

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

D.I.C.A.M.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

Corso di Tecnica delle Costruzioni LS

**PROVE DI ADERENZA SU MATTONI E
MURETTI IN LATERIZIO RINFORZATI
CON GFRP**

Tesi di Laurea di:
Alessandro Bellini

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ing. **Claudio Mazzotti**

Correlatore:
Dott. Ing. **Barbara Ferracuti**

Anno Accademico 2010 - 2011

Sessione II

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto il Prof. Claudio Mazzotti, relatore di questa tesi, per la gentile e puntuale collaborazione.

Vorrei esprimere poi la mia più sincera gratitudine al mio correlatore, Dott. Ing. Barbara Ferracuti, per la disponibilità mostrata in ogni momento e per le preziosi raccomandazioni.

Un sentito ringraziamento anche a tutto il personale del LISG (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica) per il supporto fornito e per i tanti consigli utili.

Ringrazio inoltre i miei genitori che, con il loro sostegno morale ed economico, mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

– Indice –

Introduzione 7

Capitolo 1

**CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COMPOSITI E
APPLICAZIONI NEL RINFORZO STRUTTURALE..... 9**

1.1 Descrizione dei materiali compositi ed impieghi 9

1.2 Caratteristiche dei materiali compositi 11

1.3 Fibre utilizzate nei compositi FRP 19

 1.3.1 Fibre di carbonio 21

 1.3.2 Fibre di vetro 23

 1.3.3 Fibre aramidiche 26

1.4 Analisi delle caratteristiche meccaniche e impieghi delle fibre 27

1.5 Tessuti non impregnati 29

1.6 Matrice 30

 1.6.1 Resine termoindurenti 31

 1.6.1.1 Resine epossidiche 32

 1.6.1.2 Resine poliestere 33

 1.6.1.3 Resine vinilestere 33

 1.6.2 Resine termoplastiche 34

 1.6.3 Matrici cementizie 35

1.7 Riempitivi 35

1.8 Adesivi 36

1.9 Tecniche di produzione dei compositi FRP preformati di interesse per
 l'ingegneria civile 38

 1.9.1 Laminazione manuale 39

 1.9.2 Lavorazione a spruzzo 40

 1.9.3 Avvolgimento 40

 1.9.4 Sacco sotto vuoto 41

 1.9.5 Stampaggio a compressione con controstampo rigido 42

 1.9.6 Pultrusione 42

1.10 Impiego dei materiali compositi nell'ambito del rinforzo strutturale 44

1.11 Preparazione della superficie 46

1.12 Tecniche di rinforzo di strutture in c.a., c.a.p e muratura 50

1.13 Modalità di crisi di elementi rinforzati mediante FRP	55
1.13.1 Elementi in c.a.	55
1.13.2 Muratura	59

Capitolo 2

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI NELLE PROVE 61

2.1 Materiali impiegati nel corso della campagna sperimentale	61
2.2 Caratteristiche dei materiali utilizzati.....	62
2.2.1 Mattoni.....	63
2.2.2 Malta utilizzata per la realizzazione dei campioni	65
2.2.3 Malta utilizzata per la rasatura	65
2.2.4 GFRP	67
2.3 Campioni di muratura realizzati	68
2.4 Sigle dei provini	70
2.5 Prove di caratterizzazione dei materiali	76
2.5.1 Prove di compressione sui mattoni.....	77
2.5.2 Prove di flessione sui mattoni.....	81
2.5.3 Prove a compressione su malta.....	84
2.5.4 Prove di trazione indiretta (brasiliane) su malta.....	85
2.5.5 Prova di strappo normale (pull-off) su campione B4A1a	87

Capitolo 3

REALIZZAZIONE E PREPARAZIONE DEI CAMPIONI PER LE PROVE 91

3.1 Preparazione dei mattoni non rasati	91
3.2 Preparazione dei mattoni rasati	94
3.3 Preparazione dei campioni di muratura.....	95
3.3.1 Taglio dei muretti, delimitazione della superficie di incollaggio e preparazione per l'applicazione dei rinforzi	102
3.4 Applicazione dei rinforzi	108

Capitolo 4

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA NELLE PROVE..... 113

4.1 Descrizione degli strumenti utilizzati	113
4.2 Trasduttori di spostamento - LVDT	113
4.3 Estensimetri	118
4.3.1 Modalità di applicazione degli estensimetri	131
4.4 Cella di carico	133
4.5 Sistema di acquisizione.....	137

Capitolo 5

SETUP DI PROVA..... 141

5.1 Introduzione	141
5.2 Descrizione del setup di prova.....	141
5.3 Setup estensimetri	152
5.4 Posizionamento LVDT	155
5.5 Cella di carico	158
5.6 Modalità di prova.....	159

Capitolo 6

RISULTATI DELLE PROVE..... 163

6.1 Introduzione	163
6.2 Prove di aderenza su mattoni e muretti non rasati.....	164
6.2.1 Prova B1A2a.....	164
6.2.2 Prova B1A1a.....	181
6.2.3 Prova M1A1a.....	185
6.2.4 Prova M1A1c.....	196
6.2.5 Prova B2A1a.....	201
6.2.6 Prova B2A2a.....	209
6.2.7 Prova M2A1a.....	226
6.2.8 Prova M2A1c.....	234
6.2.9 Prova B3A2a.....	239
6.2.10 Prova B3A1a.....	251
6.2.11 Prova M3A1a.....	256
6.2.12 Prova M3A1c.....	267
6.2.13 Prova B4A1a.....	271

6.2.14 Prova B4A2a	279
6.2.15 Prova M4A1c.....	290
6.2.16 Prova M4A1a.....	299
6.3 Prove di aderenza su mattoni e muretti con rasatura tipo B.....	304
6.3.1 Prova B3B1a.....	304
6.3.2 Prova M3B1a.....	313
6.3.3 Prova M3B1c.....	322
6.3.4 Prova B4B1a.....	326
6.3.5 Prova M4B1a.....	335
6.3.6 Prova M4B1c.....	343
6.4 Prove di aderenza su mattoni e muretti con rasatura tipo C.....	347
6.3.1 Prova B3C1a.....	347
6.3.2 Prova M3C1a.....	357
6.3.3 Prova M3C1c.....	365
6.3.4 Prova B4C1a.....	369
6.3.5 Prova M4C1c.....	378
6.3.6 Prova M4C1a.....	386

Capitolo 7

CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI E CONSIDERAZIONI **.....393**

7.1 Descrizione dei confronti sviluppati.....	393
7.2 Confronto tra le forze massime registrate nel corso delle prove di aderenza	394
7.3 Confronto dei grafici carico-allungamento ottenuti per prove analoghe.	399
7.4 Diagrammi carico-allungamento ottenuti con due diversi metodi a confronto.....	408
7.5 Confronto generale dei diagrammi carico-allungamento in funzione della tipologia di campione e della finitura superficiale	419
7.6 Calibrazione di opportune leggi tensione tangenziale-scorrimento per le prove svolte e confronti	426

Conclusioni 443

Bibliografia 445

INTRODUZIONE

La campagna sperimentale che si intende sviluppare ha come obiettivo lo svolgimento di prove di aderenza tra FRP e substrato utilizzando diverse tipologie di mattoni e con diverse finiture della superficie.

Le prove sono state condotte applicando il rinforzo sia sul singolo mattone, sia su campioni di muratura costituiti ognuno da sei mattoni pieni disposti su una unica fila.

Per quanto riguarda il trattamento superficiale, sono state indagate le caratteristiche di aderenza applicando il rinforzo direttamente sulla superficie oppure dopo aver effettuato preventivamente una rasatura sia con malta a base di calce idraulica naturale, sia con malta cementizia bicomponente polimero modificata caratterizzata da elevate caratteristiche di adesione e resistenza.

Tra le possibili variabili che intervengono sulla massima forza sopportabile dal rinforzo, si intende indagare il comportamento dei campioni utilizzando la stessa tipologia di tessuto in fibra di vetro, mantenendo fissati i parametri lunghezza di ancoraggio e larghezza del rinforzo e variando solo le caratteristiche del substrato utilizzato.

L'organizzazione della presente trattazione prevede un capitolo iniziale dove si analizzano le caratteristiche dei materiali compositi e si trattano brevemente le possibili applicazioni degli FRP nell'ambito del rinforzo strutturale.

Successivamente, al capitolo 2, si indicano le caratteristiche dei materiali impiegati nelle prove e si illustrano le prove di caratterizzazione condotte al riguardo.

Il capitolo 3 prevede una accurata descrizione della realizzazione dei campioni utilizzati per lo svolgimento delle prove di aderenza e l'esposizione delle fasi necessarie per la loro preparazione ai test.

Vista la necessità di specifica strumentazione per poter ricavare le quantità di interesse dalle prove, il capitolo 4 presenta una descrizione degli strumenti impiegati, indicando i principi alla base del loro funzionamento e le modalità di impiego.

Nel corso del capitolo successivo si presenta la descrizione del setup utilizzato per l'esecuzione di tutte le prove, indicando i risultati ottenuti dalle stesse all'interno del capitolo 6.

Al capitolo 7 si presentano estesi confronti tra i risultati, sotto diversi punti di vista e si discute sulla calibrazione di opportune leggi tensione tangenziale – scorrimento atte a descrivere il legame che si è effettivamente sviluppato nel corso delle prove svolte.

Infine, vengono espresse brevi considerazioni finali, cercando di mettere in luce gli aspetti più importanti della campagna sperimentale.

CAPITOLO 1

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COMPOSITI E APPLICAZIONI NEL RINFORZO STRUTTURALE

1.1 DESCRIZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI ED IMPIEGHI

I materiali compositi sono materiali caratterizzati dalla presenza di due o più fasi di natura diversa e macroscopicamente distinguibili, con almeno due fra queste che presentano proprietà fisiche e meccaniche sufficientemente diverse tra loro, in modo da impartire al composito proprietà diverse da quelle dei suoi costituenti.

I materiali fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP), proprio perché presentano le caratteristiche sopra descritte, sono materiali compositi: sono infatti costituiti da una fase continua, la matrice, al cui interno viene annegata una fase fibrosa, discontinua, rigidamente connessa alla prima.

La fibra ha una funzione resistente, mentre la matrice polimerica di natura organica ha lo scopo di mantenere unite le fibre e proteggerle, permettendo il trasferimento delle sollecitazioni esterne e la collaborazione tra le fibre stesse.

La combinazione di questi due elementi all'interno del composito lo rende un materiale che combina elevati valori di resistenza e rigidità con notevoli caratteristiche di leggerezza e durabilità.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, gli FRP si comportano come materiali eterogenei ed anisotropi e sono caratterizzati da una caratteristica peculiare: il loro comportamento meccanico è prevalentemente elastico lineare fino a rottura.

In principio i materiali compositi hanno trovato impiego nei settori dell'ingegneria navale, meccanica ed aerospaziale, dove l'elevato costo risultava secondario

rispetto alla possibilità di disporre di un materiale caratterizzato da una resistenza specifica elevatissima.

Solo a partire dagli anni '90 l'impiego degli FRP si è esteso al campo dell'ingegneria civile, risultando però estremamente limitato nell'ambito di edifici e infrastrutture di nuova costruzione, dove i materiali tradizionali hanno il pregio di essere decisamente meno costosi.

Essi hanno trovato tuttavia il loro ideale campo di applicazione nell'ambito della riabilitazione strutturale e dell'adeguamento sismico, dove una attenta analisi economica vede il maggior costo del materiale bilanciato dai ridotti tempi di applicazione e dalla minor richiesta di attrezzature necessarie per l'intervento.

L'impiego degli FRP è risultato pertanto idoneo per risolvere alcuni tra i problemi più rilevanti nel settore civile, tra cui: la necessità di porre rimedio al progressivo degrado di strutture e infrastrutture in c.a., la necessità di provvedere all'adeguamento sismico di strutture mal progettate o inadatte a resistere ad eventi sismici di una certa entità, l'urgenza di ripristinare le strutture danneggiate dal sisma o di adeguare la portanza di ponti e viadotti a causa del continuo aumento del traffico veicolare e dei carichi relativi alla circolazione stradale.

In questi settori le tecniche di intervento tradizionale presentano spesso difficoltà operative rilevanti e notevoli disagi (si pensi ad esempio alla necessità di bloccare il traffico stradale o ferroviario per lunghi periodi durante l'adeguamento di ponti e viadotti), mentre l'impiego di materiali compositi, nonostante il costo più elevato del materiale, risulta conveniente estendendo l'analisi economica anche alla manodopera, alle attrezzature necessarie e alle eventuali interruzioni di esercizio.

Un settore dove l'impiego degli FRP è in continua espansione è quello della riabilitazione strutturale, dove si possono realizzare rinforzi a flessione e a taglio su travi con relativa semplicità e tempistiche ridotte rispetto ad altre tecniche più tradizionali, si può procedere al confinamento di colonne per aumentarne la resistenza e si possono rinforzare archi e volte con ottimi risultati.

Nel settore della riabilitazione, inoltre, nell'ottica della realizzazione di edifici in muratura che appaiano il più possibile monolitici e che quindi possano funzionare secondo una ideale concezione scatolare, gli elementi in composito trovano sempre maggior impiego nel rinforzo dei maschi murari, allo scopo di incrementarne la portanza o la duttilità nei confronti di azioni agenti sia fuori che lungo il piano del pannello.

La possibilità di realizzare interventi poco invasivi ha consentito di applicare diffusamente i rinforzi in composito nei casi in cui si presenti la necessità di preservare l'aspetto della struttura originaria, come nel caso di edifici o complessi di interesse storico o artistico, conferendo a questi materiali un ruolo di fondamentale importanza in questo ambito.

1.2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COMPOSITI

Per meglio comprendere l'utilizzo e le potenzialità degli FRP è necessaria una descrizione generale dei costituenti e delle caratteristiche dei rinforzi impiegati in ambito strutturale.

In generale, i compositi possono essere costituiti da fibre continue oppure discontinue: nel primo caso le fibre vengono allineate per formare nastri, tessuti e lamine anche di dimensioni rilevanti, mentre nel secondo le fibre sono corte e la loro disposizione è generalmente casuale.

Se le fibre vengono disposte parallelamente tra loro nella matrice si ottiene un composito unidirezionale e le caratteristiche meccaniche che si ottengono risultano spiccatamente anisotrope: questa è la caratteristica più importante dei compositi, in quanto prefigura la possibilità di progettare e costruire un materiale in funzione delle esigenze che si hanno a livello strutturale.

Un materiale FRP può essere definito in base a diversi parametri:

- **geometria:** rientrano in questa categoria la forma e le dimensioni dell'FRP
- **disposizione delle fibre:** orientamento delle fibre in relazione agli assi di simmetria del materiale; questo parametro definisce le caratteristiche di isotropia o anisotropia del materiale: in particolare, se le fibre risultano disposte in maniera casuale si ottiene un materiale con caratteristiche simili a quelle di un materiale isotropo, mentre nel caso di fibre con un orientamento preferenziale il composito che ne risulta è anisotropo
- **concentrazione delle fibre:** frazione in volume, distribuzione della concentrazione

La matrice, diversamente dalle fibre, che in base all'orientamento prefigurano un comportamento anisotropo oppure quasi isotropo, può essere considerata nei casi più comuni come un continuo isotropo.

Un composito è quindi un materiale che, nella sua totalità, risulta non omogeneo e, nella maggior parte dei casi, anisotropo.

Per poter analizzare le caratteristiche e le proprietà dei compositi, è utile procedere ad una prima classificazione in due categorie principali:

- **lamina:** si tratta di un composito monostrato
- **laminato:** è costituito da più strati di lamine sovrapposte

Esistono anche laminati ibridi, che sono una particolare classe di compositi multistrato, in cui le singole lamine sono composte da fibre di natura diversa o da materiali diversi.

I laminati possono essere progettati e realizzati per soddisfare specifiche esigenze, sovrapponendo gli strati con le fibre disposte secondo orientazioni diverse, in modo da raggiungere le proprietà meccaniche desiderate nelle varie direzioni.

La grande libertà offerta nella disposizione delle fibre all'interno dei laminati deve ovviamente andare di pari passo con un controllo continuo sulle scelte operate e quindi sulle proprietà del materiale ottenuto.

Le lamine, proprio per le modalità che stanno alla base della loro realizzazione, risultano essere generalmente materiali anisotropi e pertanto le proprietà meccaniche che ne derivano risultano dipendenti dalla scelta del sistema di riferimento.

Solitamente, la scelta più comune è quella di considerare gli assi di riferimento coincidenti con gli assi di simmetria del materiale.

Il rapporto tra i valori delle proprietà di un composito nelle diverse direzioni viene definito grado di anisotropia.

I laminati, come già descritto, vengono realizzati sovrapponendo più strati con le fibre che possono essere disposte secondo orientazioni diverse, in funzione delle caratteristiche meccaniche volute (*figura 1.1*).

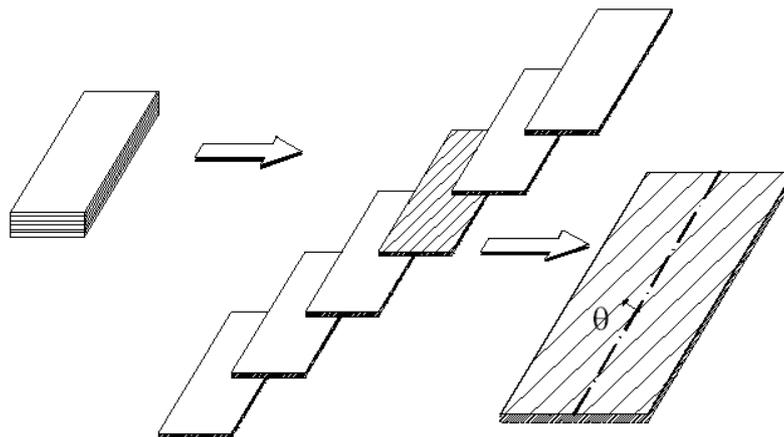


Figura 1.1 - Realizzazione di laminati utilizzando più strati di lamine sovrapposte.

Oltre ad una prima distinzione tra lamine e laminati, è possibile procedere ad una ulteriore classificazione dei laminati in base all'orientazione delle fibre nei diversi strati di lamine sovrapposte (indicando con θ l'angolo che definisce tale orientamento):

- **laminati unidirezionali:** sono costituiti da lamine sovrapposte in cui le fibre utilizzate risultano avere la stessa orientazione in tutti gli strati, definita dallo stesso angolo θ (*figura 1.2*)
- **laminati angle-ply:** le fibre disposte nelle varie lamine sovrapposte hanno orientazione di tipo $+\theta / -\theta$ alternata, così come indicato in *figura 1.3*
- **laminati cross-ply:** sono laminati composti da lamine in cui le fibre sono disposte secondo l'orientazione indicata in *figura 1.4*, ovvero con angoli pari a 0° e 90° intervallati tra loro, in modo da ottenere una trama incrociata
- **laminati bilanciati:** sono caratterizzati dalla sovrapposizione di più lamine con orientazione delle fibre diversa, ma che sono accomunate dalla seguente caratteristica: per ogni lamina avente una certa orientazione delle fibre, ne esiste un'altra con orientazione delle fibre esattamente opposta (*figura 1.5*)
- **laminati simmetrici:** per ogni lamina con una data orientazione, esiste una lamina con la stessa orientazione in posizione simmetrica rispetto al piano medio del laminato (*figura 1.6*)
- **laminati antisimmetrici:** per ogni lamina con una data orientazione, esiste una lamina con orientazione opposta in posizione simmetrica rispetto al piano medio del laminato (*figura 1.7*).

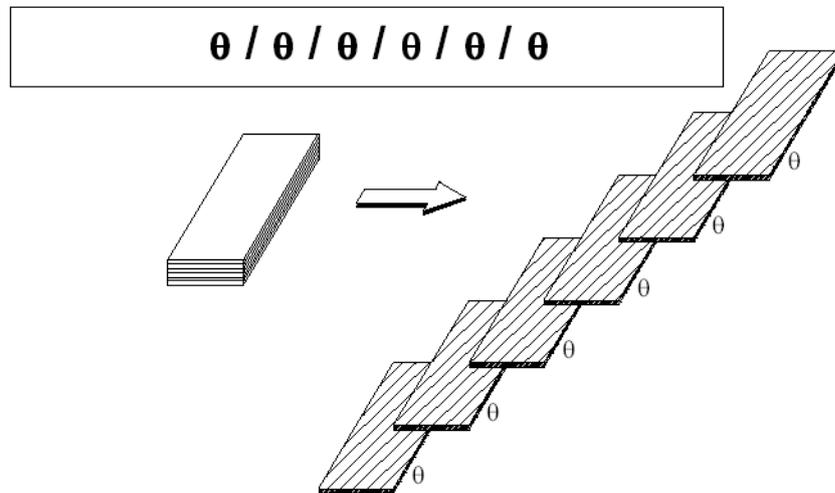


Figura 1.2 - Laminato unidirezionale: stessa giacitura delle fibre in tutte le lamine.

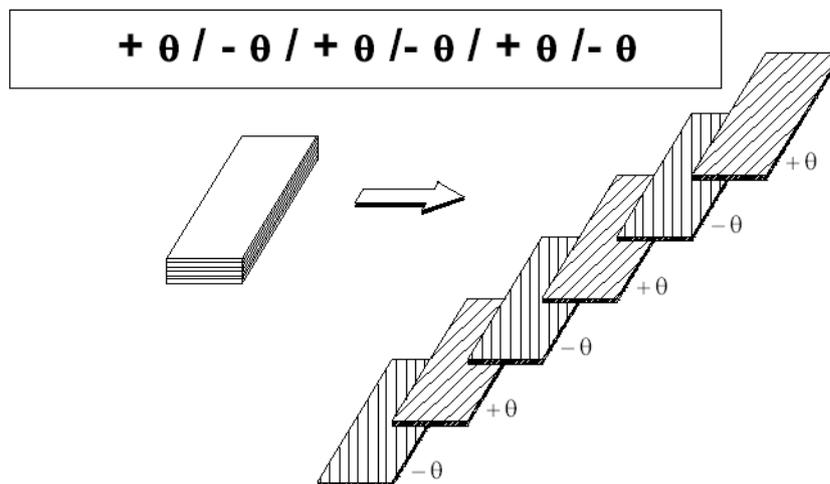


Figura 1.3 - Orientazione delle fibre in un laminato angle-ply.

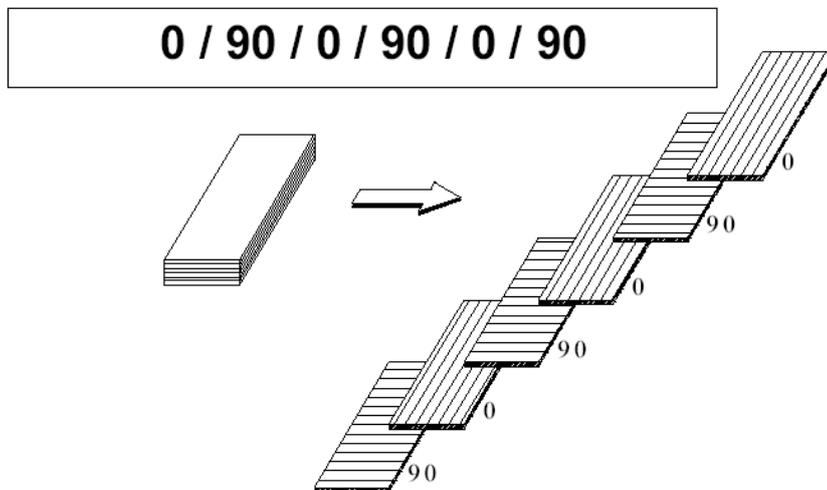


Figura 1.4 - Disposizione delle fibre in un laminato cross-ply.

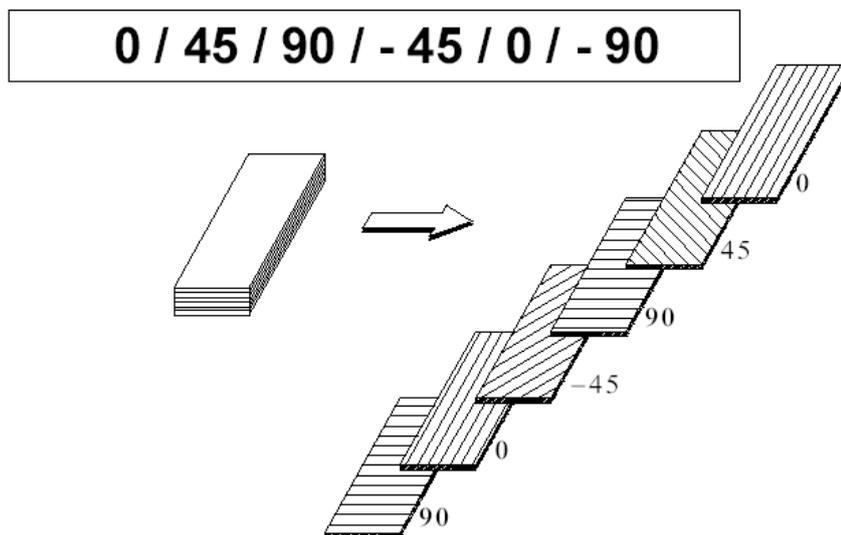


Figura 1.5 - Esempio di laminato bilanciato.

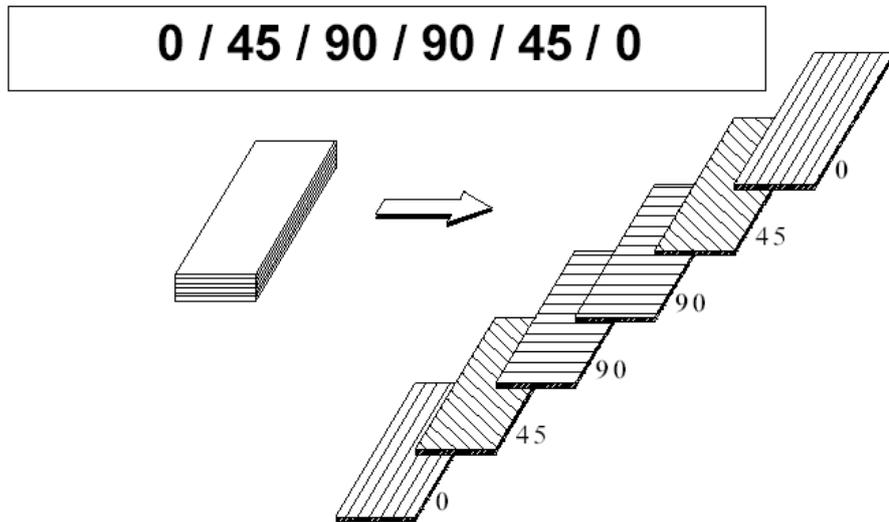


Figura 1.6 - Esempio di laminato simmetrico.

