-03f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	222
59	Campione M-GFRP-195-03f: risultati della prova.	222
60	Campione M-GFRP-195-05f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	224
61	Campione M-GFRP-195-05f: risultati della prova.	224
62	Campione M-GFRP-anc-04f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	226
63	Campione M-GFRP-anc-04f: risultati della prova.	226
64	Campione M-GFRP-anc-10f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	228
65	Campione M-GFRP-anc-10f: risultati della prova.	228

66	Campione M-CFRP-195-02dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	230
67	Campione M-CFRP-195-02dx: risultati della prova.	230
68	Campione M-CFRP-195-05dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	232
69	Campione M-CFRP-195-05dx: risultati della prova.	232
70	Campione M-CFRP-195-13dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	234
71	Campione M-CFRP-195-13dx: risultati della prova.	234
72	Campione M-CFRP-anc-07r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	236
73	Campione M-CFRP-anc-07r: risultati della prova.	236
74	Campione M-CFRP-anc-13f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	238
75	Campione M-CFRP-anc-13f: risultati della prova.	238
76	Campione M-BFRP-195-01sx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	240
77	Campione M-BFRP-195-01sx: risultati della prova.	240
78	Campione M-BFRP-195-03dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	242
79	Campione M-BFRP-195-03dx: risultati della prova.	242
80	Campione M-BFRP-195-06sx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	244
81	Campione M-BFRP-195-06sx: risultati della prova.	244
82	Campione M-BFRP-anc-07f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	246
83	Campione M-BFRP-anc-07f: risultati della prova.	246
84	Campione M-BFRP-anc-08f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	248
85	Campione M-BFRP-anc-08f: risultati della prova.	248
86	Campione M-SRP-195-08dx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	250
87	Campione M-SRP-195-08dx: risultati della prova.	250
88	Campione M-SRP-195-10r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	252
89	Campione M-SRP-195-10r: risultati della prova.	252
90	Campione M-SRP-195-14f: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	254
91	Campione M-SRP-195-14f: risultati della prova.	254
92	Campione M-SRP-anc-10sx: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	256
93	Campione M-SRP-anc-10sx: risultati della prova.	256
94	Campione M-SRP-anc-14r: geometria del provino e caratteristiche meccaniche del rinforzo.	258
95	Campione M-SRP-anc-14r: risultati della prova.	258