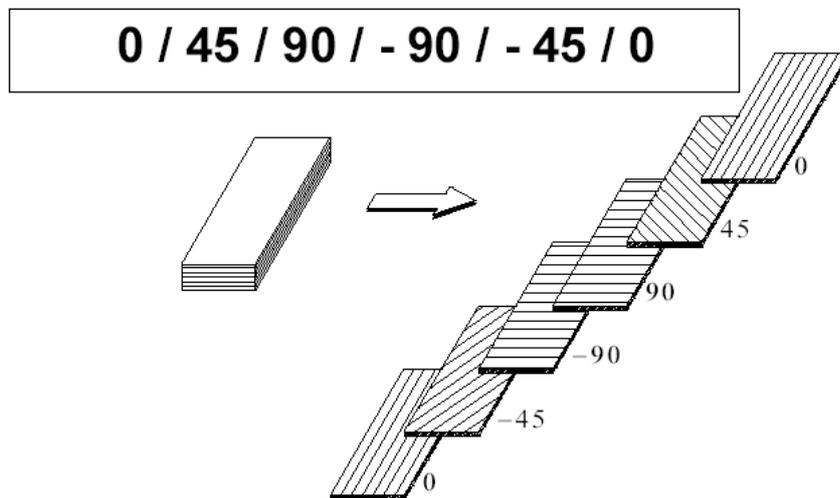


Figura 1.7 - Laminato antisimmetrico.

Oltre alla suddivisione del tutto generale nelle due categorie principali di lamine e laminati, che serve per poter esaminare le proprietà dei compositi indipendentemente dalla tecnologia di produzione, occorre analizzare brevemente anche la natura dei costituenti, che contribuiscono in maniera determinante alla formazione delle proprietà finali del materiale.

Dall'analisi delle fasi che costituiscono il composito è possibile risalire alla genesi delle proprietà meccaniche e quindi alla spiegazione di come si possa giungere a così elevati valori di resistenza specifica e di rigidità, mantenendo un peso estremamente contenuto rispetto ai materiali tradizionali.

La presenza di fibre con adeguate capacità di resistenza è sicuramente un requisito fondamentale per un composito, ma non è da sola sufficiente per ottenere un materiale dall'elevata resistenza meccanica: anche una buona adesione tra matrice e rinforzo risulta indispensabile, visto il ruolo di primo piano assunto dalla matrice nell'ottica di trasferire le sollecitazioni e consentire la collaborazione tra le fibre stesse.

L'adesione viene di solito promossa mediante l'impiego di un terzo componente, che viene applicato in strato molto sottile sulla superficie delle fibre e le rende compatibili con la matrice di natura organica.

Il trattamento superficiale descritto comporta quindi l'effettiva presenza di una terza fase intermedia tra matrice e fibre, che viene denominata interfaccia o interfase.

Le caratteristiche dell'interfaccia, pur non contribuendo in maniera diretta alle proprietà meccaniche del composito, risultano indispensabili per il corretto funzionamento del materiale nel suo complesso.

Dopo aver analizzato brevemente le caratteristiche peculiari di un composito, si riporta ora una breve descrizione dei componenti fondamentali: fibre e matrice.

Una particolare attenzione sarà riservata alla descrizione dei tessuti, che sono stati utilizzati, sfruttando la tecnica della laminazione manuale, durante la preparazione dei campioni a monte della campagna sperimentale.

1.3 FIBRE UTILIZZATE NEI COMPOSITI FRP

Le fibre sono gli elementi che contribuiscono in primis al raggiungimento delle ottime proprietà meccaniche del composito.

Sono dotate di una geometria filiforme, ovvero sono caratterizzate da un elevato valore del rapporto tra lunghezza e diametro e, se sottoposte a trazione, esibiscono un comportamento elastico lineare fino a rottura, raggiungendo elevati valori di resistenza.

Le fibre più utilizzate per la produzione di materiali compositi sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche.

In base alla loro composizione, possiamo pertanto classificare gli FRP utilizzando una denominazione che contiene direttamente la tipologia delle fibre utilizzate:

- **GFRP**: si tratta di FRP realizzati utilizzando fibre di vetro
- **CFRP**: compositi nei quali sono state utilizzate fibre di carbonio
- **AFRP**: denominazione utilizzata qualora siano state utilizzate fibre aramidiche

La geometria filiforme garantisce alle fibre una grande versatilità nelle applicazioni e caratteristiche di rigidità e resistenza più elevate rispetto al loro impiego tridimensionale, proprio per la diminuzione dei difetti, principali cause di innesco di crisi locali, che si ha tipicamente in un impiego monodimensionale.

Le fibre, che sono costituite da filamenti continui e molto sottili, risultano di difficile manipolazione singolarmente e quindi vengono classificate in base alla loro forma commerciale, dove sono presenti sotto forma di filamenti, cavi di filatura, fili (o filati), fili assemblati, tape o tessuti.

Si definisce **filamento** un elemento base con diametro di circa 10 micron.

Se utilizzando una macchina di filatura si assembla un fascio caratterizzato da un gran numero di filamenti (migliaia) senza torsione si ottiene **un cavo di filatura**,

che viene solitamente destinato ad essere filato e strappato in modo da realizzare una fibra discontinua (produzione di fibre corte).

Un **filo o filato** è invece un filo formato da fibre tenute insieme da torsione.

Costruendo un fascio costituito da filati, assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale si ottiene un **filo assemblato**.

La disposizione delle fibre in queste tipologie di prodotti è indicata schematicamente in *figura 1.8*.

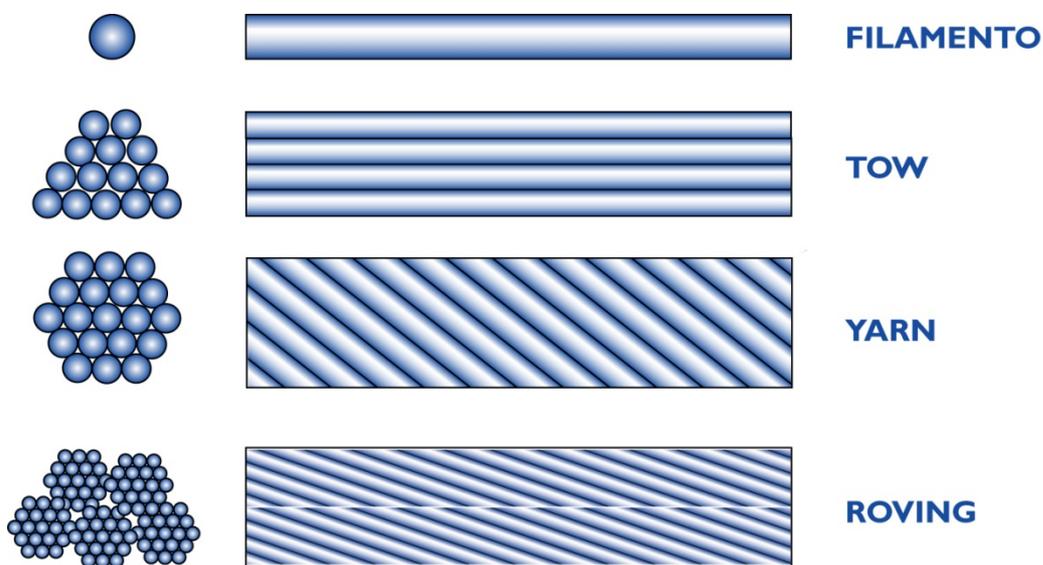


Figura 1.8 - Schema della disposizione delle fibre nei filamenti, nei cavi di filatura (*tow*), nei fili o filati (*spun yarn*) e nei fili assemblati (*roving*).

Combinando insieme centinaia di filati o cavi di filatura si ottiene il **tape**, in cui i fili costituenti possono essere semplicemente affiancati, cuciti tra loro o fissati su un supporto.

Nella tipologia commerciale dei **tessuti** (o *fabric*) le fibre sono disposte in composizioni opportunamente arrangiate in modo da formare una grande varietà di questi prodotti.

In tale ambito è possibile utilizzare anche una disposizione delle fibre tale da garantire una quasi isotropia nel piano.

Nei tessuti si ha una direzione principale, detta ordito ed una trasversale, disposta ortogonalmente alla prima, che viene denominata trama.

La classificazione delle fibre utilizzate in questi prodotti è stata mutuata dal settore dei filati tessili e prevede di catalogare i filamenti che costituiscono i filati utilizzando essenzialmente composizione chimica e massa per unità di lunghezza. Quest'ultima viene misurata utilizzando come unità di misura il Tex (che equivale a 1g/km di fibra).

Dopo aver discusso brevemente sulla classificazione commerciale delle fibre, di seguito si riporta una descrizione delle principali tipologie di fibre utilizzate, ovvero fibre di carbonio, di vetro e fibre aramidiche.

1.3.1 Fibre di carbonio

Vengono utilizzate per fabbricare compositi ad alte prestazioni, caratterizzati da elevata resistenza ed alto modulo di elasticità normale.

Le fibre di carbonio esibiscono un comportamento a rottura fragile, caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto a fronte di carichi di rottura elevati.

Inoltre, in tali fibre il modulo di elasticità normale e la resistenza risultano estremamente elevati in una direzione, mentre risultano notevolmente inferiori nella direzione trasversale (comportamento anisotropo).

Ciò è dovuto alla struttura cristallina della grafite, di tipo esagonale, con gli atomi di carbonio che risultano organizzati in strutture essenzialmente planari, che

vengono tenute unite da forze di interazione trasversale di tipo Van der Waals, decisamente più deboli rispetto ai legami covalenti che tengono insieme gli atomi di carbonio nel piano.

A causa di questa struttura, si ottengono pertanto elevate proprietà meccaniche lungo le direzioni contenute nei piani degli atomi di carbonio, ma valori decisamente inferiori in direzione trasversale.

Più precisamente, la struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite, ma la spiegazione appena fornita sulla genesi delle proprietà meccaniche risulta comunque valida.

Spesso nel linguaggio comune si usa il termine “fibre di grafite” per indicare fibre con contenuto di carbonio maggiore del 99% , ma questa terminologia, anche se diffusa, è a rigore impropria.

Con il termine “fibre di carbonio” si indicano invece comunemente fibre con un contenuto di carbonio variabile tra un minimo dell’80% e un massimo del 95%.

Nella realizzazione di un cavo di filatura con fibre di carbonio, il numero di filamenti può variare tra 400 e 160000.

La tecnica di produzione delle fibre di carbonio si basa essenzialmente sulla pirolisi, che consiste nella decomposizione termica di sostanze organiche in assenza di ossigeno.

Tra le sostanze più usate ci sono le fibre di PAN (poliacrilonitrile) e rayon.

Le fibre subiscono prima un processo di stabilizzazione, che consiste in un trattamento termico in aria a temperature di 200 – 240 °C, per far assumere alla loro struttura un’orientazione preferenziale lungo la direzione in cui verrà poi applicato il carico.

Terminato il processo di stabilizzazione, le fibre vengono sottoposte ad un trattamento di carbonizzazione in atmosfera inerte a temperature dell’ordine di 1500 °C e poi ad un successivo trattamento di grafitizzazione a 3000 °C.

La carbonizzazione serve ad eliminare la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio, mentre la grafitizzazione consente di favorire lo sviluppo della struttura cristallina delle fibre.

Le caratteristiche fondamentali delle fibre di carbonio sono le seguenti:

- consentono di fabbricare compositi ad elevate prestazioni (alto modulo di elasticità normale ed elevata resistenza)
- sono caratterizzate da un comportamento a rottura fragile, ovvero di fronte a tensioni di rottura elevate esibiscono un assorbimento di energia relativamente modesto
- risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di creep e di fatica
- la riduzione della resistenza a lungo termine risulta di modesta entità

1.3.2 Fibre di vetro

Vengono comunemente utilizzate per la fabbricazione di compositi dalle medio-alte prestazioni e presentano una elevata resistenza.

La tecnologia di produzione delle fibre di vetro è basata sulla filatura di una miscela costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare.

Il processo prevede la miscelatura a secco dei componenti, che poi vengono portati a fusione in una apposita fornace a refrattari ad una temperatura prossima ai 1260 °C.

Si ottiene così vetro fuso, che viene fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo di filiere di platino.

I filamenti prodotti sono ricoperti da un legante e vengono raggruppati per formare una treccia o fibra, applicando eventualmente una leggera torsione.

I filati sono raccolti a formare fili assemblati (*roving*).

Commercialmente le fibre di vetro sono disponibili anche in forma di fogli sottili, che possono essere costituiti sia da fibre lunghe continue che da fibre corte, chiamati *mat*.

Le fibre all'interno di un *mat* vengono tenute assieme da un legante chimico.

Tipicamente la loro larghezza è variabile fra 5 cm e 2 m, con una densità prossima ai 0.5 kg/m^2 .

Le fibre di vetro possono essere classificate in:

- **Fibre di vetro di tipo E:** si tratta di una tipologia molto comune nei prodotti sul mercato, la composizione tipica (in termini di percentuale in peso) è indicata in *tabella 1.1*
- **Fibre di vetro tipo ECR:** valgono le stesse considerazioni fatte per le fibre tipo E, ma sono resistenti alla corrosione di acidi
- **Fibre di vetro di tipo S:** hanno la composizione indicata all'interno della *tabella 1.1* e sono caratterizzate da elevate resistenze; risultano ottime per l'impiego a temperature elevate
- **Fibre di vetro tipo C:** ottime in ambienti corrosivi, vengono impiegate in strati superficiali di strutture particolarmente sollecitate chimicamente
- **Fibre di vetro tipo D:** sono impiegate dove sono richieste particolari proprietà dielettriche e sono caratterizzate da un contenuto di silice pari a circa il 75%
- **Fibre di vetro di tipo R:** come le fibre di tipo S sono adatte ad impieghi che richiedono elevate resistenze meccaniche
- **Fibre di vetro AR:** sono caratterizzate da leggerezza e resistenza in ambiente alcalino.

	VETRO E	VETRO S
Ossido di silicio	54.3	64.20
Ossido di alluminio	15.2	24.80
Ossido di ferro	-	0.21
Ossido di calcio	17.2	0.01
Ossido di magnesio	4.7	10.27
Ossido di sodio	0.6	0.27
Ossido di boro	8.0	0.01
Ossido di bario	-	0.20
Varie	-	0.03

Tabella 1.1 - Composizione tipica delle fibre di vetro di tipo E ed S in termini di percentuali in peso.

Caratteristiche tipiche delle fibre di vetro sono le seguenti:

- sono caratterizzate da un modulo di Young E inferiore rispetto a quello delle fibre di carbonio o a quello delle fibre aramidiche
- offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta e quindi viene richiesta una particolare cautela nelle fasi di manipolazione che precedono l'impregnazione
- hanno una modesta resistenza alla fatica e una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso
- non offrono generalmente una grande resistenza agli alcali

Per garantire una maggiore adesione tra fibre e matrice e proteggere le fibre dall'umidità e dagli agenti alcalini, le fibre vengono sottoposte a trattamenti di ensimaggio utilizzando sostanze con funzione di compatibilizzante.

I trattamenti sono utili per incrementare la resistenza a fatica e garantire una maggiore durabilità del composito.

1.3.3 Fibre aramidiche

Sono fibre di natura organica costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata.

La tecnologia di produzione si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero in soluzione con successivo raffreddamento veloce ed essiccamento.

Il polimero viene sintetizzato facendo uso di soluzioni fortemente acide prima del passaggio alla fase di estrusione.

Per migliorare le caratteristiche meccaniche delle fibre è possibile sottoporle ad un trattamento di orientazione a caldo mediante avvolgimento su bobine rotanti ad elevata velocità.

Commercialmente, è possibile reperire le fibre aramidiche sotto forma di fili, fili assemblati e tessuti.

Le fibre aramidiche sono dotate di un modulo elastico e di una resistenza a trazione superiori a quello delle fibre di vetro, ma inferiori al carbonio.

La modalità di rottura, che avviene tramite formazione di microfibrille, consente una elevata dissipazione di energia di frattura.

Vista l'elevata resistenza all'impatto, risultano ideali per l'impiego in elmetti, giubbotti antiproiettile e auto blindate.

La resistenza a compressione risulta modesta a causa della rottura per instabilità a compressione delle fibrille, mentre la resistenza alla fatica è ottima.

Riguardo alla durabilità, occorre prestare particolare attenzione all'esposizione a raggi UV e umidità, che possono comportare un significativo degrado della fibra.

1.4 ANALISI DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE E IMPIEGHI DELLE FIBRE

Dopo la breve descrizione delle tipologie di fibre adottate per il rinforzo strutturale, appare opportuno riportare alcune proprietà meccaniche tipiche delle fibre in oggetto.

Le caratteristiche delle fibre vengono messe a confronto con quelle dell'acciaio da costruzione nella *tabella 1.2*.

In *figura 1.9* viene invece indicato il comportamento a trazione monoassiale tipico delle più comuni fibre di rinforzo, utilizzando sempre come riferimento il legame costitutivo dell'acciaio.

Per quanto riguarda l'utilizzo delle fibre, oltre al settore del rinforzo di strutture civili, i principali campi di impiego sono i seguenti:

- **Fibre di vetro:** campo nautico (grazie al basso costo e all'elevata resistenza), laminati di spessore considerevole (> 100 mm), tubazioni sottomarine
- **Fibre di carbonio:** strutture aeronautiche, campo meccanico (automobilismo e motociclismo nel settore delle competizioni), strutture per lo sport (come ad esempio canne da pesca, biciclette, canoe, remi, sci, racchette da tennis, ecc.).

La descrizione dei campi di utilizzo principali delle fibre è stata riportata a scopo esemplificativo e non ha la pretesa di essere esaustiva, vista le possibilità offerta dalla ricerca di estendere l'applicazione delle fibre sempre a nuovi ambiti.

	Modulo di elasticità normale E	Resistenza σ_r	Deformazione a rottura ε_r	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	[σ_r]	[g/cm^3]
Fibre di vetro E	72-80	3445	4.8	2.5-2.6
Fibre di vetro S	85	4585	5.4	2.46-2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390-760	2400-3400	0.5-0.8	1.85-1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240-280	4100-5100	1.6-1.73	1.75
Fibre di Aramide	62-180	3600-3800	1.9-5.5	1.44-1.47
Matrice polimerica	2.7-3.6	40-82	1.4-5.2	1.10-1.25
Acciaio da costruzione	200	250-400 (snervamento) 350-600 (rottura)	20-30	7.8

Tabella 1.2 - Proprietà meccaniche delle fibre.

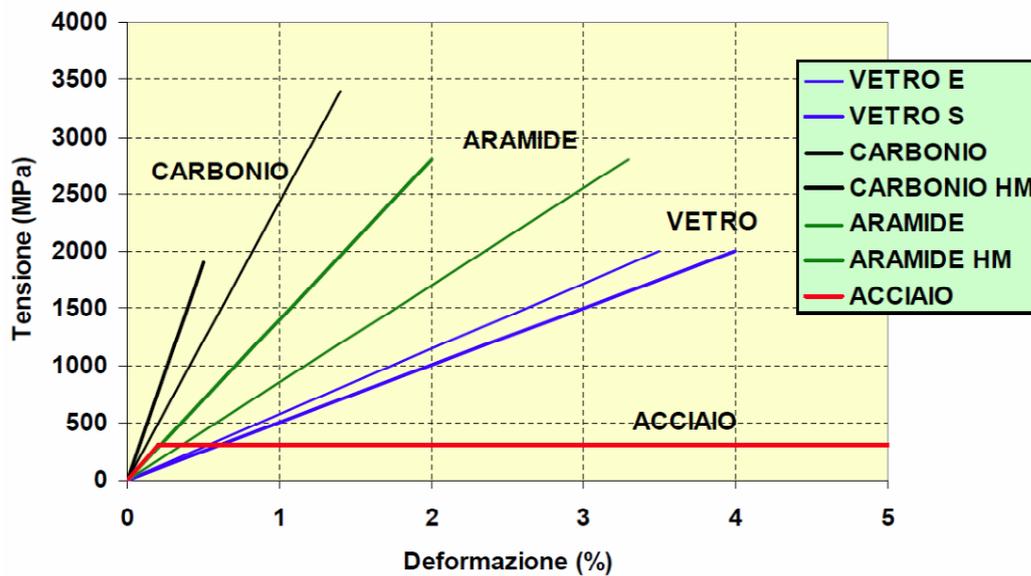


Figura 1.9 - Grafico sforzo – deformazione per le fibre di carbonio, vetro e aramide a confronto con l'acciaio.

1.5 TESSUTI NON IMPREGNATI

Per quanto riguarda i tessuti, che hanno una vasta applicazione nel settore del rinforzo di strutture civili, si può attuare in primo luogo la seguente classificazione, in base all'orientazione delle fibre:

- **Tessuti unidirezionali:** le fibre risultano orientate tutte nella direzione longitudinale e sono tenute insieme da una trama leggera di tipo non strutturale
- **Tessuti bidirezionali:** sono caratterizzati da una tessitura bilanciata fra ordito e trama
- **Tessuti multiassiali:** in questa tipologia le fibre risultano orientate nel piano in diverse direzioni.

In ambito civile si ha un vasto impiego di tessuti non impregnati che vengono poi laminati manualmente in situ.

Una seconda tipologia di rinforzo, anch'essa molto utilizzata, prevede di utilizzare lamine piatte realizzate mediante pultrusione e incollate mediante un adesivo.

Il tessuto non impregnato di resina viene comunemente chiamato “secco”.

I tessuti per il rinforzo strutturale vengono distribuiti allo stato secco in rotoli, che vengono utilizzati per l'impregnazione in cantiere con apposite resine.

Il produttore deve ovviamente fornire all'utilizzatore una adeguata scheda tecnica del tessuto, che deve contenere la descrizione, le caratteristiche, le condizioni di stoccaggio, le precauzioni d'uso e indicazioni su come utilizzare il prodotto in un sistema di rinforzo.

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche del filato si usa definire il titolo e l'area della sezione trasversale.

Le caratteristiche del tessuto da indicare sono solitamente: titolo e densità del filato, numero di fili per unità di larghezza, massa per unità di superficie delle fibre (grammatura) per ordito e trama, modulo di elasticità normale a trazione, resistenza a trazione, deformazione a rottura.

Si precisa che, qualora non sia espressamente indicata, è possibile risalire semplicemente alla grammatura conoscendo il titolo del filato nella direzione in esame e il numero di fili per unità di larghezza riferiti sempre alla direzione considerata.

La formula da utilizzare è la seguente:

$$p_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10} \quad (1.1)$$

dove p_x è la massa del tessuto (grammatura) nella direzione interessata, espressa in g/m^2 , T_x è il titolo del filato espresso in Tex ed N_f è il numero di fili per unità di larghezza [n° fili /cm].

1.6 MATRICE

Il ruolo della matrice all'interno di un composito FRP è quello di proteggere le fibre e promuovere la loro collaborazione, garantendo così il trasferimento del carico esterno alle fibre stesse, dotate di elevate proprietà meccaniche.

La matrice svolge il ruolo di elemento legante che assicura anche il mantenimento della forma del composito, ma è dotata di caratteristiche meccaniche decisamente inferiori a quelle delle fibre.

Essa tuttavia può assorbire energia deformandosi, se sottoposta a sollecitazione e conferisce al composito nella sua globalità una maggiore tenacità.

Le fibre infatti possono essere piuttosto fragili e sarebbero inadatte al loro ruolo senza la presenza della matrice.

Le resine utilizzate più comunemente possono essere classificate in due categorie principali:

- **resine termoplastiche**
- **resine termoindurenti**

Fra queste, le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti.

Altre tipologie di matrici che vengono utilizzate sono quelle di natura inorganica: **cementizie, metalliche, ceramiche.**

Il loro utilizzo per la realizzazione di compositi un campo civile sta progressivamente diffondendosi.

1.6.1 Resine termoindurenti

Sono quelle in genere più utilizzate e sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata, risultando liquide o pastose a temperatura ambiente.

Esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso non appena miscelate con un opportuno reagente.

La terminologia “resine termoindurenti” deriva dal fatto che la reazione può essere accelerata agendo appunto sulla temperatura.

Le resine termoindurenti più utilizzate nei compositi fibrorinforzati per il settore civile sono quelle **epossidiche.**

Altre tipologie sono quelle delle resine **poliestere e vinilestere.**

L'utilizzo delle resine termoindurenti è favorito da diversi vantaggi:

- garantiscono una relativa facilità di impregnazione delle fibre grazie alla loro bassa viscosità allo stato fluido
- è possibile avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente
- sono caratterizzate da ottime proprietà adesive e da una buona resistenza all'umidità e agli agenti chimici

Gli svantaggi di cui tenere conto sono invece i seguenti:

- l'ampiezza del campo di temperature di esercizio risulta piuttosto limitato superiormente a causa della temperatura di transizione vetrosa con possibili problemi oltre i 60 °C
- la tenacità a frattura risulta modesta (comportamento "fragile")
- bisogna prestare attenzione in fase di applicazione sulla struttura alla sensibilità che queste resine mostrano nei confronti dell'umidità.

1.6.1.1 Resine epossidiche

Presentano i vantaggi e gli svantaggi, appena descritti, della categoria delle resine termoindurenti e risultano particolarmente indicate per la realizzazione dei compositi da impiegare nel settore civile, grazie a caratteristiche di buona versatilità, elevate proprietà meccaniche, semplicità di trattamento e buona resistenza all'umidità e agli agenti chimici.

Il prepolimero epossidico solitamente è un fluido viscoso a cui viene aggiunto un agente reticolante (di solito un'ammina alifatica).

La reazione che si sviluppa è esotermica e può essere condotta, a seconda delle necessità e delle proprietà desiderate, sia a temperatura ambiente, sia ad elevate temperature.

1.6.1.2 Resine poliestere

Sono caratterizzate da resistenza meccanica e proprietà adesive solitamente inferiori a quelle delle resine epossidiche.

Anche la loro viscosità, sempre rispetto alle epossidiche, risulta inferiore.

Sono però versatili e presentano una elevata reattività.

A temperatura ambiente, la resina si presenta solitamente come una sostanza solida e per poter essere impiegata deve quindi essere disciolta in un opportuno solvente.

La reazione che si sviluppa è esotermica e, come per le resine epossidiche, può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.

1.6.1.3 Resine vinilestere

Sono adatte all'impiego in ambienti chimicamente aggressivi ad elevata temperatura.

Rappresentano un compromesso tra le prestazioni delle resine epossidiche e quelle delle resine poliestere.

1.6.2 Resine termoplastiche

Sono state sviluppate per superare i limiti intrinseci delle resine termoindurenti, come la modesta tenacità a frattura, le temperature di esercizio piuttosto basse e la tendenza ad assorbire umidità dall'ambiente.

Sono resine che diventano plastiche per riscaldamento, ma che possono essere sottoposte a cicli di fusione - solidificazione senza alterazioni della struttura.

Sono caratterizzate dalla capacità di fluire una volta riscaldate ad una temperatura sufficientemente elevata, superiore alla temperatura di transizione vetrosa (nel caso di materiali amorfi) e alla temperatura di fusione (nel caso di materiali semicristallini).

Caratteristica fondamentale è la possibilità di modificare a piacere la forma dei componenti semplicemente riscaldando il materiale ad una adeguata temperatura (processo di formatura a caldo).

Le resine termoplastiche risultano mediamente più tenaci e presentano in alcuni casi temperature di esercizio più elevate rispetto alle resine termoindurenti, oltre ad una migliore resistenza nei confronti dei fattori ambientali.

Hanno una maggiore resistenza agli urti e maggiori deformazioni a rottura e possono essere conservate a lungo (se protette dall'umidità e disidratate).

Presentano però il grosso svantaggio di avere una viscosità elevata, che penalizza la lavorazione e rende difficoltosa l'impregnazione delle fibre.

Al momento il loro impiego in ambito civile risulta piuttosto limitato, ma non va dimenticato che sono allo studio potenziali applicazioni di notevole importanza, come ad esempio barre di rinforzo per conglomerato cementizio armato.

1.6.3 Matrici cementizie

Si parla di rinforzo strutturale FRCM (ovvero Fiber Reinforced Cementitious Matrix) se il materiale composito fibroso è annegato in una matrice inorganica cementizia.

Tale matrice è costituita da una malta speciale di cementi ad azione pozzolanica, che vengono miscelati previa sola aggiunta di acqua.

I compositi a matrice cementizia sono caratterizzati dai seguenti vantaggi:

- possono essere applicati su supporti umidi, scabri e irregolari: infatti la malta cementizia non è inficiata nella fase di indurimento dall'umidità presente nella struttura e provvede a colmare le irregolarità della superficie del supporto
- presentano una permeabilità comparabile a quella del supporto sul quale vengono applicati, favorendo così il normale scambio termico e igrometrico con l'esterno
- hanno una resistenza al fuoco assolutamente comparabile a quella del supporto.

1.7 RIEMPITIVI

I riempitivi sono sostanze che possono essere aggiunte ai polimeri termoplastici o termoindurenti allo scopo di:

- migliorare le proprietà meccaniche
- controllare il ritiro
- conferire caratteristiche di resistenza al fuoco

- ridurre il costo della resina.

Possono anche servire a migliorare il trasferimento dei carichi a ridurre la fessurazione nelle zone non armate nelle applicazioni strutturali.

Esempi di riempitivi comunemente impiegati sono: fibre di vetro corte, carbonato di calcio, argilla.

1.8 ADESIVI

L'adesivo è un materiale in grado di creare un collegamento tra almeno due superfici e che permette la trasmissione delle forze.

Esistono adesivi di diverse tipologie, sia naturali che sintetici.

La scelta dell'adesivo riveste un ruolo fondamentale e deve essere ponderata in base a diversi fattori: occorre infatti tenere ben presenti le condizioni ambientali, tra cui ad esempio l'umidità, il comportamento alle alte temperature e la resistenza in caso di incendio.

Gli adesivi più adatti per l'applicazione di materiali compositi sono quelli a base di resine epossidiche bicomponenti.

La scheda tecnica fornita dal produttore dovrebbe riportare non solo le proprietà fisico-meccaniche dei componenti, ma anche le proprietà adesive in termini ad esempio di resistenza a taglio e resistenza a peeling (valori medi e caratteristici).

Le diverse modalità di crisi che possono manifestarsi tra adesivo e aderendo sono le seguenti:

- Frattura adesiva
- Frattura coesiva
- Frattura mista

Si parla di **frattura adesiva** quando si ha crisi all'interfaccia tra adesivo e aderendo: questa crisi si manifesta quando la resistenza dell'interfaccia è minore di quella dell'aderendo ed è indice di una non corretta applicazione dell'adesivo.

Le superfici di frattura in questo caso risultano tipicamente lisce.

La **frattura coesiva** avviene invece all'interno di uno dei materiali (nel caso di applicazione di rinforzi strutturali avviene all'interno del substrato sul quale è stato applicato il rinforzo).

Lo stesso materiale risulta quindi presente su entrambe le superfici di frattura, che possono essere lisce oppure rugose.

Si tratta del tipo di crisi preferibile perché si osserva in condizioni ottimali di applicazione dell'adesivo e consente un adeguato sfruttamento della resistenza del substrato.

Si ha invece una **frattura mista** quando questa si presenta alternativamente sia come coesiva che adesiva.

Le superfici di frattura sono piuttosto irregolari con coesistenza di entrambi i materiali: parti in cui la resistenza del substrato è stata adeguatamente sfruttata si alternano ad altre in cui è avvenuta una pura crisi adesiva all'interfaccia tra adesivo e aderendo.

Solitamente questa tipologia di crisi si manifesta in presenza di un substrato debole e non consolidato in concomitanza con una applicazione dell'adesivo non ottimale.

Tra le tre modalità di crisi appena descritte è ovvio che sia preferibile la frattura coesiva perché indica una corretta applicazione dell'adesivo e del rinforzo e consente di sfruttare appieno la resistenza fornita dal supporto.

Il meccanismo di adesione consiste essenzialmente in un aggrappaggio meccanico (mechanical interlocking) in cui la formazione di legami chimici tra le molecole polimeriche e quelle del substrato riveste un ruolo secondario.

Il legame sfrutta la resistenza allo scorrimento reciproco tra superfici localmente compenstrate (*figura 1.10*).

Proprio per questa motivazione è importante avere una superficie irregolare su scala microscopica (microrugosità) grazie alla quale l'adesivo possa penetrare nei pori, riempire le fessure presenti e quindi completare la propria solidificazione, garantendo così un aggrappo ottimale.

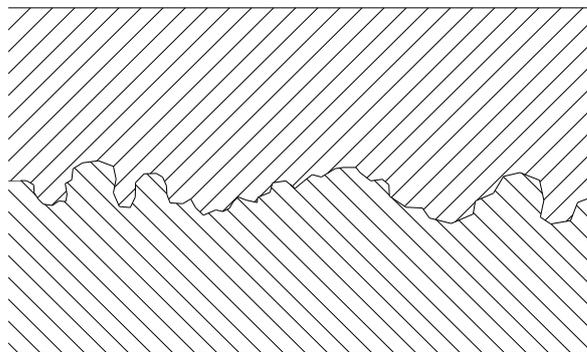


Figura 1.10 - Esempificazione del meccanismo di aggrappaggio meccanico (*mechanical interlocking*).

1.9 TECNICHE DI PRODUZIONE DEI COMPOSITI FRP PREFORMATI DI INTERESSE PER L'INGEGNERIA CIVILE

Si può innanzitutto attuare una prima distinzione in lavorazioni a **stampo aperto** e lavorazioni a **stampo chiuso**.

Tra le prime sono incluse le seguenti tecniche:

- laminazione manuale
- lavorazione a spruzzo
- avvolgimento
- sacco sotto vuoto

Tra le lavorazioni a stampo chiuso invece si distinguono:

- lo stampaggio a compressione con controstampo rigido
- la pultrusione

1.9.1 Laminazione manuale

È presente uno stampo che intende dare la forma corretta al composito da realizzare.

Il tessuto viene adagiato manualmente sullo stampo, poi viene versato il corretto quantitativo di resina e si procede alla laminazione.

Il distacco del pezzo finito è facilitato da un agente distaccante, che viene applicato prima di disporre il tessuto, sul quale viene poi stesa una pellicola di resina speciale contenente pigmenti che ha lo scopo di rendere perfettamente levigata la superficie.

Il processo di laminazione ha inizio dopo che la pellicola si è solidificata e prevede per ogni strato le seguenti fasi:

- stesura della resina
- disposizione dello strato di fibre
- consolidamento mediante utilizzo di un rullo

Si continua con l'applicazione di strati di resina e fibre finché non si raggiunge lo spessore desiderato del composito, con successivo periodo di stagionatura di circa 8 ore alla temperatura di 60 °C.

Con il processo di laminazione manuale vengono realizzati prodotti come lamine, laminati, pannelli, serbatoi.

1.9.2 Lavorazione a spruzzo

Come per gli altri processi è presente uno stampo, dove si spruzzano contemporaneamente resina e fibre.

Una pistola a getto d'aria provvede allo spruzzo della resina, mentre le fibre vengono tagliate mediante l'uso di una taglierina e successivamente spruzzate contemporaneamente alla resina.

La compattazione avviene attraverso dei rulli che garantiscono una corretta impregnazione delle fibre e la rimozione dell'aria.

Il periodo di stagionatura di 8 ore a 60°C si applica anche in questo caso.

Mediante lavorazione a spruzzo si possono produrre forme di medie e grosse dimensioni.

1.9.3 Avvolgimento

In questa tecnica di produzione le fibre vengono preventivamente impregnate con la resina e successivamente avvolte su un cilindro rotante (*figura 1.11*).

Raggiunto il numero di strati desiderato, il materiale viene lasciato indurire e poi viene rimosso dal cilindro.

Questo processo prevede di poter controllare l'orientazione delle fibre (tramite l'angolo di inclinazione) e la loro percentuale in volume.

Utilizzando la tecnica dell'avvolgimento è possibile produrre ad esempio tubi, barre di torsione e serbatoi.

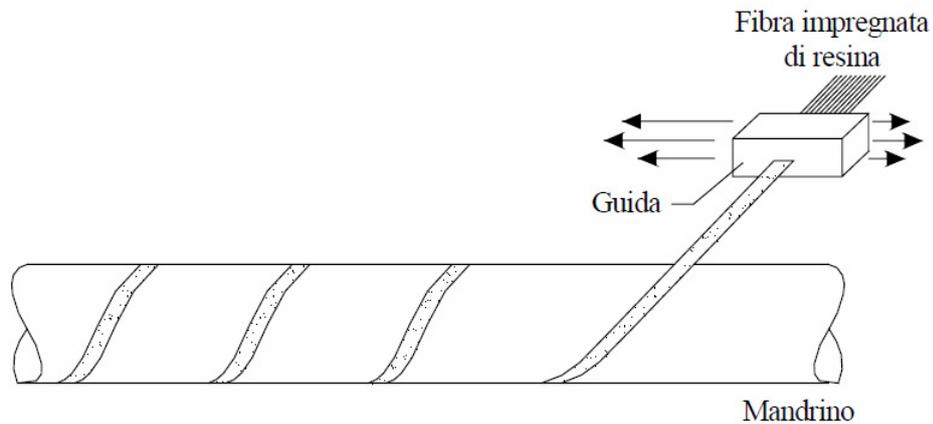


Figura 1.11 - Processo di produzione mediante avvolgimento.

1.9.4 Sacco sotto vuoto

La tecnica prevede di adagiare sul laminato una sottile membrana flessibile (il sacco) che ricopre il composito, appoggiando anche intorno alla base.

Si fa uso di film distaccanti ove necessario (*figura 1.12*) e di uno strato assorbente interposto tra sacco e composito che permette la rimozione della resina in eccesso.

Dopo aver preparato il sacco si procede all'aspirazione dell'aria tra stampo e membrana utilizzando una pompa per il vuoto, che garantisce la perfetta adesione tra sacco e laminato, con una pressione di stampaggio pari alla pressione atmosferica.

Il vuoto ha essenzialmente il compito di consentire la rapida estrazione dei solventi e dell'aria contenuti nel laminato e di compattare gli strati prima della reticolazione completa della resina.

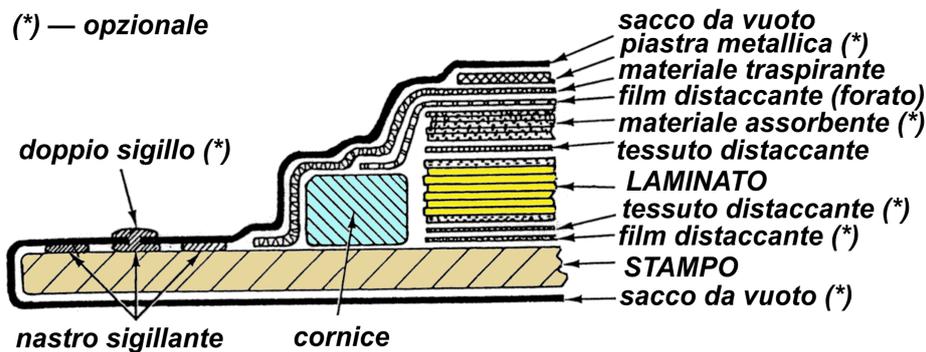


Figura 1.12 - Tecnica di laminazione con sacco sotto vuoto.

1.9.5 Stampaggio a compressione con controstampo rigido

È una tecnica di lavorazione a stampo chiuso. Gli stampi servono a determinare forma e spessore del pezzo, spesso con l'ausilio di presse.

La tecnica prevede di utilizzare fibre corte disposte in configurazioni tridimensionali allo scopo di ottenere un prodotto finito dalle caratteristiche quasi isotrope.

Purtroppo, il grosso difetto di questa tecnica è quello di originare compositi con proprietà meccaniche non degne di note, anzi piuttosto scadenti.

1.9.6 Pultrusione

La pultrusione viene utilizzata per produrre lamine fibrorinforzate, spesso impiegate in ambito civile, ma anche barre, profili a sezione sagomata, pannelli e piastre.

Si tratta di un procedimento che presenta grandi analogie con la estrusione.

Tuttavia, mentre nella estrusione il materiale viene compresso contro una trafila per poi uscire con la forma voluta, nel processo di pultrusione invece viene trascinato dall'esterno per farlo passare sempre attraverso la trafila.

Le fasi del processo di produzione sono essenzialmente tre:

- formatura
- impregnazione
- consolidamento

Le fibre vengono trascinate attraverso una serie di dispositivi in cui prima avviene la loro impregnazione con della resina, poi vengono sagomate nella forma desiderata.

Più in dettaglio, tipicamente le fibre vengono prelevate da rocchetti e, grazie all'uso di rastrelliere sono convogliate in un serbatoio di resina dove avviene l'impregnazione (*figura 1.13*).

Terminata questa fase, il materiale viene consolidato sotto pressione all'interno di uno stampo riscaldato, dove sono eliminati i vuoti tra le fibre, per un tempo variabile a seconda della velocità di produzione.

Nella fase successiva, un apposito dispositivo di traino trascina il prodotto solidificato a velocità costante, per poi farlo passare alla fase terminale della linea di produzione, dove avviene il taglio.

Con speciali attrezzature è possibile anche realizzare la tessitura, l'avvolgimento e l'intreccio delle fibre direttamente nella linea produttiva.

I compositi realizzati tramite la tecnica della pultrusione presentano una sezione costante, risultano leggeri e sono resistenti alla corrosione.

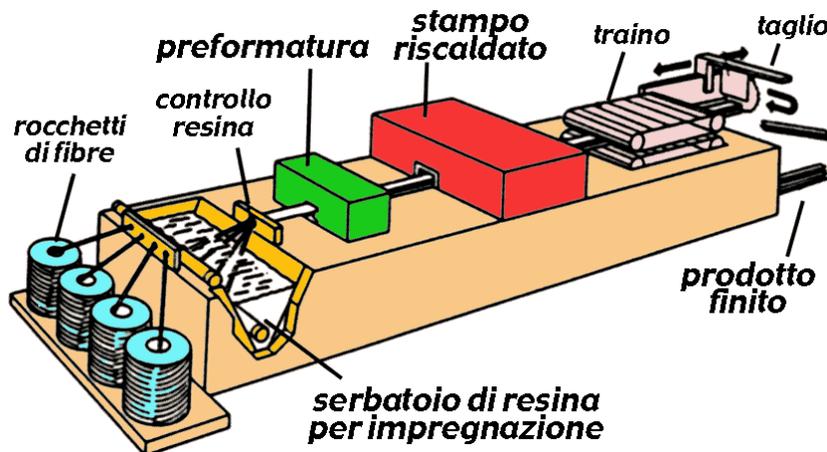


Figura 1.13 - Fasi del processo produttivo nella tecnica della pultrusione.

1.10 IMPIEGO DEI MATERIALI COMPOSITI NELL'AMBITO DEL RINFORZO STRUTTURALE

Le tipologie di prodotti che trovano applicazione nell'ambito del rinforzo strutturale sono le seguenti:

- **Tessuti di fibre unidirezionali o multidirezionali che vengono forniti allo stato secco e applicati attraverso laminazione manuale in situ.**
I tessuti vengono impregnati con la resina, che funge anche da adesivo con il substrato, direttamente in situ e non preventivamente.
- **Tessuti e nastri preimpregnati con resina non indurita**, che vengono applicati sulla superficie con o senza aggiunta di resine per l'impregnazione, a seconda della tipologia di sistema di rinforzo adottato.
Anche in questo caso i tessuti possono essere unidirezionali oppure multidirezionali.

- **Lamine piatte, fogli o nastri in FRP con resina indurita**, realizzati mediante pultrusione e applicati utilizzando un idoneo adesivo indicato dal produttore.

Prima di realizzare ogni applicazione è necessario studiare i componenti che garantiscano la migliore compatibilità chimico-fisica e meccanica sia tra loro che in relazione al supporto.

Non è consentito accoppiare resine e tessuti qualsiasi, ma si deve sempre far riferimento a comprovate prove sperimentali ed esperienze applicative.

Per poter ottenere un risultato soddisfacente infatti occorre che le fibre siano correttamente allineate ed impregnate e che ci sia una adeguata adesione tra supporto ed FRP.

L'aderenza tra rinforzo e substrato svolge infatti un ruolo determinante per il successo dell'intervento perché permette il trasferimento delle tensioni e garantisce così l'efficacia del sistema di rinforzo adottato.

Prima di effettuare il ripristino mediante incollaggio esterno è necessaria una preventiva valutazione del substrato: occorre verificare le condizioni del substrato e la sua superficie, in modo da accertarsi che questo risulti idoneo ad essere rinforzato e possa garantire una efficace aderenza all'interfaccia FRP – supporto.

Questo aspetto è di importanza basilare nelle applicazioni “per aderenza” (come nei rinforzi a flessione e a taglio) e di minore importanza nelle applicazioni “per contatto”, come nel caso del confinamento di colonne.

È necessaria inoltre una attenta analisi dei quadri fessurativi e, nel caso di rinforzo di strutture armate, anche una preventiva valutazione delle condizioni dell'armatura presente prima di procedere.

Nel caso del calcestruzzo è necessario valutare l'omogeneità dell'area da rinforzare, controllare l'eventuale presenza di carbonatazione e misurare la resistenza a compressione, che non deve risultare inferiore a 15 N/mm^2 .

Quest'ultima può essere valutata in situ mediante carotaggi e prove non distruttive, come ad esempio le prove sclerometriche, ultrasoniche o metodi combinati.

Nel caso di rinforzo di elementi in muratura, si devono valutare anche in tal caso l'omogeneità della stessa e le relative proprietà meccaniche.

Per la valutazione dell'omogeneità si possono utilizzare strumenti come la battitura manuale, gli ultrasuoni, la radiografia, la termografia, la tomografia, il penetrometro, le prove soniche.

Per giungere ad una stima delle proprietà meccaniche si possono effettuare ad esempio prove su campioni estratti, prove soniche o utilizzare ultrasuoni.

È importante sottolineare che, anche ad intervento ultimato, occorre procedere ad un accurato controllo e ad un eventuale monitoraggio nel tempo mediante prove non distruttive o parzialmente distruttive.

1.11 PREPARAZIONE DELLA SUPERFICIE

Una adeguata preparazione del supporto è fondamentale per una buona riuscita dell'operazione di rinforzo.

Si è già discusso brevemente della necessità di valutare l'idoneità del substrato ad essere rinforzato prima di procedere con l'intervento e delle principali prove che possono essere condotte a questo scopo.

Per quanto riguarda la preparazione della superficie, è necessario innanzitutto distinguere tra le applicazioni per aderenza e per contatto perché la preparazione risulta sostanzialmente diversa nei due casi.

Nelle **applicazioni per contatto** (come ad esempio avviene nel confinamento di elementi compressi) non è necessario garantire una perfetta aderenza tra l'FRP e il materiale da rinforzare, per cui le operazioni da svolgere possono limitarsi ad una

spazzolatura, alla rimozione dei detriti e ad una lisciatura con malta per scongiurare la possibilità che eventuali asperità possano danneggiare il composito. Nelle **applicazioni per aderenza** invece (come nel caso di rinforzi a flessione e a taglio) è necessario preparare adeguatamente la superficie, in modo da garantire la perfetta adesione del rinforzo.

Occorre rimuovere eventuali porzioni di materiale danneggiato o scadente e sostituirle con malta o altri materiali adatti, colmare eventuali vuoti e sigillare opportunamente le fessure.

La preventiva rimozione del calcestruzzo ammalorato in strutture in c.a. consente di accertare lo stato delle armature e di progettare eventuali interventi che limitino il deterioramento del calcestruzzo.

Nel caso di armature soggette ad un processo corrosivo si procede rimuovendo lo strato deteriorato mediante spazzolatura o sabbiatura per poi trattare la superficie con opportuni inibitori di corrosione.

Il reintegro del calcestruzzo ammalorato può avvenire mediante l'utilizzo di betoncini espansivi da ripristino.

Se la superficie presenta asperità superficiali rilevanti (solitamente maggiori di 10 mm) è opportuno eseguire un livellamento con stucco epossidico compatibile.

In generale, prima di procedere a qualsiasi applicazione, bisogna verificare che sulla superficie non siano presenti sostanze che possano interferire con una corretta adesione, come polvere o grassi.

Nel confinamento di pilastri, nel rinforzo a taglio ed in generale in tutti i casi in cui risulti necessario applicare il rinforzo intorno a degli spigoli, è necessario realizzare un preventivo arrotondamento degli stessi, assicurando che il raggio di curvatura sia almeno pari a 20 mm.

Poiché il meccanismo di adesione consiste principalmente nell'aggrappaggio meccanico dell'adesivo con il substrato, oltre che nella formazione di legami chimici, è importante avere superfici molto irregolari su scala microscopica (microrugosità) sulle quali l'adesivo possa espandersi, riempire pori e fessure presenti e quindi solidificare.

Le diverse tecniche che sono a disposizione per la preparazione della superficie sono, da un punto di vista generale, le seguenti:

- **Spazzolatura manuale:** si tratta di una tecnica applicabile su superfici di piccole dimensioni o per interventi localizzati e generalmente è complementare ad altre tecniche (*figura 1.14*).
- **Spazzolatura con trapano:** garantisce una efficacia maggiore rispetto alla spazzolatura manuale, ma va considerata sempre come un complemento ad altri interventi.



Figura 1.14 - Spazzolatura a mano (a sinistra) e con trapano (sulla destra).

- **Smerigliatura:** si effettua utilizzando dischi adeguati montati su un flessibile e genera molta polvere sulla superficie trattata.
In genere è seguita da una spazzolatura finale della superficie.
- **Bocciardatura:** si effettua con un apposito utensile, montato su un martello elettrico o funzionante ad aria compressa (*figura 1.15*).

L'effetto meccanico di battitura ripetuta sul sottofondo demolisce la parte non idonea all'applicazione del rinforzo.

La bocciardatura è idonea per calcestruzzo poco degradato e, come la smerigliatura, è generalmente seguita da spazzolatura.



Figura 1.15 – Bocciardatura.

- **Sabbiatura:** avviene proiettando granelli di sabbia di diversa granulometria contro il supporto per mezzo di aria compressa. L'effetto della sabbiatura è rilevante sulla superficie del supporto ed è fondamentale per creare una adeguata superficie di aggrappo. Tra i metodi elencati, risulta indubbiamente uno dei più efficaci.
- **Idrodemolizione:** risulta ancora più efficace della sabbiatura per la preparazione della superficie. Anziché sabbia, in questo trattamento si proietta violentemente un getto d'acqua sulla superficie, mediante utilizzo di un compressore che garantisce una pressione molto elevata (*figura 1.16*).



Figura 1.16 - Esempio di idrodemolizione.

Dopo aver preparato opportunamente la superficie in alcuni casi si applica con rullo uno strato di **primer epossidico** per migliorare le proprietà meccaniche dello strato superficiale e facilitare l'aderenza degli strati successivi.

Solo nel caso di superfici con una spiccata irregolarità si procede applicando uno strato di **stucco epossidico (putty)** che garantisce un adeguato livellamento e deve essere applicato entro non più di 48 ore dall'applicazione del primer.

1.12 TECNICHE DI RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A., C.A.P. E MURATURA

L'applicazione dei materiali compositi nell'ambito del rinforzo strutturale consente diverse tipologie di interventi.

In generale si possono progettare interventi di:

- **Rinforzo a flessione** di travi che sono state soggette a degrado o che non risultano più idonee alla nuova destinazione d'uso della struttura e che ad ogni modo presentano una resistenza inferiore a quella richiesta. Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere realizzato applicando al lembo teso dell'elemento da rinforzare lamine preformate o strati di tessuto impregnati in situ (*figura 1.17*)
- **Rinforzo a taglio**, mediante applicazione in aderenza sulla superficie esterna dell'elemento da rinforzare di compositi fibrorinforzati (tipicamente strisce di tessuto), che vanno a costituire uno o più strati. Le strisce possono essere applicate in maniera continua oppure discontinua. La disposizione del sistema di rinforzo attorno alla superficie può avvenire secondo modalità diverse: tipicamente si può avere una disposizione laterale, ad U o in avvolgimento (*figura 1.18*)
- **Confinamento di elementi soggetti a pressoflessione (pilastri in c.a e colonne in muratura)** non dotati di adeguata resistenza, mediante fasciatura esterna continua (ricoprimento) o discontinua (cerchiatura), realizzata mediante tessuti o lamine di FRP. Spesso vengono utilizzate anche barre (tiranti) di FRP nel confinamento di colonne in muratura. Il confinamento risulta molto efficace perché permette di incrementare la resistenza dell'elemento e la sua duttilità. Esempi di confinamento realizzati mediante fasciatura continua e discontinua sono riportati in *figura 1.19*.
- **Recupero di condotte, tubi, serbatoi, vasche, pali e altri manufatti in c.a**

- **Rinforzo di pannelli murari**
- **Rinforzo di elementi a semplice e doppia curvatura (archi, volte, cupole)**
- **Riduzione della spinta di strutture spingenti**
- **Trasformazione di elementi non strutturali in elementi strutturali, mediante conferimento di rigidità e capacità resistente**
- **Fasciatura o incatenatura dell'edificio in modo da garantirne la monoliticità e il comportamento scatolare ottimale**
- **Rinforzo (recupero) di solai in legno allo scopo di aumentarne la rigidità e la capacità portante**



Figura 1.17 - Rinforzo a flessione e a taglio di una trave in c.a.

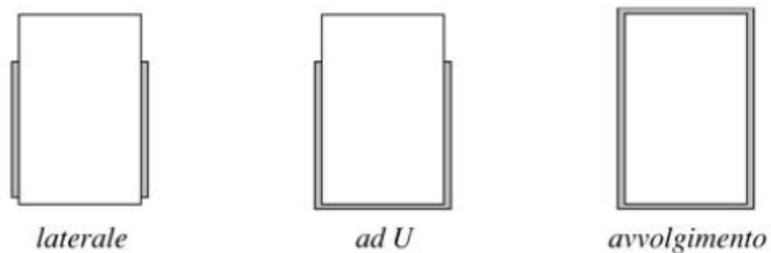


Figura 1.18 - Modalità di disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione.



Figura 1.19 - Esempio di confinamento realizzato mediante fasciatura esterna continua (a sinistra) e discontinua (sulla destra).



Figura 1.20 - Esempio di rinforzo di una volta.

Le tecniche di intervento utilizzate nell'ambito del recupero strutturale sono diverse, ma nell'applicazione dei materiali compositi si possono distinguere essenzialmente due categorie principali: quella degli interventi di placcaggio e quella delle opere di confinamento.

Il **placcaggio** consiste nell'applicazione del rinforzo in aderenza al lembo teso di elementi inflessi e permette di aumentare la capacità portante oltre a ridurre gli stati fessurativi.

Il **confinamento** (o wrapping) consiste invece, come già descritto in precedenza, nella fasciatura di elementi compressi o pressoinflessi, come pilastri, colonne e pile di ponti, con la finalità di conferire a questi elementi una maggiore resistenza e duttilità, requisiti essenziali in zona sismica.

L'utilizzo dei compositi fibreroinforzati ha permesso di risolvere brillantemente le problematiche inerenti agli interventi di risanamento di strutture danneggiate o degradate, adeguamento strutturale e rapida messa in sicurezza di costruzioni in condizioni di emergenza.

L'inserimento dei rinforzi permette di trasferire sforzi di trazione all'interno dei singoli elementi strutturali, di collegare elementi che collaborano per resistere ad un'azione esterna (es. catene o connessioni tra pareti ortogonali), di limitare l'apertura delle fessure, di eseguire opere di confinamento, di incrementare la resistenza di pannelli murari, archi e volte.

L'impiego degli FRP, nonostante il costo del materiale risulti ancora piuttosto elevato, viene comunque favorito dalla minor richiesta di manodopera e attrezzature e dalla realizzazione generalmente più rapida dell'intervento rispetto alle tecniche tradizionali.

1.13 MODALITÀ DI CRISI DI ELEMENTI RINFORZATI MEDIANTE FRP

In questa sezione si presenta una breve descrizione delle modalità di crisi di elementi rinforzati in c.a. e muratura, analizzando i modi di rottura per distacco dal supporto che possono verificarsi.

Vista la sostanziale diversità delle caratteristiche del supporto tra queste due tipologie, le modalità di crisi verranno descritte separatamente per elementi in c.a. e strutture murarie.

1.13.1 Elementi in c.a.

Nel caso del rinforzo di elementi strutturali in c.a. la crisi può avvenire secondo le seguenti modalità:

- **Si arriva a rottura per schiacciamento del calcestruzzo in zona compressa o per rottura a trazione del rinforzo in FRP con il composito che risulta ancora applicato.**

- Non si raggiunge la resistenza ultima dei materiali perché si verifica un **premature distacco dal supporto** della lamina o del tessuto utilizzati.

Tra le due modalità di crisi indicate, la seconda sicuramente non è quella preferibile, perché si manifesta in maniera estremamente fragile, ma purtroppo va detto che si tratta di una crisi tipica della tecnica del rinforzo strutturale.

Il meccanismo che consente il trasferimento della forza tra calcestruzzo e rinforzo è quello dell'aderenza.

Quando viene meno l'adesione tra i materiali si ha una crisi fragile, che a seconda dell'interfaccia nella quale si manifesta può dare luogo a:

- **Distacco del calcestruzzo vicino alla superficie oppure lungo uno strato indebolito**, come ad esempio lungo l'interfaccia con le armature.
In questa modalità di rottura si assiste ad un distacco del composito dal supporto insieme ad una porzione di calcestruzzo di una certa entità: si tratta di una tipica frattura coesiva, preferibile rispetto ad una frattura adesiva oppure mista.
- **Crisi adesiva** all'interfaccia tra adesivo e calcestruzzo oppure tra adesivo ed FRP: la crisi che si manifesta è tipicamente quella all'interfaccia calcestruzzo-adesivo ed è indice di una non perfetta preparazione della superficie o di una non corretta applicazione della lamina.
- **Crisi (frattura) mista**, che si manifesta con superfici di rottura piuttosto irregolari con coesistenza di parti in cui si è raggiunta la resistenza del substrato (di cui una parte è rimasta quindi incollata al rinforzo) e parti in cui è avvenuta una crisi adesiva all'interfaccia tra calcestruzzo e rinforzo (*figura 1.21*). Si tratta di una crisi intermedia tra una frattura adesiva e una

coesiva e di solito si manifesta quando il substrato non è ben consolidato e/o quando l'adesivo non è stato applicato in maniera ottimale.

- **Delaminazione all'interno della lamina in FRP:** è una rottura che si manifesta piuttosto raramente ed è originata dalla crisi del legame di aderenza tra fibre e matrice all'interno dell'FRP.

Visto che la resina manifesta una resistenza a taglio decisamente superiore rispetto a quella offerta dal calcestruzzo, questa modalità di crisi risulta secondaria e può manifestarsi soprattutto in concomitanza all'applicazione su calcestruzzi ad alta resistenza.

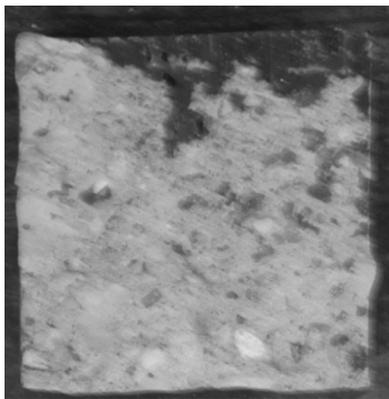


Figura 1.21 - Esempio di frattura mista. Lo sfruttamento della resistenza del substrato non è ottimale, a causa della parte in alto (più scura) in cui si è manifestata una pura crisi adesiva.

Volendo classificare i diversi modi di rottura per distacco dal supporto in un elemento in c.a. rinforzato a flessione con tessuti o lamine, possiamo distinguere quattro modalità principali:

- **Distacco di estremità:** avviene nelle zone terminali del rinforzo, dove ci sono elevate tensioni tangenziali di interfaccia.

In caso di utilizzo di lamine nel rinforzo di un elemento inflesso si possono instaurare anche significative tensioni di trazione in direzione normale all'interfaccia (tensioni di peeling) a causa della rigidità flessionale del rinforzo. La concomitante presenza di tensioni tangenziali di interfaccia e tensioni normali favorisce un prematuro distacco di estremità del rinforzo.

- **Distacco indotto da fessure per flessione nell'elemento inflesso:** si manifesta perché le fessure che si originano nel calcestruzzo teso generano concentrazioni tensionali all'interfaccia con l'FRP, che possono portare a un distacco totale o parziale del rinforzo. Le fessure che si originano in una trave possono essere ortogonali rispetto all'asse dell'elemento (prevalenza di momento flettente) oppure inclinate (se agiscono contemporaneamente momento flettente e taglio).
- **Distacco causato da fessure da taglio nel calcestruzzo:** si tratta di un tipo di rottura che avviene su elementi scarsamente armati a taglio, a causa dell'apertura di fessure diagonali che originano un distacco del supporto per effetto delle tensioni di peeling (*figura 1.22*).
- **Distacco causato da irregolarità e rugosità della superficie del calcestruzzo:** le irregolarità superficiali possono provocare perdite di aderenza localizzate che possono propagarsi fino a provocare il distacco completo del rinforzo dal calcestruzzo.

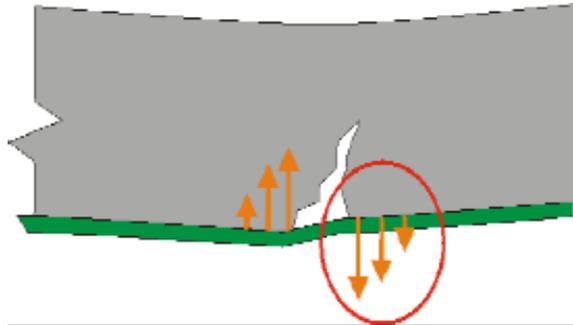


Figura 1.22 - Distacco originato da fessure diagonali da taglio.

1.13.2 Muratura

Le modalità di crisi dei materiali possibili per una struttura muraria che è stata rinforzata con FRP sono le seguenti:

- **Crisi per schiacciamento della muratura**
- **Taglio-scorrimento della muratura**
- **Fessurazione della muratura a trazione**
- **Rottura del composito fibrorinforzato**
- **Distacco del rinforzo dal supporto**

Prendendo in considerazione l'ultima modalità di crisi, il distacco del rinforzo dalla muratura può avvenire essenzialmente secondo due modi principali:

- **Distacco di estremità del rinforzo**

- **Distacco intermedio a partire dai corsi di malta o da fessure trasversali nella muratura**

Per quanto riguarda il distacco della parte terminale del rinforzo, questo in genere risulta accompagnato dall'asportazione di uno strato di muratura (*rip-off failure*).

Ciò avviene in maniera significativa soprattutto quando alle tensioni tangenziali di estremità si associano sforzi di trazione.

È opportuno sottolineare come, qualora siano presenti sforzi agenti in direzione normale all'interfaccia (tensioni di peeling), la forza di debonding risulti ridotta.

Tensioni di peeling rilevanti si manifestano ad esempio in caso di applicazione del rinforzo all'intradosso di archi e volte o quando la rigidità flessionale della lamina che viene applicata è elevata.

Concentrazioni tensionali in presenza di fessure, giunti di malta, discontinuità o disomogeneità del paramento murario risultano inoltre dannose per il rinforzo.

In caso di applicazione del rinforzo per prevenire l'allargamento di fessure preesistenti, la modalità utilizzata (in quanto risulta la più efficace) è quella di applicare il rinforzo orientando le fibre in direzione ortogonale alle fessure.

Questa scelta è ovviamente motivata dalla possibilità di far lavorare il composito al meglio per resistere agli sforzi di trazione presenti.

CAPITOLO 2

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI NELLE PROVE

2.1 MATERIALI IMPIEGATI NEL CORSO DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

Come già anticipato nel corso del capitolo introduttivo, la campagna sperimentale si pone l'obiettivo di analizzare il fenomeno dell'aderenza tra FRP e substrato, impiegando diverse tipologie di mattoni e differenti finiture superficiali.

Si precisa che le prove sono state condotte applicando il rinforzo sia sul singolo mattone, sia su campioni di muratura costruiti sempre utilizzando mattoni delle stesse tipologie.

Si precisa che in totale è stato previsto l'impiego di quattro diversi tipi di mattoni, che verranno descritti al § 2.2.1.

Per quanto riguarda il trattamento superficiale, sono state indagate le caratteristiche di aderenza applicando il rinforzo direttamente sulla superficie (finitura tipo A) oppure dopo aver effettuato preventivamente una rasatura impiegando due malte di caratteristiche diverse (descritte ai §§ 2.2.2 e 2.2.3).

Si ricorda che, tra le possibili variabili che intervengono sulla massima forza sopportabile dal rinforzo, si intende indagare il comportamento dei campioni utilizzando la stessa tipologia di fibra di vetro, che verrà descritta in seguito, mantenendo fissati i parametri lunghezza di ancoraggio e larghezza del rinforzo e variando solo le caratteristiche del substrato utilizzato.

In particolare, si è scelto di adottare una larghezza del rinforzo e una lunghezza di ancoraggio fissi e pari rispettivamente a 50 mm e 200 mm.

L'unico parametro che è stato variato passando dalle prove sui mattoni singoli alle prove sui campioni di muratura è stato la lunghezza della zona non incollata sulla parte anteriore del campione: mentre nei mattoni non è stato possibile adottare un valore superiore a 30 mm per ovvie limitazioni dimensionali del provino, nei muretti, vista la maggiore lunghezza del campione, ci si è potuti spingere sino a 100 mm, valore che serve a garantire un debonding più pulito, senza il rischio di asportare cunei di materiale dal bordo anteriore.

Va inoltre rilevato che, a rigore, la faccia del mattone su cui viene effettuata l'applicazione del rinforzo non è la stessa nelle prove su mattoni e muretti: il tessuto viene infatti applicato sulla faccia laterale dei mattoni nei campioni di muratura e sulla faccia superiore degli stessi nelle prove condotte sul singolo mattone.

Tale modalità è stata adottata perché la faccia laterale del mattone presentava singolarmente dimensioni troppo esigue per l'applicazione del rinforzo, ma occorre comunque tener presente questa differenza fra le due tipologie di campioni.

2.2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI UTILIZZATI

Per la realizzazione dei campioni da sottoporre alle prove di aderenza è stato previsto l'utilizzo di quattro diverse tipologie di mattone, mentre per la realizzazione dei letti tra i mattoni stessi è stata utilizzata sempre la stessa malta (Tassullo T30 V), le cui caratteristiche verranno indicate al § 2.2.2.

Per la realizzazione della rasatura invece la scelta è ricaduta su due diverse tipologie di malta, così da analizzare il comportamento del rinforzo al variare delle caratteristiche del substrato.

Di seguito si riporta la descrizione dei materiali utilizzati.

2.2.1 Mattoni

Per quanto riguarda i mattoni, sono state utilizzate quattro diverse tipologie:

- 1) Mattone RDB classico 010 pieno con finitura a sabbia, formato UNI, visibile in *figura 2.1* , che in seguito verrà indicato come mattone tipo 1
- 2) Mattone IBL pieno, formato UNI, visibile in *figura 2.2* , che in seguito verrà chiamato mattone tipo 2
- 3) Mattone pieno liscio tipo bolognese, riportato in *figura 2.3* , la cui denominazione sarà mattone tipo 3
- 4) Mattone pieno di recupero (*figura 2.4*) , indicato in seguito come mattone tipo 4

Una descrizione più esaustiva della nomenclatura dei provini realizzati verrà riportata in seguito al § 2.4.

Sul singolo mattone sono state eseguite prove di caratterizzazione del materiale a flessione e compressione, i cui risultati verranno indicati ai paragrafi 2.5.1 e 2.5.2.



Figura 2.1 - Mattone RDB classico 010 con finitura a sabbia (mattone tipo 1).



Figura 2.2 - Mattone IBL pieno (mattone tipo 2).



Figura 2.3 - Mattone pieno liscio tipo bolognese (mattone tipo 3).



Figura 2.4 - Mattone pieno di recupero (mattone tipo 4).

2.2.2 Malta utilizzata per la realizzazione dei campioni

Per la realizzazione dei letti di malta è stata utilizzata la stessa tipologia per tutti i campioni, ovvero si è fatto uso di malta Tassullo T30 V.

Si tratta di una malta a base di calce idraulica naturale ed inerti selezionati con granulometria massima di 4 mm, dotata di resistenza medio-alta e di un basso contenuto di sali idrosolubili.

Altra caratteristica di questa malta è che risulta a ritiro controllato.

I dati tecnici (forniti dal produttore) vengono riportati in seguito:

- **Granulometria (UNI EN 1015-1):** da 0 a 4 mm
- **Acqua d'impasto:** ca. 0.16 l/kg (ca. 5 l/sacco)
- **Peso specifico (UNI EN 1015/10):** 1750 ÷ 1850 kg/m³
- **Resistenza a compressione (UNI EN 1015-11):** Classe CS III (3.5 ÷ 7.5 N/mm²)
- **Resistenza alla diffusione del vapore (UNI 9233):** $\mu = 12$
- **pH:** > 10.5
- **Classe di resistenza al fuoco:** A1

2.2.3 Malta utilizzata per la rasatura

Per effettuare la rasatura sui provini si è scelto di utilizzare due diverse tipologie di malta: Tassullo T30V per la finitura di tipo B e Mapei Mapefinish per la finitura tipo C, in modo da confrontare il comportamento dei diversi trattamenti superficiali.

Visto che la scheda tecnica della malta Tassullo T30V è già stata riportata, di seguito si presenta una descrizione anche della malta Mapei Mapefinish.

Si tratta di una malta bicomponente a base di cementi ad alta resistenza, aggregati selezionati a grana fine, additivi speciali e polimeri sintetici in dispersione acquosa.

La scheda tecnica fornita dal produttore fornisce i seguenti dati:

- **Rapporto dell'impasto:** componente A: componente B = 4:1
- **Massa volumica dell'impasto:** 1900 kg/m³
- **Temperatura di applicazione permessa:** da +5 a +35°C
- **Durata dell'impasto:** circa 1h
- **Resistenza a compressione (EN 12190):** > 35 MPa (a 28 gg)
- **Resistenza a flessione (EN 196/1):** > 10 MPa (a 28 gg)
- **Modulo elastico a compressione (EN 13412):** 14 GPa (a 28 gg)
- **Adesione al supporto (EN 1542):** ≥ 2 MPa (a 28 gg)
- **Compatibilità termica di cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti (EN 13678/1), misurata come adesione (EN 1542):** ≥ 2 MPa
- **Assorbimento capillare (EN 13057):** < 0.30 kg/m²·h^{0.5}
- **Impermeabilità espressa come coefficiente di permeabilità all'acqua libera (EN 1062-3):** $W < 0.05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ Classe III (bassa permeabilità all'acqua) secondo EN 1062-1
- **Permeabilità al vapor acqueo – spessore d'aria equivalente S_D (EN ISO 7783-1):** $S_D < 0.5 \text{ m}$
- **Resistenza alla carbonatazione accelerata (EN 13295):** profondità di carbonatazione ≤ del calcestruzzo di riferimento (tipo MC 0.45 rapporto a/c 0.45) secondo UNI 1766
- **Reazione al fuoco (Euroclasse):** E
- **Consumo (per mm di spessore):** 2 kg/m²

Relativamente alla malta Tassullo T30V, sono stati realizzati due cubetti e due cilindri per poi eseguire su questi rispettivamente prove di compressione e prove brasiliane.

I risultati ottenuti durante queste prove di caratterizzazione del materiale verranno discussi ai paragrafi 2.5.3 e 2.5.4.

2.2.4 GFRP

Il rinforzo è stato realizzato utilizzando un tessuto SikaWrap 430 G impregnato in situ grazie all'utilizzo di resina epossidica Sikadur 330.

Si tratta di un tessuto in fibra di vetro con andamento unidirezionale delle fibre, dotato dalle seguenti caratteristiche (fornite dal produttore):

- **Resistenza a trazione delle fibre:** 2300 N/mm² (misurato sul tessuto)
- **Modulo elastico a trazione:** 76000 N/mm²
- **Allungamento a rottura:** 2.8 % (misurato sul tessuto)
- **Densità:** 2.56 g/cc
- **Peso:** 445 g/mq ± 22 g/mq
- **Direzione primaria della fibra:** 0° (unidirezionale)
- **Spessore:** 0.172 mm (basato sull'area totale delle fibre)

La resina Sikadur 330 che è stata utilizzata è una resina epossidica bicomponente le cui caratteristiche (fornite dal produttore) sono indicate in seguito:

- **Aspetto:** - componente A (bianco) - componente B (grigio)
- **Peso specifico:** 1.31 kg/l
- **Rapporto stechiometrico:** 4:1 in peso
- **Pot life:** 30 minuti (a +23°C)
- **Temperature di applicazione:** da +5 a +30 °C
- **Adesione su calcestruzzo:** 3 N/mm² (rottura calcestruzzo)
- **Resistenza a trazione diretta:** 30 N/mm²

Le modalità di preparazione della superficie e di applicazione del rinforzo verranno descritte al capitolo 3.

2.3 CAMPIONI DI MURATURA REALIZZATI

Mentre per quanto riguarda i mattoni è stato sufficiente procedere alla delimitazione della superficie di incollaggio e alla pulitura della superficie prima di procedere all'applicazione del rinforzo, i campioni di muratura sono stati invece realizzati preventivamente in numero di sedici esemplari.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei campioni di muratura realizzati:

Tipologia di mattone	Muretti senza rasatura	Muretti con rasatura superficiale utilizzando malta Tassullo T30V	Muretti con rasatura utilizzando malta Mapei Mapefinish	Totale campioni
Mattone RDB Classico	2	1	1	4
Mattone IBL	2	1	1	4
Mattone tipo bolognese	2	1	1	4
Mattone di recupero	2	1	1	4
Totale	8	4	4	16

Tabella 2.1 - Campioni di muratura realizzati.

Per quanto riguarda la cronologia di realizzazione dei campioni si può invece fare riferimento alla seguente tabella:

Tipologia di campione	Numero di campioni	Descrizione della tipologia	Data di realizzazione
Muretti non rasati	2	Mattone RDB classico	28/02/2011
Muretti non rasati	2	Mattone IBL	01/03/2011
Muretti non rasati	2	Mattone pieno liscio tipo bolognese	28/02/2011
Muretti non rasati	2	Mattone pieno di recupero	01/03/2011
Muretti con rasatura (Tassullo T30V)	4	un muretto per ogni tipologia	03/03/2011 (data applicazione rasatura)
Muretti con rasatura (Mapei Mapefinish)	4	un muretto per ogni tipologia	14/03/2011 (data applicazione rasatura)
Cubetto malta Tassullo T30 V	2	Cubetto con lato L=100 mm	02/03/2011
Cilindro malta Tassullo T30 V	2	Cilindro L=95 mm H=225 mm	02/03/2011

Tabella 2.2 - Cronologia della realizzazione dei campioni.

In riferimento alla tabella sopra riportata, si chiarisce che i campioni sui quali è stata applicata la rasatura sono stati realizzati contemporaneamente agli altri non

rasati, pertanto la data indicata per questi è la data di applicazione della rasatura e non quella di realizzazione del muretto stesso.

Per una descrizione accurata della preparazione dei campioni si rimanda al capitolo 3, dove vengono descritte tutte le fasi relative alla realizzazione e alla preparazione dei campioni da sottoporre alle prove di aderenza.

2.4 SIGLE DEI PROVINI

Per quanto riguarda la nomenclatura dei provini si è scelto di utilizzare una sigla composta da cinque caratteri alfanumerici, con la seguente convenzione:

- **PRIMA LETTERA (MAIUSCOLA):** serve a distinguere i mattoni dai muretti. Con la lettera B si indicano i mattoni (B = brick (mattone)), mentre con la lettera M si indica il campione di muratura (M = masonry (muretto)).

- **PRIMO NUMERO:** il numero che segue immediatamente la prima lettera indica la tipologia di mattone utilizzata:
 - 1 = mattone RDB classico 010 con finitura a sabbia (formato UNI, pieno)
 - 2 = mattone UNI pieno IBL
 - 3 = mattone pieno liscio tipo bolognese
 - 4 = mattone pieno di recupero

Questa nomenclatura è coerente con quella già indicata al § 2.2.1, dove sono stati indicati i mattoni utilizzati nelle prove.

- **SECONDA LETTERA (MAIUSCOLA):** la seconda lettera del nome del campione indica il tipo di trattamento superficiale:
 - A = campione senza rasatura superficiale
 - B = provino sul quale è stata effettuata una rasatura con malta Tassullo T30V
 - C = rasatura effettuata con malta Mapei Mapefinish
- **SECONDO NUMERO:** indica il numero del provino
- **ULTIMA LETTERA (MINUSCOLA):** indica la faccia del provino sulla quale viene svolta la prova di aderenza. Per i mattoni si utilizzano le lettere a,b; per i muretti invece a,b,c,d

Per chiarire meglio la nomenclatura utilizzata, si riportano un paio di esempi:

- **B1A1a** = mattone (B), tipo 1, non rasato (A), provino numero 1, faccia a
- **M3B1c** = muretto (M), mattone tipo 3, rasatura con malta tipo B, campione numero 1, faccia c

Per quanto riguarda le facce di un muretto, un ulteriore chiarimento è fornito in *figura 2.5*.



Figura 2.5 - Indicazione delle facce dei campioni: a sinistra è rappresentato un muretto (in pianta) tagliato a metà del lato lungo che origina due campioni con facce a,b,c,d sulle quali poi incollare il rinforzo; a destra invece è indicato schematicamente un muretto non tagliato con le sole due facce a,b disponibili per l'applicazione del composito.

I mattoni chiaramente presentano solo due facce disponibili per l'applicazione del rinforzo, che sono state indicate con le lettere minuscole a,b.

A completamento di questa breve descrizione, si precisa che, partendo dai sedici muretti realizzati inizialmente, solo dodici di questi sono stati tagliati sul lato lungo, mentre quattro sono stati lasciati alle loro dimensioni originali (quelli con finitura di tipo A), ottenendo quindi ventiquattro muretti dai dodici di partenza.

	Provini tagliati	Sigla facce	Numero di provini	Numero facce
1	M1A1	M1A1a,b M1A1c,d	2	4
2	M2A1	M2A1a,b M2A1c,d	2	4
3	M3A1	M3A1a,b M3A1c,d	2	4
4	M4A1	M4A1a,b M4A1c,d	2	4
5	M1B1	M1B1a,b M1B1c,d	2	4
6	M2B1	M2B1a,b M2B1c,d	2	4
7	M3B1	M3B1a,b M3B1c,d	2	4
8	M4B1	M4B1a,b M4B1c,d	2	4
9	M1C1	M1C1a,b M1C1c,d	2	4
10	M2C1	M1C1a,b M1C1c,d	2	4
11	M3C1	M1C1a,b M1C1c,d	2	4
12	M4C1	M4C1a,b M4C1c,d	2	4
Totale			24	48

Tabella 2.3 - Campioni ottenuti dopo il taglio.

	Provini non tagliati	Sigla facce	Numero di provini	Numero facce
1	M1A2	M1A2a,b	1	2
2	M2A2	M2A2a,b	1	2
3	M3A2	M3A2a,b	1	2
4	M4A2	M4A2a,b	1	2
Totale			4	8

Tabella 2.4 - Campioni di muratura non tagliati.

Si precisa che al momento non sono stati sottoposti a prove di aderenza tutti i campioni elencati, ma solo quelli indicati nel programma di incollaggio descritto in seguito (§ 3.4).

Per quanto riguarda i mattoni, sono stati preparati per le prove, con le modalità che verranno illustrate al capitolo 3, mattoni delle quattro tipologie, sia senza rasatura, sia con applicazione di una rasatura superficiale.

I mattoni e i muretti su cui sono stati applicati i rinforzi, sono indicati nelle *tabelle 2.5, 2.6 e 2.7*.

Infine, un quadro riassuntivo delle prove di aderenza che sono state condotte viene presentato in *tabella 2.8*.

Tipologia di mattone	Mattoni	N. facce mattoni	Muretti	N. facce Muretti (GFRP)
Mattone RDB Classico	B1A1a B1A2a	2	M1A1a M1A1c	2
Mattone IBL	B2A1a B2A2a	2	M2A1a M2A1c	2
Mattone tipo bolognese	B3A1a B3A2a	2	M3A1a M3A1c	2
Mattone di recupero	B4A1a B4A2a	2	M4A1a M4A1c	2
Totale		8		8

Tabella 2.5 - Mattoni e muretti sottoposti alle prove di aderenza non dotati di rasatura superficiale.

Tipologia di mattone	Mattoni	N. facce mattoni	Muretti	N. facce Muretti (GFRP)
Mattone tipo bolognese	B3B1a	1	M3B1a M3B1c	2
Mattone di recupero	B4B1a	1	M4B1a M4B1c	2
Totale		2		4

Tabella 2.6 - Mattoni e muretti utilizzati nelle prove con rasatura di tipo B.

Tipologia di mattone	Mattoni	N. facce mattoni	Muretti	N. facce Muretti (GFRP)
Mattone tipo bolognese	B3C1a	1	M3C1a M3C1c	2
Mattone di recupero	B4C1a	1	M4C1a M4C1c	2
Totale		2		4

Tabella 2.7 - Mattoni e muretti con rasatura superficiale di tipo C.

Prove su mattone singolo	12
Prove su muretti	16
TOTALE	28

Tabella 2.8 - Tabella riassuntiva delle prove di aderenza che sono state svolte.

2.5 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

L'esecuzione di queste prove si è resa necessaria per conoscere le caratteristiche dei materiali impiegati nelle prove.

Le prove sono state svolte presso il LISG (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica) grazie all'ausilio di personale qualificato.

Per quanto riguarda il rinforzo, l'unica quantità necessaria all'elaborazione dei dati, oltre alle caratteristiche dimensionali già note, è stata il modulo elastico, che è stato misurato nel corso dello svolgimento delle prove di aderenza, secondo le modalità che verranno indicate in seguito.

La resistenza a trazione del rinforzo, invece, non è stata tra le quantità significative richieste, perché le prove sono state condotte allo scopo di valutare l'aderenza tra composito e substrato, senza cercare la rottura del rinforzo stesso.

I dati del tessuto utilizzato, pertanto, sono stati ricavati a partire dalla scheda tecnica del produttore, ad eccezione del modulo elastico, che è stato misurato in maniera accurata nel corso di più prove, in quanto spesso la misura sperimentale differisce significativamente da quella indicata nelle schede tecniche.

Come si vedrà nella descrizione dei risultati delle prove (capitolo 6), in particolare il modulo elastico misurato è risultato significativamente superiore a quello indicato nella scheda tecnica.

Per quanto riguarda i mattoni e la malta utilizzati per la realizzazione dei campioni, sono state condotte tutte le prove di caratterizzazione necessarie, allo scopo di determinare le resistenze a compressione e a trazione dei materiali utilizzati.

In questo ambito, sono state condotte prove di caratterizzazione a flessione e compressione sulle quattro tipologie di mattoni utilizzate, oltre a prove di compressione e di trazione indiretta per quanto riguarda la malta impiegata per la realizzazione dei campioni di muratura.

Si precisa che, quando si svolgono prove sperimentali, le quantità di interesse per la corretta interpretazione dei risultati, sono le resistenze medie piuttosto che quelle caratteristiche.

Nelle prove, infatti, si è interessati all'effettiva resistenza che il campione manifesta nel corso dello svolgimento dei test e non alle grandezze caratteristiche, che invece sono più affini alla progettazione.

In seguito si presentano i risultati ottenuti durante le prove di caratterizzazione dei materiali utilizzati per i campioni, ovvero mattoni e malta.

2.5.1 PROVE DI COMPRESSIONE SUI MATTONI

Su ogni tipologia di mattone sono state condotti innanzitutto prove per la determinazione della resistenza a compressione.

A partire dai mattoni scelti per l'esecuzione della prova sono stati ricavati campioni aventi le caratteristiche dimensionali indicate nella *tabella 2.9*.

La nomenclatura utilizzata prevede per i campioni sigle alfanumeriche composte da cinque caratteri, secondo la seguente **convenzione**:

- la **prima lettera** indica la tipologia di materiale testato e in tal caso è sempre B (B = brick, mattone)
- il **primo numero** indica il tipo di mattone testato, secondo le convenzioni già descritte in precedenza. Si ricorda che il numero 1 designa il mattone RDB classico 010 con finitura a sabbia, il numero 2 indica il mattone pieno IBL, il numero 3 indica il mattone liscio tipo bolognese e il numero 4 si riferisce al mattone di recupero
- la **seconda** e la **terza lettera** indicano il tipo di prova che è stata condotta sul mattone (PC = prova di compressione)
- l'**ultimo numero** indica il numero del campione testato (1,2).

Campione	Dimensione min (mm)	Dimensione max (mm)	Altezza (mm)
B1PC1	118	120	50
B1PC2	117	120	50
B2PC1	118	120	47
B2PC2	116	118	47
B3PC1	110	120	56
B3PC2	110	120	56
B4PC1	126	140	48
B4PC2	130	140	52

Tabella 2.9 - Dimensioni dei campioni (ricavati dai mattoni) sottoposti alle prove di compressione.

L'operazione di ritagliare questi provini da elementi di dimensioni maggiori (in questo caso il mattone intero originale) ha lo scopo di creare un campione regolare, in quanto le facce devono risultare prive di irregolarità superficiali e devono apparire lisce e livellate, in conformità a quanto prescritto dalla norma UNI EN 772-1.

I campioni devono soddisfare le esigenze di planarità e parallelismo e, se necessario, vanno rettificati prima della prova finché non raggiungono i requisiti richiesti.

La determinazione delle dimensioni dei campioni è stata condotta in maniera conforme a quanto indicato dalla norma UNI EN 772-16.

La sistemazione dei provini nella macchina di prova è avvenuta togliendo tutte le particelle dalle facce di posa del provino e allineandolo al centro della macchina stessa (*figura 2.6*).

Applicando una velocità di carico consona a quanto prescritto, i campioni sono stati portati a rottura ed è stato ottenuto il carico massimo sopportabile dal provino.



Figura 2.6 - Collocazione del campione nella macchina di prova.



Figura 2.7 - Aspetto dei campioni al termine dell'esecuzione della prova.

Dividendo il carico massimo raggiunto per l'area di carico è stato possibile quindi determinare la resistenza a compressione dei campioni e, seguendo quanto prescritto all'appendice A della norma UNI EN 772-1, i valori ottenuti sono stati convertiti in valori di resistenza alla compressione normalizzata.

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella seguente:

Sigla del campione	Carico massimo (t)	Resistenza a compressione (MPa)	Fattore di forma (UNI EN 772-1)	Resistenza a compressione normalizzata (MPa)	Media (MPa)
B1PC1	31.750	21.996	0.73	16.057	16.304
B1PC2	32.450	22.673	0.73	16.552	
B2PC1	39.000	27.019	0.73	19.724	18.233
B2PC2	32.000	22.934	0.73	16.742	
B3PC1	57.850	42.993	0.76	32.675	32.901
B3PC2	58.650	43.588	0.76	33.127	
B4PC1	87.550	48,689	0.71	34.569	29.186
B4PC2	62.200	33.526	0.71	23.804	

Tabella 2.10 - Risultati delle prove di compressione sui mattoni.

Come si può vedere dalla tabella, i due campioni relativi al mattone di tipo 1 hanno esibito una resistenza tra loro paragonabile, ma mediamente più bassa rispetto alle altre tipologie.

Anche i mattoni di tipo 2 sono risultati meno resistenti rispetto ai mattoni di tipo 3 o 4.

Ciò dovrebbe lasciar presagire una maggiore resistenza del substrato per quanto riguarda i mattoni delle ultime due tipologie rispetto a quelli meno resistenti, comportamento effettivamente registrato durante le prove di aderenza.

2.5.2 PROVE A FLESSIONE SUI MATTONI

Oltre alle prove di compressione appena descritte, su tutte le tipologie di mattone sono state condotte anche prove di flessione a 3 punti per determinare la resistenza a trazione del materiale.

I campioni ricavati a partire dai mattoni scelti per le prove hanno le dimensioni indicate nella *tabella 2.11*.

Campione	Larghezza sezione (mm)	Altezza sezione (mm)	Luce (mm)
F1a	40.5	53.6	200
F1b	40	52.3	200
F2a	41.3	53	200
F2b	40.7	53.3	200
F3a	41.2	60.5	200
F3b	40	59	200
F4a	40	47	200
F4b	40.4	45.5	200

Tabella 2.11 - Dimensioni dei campioni (ricavati dai mattoni delle quattro tipologie) sottoposti alle prove di flessione per la determinazione della resistenza a trazione e luce tra gli appoggi.

La nomenclatura utilizzata prevede per i campioni sigle alfanumeriche di tre caratteri, secondo la seguente **convenzione**:

- la **prima lettera** indica la tipologia di prova a cui il campione è stato sottoposto e in tal caso è sempre F (prova a flessione)
- il **primo numero** indica il tipo di mattone testato, secondo le convenzioni già descritte in precedenza.
- la **seconda lettera** indica il campione testato (a,b).

Operativamente, sono stati selezionati due mattoni per ognuna delle quattro tipologie disponibili e da ciascuno di essi è stato ricavato uno dei provini descritti in *tabella 2.11*, ottenendo in totale otto campioni.

Dopo essersi accertati che i provini da sottoporre al test soddisfacessero i requisiti di regolarità richiesti, questi sono stati collocati nel macchinario di prova e portati a rottura, registrando il carico massimo applicato.

Note le caratteristiche dimensionali del campione e la luce tra gli appoggi (pari a 200 mm), ricordando che il carico viene applicato in mezzeria, la resistenza a trazione è stata ricavata semplicemente applicando la formula:

$$f_{bf} = \frac{M}{W} = \frac{\frac{Pl}{4}}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3}{2} \frac{Pl}{bh^2} \quad (2.1)$$

in cui P rappresenta il massimo carico registrato, l è la luce tra gli appoggi, mentre b e h sono rispettivamente la larghezza e l'altezza della sezione.

Applicando la (2.1) ai campioni testati, si ottengono i seguenti risultati:

Campione	Carico max (kg)	Resistenza a trazione (MPa)	Media (MPa)
F1a	140	3.541	3.680
F1b	142	3.820	
F2a	257	6.520	5.907
F2b	208	5.294	
F3a	-	-	7.144
F3b	338	7.144	
F4a	213	7.094	9.705
F4b	350	12.316	

Tabella 2.12 – Resistenza a trazione dei campioni testati.

Come si può vedere dalla tabella, non è presente la resistenza a trazione per il campione F3a: purtroppo ciò è dovuto ad una prematura rottura del provino poco dopo la sua collocazione all'interno del macchinario di prova.

L'unica spiegazione che si può dare a questo proposito è che evidentemente il campione era già stato danneggiato e quindi, nonostante il suo aspetto apparentemente integro, non è stato in grado di sopportare alcun carico degno di nota.



Figura 2.8 – Campione durante l'esecuzione della prova.

2.5.3 PROVE A COMPRESSIONE SU MALTA

La determinazione della resistenza a compressione della malta Tassullo T30V, impiegata per la realizzazione dei muretti e per la rasatura superficiale di tipo B, è stata effettuata testando due cubetti con lato 100 mm realizzati al termine della realizzazione dei campioni di muratura (si veda a tal proposito la *tabella 2.2*).

I risultati ottenuti sono riportati nella *tabella 2.13*, mentre la *figura 2.9* mostra i cubetti a fine prova: la tipica modalità di rottura a clessidra è indice di una corretta realizzazione dei campioni e del regolare svolgimento della prova stessa.

Campione	Lunghezza (mm)	Larghezza (mm)	Altezza (mm)	Carico max (kg)	Resistenza a compressione (MPa)
BCM1	99	99	100	4410	4.414
BCM2	99	100	100	3880	3.845

Tabella 2.13 – Resistenza a compressione dei cubetti testati.



Figura 2.9 – Modalità di rottura dei cubetti.

2.5.4 PROVE DI TRAZIONE INDIRETTA (BRASILIANE) SU MALTA

Per completare il quadro relativo alla caratterizzazione dei materiali impiegati, sono state condotte prove di trazione indiretta su due cilindri di malta realizzati al termine della costruzione dei muretti (si veda a tal proposito la *tabella 2.2*).



Figura 2.10 – Prova brasiliana su un cilindro di malta.

Per la determinazione della resistenza a trazione indiretta dei campioni testati occorre far riferimento alla seguente formula:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (2.2)$$

dove F è il carico massimo a rottura, L è la lunghezza della linea di contatto del provino (coincidente con la lunghezza del provino stesso) e d è il diametro del cilindro.

Esprimendo il carico massimo in N e le altre due dimensioni in mm, si ottiene la resistenza a trazione indiretta in MPa.

I risultati ottenuti sui due campioni testati sono indicati nella seguente tabella:

Campione	Diametro d (mm)	Lunghezza L (mm)	Carico max F (kg)	Resistenza a trazione (MPa)
MB1	95	225	4100	1.198
MB2	95	225	3100	0.906

Tabella 2.14 – Resistenza a trazione indiretta dei campioni testati.

La figura successiva mostra la modalità di rottura di un cilindro, che conferma il corretto svolgimento della prova.



Figura 2.11 – Modalità di rottura di un cilindro sottoposto a prova di trazione indiretta.

2.5.5 PROVA DI STRAPPO NORMALE (PULL-OFF) SU CAMPIONE B4A1a

Durante la prova di aderenza condotta sul campione B4A1a (si veda il § 6.2.13) si è verificata la rottura del composito prima che si giungesse al completo distacco del rinforzo.

Vista la disponibilità di una consistente parte di composito rimasta ancora completamente incollata al substrato, si è pensato che potesse risultare utile svolgere una prova di pull-off su questa porzione di rinforzo, per potere avere indicazioni sulla bontà della procedura di incollaggio, determinando la resistenza a strappo normale del composito.

Il test poteva essere eseguito solo su questo campione, vista la particolarità della rottura del rinforzo a trazione durante la prova e non sugli altri campioni che erano ancora da sottoporre alle prove di aderenza.

La prova di pull off è stata preparata utilizzando un controstampo di forma quadrata (con lato di 40 mm), incollato alla superficie del composito mediante apposito adesivo epossidico (*figura 2.12*).

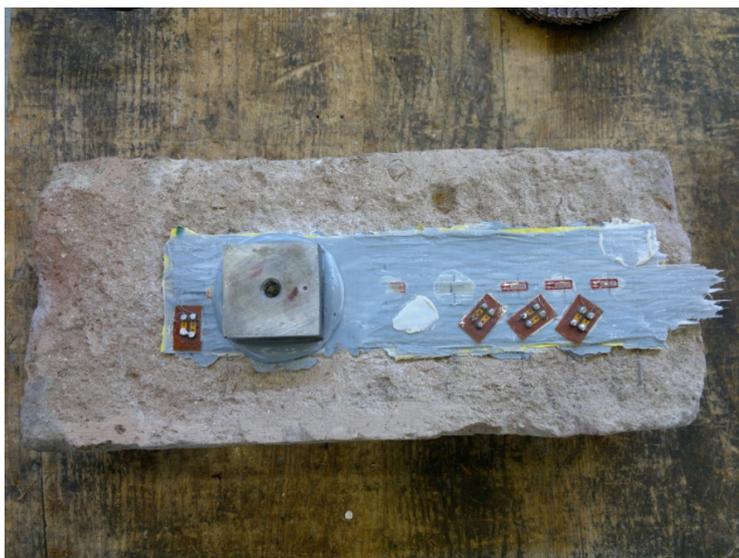


Figura 2.12 - Preparazione della prova di pull-off.

Prima di procedere all'esecuzione della prova è stato necessario attendere che la resina raggiungesse un'adeguata resistenza a trazione: un tempo superiore a 24 ore è in genere sufficiente, ma in tal caso, non essendo l'esecuzione della prova prioritaria rispetto alle prove di aderenza, questa è stata eseguita 72 ore dopo l'applicazione dell'adesivo.

La superficie su cui è stato incollato il controstampo è stata isolata mediante incisione praticata con l'ausilio di un flessibile (*figura 2.13*).

Questa operazione è stata eseguita con estrema attenzione, evitando di surriscaldare il controstampo e l'adesivo e di disturbare l'FRP già posto in opera.



Figura 2.13 - Incisione della superficie.

Terminata questa fase, prima di eseguire la prova, è stato necessario avvitare nel foro centrale del controstampo una apposita vite a testa sferica che funge da presa per lo strumento (un dinamometro di trazione a lettura analogica), come si può vedere in *figura 2.14*.

La prova consiste nello strappare con il dinamometro la parte intagliata del materiale e leggere quindi la forza di trazione applicata.

La forza viene applicata manualmente ruotando la manovella ed è indicata dallo strumento in kN.

Il misuratore analogico dello strumento prevede un blocco automatico della lancetta sul valore massimo della misura (*figura 2.15*).

La prova svolta ha fornito nel caso in oggetto un valore della resistenza a strappo normale del composito pari a 4.6 kN.

Dividendo questo valore per l'area del controstampo utilizzato, si è ottenuto una tensione di picco allo strappo pari a 2.875 MPa.

L'esecuzione di questa prova ha mostrato come l'incollaggio dell'FRP al mattone sia stato eseguito correttamente, visto che non si è verificato un distacco all'interfaccia tra questi due elementi (*figura 2.16*) e ha confermato la buona resistenza del substrato.



Figura 2.14 - Strumento utilizzato per l'esecuzione della prova di pull-off.



Figura 2.15 - Lettura della forza di trazione applicata.



Figura 2.16 – Modalità di distacco del controstampo.

CAPITOLO 3

REALIZZAZIONE E PREPARAZIONE DEI CAMPIONI PER LE PROVE

3.1 PREPARAZIONE DEI MATTONI NON RASATI

Per quanto riguarda la preparazione dei mattoni da utilizzare nelle prove di aderenza sul singolo mattone non rasato, non si prevede alcuna fase di lavorazione preventiva, se non quella relativa alla delimitazione della superficie di incollaggio e alla preparazione superficiale prima dell'applicazione del rinforzo.

La preparazione superficiale è stata eseguita secondo le seguenti modalità:

- Per i mattoni della tipologia 1 e 2 si è provveduto all'eliminazione dell'eccesso di sabbia presente sulla superficie, per poi procedere ad una accurata aspirazione di polvere e impurità mediante uso di un aspiratore industriale, in modo da lasciare la superficie nelle condizioni ottimali per l'applicazione del rinforzo. L'operazione di aspirazione è stata ripetuta anche immediatamente prima dell'incollaggio dei rinforzi per assicurarsi che la superficie fosse effettivamente idonea e priva di qualsiasi impurità.
- Per i mattoni della tipologia 3, visto che la superficie non presentava una finitura a sabbia, ma era effettivamente liscia, è stato sufficiente procedere all'eliminazione della polvere e delle impurità mediante uso di un aspiratore e senza spazzolatura preventiva. Come per la tipologia 1, l'operazione di aspirazione è stata ripetuta immediatamente prima dell'incollaggio.

- Per quanto riguarda i mattoni pieni di recupero, ovvero quelli appartenenti alla tipologia 4, è risultata invece necessaria una accurata spazzolatura e pulitura della superficie, vista la presenza di residui di terra e malta che molti di questi mattoni presentavano. Alla fine della pulitura della superficie, anche per questa tipologia si è passati all'aspirazione di polvere e detriti che potevano pregiudicare l'incollaggio. Tale operazione, come avvenuto per le altre tipologie, è stata ripetuta immediatamente prima della fase di applicazione del rinforzo.

Terminata la preparazione iniziale della superficie, è stato necessario procedere alla delimitazione della superficie di incollaggio, in modo da impedire che la resina utilizzata per l'applicazione potesse coinvolgere anche parti di mattone non desiderate.

La delimitazione è stata effettuata allo stesso modo per tutti i mattoni segnando preventivamente sul mattone l'area di incollaggio (*figura 3.1*).

L'area indicata ha dimensioni di 50 mm per 200 mm, pari rispettivamente alla larghezza e alla lunghezza di incollaggio del rinforzo.

Per la lunghezza della parte non incollata, misurata a partire dal bordo anteriore del mattone, si è adottato un valore di 30 mm.

La presenza di una parte iniziale del mattone in cui il rinforzo non è incollato serve a garantire un debonding più pulito, cercando di prevenire possibili asportazioni di cunei di materiale sulla parte anteriore.

La delimitazione dell'area di incollaggio è stata condotta allo stesso modo anche per quanto riguarda i mattoni con rasatura superficiale.

Tutta la parte al di fuori dell'area indicata è stata coperta con diversi strati di nastro adesivo, in modo da impedire che durante la fase di rullatura della resina epossidica questa potesse attaccarsi al mattone in questa zona indesiderata (*figura 3.2*).

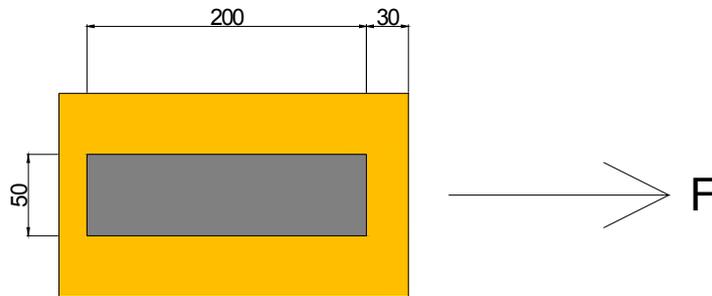


Figura 3.1 - Area di incollaggio utilizzata in tutte le prove sui mattoni (indicata in grigio).



Figura 3.2 - Campioni dopo aver terminato la delimitazione dell'area di incollaggio con nastro adesivo.

3.2 PREPARAZIONE DEI MATTONI RASATI

La preparazione dei mattoni rasati è stata condotta allo stesso modo per quanto riguarda la fase precedente all'applicazione della rasatura, ovvero procedendo alla spazzolatura della superficie per eliminare l'eccesso di sabbia o impurità che potevano essere presenti (come ad esempio residui di terra o calce nei mattoni della tipologia 4) e poi passando all'aspirazione dei detriti.

Prima di applicare la rasatura, però, in questo caso è stato necessario procedere prima alla bagnatura e poi alla successiva sgocciolatura dei mattoni, secondo la modalità utilizzata anche nella preparazione dei muretti.

Terminata la fase di preparazione, è stata applicata la rasatura, cercando di applicare uno strato di malta che risultasse il più sottile possibile.

A tal proposito va ricordato che lo strato di malta di tipo C è risultato sensibilmente più sottile di quello di tipo B, a causa di una granulometria decisamente diversa tra queste due tipologie.

La dimensione massima dei grani più elevata per la malta di tipo B infatti definisce un valore minimo per lo spessore dello strato di rasatura, sotto il quale non è possibile scendere.

Il criterio adottato per la rasatura, applicato ad entrambi i tipi di malta, è stato quello di rendere minimo lo spessore dello strato, compatibilmente con la granulometria della malta e con la necessità di regolarizzare la superficie.

I mattoni sono stati rasati su entrambi i lati per avere la possibilità di svolgere due prove sullo stesso campione: prima è stata applicata la rasatura su un lato e poi, non appena possibile, anche sull'altro.

Terminata questa fase i campioni sono stati lasciati maturare adeguatamente e successivamente è stata effettuata la delimitazione dell'area di incollaggio, secondo le modalità già descritte al § 3.1.

3.3 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI DI MURATURA

La preparazione dei muretti ha richiesto fasi in parte diverse e comunque più articolate rispetto alla preparazione dei mattoni.

Innanzitutto è stato necessario provvedere alla costruzione di un sistema che consentisse di avere una adeguata verticalità durante la realizzazione del muretto.

La regolarità dei campioni è infatti un requisito essenziale per poi avere una collocazione più semplice degli stessi all'interno del setup di prova.

Visto che si tratta di campioni di muratura, costruiti utilizzando mattoni anche di recupero e quindi generalmente diversi tra loro, chiaramente non si potrà mai ottenere un muretto perfettamente regolare, ma il mantenimento della regolarità almeno su una delle facce garantisce un posizionamento più agevole del provino nell'apparecchiatura di prova, senza spessorare in maniera eccessiva.

Per garantire quindi che il muretto risultasse verticale e appoggiasse nella maniera migliore possibile su una delle facce, è stato predisposto il sistema riportato in *figura 3.3*.



Figura 3.3 - Parete di appoggio per la costruzione dei campioni di muratura.

Si tratta essenzialmente di una parete di appoggio costruita utilizzando due pannelli in legno della tipologia di quelli utilizzati normalmente per la cassetta. Viste le necessità di regolarità richieste, sono stati selezionati opportunamente i pannelli più nuovi e regolari, che poi sono stati collegati mediante chiodatura e rinforzati con due elementi diagonali ai bordi.

Questa disposizione è risultata ottimale, visto che ogni pannello ha permesso di realizzare ben otto campioni, senza alcun intralcio durante le operazioni di lavoro.

Infatti, su ognuno dei due lati della parete sono stati costruiti in appoggio quattro muretti, con la possibilità di lavorare con diverse persone su entrambi i lati.

Per la realizzazione di tutti i 16 campioni, sono state costruite due pareti di appoggio di questo tipo.

Prima di procedere alla costruzione del muretto, sono state seguite le seguenti **fasi per la preparazione dei mattoni:**

- 1) **Spazzolatura dell'eccesso di sabbia presente sulla superficie** (questa operazione si è rivelata necessaria solo per i mattoni con finitura a sabbia)

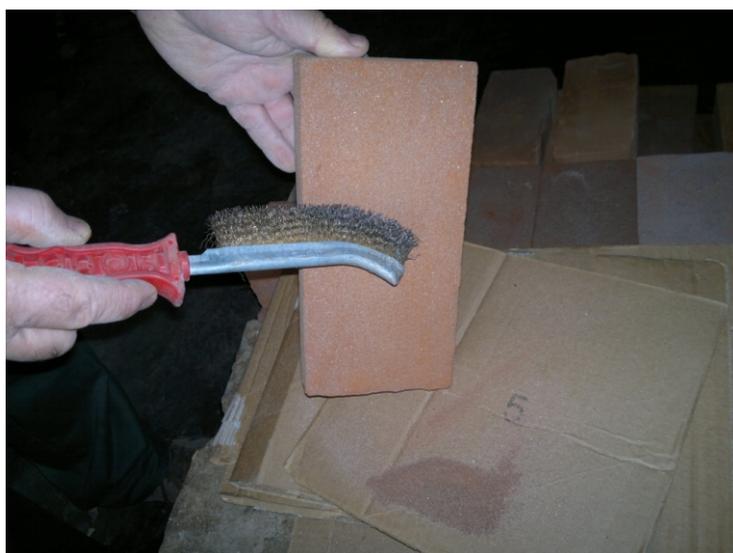


Figura 3.4 - Spazzolatura della superficie mediante uso di una spazzola metallica.

- 2) **Idropulitura della superficie** per eliminare le impurità e i residui sulle facce dove poi andranno realizzati i giunti di malta (solo per i mattoni di recupero) al fine di garantire una migliore adesione della malta stessa, necessaria soprattutto per mitigare i rischi di distacco e danneggiamento nelle successive fasi di trasporto del muretto. L'idropulitura non ha interessato le facce laterali, sulle quali è poi stato incollato il rinforzo, ma solo la faccia superiore e inferiore del mattone, in modo da non influenzare i risultati delle prove di aderenza, che potrebbero variare in funzione della consistenza e della rugosità superficiale del campione



Figura 3.5 - Idropulitura della faccia superiore ed inferiore del mattone di tipo 4, per garantire una migliore adesione della malta sui mattoni di recupero.

- 3) **Bagnatura dei mattoni**, operazione tipica che viene effettuata prima della realizzazione di qualunque muratura



Figura 3.6 - Fase di bagnatura dei mattoni.

4) **Sgocciolatura dei mattoni** prima della realizzazione del muretto



Figura 3.7 - Sgocciolatura dei mattoni.

Terminate le fasi preparatorie appena indicate, per la costruzione del muretto sono stati seguiti i seguenti passi fondamentali:

- 1) Applicazione accurata di un adeguato quantitativo di malta sulla faccia del mattone sottostante e sulla faccia di quello soprastante per garantire una perfetta aderenza superficiale (*figure 3.8 e 3.9*)



Figura 3.8 - Fase di applicazione della malta sulla faccia del mattone ancora da posizionare.



Figura 3.9 - Fase di applicazione della malta sul mattone inferiore e superiore terminata.

- 2) Collocazione del mattone nella sua corretta posizione grazie all'utilizzo della parete in legno posteriore, con pulitura e recupero dell'eventuale eccesso di malta



Figura 3.10 - Collocazione del mattone e recupero della malta eccedente.

- 3) Realizzazione dell'intera fila di sei mattoni cercando di ottenere la maggiore omogeneità possibile nella realizzazione dei corsi di malta e una adeguata verticalità nelle superfici di appoggio che andranno poi disposte nell'apparecchiatura di prova
- 4) Finitura dei corsi di malta
- 5) Successiva applicazione della rasatura nei campioni che lo prevedevano.



Figura 3.11 - Fase di realizzazione della rasatura superficiale.

Seguendo queste fasi di lavoro sono stati realizzati tutti i muretti con le tipologie di mattoni e le tempistiche già descritte al capitolo 2.

Per quanto riguarda lo spessore dei corsi di malta, si è adottato uno spessore di un centimetro su tutte le tipologie, tranne sui mattoni di recupero, dove la forma irregolare del mattone di volta in volta suggeriva uno spessore adeguato da utilizzare con una media in genere superiore al centimetro.

Nell'applicazione della rasatura si è scelto di utilizzare lo spessore minore possibile, in quanto spessori eccessivi originano in genere distacchi prematuri e vanno stesi per applicazioni successive.

Come già anticipato, lo spessore della rasatura risulta comunque minore nel caso della finitura superficiale di tipo C, in quanto la malta utilizzata per la finitura di tipo B è caratterizzata da una dimensione minima dei grani piuttosto elevata, caratteristica tipica delle malte da restauro, che rende impossibile realizzare una rasatura di spessore troppo sottile, imponendo uno spessore minimo da realizzare.

Terminata la realizzazione dei campioni, secondo la cronologia indicata al § 2.3, è seguita una adeguata fase di maturazione dei provini prima di procedere al

trasporto, al taglio dei muretti per raddoppiare le superfici a disposizione e alla successiva preparazione per la fase di incollaggio.

3.3.1 Taglio dei muretti, delimitazione della superficie di incollaggio e preparazione per l'applicazione dei rinforzi

La fase di taglio dei muretti è stata eseguita grazie all'aiuto dei tecnici del LISG (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica), impiegando un apposito macchinario dotato di sega circolare.

Per prevenire possibili danneggiamenti sono stati applicati ai lati dei muretti dei morsetti da falegname, che sono serviti a tenere compresso il campione durante la fase di taglio, allo scopo di impedire che mattoni e malta potessero separarsi irreparabilmente.

I muretti soggetti al taglio sono stati dodici su un totale di sedici campioni.

I campioni tagliati sono quelli indicati in *tabella 3.1*.

Il taglio è avvenuto a metà del lato lungo del mattone, ottenendo, a partire da un muretto, due campioni tra loro speculari (*figura 3.12*), dotati comunque di dimensioni sufficienti per il rinforzo da testare.

Anche in questo caso, ottenuti i campioni nella forma definitiva, è stato necessario procedere alla delimitazione della superficie di incollaggio, in modo da assicurarsi che l'applicazione della resina non avvenisse anche in parti indesiderate.

La delimitazione è stata effettuata, analogamente al caso dei mattoni, segnando preventivamente la zona di applicazione del rinforzo e procedendo poi ad applicare del nastro adesivo di protezione all'esterno di tale area.

L'area di incollaggio ha le stesse dimensioni di quella utilizzata nei mattoni: 50 mm (come la larghezza del rinforzo) per 200 mm di lunghezza.

Questa scelta è stata indispensabile per poter poi confrontare i risultati delle prove sui mattoni con quelli delle prove sui muretti, a parità di tipologia di mattone e di finitura superficiale.

Diversamente dal caso dei mattoni, però, nei muretti è stata variata la lunghezza della parte non incollata nella zona anteriore del campione: nel caso dei mattoni, infatti, tale lunghezza risultava obbligata a causa delle limitazioni dimensionali del provino, mentre qui le dimensioni maggiori del campione hanno consentito di spingersi fino al valore di 100 mm.

Come poi si vedrà dal risultato delle prove, la scelta di questa distanza ha garantito un debonding più pulito, senza asportazione di parti di materiale a ridosso del bordo anteriore.

Per maggiore chiarezza, il posizionamento dell'area di incollaggio sul campione è rappresentato schematicamente in *figura 3.13*.

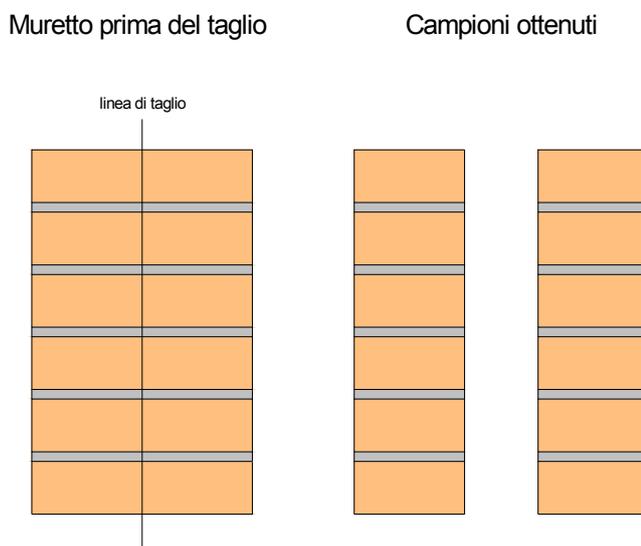


Figura 3.12 - Taglio dei campioni per raddoppiare i campioni disponibili.

	Provini tagliati	Sigla facce	Numero di provini	Numero facce
1	M1A1	M1A1a,b M1A1c,d	2	4
2	M2A1	M2A1a,b M2A1c,d	2	4
3	M3A1	M3A1a,b M3A1c,d	2	4
4	M4A1	M4A1a,b M4A1c,d	2	4
5	M1B1	M1B1a,b M1B1c,d	2	4
6	M2B1	M2B1a,b M2B1c,d	2	4
7	M3B1	M3B1a,b M3B1c,d	2	4
8	M4B1	M4B1a,b M4B1c,d	2	4
9	M1C1	M1C1a,b M1C1c,d	2	4
10	M2C1	M1C1a,b M1C1c,d	2	4
11	M3C1	M1C1a,b M1C1c,d	2	4
12	M4C1	M4C1a,b M4C1c,d	2	4
Totale			24	48

Tabella 3.1 – Campioni sottoposti al taglio.

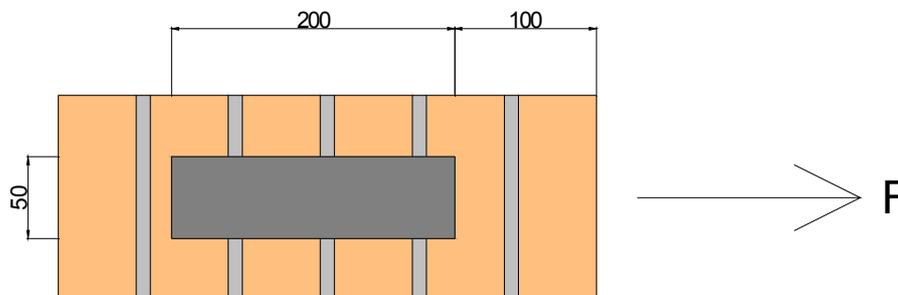


Figura 3.13 - Area di incollaggio nei muretti (indicata in grigio).

La delimitazione dell'area di incollaggio è stata condotta allo stesso modo sia per quanto riguarda i campioni dotati di rasatura sia per quelli che ne risultavano privi.

Tutta la parte al di fuori dell'area indicata è stata coperta accuratamente utilizzando nastro adesivo, in modo da impedire che, durante la fase di applicazione del rinforzo, della resina epossidica potesse attaccarsi al campione in una parte indesiderata.



Figura 3.14 - Muretti dopo la delimitazione dell'area di incollaggio, prima della fase di applicazione del rinforzo.

Terminata la delimitazione dell'area di incollaggio, tutti i campioni sono stati preparati per la fase di applicazione dei rinforzi, cercando di proseguire nella parte anteriore dei campioni con una superficie assolutamente regolare e in bolla, sulla quale poi appoggiare la parte libera del tessuto da laminare in situ.

L'importanza di questa fase è fondamentale, perché senza questo accorgimento la parte a sbalzo del rinforzo, da collegare al setup di prova per applicare la forza di trazione, non assumerebbe la forma rettilinea richiesta.

Per i mattoni, questa fase è stata completata appoggiando davanti ai campioni un altro mattone e collocando correttamente in bolla entrambi mediante uso di appositi spessori (*figura 3.15*).

Per impedire che la resina potesse incollare il rinforzo anche al mattone di appoggio anteriore, sono stati utilizzati spezzoni di teli in nylon e nastro adesivo.



Figura 3.15 - Posizionamento dei mattoni prima di procedere all'applicazione del rinforzo: è visibile il mattone posto davanti al campione già preparato per consentire l'appoggio della parte a sbalzo del tessuto.

Per creare una superficie adeguata ad appoggiare la parte libera del rinforzo anche per i muretti, si è scelto di accostare a questi, sulla parte anteriore, dei prismi di calcestruzzo che rispondevano ai requisiti di regolarità richiesti (*figura 3.16*).

Per adeguare l'altezza dei prismi a quella dei muretti e mettere in bolla entrambi, anche in questo caso sono stati utilizzati adeguati spessori.

Per impedire che il rinforzo potesse incollarsi ai prismi, è stato necessario coprire adeguatamente la faccia superiore di questi con spezzoni di teli in nylon e nastro adesivo, come già visto per i mattoni.



Figura 3.16 - Collocazione dei muretti prima di procedere all'incollaggio del rinforzo.

3.4 APPLICAZIONE DEI RINFORZI

Terminata la fase di preparazione di tutti i campioni, è stato possibile procedere con l'incollaggio dei rinforzi, dopo aver preventivamente tagliato le strisce di tessuto necessarie (*tabella 3.2*) a partire dal rotolo di tessuto fornito.

	N. strisce	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L totale (mm)	Larghezza (mm)
Striscia per mattone	12	200	30	220	450	50
Striscia per muretti	16	200	100	150	450	50
Totale	28					

Tabella 3.2 - Strisce di tessuto utilizzate per la laminazione in situ, secondo le convenzioni indicate in figura 3.17.

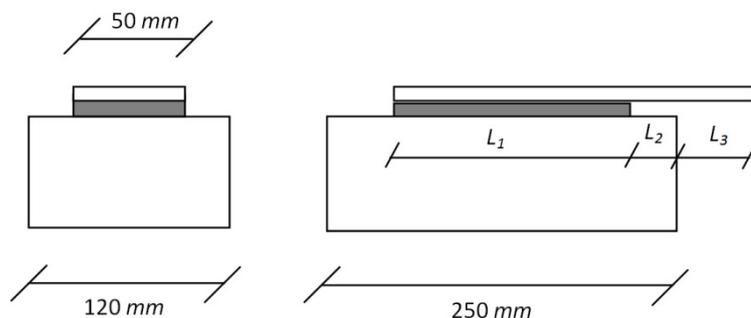


Figura 3.17 - Rappresentazione schematica delle lunghezze L₁, L₂ ed L₃ indicate nella tabella precedente.

La fase di laminazione in situ è stata condotta il giorno 10/05/2011 grazie all'ausilio di personale altamente specializzato nel settore.

Il programma di incollaggio è stato portato a termine sui campioni indicati nella *tabella 3.3*.

La nomenclatura utilizzata è quella già illustrata al § 2.4.

Tipologia di mattone (campioni non rasati)	Mattoni	Muretti
Mattone RDB Classico (tipo 1)	B1A1a B1A2a	M1A1a M1A1c
Mattone IBL (tipo 2)	B2A1a B2A2a	M2A1a M2A1c
Mattone tipo bolognese (tipo 3)	B3A1a B3A2a	M3A1a M3A1c
Mattone di recupero (tipo 4)	B4A1a B4A2a	M4A1a M4A1c
Totale	8	8

Tipologia di mattone (campioni con rasatura tipo B)	Mattoni	Muretti
Mattone tipo bolognese (tipo 3)	B3B1a	M3B1a M3B1c
Mattone di recupero (tipo 4)	B4B1a	M4B1a M4B1c
Totale	2	4

Tipologia di mattone (campioni con rasatura tipo C)	Mattoni	Muretti
Mattone tipo bolognese (tipo 3)	B3C1a	M3C1a M3C1c
Mattone di recupero (tipo 4)	B4C1a	M4C1a M4C1c
Totale	2	4

Tabella 3.3 - Programma di incollaggio portato a termine il giorno 10/05/2011.

La laminazione in situ è stata condotta seguendo le fasi indicate:

- Pulitura del sottofondo
- Miscelazione accurata dei due componenti della resina epossidica in un apposito recipiente fino ad ottenere un colore grigio chiaro omogeneo
- Stesura della resina sul sottofondo nella giusta quantità utilizzando una spatola (il produttore indica da 1.0 a 1.5 kg/m² a seconda delle imperfezioni della superficie), come si può vedere in *figura 3.18*
- Stesura accurata del tessuto incorporandolo nella massa della resina (*figura 3.19*)
- Rullatura allo scopo di far fuoriuscire la resina attraverso i fori della trama e far aderire compiutamente il rinforzo (*figura 3.20*)
- Aggiunta di un ultimo strato di resina miscelata sullo strato superiore del tessuto (il produttore raccomanda in ragione di circa 0,2 kg /m²)
- Pulitura degli eccessi di resina che sono stati portati dal rullo al di fuori dell'area di incollaggio, per consentire in seguito una rimozione più agevole del nastro adesivo di delimitazione (*figura 3.21*).

Terminata la fase di preparazione dei campioni, questi sono stati lasciati maturare adeguatamente nella posizione di incollaggio, procedendo poi al cauto distacco del rinforzo dall'appoggio anteriore e alla rimozione del nastro adesivo di delimitazione solo in concomitanza con la collocazione dei campioni all'interno del setup di prova.



Figura 3.18 - Fase di stesura della resina sul sottofondo.



Figura 3.19 - Collocazione del tessuto.



Figura 3.20 - Fase di rullatura per far fuoriuscire la resina attraverso i fori della trama.

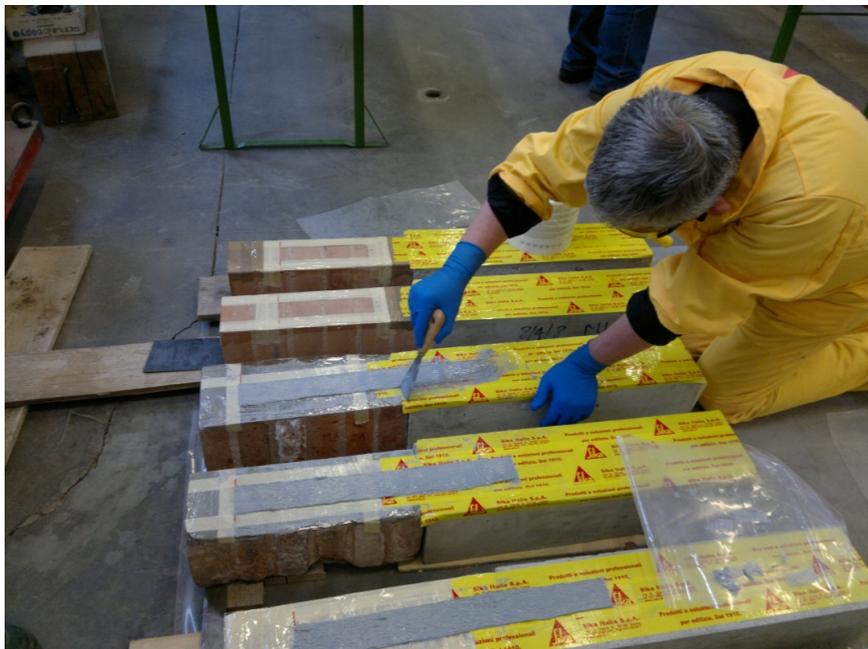


Figura 3.21 - Pulitura degli eccessi di resina ai lati del tessuto.

CAPITOLO 4

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA NELLE PROVE

4.1 DESCRIZIONE DEGLI STRUMENTI UTILIZZATI

Durante lo svolgimento delle prove di aderenza condotte sui singoli mattoni o sui campioni di muratura rinforzati con GFRP, è stato necessario misurare la forza applicata al rinforzo, le deformazioni e gli spostamenti.

Per la misura della forza applicata mediante il sistema di tiro (che verrà descritto compiutamente al capitolo 5) si è fatto uso di una cella di carico, mentre la misura di deformazioni e spostamenti ha richiesto rispettivamente l'utilizzo di estensimetri applicati al rinforzo (secondo le modalità indicate al § 5.3) e di trasduttori di spostamento (LVDT).

Le letture della cella di carico, degli LVDT e degli estensimetri sono state registrate facendo uso del sistema di acquisizione descritto al § 4.5.

4.2 TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO - LVDT

Il trasduttore lineare di spostamento, noto anche come LVDT (Linear Variable Differential Transformer) è un dispositivo elettromagnetico utilizzato per la misurazione dello spostamento di un punto predefinito.

Il fenomeno su cui si basa il trasduttore è quello dell'induzione elettromagnetica: è presente essenzialmente un trasformatore a nucleo mobile in grado di manipolare solamente grandezze elettriche relative a corrente alternata.

In *figura 4.2* sono visibili le principali componenti di un LVDT.

Il trasduttore è realizzato mediante un tubo composto da tre avvolgimenti disposti con assi paralleli e con all'interno un nucleo cilindrico ferromagnetico mobile, caratterizzato da una elevata permeabilità magnetica.

È presente un avvolgimento primario (*primary coil*), indicato con A nello schema a sinistra di *figura 4.2* e altri due avvolgimenti secondari (*secondary coils*), segnalati con la lettera B.

L'avvolgimento primario è collegato ad un generatore di tensione a corrente alternata, mentre i due secondari sono utilizzati per misurare la tensione di uscita.

Nel solenoide A, percorso da corrente alternata, si genera un campo d'induzione elettromagnetica; tale campo, concatenato ai due solenoidi secondari, risulta variabile nel tempo e perciò induce in questi correnti alternate.

Quando il nucleo, magnetizzato, è in posizione tale da conferire simmetria al trasformatore, la tensione indotta sugli avvolgimenti secondari, essendo questi avvolti in maniera discorde, è uguale ma opposta e la tensione misurata in uscita dai due estremi del circuito secondario risulta nulla (*figura 4.3*).

Man mano che il nucleo si sposta in una direzione, la tensione indotta sul solenoide al quale si è avvicinato risulta maggiore, mentre all'altro avvolgimento si registra un campo concatenato di minore entità.

L'output che si genera risulta così diverso da zero e, in particolare, il segnale misurato in uscita varia in maniera linearmente proporzionale allo spostamento del nucleo centrale.

Quest'ultimo è collegato alla sonda dello strumento (*probe*), che rimane nella posizione normale di massima estensione (in assenza di contrasto) grazie all'azione di una molla.



Figura 4.1 - Tipico LVDT per la misura dello spostamento utilizzato nelle prove di aderenza.

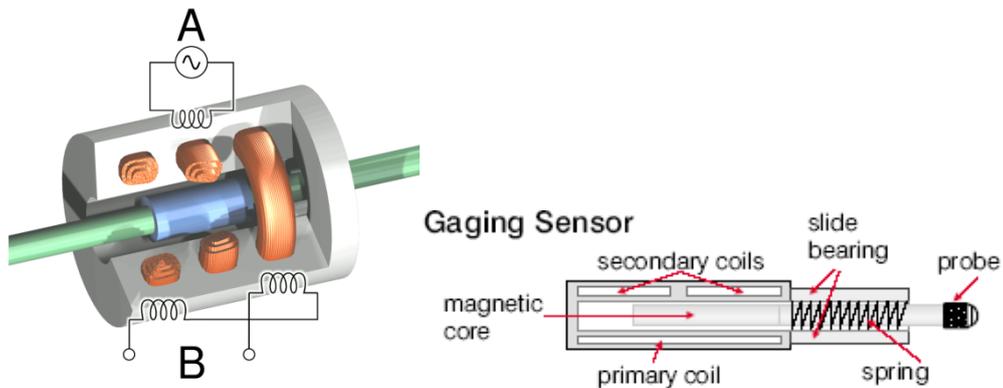


Figura 4.2 - Componenti fondamentali di un LVDT.

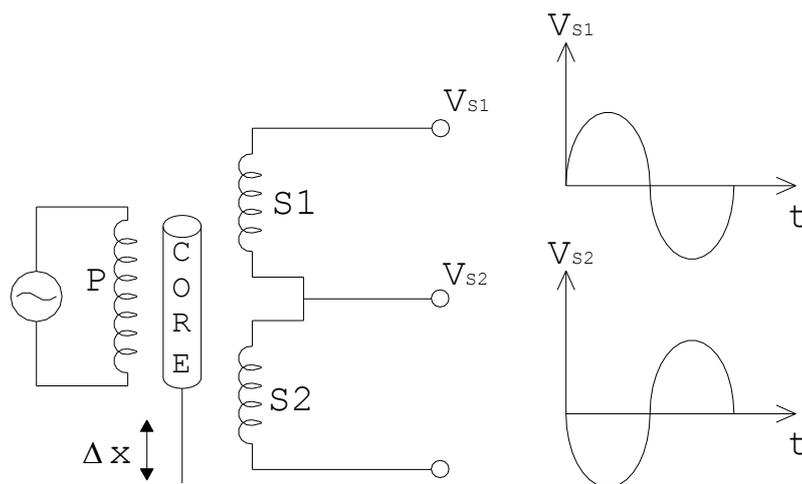


Figura 4.3 - Rappresentazione schematica del circuito elettrico all'interno di un LVDT.

L'LVDT è un trasduttore estremamente sensibile e in grado di misurare piccolissimi spostamenti.

Nelle prove svolte questo strumento è stato fissato rigidamente ad un supporto esterno che garantisce il corretto posizionamento del trasduttore e l'assenza di spostamenti o rotazioni indesiderate durante la prova.

Per poter misurare lo spostamento dei punti di misura scelti la sonda del dispositivo è stata posizionata a contatto con elementi metallici di contrasto fissati rigidamente al rinforzo mediante uso di apposita colla (adesivo bicomponente HBM X60), assicurandosi di avere la corsa necessaria dello strumento durante la prova.

Il supporto esterno e gli elementi metallici sui quali sono stati posti a contatto i trasduttori sono visibili in *figura 4.4*.

Quando si comincia a tirare il rinforzo, gli elementi metallici si muovono con esso e le sonde dei trasduttori rilevano lo spostamento dei punti di misura, grazie all'azione delle molle interne che tengono la sonda a contatto con le basette metalliche.

Lo spostamento della sonda viene rilevato dal sistema di acquisizione in termini di variazione di potenziale elettrico.

È opportuno ricordare che, per poter giungere ad un corretto utilizzo di questi strumenti di misura, è necessario conoscere la relazione tra la differenza di potenziale misurata in uscita e gli spostamenti misurati dal trasduttore.

La costante di proporzionalità che lega queste due quantità può essere ricavata attraverso una operazione di taratura, che viene eseguita assegnando spostamenti noti agli LVDT in maniera ciclica (tramite uno strumento di taratura per LVDT, visibile in *figura 4.5*) e registrando le differenze di potenziale che si ottengono come output.



Figura 4.4 - Posizionamento LVDT per la misura dello spostamento dei punti prefissati.



Figura 4.5 - Strumento di taratura per LVDT.

4.3 ESTENSIMETRI

Gli estensimetri vengono comunemente utilizzati per effettuare misure locali di deformazione di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche.

Sono strumenti che permettono la misura di deformazioni dimensionali anche piccolissime della superficie di un corpo al quale vengono applicati.

Esistono varie tipologie di estensimetri che, in base al funzionamento, possono essere catalogati come:

- Estensimetri meccanici
- Estensimetri a resistenza elettrica
- Estensimetri acustici
- Estensimetri ottici
- Estensimetri pneumatici

Gli estensimetri impiegati nelle prove di nostro interesse appartengono alla categoria degli estensimetri a resistenza elettrica.

Questa tipologia, che risulta ora largamente impiegata, sin dalla sua introduzione ha fatto perdere molta importanza alle altre categorie, tanto che oggi quando si parla di “estensimetri” si intende solitamente “estensimetri a resistenza elettrica”.

Il principio su cui si basano è quello dell’effetto piezoresistivo del materiale conduttore impiegato al loro interno: questo materiale, man mano che subisce deformazioni, denota infatti una apprezzabile variazione di resistenza.

Il filo estensimetrico è disposto a serpentina su un supporto di materiale plastico al quale è rigidamente aderente (*figura 4.6*) e prosegue con dei terminali; il supporto viene a sua volta incollato, utilizzando un adesivo, alla superficie dell’elemento di interesse, in un prestabilito punto di misura (*figura 4.7*).

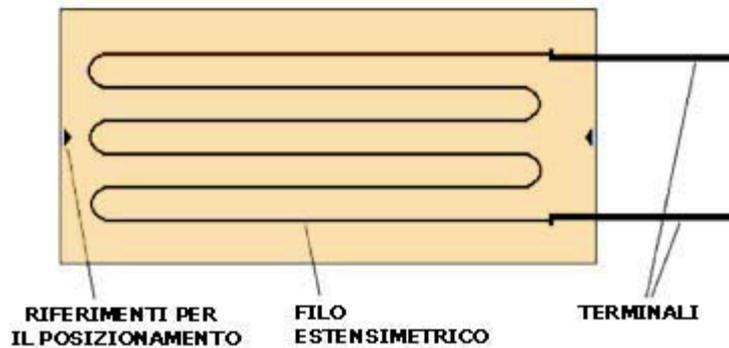


Figura 4.6 - Schema di un tipico estensimetro elettrico.

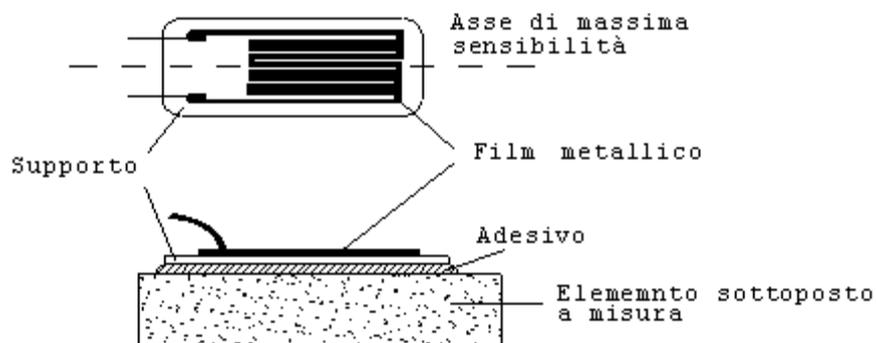


Figura 4.7 - Schema dell'applicazione di un estensimetro a resistenza elettrica.

Gli estensimetri più utilizzati hanno al loro interno un filo di piccolissimo diametro (variabile tra circa 0.01 e 0.03 mm) costituito da una lega speciale, solitamente manganina o costantana, che presenta una resistenza elettrica nota.

Uno schema più in dettaglio, riguardo alla terminologia e alle funzioni delle componenti impiegate in un estensimetro, è indicato in *figura 4.8* : la lunghezza della griglia metallica lungo la direzione di misura (*gauge length*) è detta base dell'estensimetro e differisce dall'ingombro longitudinale dell'estensimetro (*backing length*) che risulta maggiore a causa delle dimensioni del supporto e della presenza dei terminali della resistenza.

Allo stesso modo, anche in direzione trasversale, la larghezza del film metallico (*gauge width*) è inferiore all'ingombro dell'intero supporto (*backing width*).

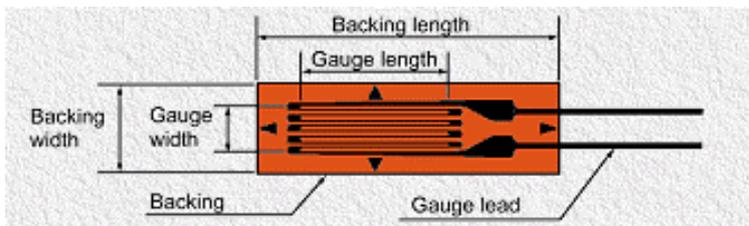


Figura 4.8 - Componenti di un estensimetro: differenza tra base ed ingombro.

Si precisa che la direzione lungo la quale si effettua la misura di deformazione è quella longitudinale, coincidente con l'asse di massima sensibilità, come indicato in *figura 4.7*.

La misura che si effettua con un estensimetro dipende dalle dimensioni dello stesso: estensimetri di piccole dimensioni sono utilizzati per misure praticamente puntuali, mentre quelli di maggiore lunghezza sono adatti alla rilevazione di deformazioni medie nella zona alla quale sono applicati.

Visto che, per quanto piccolo, l'estensimetro avrà sempre una dimensione finita, in generale è corretto affermare che la misura che viene effettuata è sempre quella relativa ad un valor medio della deformazione che la superficie dell'elemento subisce nella zona di misura.

La logica prevede che, in presenza di zone in cui si prevedono concentrazioni tensionali, sia opportuno impiegare estensimetri dalla base piccola, perché ciò consente di avvicinarsi il più possibile al valore locale reale della deformazione.

Nell'applicare questo concetto occorre però tenere in considerazione anche gli effetti negativi dell'utilizzo di una base piccola: minore è la base, infatti, maggiore è l'amplificazione necessaria per avere la stessa sensibilità dello strumento e ciò comporta il rischio di aumentare gli errori di misura.

A seconda dei casi, quindi, è opportuno ricercare un buon compromesso nella scelta della base da adottare, mediando le necessità di misura e le possibili controindicazioni.

La superficie del corpo spesso è la variabile che influenza la scelta in maniera determinante: in presenza di materiali disomogenei caratterizzati da diffuse irregolarità superficiali si cerca infatti di mediare la misura e pertanto si utilizzano estensimetri con basi maggiori, mentre in presenza di materiali più omogenei si cerca di avvicinarsi il più possibile ad una misura puntuale di deformazione.

Anche le caratteristiche dell'adesivo utilizzato per fissare il supporto all'elemento da sottoporre a misura devono risultare adeguate: a tal proposito durante le prove, come verrà descritto in seguito in maniera più approfondita (§ 4.3.1), l'applicazione degli estensimetri è stata effettuata utilizzando l'adesivo bicomponente HBM X60.

L'utilizzo degli estensimetri a resistenza elettrica avviene ormai in tantissimi campi, grazie alla loro caratteristica peculiare di poter trasformare una grandezza (in tal caso la deformazione) in un segnale elettrico.

Le possibilità offerte dalla tecnica odierna di misurare con precisione grandezze elettriche e di amplificare il segnale rendono gli estensimetri elettrici a resistenza assolutamente efficaci.

Il principio su cui si basano concettualmente è semplice: se il corpo al quale viene applicato l'estensimetro si deforma, questa deformazione interessa anche l'estensimetro (grazie all'azione dell'adesivo) e ciò comporta una variazione della resistenza elettrica del filo.

La variazione avviene sia perché il filo subisce un allungamento o un accorciamento con conseguente diminuzione o aumento di sezione, sia perché in un materiale conduttore al variare della sollecitazione si assiste ad una variazione di resistività elettrica.

La formula che esprime infatti la resistenza elettrica del filo conduttore in relazione alle altre quantità è la seguente:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (4.1)$$

in cui R rappresenta appunto la resistenza del filo, ρ è la resistività elettrica, L la lunghezza e A la sezione del filo stesso.

Se si procede differenziando la (5.1), si ottiene:

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial L} \right) \cdot \Delta L + \left(\frac{\partial R}{\partial A} \right) \cdot \Delta A + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho} \right) \cdot \Delta \rho = \frac{\rho}{A} \cdot \Delta L - \frac{(\rho \cdot L)}{A^2} \cdot \Delta A + \frac{L}{A} \cdot \Delta \rho \quad (4.2)$$

da cui, dividendo entrambi i membri per R e tenendo in considerazione la (4.1) si ha:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4.3)$$

Ora, sapendo che risulta:

$$A = \pi \cdot \Phi^2 / 4 \quad (4.4)$$

$$\Delta A = \pi \cdot 2\Phi \cdot \Delta\Phi / 4 \quad (4.5)$$

si ottiene la seguente:

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Phi} = -2\nu \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (4.6)$$

in cui si è indicato con ν il coefficiente di Poisson.

Ricavando il valore del termine $\frac{\Delta A}{A}$ attraverso la (4.6) e sostituendolo nella (4.3)

si ha:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \cdot \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} = \left[(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon_L} \right] \cdot \varepsilon_L \quad (4.7)$$

dove risulta $\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$

Il termine indicato tra parentesi quadre all'interno della (4.7), che rappresenta il rapporto tra la variazione di resistenza e la deformazione, viene definito *Gauge Factor* e indicato solitamente con K_G :

$$K_G = \left[(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon_L} \right] \quad (4.8)$$

La costante K_G viene determinata mediante taratura ed il suo valore è fornito dal produttore dell'estensimetro, insieme alla tolleranza della misura in percentuale.

Riscrivendo la (4.7) nell'intento di ricavare da essa il valore di ε_L , che rappresenta la deformazione lungo l'asse di massima sensibilità dello strumento, si ottiene:

$$\varepsilon_L = \frac{1}{K_G} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (4.9)$$

che in questa forma rappresenta la **prima relazione fondamentale dell'estensimetria elettrica**.

Riguardo alla misura di ε_L , è necessaria una precisazione: visto che il filo conduttore è posizionato a serpentina e presenta pertanto tratti di lunghezza

diversa fra le due direzioni, ne consegue che anche la sensibilità alle dilatazioni nelle due direzioni non è la stessa: essa risulta massima lungo l'asse longitudinale e molto più bassa lungo l'asse trasversale.

In fase di applicazione l'estensimetro andrà pertanto collocato in modo tale da far coincidere la direzione di massima sensibilità con l'asse lungo il quale misurare la deformazione.

Poiché la sensibilità dello strumento alle dilatazioni al di fuori dell'asse di misura risulta piccola, ma non trascurabile, si ottiene un certo disturbo alla misura principale dovuto a questo effetto.

Per ridurlo si usa realizzare i collegamenti trasversali fra i tratti più lunghi della serpentina utilizzando un materiale di elevata conduttività elettrica (ovvero di resistenza estremamente bassa), in modo da rendere trascurabili le variazioni di resistenza lungo tale direzione.

Quando, anziché misurare la deformazione lungo un asse predefinito, si vogliono effettuare misure in stati biassiali di sollecitazioni, si usano le cosiddette rosette estensimetriche.

Nel caso si conoscano le direzioni principali in uno stato biassiale di sollecitazione è sufficiente l'utilizzo di rosette con due griglie tra loro perpendicolari, mentre, in casi generici in cui le direzioni non risultino note, si è costretti all'utilizzo di rosette a tre griglie (*figura 4.9*).

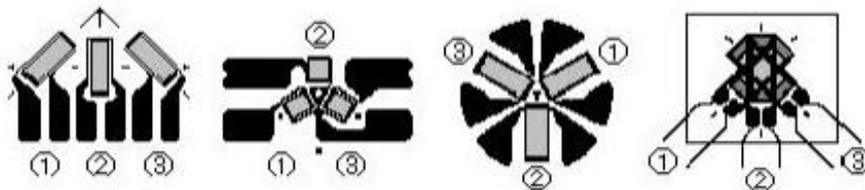


Figura 4.9 - Esempi di rosette estensimetriche a tre griglie.

Una volta applicato, l'estensimetro viene collegato ad un circuito elettrico opportunamente alimentato e la deformazione che esso subisce causa una variazione di resistenza elettrica del filo conduttore, che viene percepita sotto forma di variazione della tensione rilevata in uscita.

Grazie all'operazione di taratura è noto il legame tra la variazione di questa grandezza elettrica e deformazione che l'ha causata, pertanto è possibile risalire allo stato deformativo.

Un problema che però si presenta durante l'utilizzo degli estensimetri è quello di poter avere effetti di variazione della resistenza dovuti alla temperatura.

Leghe a basso TCR (coefficiente di temperatura della resistenza) permettono di mitigare il problema, in abbinamento all'utilizzo di un materiale per lo strato sottostante avente lo stesso coefficiente di dilatazione termica della lega utilizzata per il filo.

L'abbinamento di due materiali caratterizzati dallo stesso coefficiente di dilatazione termica impedisce che eventuali variazioni di temperatura possano indurre stress nel film metallico.

Per mitigare gli effetti dannosi della temperatura si può utilizzare anche una configurazione a *ponte di Wheatstone* per collegare gli estensimetri (*figura 4.10*).

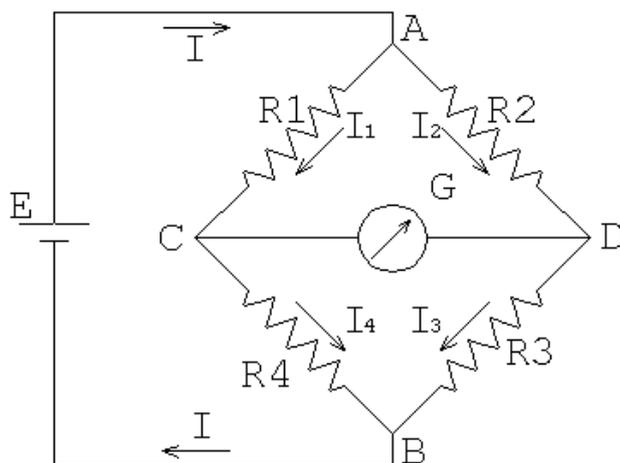


Figura 4.10 - Schema elettrico del ponte di Wheatstone.

In questo schema vi sono quattro resistenze (indicate con la lettera R) disposte a formare una maglia quadrata; un galvanometro (G) è collegato ai nodi C e D ed è sensibile alla differenza di potenziale tra questi due punti, mentre un generatore (E) alimenta il circuito.

Gli estensimetri vengono inseriti generalmente in uno o più rami della rete e la loro resistenza è nota ($120 \pm 0.3 \Omega$ nelle prove svolte).

Sotto l'ipotesi che gli estensimetri siano alla stessa temperatura e che abbiano lo stesso TCR, questa configurazione consente di rendere la tensione misurata in uscita indipendente dalla resistenza dovuta a variazioni termiche.

La tensione in uscita varierà pertanto solo in seguito ad una sollecitazione meccanica dell'elemento di cui si vuole misurare la deformazione.

Per mitigare gli effetti indotti dalle variazioni termiche e per amplificare l'output di un estensimetro, che risulterebbe altrimenti estremamente piccolo, nelle prove si utilizzano questi particolari schemi elettrici.

Prima di poter utilizzare gli estensimetri è necessario però giungere alla condizione di equilibrio del sistema, mediante il cosiddetto "annullamento del ponte".

Si tratta cioè di determinare il valore incognito di resistenza che renda nulla la differenza di potenziale tra i punti C e D.

Dopo aver trovato per quale valore di resistenza la condizione $V_{CD} = 0$ risulta verificata, si ha che in seguito ogni deformazione degli estensimetri comporta una variazione della configurazione iniziale di equilibrio.

Utilizzando la simbologia indicata in *figura 4.10*, si può procedere con le considerazioni indicate in seguito.

Innanzitutto, si possono applicare le leggi di Kirchhoff allo schema del ponte, ricordando che ricerchiamo condizioni di equilibrio e ottenendo quindi:

equazione di equilibrio nel nodo C:

$$I_1 = I_4 \quad (4.10)$$

equazione di equilibrio scritta per il nodo D:

$$I_2 = I_3 \quad (4.11)$$

maglia ACD:

$$R_1 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 = 0 \quad (4.12)$$

da cui:

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1} \cdot I_2 \quad (4.13)$$

e, sostituendo la (4.11) nella (4.13):

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1} \cdot I_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot I_3 \quad (4.14)$$

maglia BCD:

$$R_4 \cdot I_4 - R_3 \cdot I_3 = 0 \quad (4.15)$$

da cui:

$$I_3 = \frac{R_4}{R_3} \cdot I_4 \quad (4.16)$$

tenendo conto della (4.10) e sostituendo la (4.13) nella (4.16) si ha:

$$I_3 = \frac{R_4}{R_3} \cdot I_4 = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{R_2}{R_1} I_2 \quad (4.17)$$

Ora, dovendo risultare valida la (4.11), nell'ultima equazione si deve necessariamente avere:

$$R_1 \cdot R_3 = R_4 \cdot R_2 \quad (4.18)$$

che esprime la condizione di equilibrio del ponte.

Tramite la (4.18), è possibile ricavare il valore di una resistenza incognita, note le altre tre impiegate all'interno del circuito.

È possibile effettuare la calibrazione del ponte facendo uso del galvanometro (G): si varia la resistenza di un lato del ponte e si rilevano le indicazioni dello strumento, procedendo finché non si raggiunge l'equilibrio del ponte (che viene indicato da un segnalatore di zero (*null detector*) posto nel circuito.

Le relazioni che descrivono compiutamente lo schema del ponte di Wheatstone sono le seguenti:

$$I_1 = \frac{V_{AB}}{(R_1 + R_4)} \quad (4.19)$$

$$I_2 = \frac{V_{AB}}{(R_2 + R_3)} \quad (4.20)$$

$$V_{CD} = I_2 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_4 \Rightarrow V_{CD} = \left(\frac{R_3}{(R_2 + R_3)} - \frac{R_4}{(R_1 + R_4)} \right) \cdot V_{AB} \quad (4.21)$$

In particolare la (4.21) lega la tensione in uscita V_{CD} alla tensione di alimentazione V_{AB} che viene fornita al ponte.

Essa può anche essere riscritta nella forma:

$$\frac{V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} \quad (4.22)$$

Se, a partire dalla configurazione iniziale di equilibrio, si ha un aumento di un valore di resistenza (poniamo ad esempio che R_1 assuma il valore $R_1' = R_1 + \Delta R_1$, la (4.22) si trasforma in:

$$\frac{V_{CD} + \Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{(R_1 + \Delta R_1) R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} \quad (4.23)$$

ovvero:

$$\frac{V_{CD} + \Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4 + R_3 \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} \quad (4.24)$$

Partendo dalla (4.24) e ricordando che, prima della variazione della resistenza R_1 il ponte risultava bilanciato (ovvero risultava $V_{CD} = 0$ e valeva la (4.18)) si ottiene:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{R_3 \Delta R_1}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3) + \Delta R_1 (R_2 + R_3)} \quad (4.25)$$

Da quest'ultima relazione, dividendo numeratore e denominatore per $(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)$ si giunge ad una forma equivalente alla (4.25) riscritta come:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{R_3 \Delta R_1}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3) \left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1 + R_4} \right)} \quad (4.26)$$

Se si pone:

$$\frac{R_3}{R_2 + R_3} = \alpha \quad (4.27)$$

$$R_1 + R_4 = R_m \quad (4.28)$$

la (4.26) assume la forma:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{\alpha \cdot \frac{\Delta R_1}{R_m}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_m} \right)} \quad (4.29)$$

Essendo la variazione di resistenza ΔR_1 piccola rispetto alla somma delle resistenze R_1 e R_4 (ovvero $\Delta R_1 \ll R_m$), deve risultare $\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_m}\right) \cong 1$.

Il valore di α , espresso dalla (4.27), in caso di resistenze tutte uguali risulta pari ad $1/2$, mentre dalla (4.28) risulta $R_m = 2 \cdot R_1$; in tal caso quindi la (4.29) si semplifica in:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (4.30)$$

Se si fanno gli stessi ragionamenti per la resistenza R_2 , sottoposta ad una variazione pari a ΔR_2 , con passaggi analoghi a quelli già riportati si giunge al risultato:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_2}{R_2} \quad (4.31)$$

Si può procedere analogamente per gli altri due rami del ponte e giungere così alla **seconda relazione fondamentale dell'estensimetria elettrica**, espressa attraverso la seguente formula:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (4.32)$$

Supponendo che tutti gli estensimetri abbiano lo stesso *gauge factor* K_G e facendo uso della prima relazione fondamentale espressa nella forma $\varepsilon_L = \frac{1}{K_G} \cdot \frac{\Delta R}{R}$, si ottiene:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (4.33)$$

La (4.33) risulta estremamente importante: tale relazione infatti, noti K_G e il valore della tensione di alimentazione del circuito V_{AB} , collega la variazione della tensione in uscita ΔV_{CD} , misurata attraverso il galvanometro, alle deformazioni subite dagli estensimetri.

È facile comprendere come un eventuale squilibrio di pari intensità e segno su tutti gli estensimetri, come ad esempio l'effetto indotto da una variazione di temperatura, provochi una variazione nulla della tensione in uscita (infatti la (4.32) fornisce $\Delta V_{CD} = 0$ nel caso in cui $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$).

Questo risultato, già anticipato in precedenza, mostra come l'uso del ponte di Wheatstone sia fondamentale per annullare l'effetto delle variazioni termiche sulla tensione in uscita.

4.3.1 Modalità di applicazione degli estensimetri

Dopo la discussione sulle potenzialità degli estensimetri e sulla teoria che sta alla base del loro impiego, si riporta in seguito una breve descrizione di come è possibile procedere alla loro applicazione sulla superficie dell'elemento da sottoporre a misura.

Innanzitutto, la superficie sulla quale applicare l'estensimetro per poi misurare la deformazione dovrebbe risultare omogenea e ben livellata.

Chiaramente non tutte le superfici dispongono di queste caratteristiche, compresa la superficie del rinforzo sul quale sono state realizzate le prove di aderenza che costituiscono l'oggetto di questa tesi.

Pertanto, come primo passo, è necessario procedere ad una adeguata preparazione della superficie mediante smerigliatura.

L'uso di una lima in una prima fase e successivamente di carta abrasiva a grana fine ha permesso di regolarizzare il più possibile la superficie, prestando estrema attenzione a non danneggiare le fibre presenti nel tessuto al di sotto dello strato superficiale di resina epossidica.

Una volta terminata la preparazione della superficie, per ogni estensimetro è necessario tracciare linee che ne indichino l'esatto posizionamento: questa fase si espleta disegnando opportunamente due linee tra loro perpendicolari, di cui una orientata nella direzione di misura e l'altra in senso ortogonale.

Noto dove posizionare lo strumento, è necessario procedere ad una adeguata pulitura della superficie con un opportuno solvente (come ad esempio l'alcool isopropilico), per eliminare tracce di grasso, polvere o altri materiali che potrebbero pregiudicare l'incollaggio.

L'eventuale acidità superficiale che potrebbe risultare dopo il condizionamento della superficie va ridotta utilizzando garze imbevute con un neutralizzatore.

Terminata la pulitura, si procede all'asciugatura della superficie: a tale scopo si può utilizzare in generale una lampada ad infrarossi o un asciugacapelli per accelerare l'evaporazione.

Nella preparazione delle prove di aderenza, la fase di asciugatura della superficie è avvenuta per via naturale, vista l'estrema volatilità del solvente utilizzato, senza utilizzare alcuno strumento per rendere l'evaporazione più rapida.

Le fasi successive hanno visto nell'ordine l'applicazione del collante (adesivo bicomponente HBM X60) e il posizionamento dell'estensimetro al di sopra di esso.

Appena un istante dopo il posizionamento, è necessario collocare una apposita pellicola trasparente (sotto forma di piccolo foglietto) al di sopra dell'estensimetro stesso tenendo premuto per un tempo sufficientemente lungo da consentire l'incollaggio.

Terminata l'applicazione dell'estensimetro si procede a collocare in prossimità di questo un supporto con delle terminazioni alle quali collegare i fili conduttori con dei punti di stagnatura.

Il loro ruolo è quello di proteggere l'estensimetro: infatti, se per qualche motivo i cavi che lo collegano al sistema di acquisizione vengono tirati o sollecitati, si otterranno nella peggiore delle ipotesi strappi in corrispondenza delle terminazioni e non all'interno dello strumento.

L'ultima fase prevede il collegamento del cavo del sistema di acquisizione alla terminazione, che deve avvenire sempre mediante stagnatura.

In questo modo è garantito il perfetto collegamento dei terminali dell'estensimetro con il sistema di acquisizione, che provvederà poi a registrare i dati.

4.4 CELLA DI CARICO

La cella di carico, che serve a misurare la forza applicata ad un generico corpo, è uno degli strumenti indispensabili utilizzati nelle prove di aderenza tra rinforzo e substrato.

Infatti mediante la cella di carico è stato possibile monitorare la forza di trazione applicata al rinforzo e correlarla alle corrispondenti deformazioni lette dagli estensimetri e agli spostamenti misurati attraverso gli LVDT.

In *figura 4.11* è indicata una tipica cella di carico.

Il comportamento dello strumento è di tipo resistivo: al suo interno infatti sono presenti estensimetri collegati in modo da costituire un ponte di Wheatstone intero.

La collocazione dei quattro estensimetri all'interno della base circolare della cella è indicata in *figura 4.12*: gli estensimetri E1 ed E3 presentano l'asse di massima sensibilità in direzione parallela all'asse di applicazione del carico (ovvero all'asse z), mentre E2 ed E4 risultano collocati con asse perpendicolare al carico e servono quindi per la misurazione delle deformazioni trasversali.

La deformazione assiale indotta dal carico applicato può essere espressa come:

$$\varepsilon_a = \frac{F}{A \cdot E} \quad (4.34)$$

mentre la deformazione trasversale, legata al coefficiente di Poisson, risulta pari a:

$$\varepsilon_t = \frac{-\nu \cdot F}{A \cdot E} \quad (4.35)$$

Tenendo presente le equazioni fondamentali dell'estensimetria elettrica, espresse attraverso la (4.9) e la (4.32) e facendo uso della (4.34) e della (4.35) si giunge alle relazioni:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = K_G \cdot \varepsilon_a = \frac{K_G \cdot F}{A \cdot E} \quad (4.36)$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = K_G \cdot \varepsilon_t = \frac{-\nu \cdot K_G \cdot F}{A \cdot E} \quad (4.37)$$

Impiegando la (4.34) e la (4.35) all'interno della (4.33) si ottiene:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{K_G \cdot F}{2 \cdot A \cdot E} \cdot (1 + \nu) \quad (4.38)$$

che può essere espressa anche nella forma:

$$\frac{\Delta V}{V} = K_F \cdot F \quad (4.39)$$

avendo posto:

$$K_F = \frac{K_G}{2 \cdot A \cdot E} \cdot (1 + \nu) \cong \frac{1 + \nu}{A \cdot E} \quad (4.40)$$

La (4.39) mostra che esiste un rapporto di proporzionalità tra la variazione di potenziale e la forza applicata: ciò permette di stabilire una relazione diretta tra queste due grandezze una volta effettuata la taratura della cella.

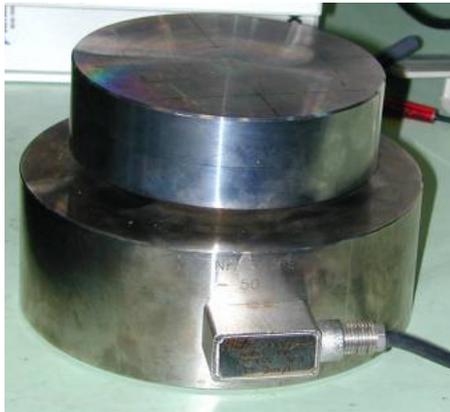


Figura 4.11 - Cella di carico.

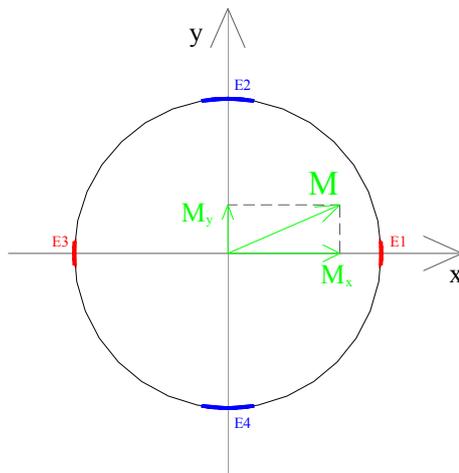


Figura 4.12 - Collocazione degli estensimetri (indicati come E1, E2, E3, E4) all'interno della cella di carico.

La collocazione degli estensimetri, così come si può vedere in *figura 4.12*, è tale da impedire che l'insorgere di eventuali momenti flettenti, dovuti ad eccentricità del carico assiale, possa disturbare la misura.

Per dimostrarlo, basta risalire alle variazioni di resistenza sugli estensimetri indotte da un momento flettente M .

Utilizzando la simbologia indicata in figura, M ha due componenti lungo gli assi x ed y , indicate rispettivamente come M_x ed M_y .

La prima componente porta alle seguenti variazioni di resistenza sugli estensimetri:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (4.41)$$

e

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0 \quad (4.42)$$

mentre la seconda componente M_y comporta:

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} \quad (4.43)$$

e

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = 0 \quad (4.44)$$

Ora, inserendo le (4.41), (4.42), (4.43) e (4.44) all'interno della (4.32) si ottiene

$$\frac{\Delta V}{V} = 0 \quad \text{e ciò dimostra l'indipendenza della variazione del potenziale in uscita}$$

dalle variazioni di resistenza degli estensimetri determinate da possibili eccentricità del carico assiale.

Poiché la cella di carico funziona con lo schema di un ponte di Wheatstone intero e i segnali elettrici trasmessi dal ponte possono essere letti come vere e proprie misure estensimetriche ($\mu\varepsilon$), tramite la procedura di taratura si cerca il fattore di conversione fra il carico agente e queste misure.

Il fattore di conversione K_c corretto è dunque quello che si può ricavare della formula:

$$\mu\varepsilon \cdot K_c = F \quad (4.45)$$

La procedura di taratura si effettua applicando alla cella dei carichi noti e leggendo per ognuno di questi il valore del segnale in uscita: ottenute sufficienti misure, il valore del coefficiente K_c si determina mediante interpolazione dei dati rilevati.

4.5 SISTEMA DI ACQUISIZIONE

Il sistema di acquisizione è di fondamentale importanza nelle prove, perché permette di registrare le letture ottenute dalla cella di carico, dagli LVDT e dagli estensimetri ad intervalli temporali definiti.

I componenti del sistema di acquisizione sono mostrati nelle *figure 4.13 e 4.14*.

Come si può vedere, sono presenti un computer con apposita scheda di acquisizione e un software per gestire la registrazione dei dati (in questo caso LabView), due sistemi di amplificazione dei segnali ottenuti dagli strumenti (HBM MGC Plus e Instruments Division 2150) ed una terminaliera.

In particolare, il sistema 2150 permette di collegare solo strumenti con funzionamento di tipo resistivo, mentre il sistema MGC permette la connessione sia di strumenti di tipo resistivo, che di strumenti dal funzionamento induttivo.

Tra gli strumenti utilizzati nelle prove, estensimetri e cella di carico hanno un funzionamento resistivo, mentre gli LVDT sono strumenti di tipo induttivo.



Figura 4.13 - Sistema di acquisizione (vista frontale).



Figura 4.14 - Sistema di acquisizione (vista posteriore).

Il collegamento degli strumenti all'uno o all'altro sistema sarà descritto opportunamente per ogni prova, ma in via del tutto generale è stato adottato il criterio di collegare cella di carico e LVDT al sistema di amplificazione MGC, mentre gli estensimetri sono stati collegati al sistema 2150.

Solo quando i canali del sistema di amplificazione 2150 impiegati per gli estensimetri non sono stati sufficienti, si è scelto di collegare gli estensimetri in eccesso al MGC.

Per quanto riguarda il collegamento, per entrambi i sistemi di acquisizione sono presenti connettori sul retro in grado di accogliere come input i cavi degli strumenti.

I cavi in uscita vanno posizionati al di sotto di quelli in ingresso per quanto riguarda il sistema 2150, mentre il sistema MGC prevede uscite frontali.

L'output degli strumenti dopo l'amplificazione va riportato tramite apposito cavo alla terminaliera, che raccoglie tutti i cavi che fuoriescono dai sistemi descritti in precedenza.

La terminaliera prevede a sua volta come uscita un unico cavo, che va collegato alla scheda di acquisizione presente nel computer.

Dopo aver completato il collegamento, prima di poter svolgere le prove è necessario definire per ogni strumento il corretto voltaggio di alimentazione e inserire tutti i giusti parametri.

Per quanto riguarda gli estensimetri, è necessario procedere a bilanciare il ponte di Wheatstone, in modo da azzerare il valore di deformazione letto in partenza e regolare il grado di amplificazione del segnale.

Tutto avviene attraverso apposite manopole di regolazione per quanto riguarda il sistema 2150, mentre avviene in maniera digitalizzata sul MGC.

È altresì importante inserire tutte le costanti di taratura degli strumenti all'interno del software di acquisizione e selezionare i canali e l'ordine di registrazione desiderati.

CAPITOLO 5

SETUP DI PROVA

5.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo vengono descritte le modalità di prova utilizzate per l'esecuzione delle prove di aderenza oggetto della campagna sperimentale.

La preparazione e la descrizione dei campioni utilizzati durante le prove sono già state oggetto del capitolo 3, mentre, per quanto riguarda setup di prova e collocazione degli strumenti, questi verranno descritti di seguito nel corso del presente capitolo.

Verranno descritte compiutamente anche le fasi riguardanti l'esecuzione delle prove, che sono state condotte presso il LISG (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica).

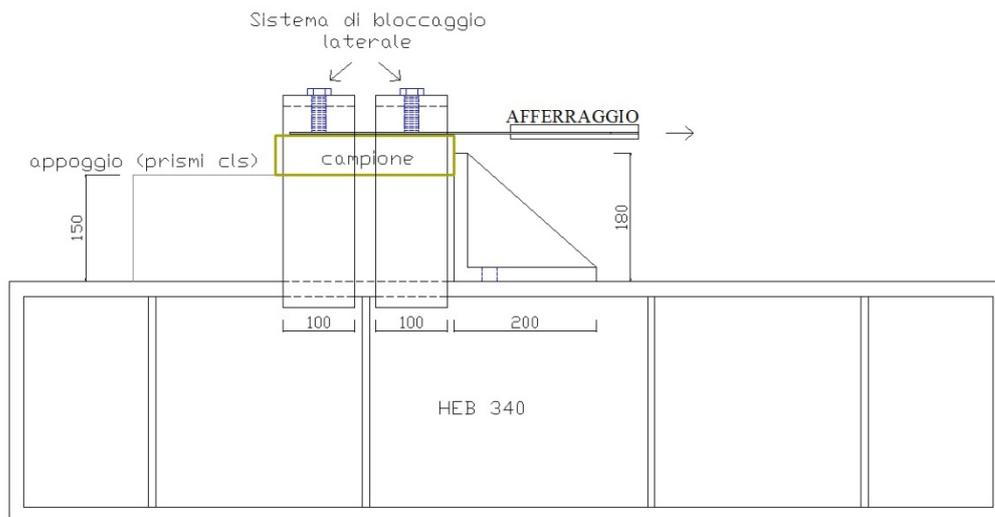
5.2 DESCRIZIONE DEL SETUP DI PROVA

L'apparecchiatura utilizzata per applicare la forza di tiro sul rinforzo applicato ai provini è costituita dai seguenti elementi fondamentali:

- una base su cui appoggiare i campioni, previo opportuno aggiustamento della quota degli stessi tramite spessori, ottenuta grazie all'ausilio di un telaio metallico utilizzato come banco di supporto per le prove

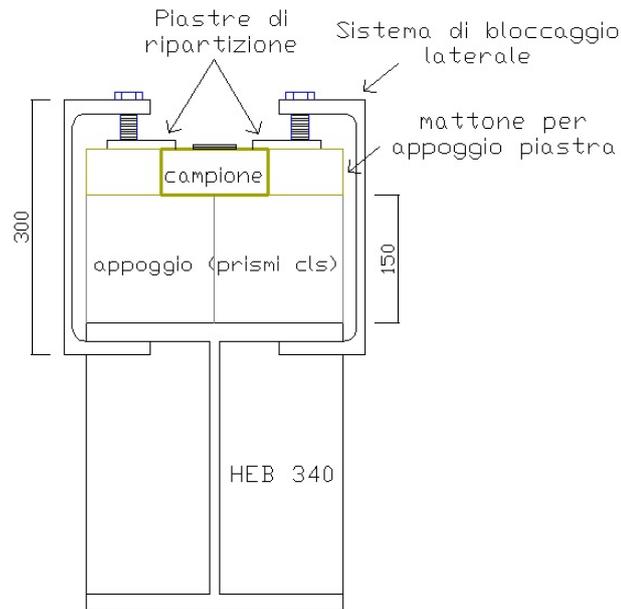
- un sistema di contrasto anteriore per impedire lo spostamento del campione lungo l'asse di tiro
- un opportuno sistema di bloccaggio laterale del campione per impedire il sollevamento della parte posteriore dello stesso durante la prova
- il sistema di tiro vero e proprio.

Uno schema semplificato del setup di prova utilizzato per l'esecuzione delle prove sui mattoni è visibile nelle *figure 5.1* e *5.2*.



VISTA LATERALE

Figura 5.1 - Vista laterale del setup di prova utilizzato per le prove sui mattoni.



VISTA FRONTALE

Figura 5.2 - Vista frontale del setup di prova.

La base su cui appoggiare i campioni è stata ricavata utilizzando un profilo metallico di tipo HEB 340.

L'ala superiore dello stesso, opportunamente levigata, è risultata perfettamente idonea come appoggio, date le caratteristiche di regolarità e planarità richieste.

Per adeguare la quota del campione a quella dell'asse di tiro, che era stata precedentemente dimensionata per l'esecuzione di prove di aderenza su prismi di calcestruzzo, è stato necessario utilizzare appositi spessori.

Per l'esecuzione delle prove sui mattoni, sono stati utilizzati due prismi di calcestruzzo affiancati molto regolari e posizionati perfettamente in bolla, che hanno consentito di raggiungere l'altezza richiesta.

Durante le prove condotte sui campioni di muratura, caratterizzati da dimensioni diverse da quelle dei mattoni, invece, l'altezza desiderata è stata raggiunta utilizzando piastre in acciaio come spessori.

Il sistema di contrasto anteriore, uguale per tutte le prove, è stato realizzato appositamente secondo la geometria indicata in *figura 5.3*.

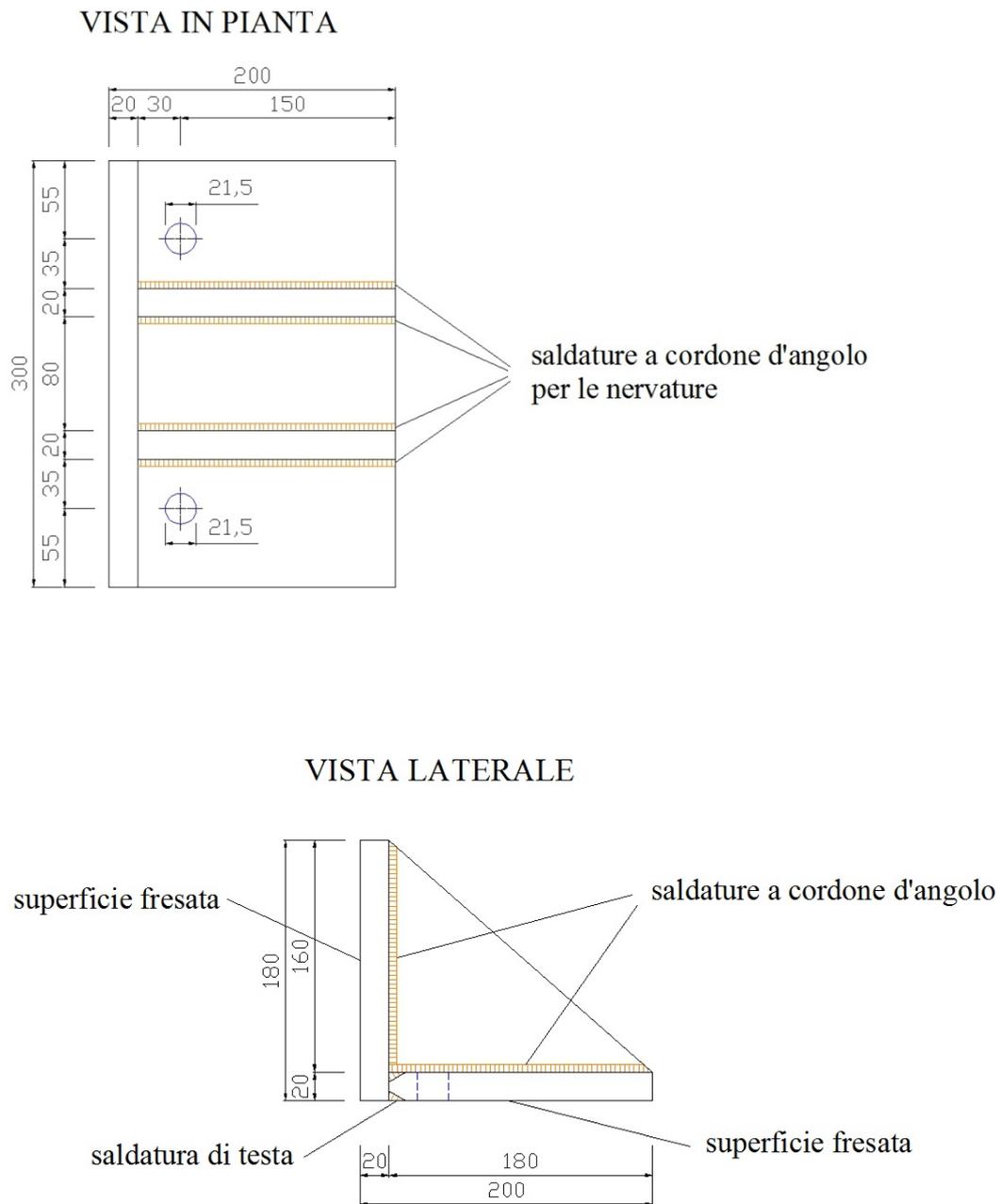


Figura 5.3 - Vista in pianta e laterale del contrasto anteriore.

Questo elemento a forma di L, costituito essenzialmente da due piastre metalliche dello spessore di 20 mm saldate tra loro e rinforzate con delle nervature, viene fissato rigidamente alla base di appoggio del setup di prova mediante bullonatura e impedisce che il campione possa spostarsi in avanti quando si applica la forza di tiro al rinforzo.

Visto che il campione, pur non potendosi muovere lungo l'asse, potrebbe però sollevarsi sulla parte posteriore a causa del fatto che la forza di tiro è applicata all'altezza del rinforzo e non del baricentro della sezione, è stato necessario predisporre a questo scopo un opportuno sistema di contrasto che impedisse il sollevamento.

Tale contrasto non è stato applicato sulla parte posteriore del campione, visto che lo spazio a disposizione non risultava sufficiente, ma è stato posizionato lateralmente, in modo da creare un appoggio non puntuale ma il più possibile esteso.

Gli elementi a C utilizzati a questo scopo sono rappresentati in *figura 5.4* e fungono essenzialmente da morsetti, visto che sono dotati di una apposita vite di regolazione per stringere il tutto.

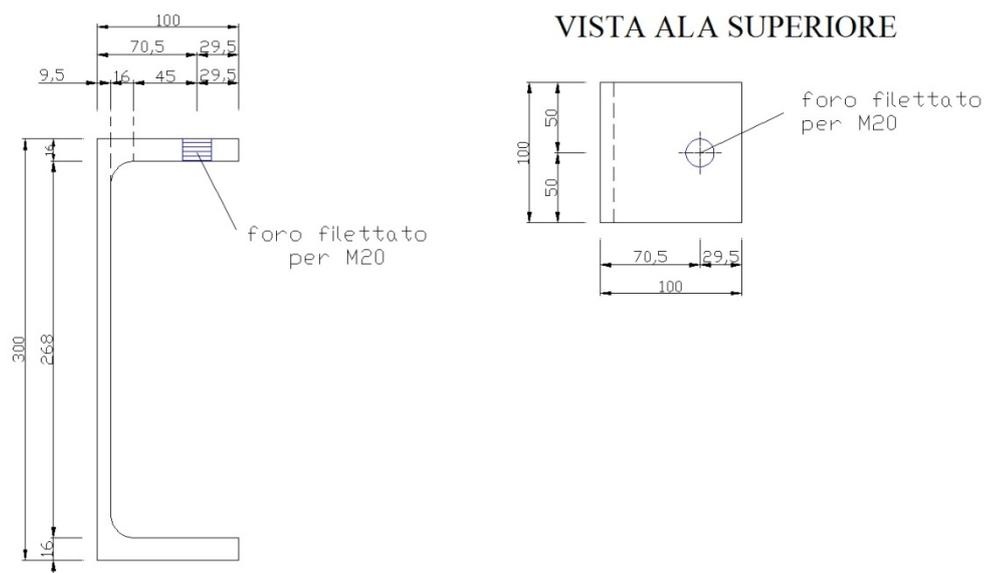


Figura 5.4 - Elementi a C del sistema di contrasto laterale.

Utilizzando due di questi elementi per ogni lato (come è possibile apprezzare osservando le *figure 5.1 e 5.2*), e frapponendo fra l'elemento a C e il campione una piastra di ripartizione, è possibile impedire il sollevamento dei provini.

L'appoggio laterale praticamente continuo, esteso alla maggior parte del provino, riduce la sollecitazione trasmessa dal vincolo e limita al minimo la possibilità che si possano verificare rotture del campione lungo la superficie su cui agisce il contrasto.

Un ulteriore accorgimento adottato, vista in generale l'irregolarità della superficie dei mattoni e dei muretti, è stato quello di frapporre tra la piastra di ripartizione e il campione uno strato di gomma, che garantisca il giusto contatto senza pericolo di concentrazione delle tensioni in una zona poco estesa.

Il sistema di contrasto laterale è risultato adatto a bloccare il sollevamento sia dei mattoni che dei muretti, semplicemente adattando la posizione degli elementi a C e stringendo opportunamente la vite per bloccare il tutto.

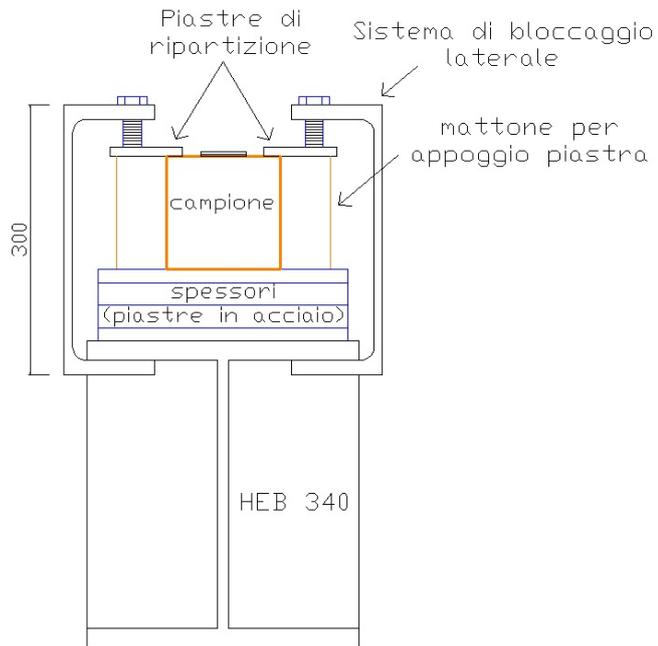
Anche le piastre di ripartizione e lo strato di gomma sono risultati adatti per entrambe le tipologie di prova.

Per garantire l'appoggio delle piastre di ripartizione nelle prove di aderenza svolte sui mattoni, ai lati del campione sono stati collocati altri due mattoni orientati come il provino stesso (*figura 5.2*).

Nelle prove di aderenza condotte sui muretti, invece, per garantire l'appoggio delle piastre sono stati collocati sempre due mattoni, ma con diversa disposizione a coltello (*figura 5.5*).

Vista la maggior altezza del campione, come già accennato precedentemente, nelle prove sui muretti si è resa necessaria la sostituzione dei prismi di calcestruzzo con delle piastre in acciaio per raggiungere la quota corretta rispetto all'asse di tiro.

La forza di trazione viene applicata all'FRP mediante un martinetto meccanico a vite senza fine azionato manualmente, che trasmette lo sforzo al provino mediante un apposito afferraggio (*figura 5.6*).



VISTA FRONTALE

Figura 5.5 - Vista frontale setup di prova per prove di aderenza sui muretti.



Figura 5.6 - Particolare dell'afferraggio.

Le due piastre che costituiscono l'afferraggio vengono fatte aderire al rinforzo utilizzando uno strato di apposito mastice adesivo e sono tenute unite da quattro bulloni.

L'uso dei bulloni permette di tenere unito il tutto finché il collante non ha fatto presa e permette di mantenere stabile il collegamento anche durante le prove.

Il mastice utilizzato deve permettere la trasmissione della forza al rinforzo ed evitare possibili scorrimenti.

L'utilizzo delle piastre di afferraggio è consueto nelle prove su lamine e tessuti, perché permette di ridistribuire gli sforzi senza creare concentrazioni tensionali dannose che potrebbero innescare una crisi fragile del rinforzo.

La costruzione e l'utilizzo del sistema di tiro erano già stati previsti per l'esecuzione di prove di aderenza su prismi in calcestruzzo, ma tale sistema si è ottimamente adattato anche alle prove su mattoni e muretti, previa la sola modifica del sistema di contrasto anteriore e del sistema di bloccaggio laterale, utilizzando appositi spessori per regolare le altezze dei campioni.

Piccole regolazioni dell'altezza dell'asse di tiro sono possibili prima dell'esecuzione della prova, agendo sul sistema di ancoraggio del martinetto meccanico al telaio.

Tale sistema, infatti, permette di poter variare la sua posizione rispetto al telaio metallico utilizzato come banco di supporto per le prove; è quindi necessario verificare, dopo aver effettuato l'incollaggio delle due piastre di afferraggio, che il tratto libero del rinforzo sia perfettamente in linea con l'asse di tiro.

Qualora ciò non sia verificato, è possibile regolare la posizione dell'asse di tiro agendo su apposite viti di regolazione poste dietro al sistema di fissaggio del martinetto (*figura 5.7*).

Si ricorda che il sistema di tiro è dotato anche di una cella di carico per la misurazione della forza applicata al rinforzo.

Il setup di prova completo di tutti gli elementi appena descritti è visibile in *figura 5.8*.



Figura 5.7 - Vista posteriore del sistema di fissaggio del sistema di tiro al telaio: sono visibili le viti di regolazione dell'altezza del sistema di tiro.

Dopo aver descritto le componenti fondamentali del sistema di prova, si riporta una breve descrizione delle fasi seguite per la preparazione dei campioni e per la loro collocazione all'interno del setup di prova.

Le fasi seguite sono essenzialmente le seguenti:

- recupero del provino distaccando con cautela la parte libera del rinforzo dalla superficie di appoggio utilizzata per la sua laminazione
- lisciatura del rinforzo con apposita lima e carta abrasiva fine per ottenere una superficie idonea all'applicazione degli estensimetri
- pulitura della superficie dalle tracce di polvere e altri residui prima dell'applicazione degli estensimetri

- tracciatura della corretta posizione in cui applicare gli estensimetri
- applicazione di estensimetri, supporti con le terminazioni e collegamento tramite stagnatura tra questi due elementi
- preparazione superficiale della parte libera nella zona in cui applicare l'afferraggio (lisciatura, pulitura, eliminazione residui)
- preparazione superficiale delle zone in cui applicare le basette metalliche per la misura degli spostamenti
- collocazione del campione sulla base del setup di prova (costituita dai due prismi in calcestruzzo per i mattoni e dalle piastre in acciaio per i muretti), appoggiandolo al contrasto anteriore e allineandolo con l'asse di tiro
- sistemazione del campione, assicurando l'adeguato appoggio dello stesso e la corretta messa in bolla, tramite utilizzo di spessori
- collocazione degli appoggi laterali per le piastre di ripartizione (due mattoni disposti normalmente o a coltello a seconda che si tratti di mattoni o muretti, come descritto precedentemente) ed eventuale spessoratura ove richiesto
- posizionamento dello strato di gomma al di sotto delle piastre di ripartizione e collocazione delle piastre stesse
- posizionamento degli elementi a C e fissaggio del sistema stringendo le apposite viti
- stagnatura dei cavi del sistema di acquisizione ai terminali degli estensimetri
- regolazione dell'altezza dell'asse di tiro in modo che risulti perfettamente in linea con la parte libera del rinforzo (ciò serve ad assicurarsi di tirare il rinforzo effettivamente lungo il suo asse e non verso l'alto o verso il basso)
- incollaggio delle due piastre di afferraggio al campione e posizionamento di un appoggio atto a sostenere il peso delle piastre fino a presa avvenuta
- incollaggio delle basi di misura degli LVDT
- sistemazione dei trasduttori di spostamento

- rimozione dell'appoggio delle piastre dell'afferraggio prima di iniziare la prova.

Le fasi indicate sono state ripetute per la preparazione di ogni prova, trascurando il posizionamento degli estensimetri nelle prove in cui questi non erano richiesti.

Prima di iniziare ogni prova è stato necessario inoltre procedere al collegamento, al controllo e alla messa a punto degli strumenti utilizzati (cella di carico, LVDT, estensimetri), come indicato al capitolo 4.

Nel paragrafo successivo viene riportata una descrizione del posizionamento di estensimetri e LVDT nelle prove svolte.



Figura 5.8 - Fotografia del setup di prova in una prova di aderenza su un mattone: sono visibili il telaio, il contrasto anteriore del provino, gli elementi di contrasto laterale a forma di C e il sistema di tiro.

5.3 SETUP ESTENSIMETRI

Gli estensimetri sono stati collocati in punti prestabiliti del rinforzo, lungo il suo asse medio, in modo poi da poter determinare, tramite apposite elaborazioni, deformazioni, tensioni tangenziali e scorrimenti su tutta la superficie incollata, in funzione del carico applicato.

L'applicazione di estensimetri nel tratto libero ha consentito inoltre, conoscendo il carico applicato (ciò è stato possibile grazie alla cella di carico), di determinare il valore effettivo del modulo elastico del rinforzo.

La collocazione degli estensimetri nella parte libera (ovvero nel tratto tra il bordo anteriore del campione e l'afferraggio) deve avvenire disponendo due di questi in maniera speculare rispetto al rinforzo (cioè su entrambe le facce e nella medesima posizione), in modo da poter eliminare i possibili contributi deformativi di tipo flessionale.

Il numero degli estensimetri applicati è variato da 0 a 9 a secondo della prova.

I setup utilizzati sono stati effettivamente i seguenti:

- 1) **SETUP SENZA ESTENSIMETRI:** nelle prove in cui era di interesse solo la misurazione della forza applicata e degli spostamenti per la costruzione del diagramma forza – allungamento del composito, non è stato applicato alcun estensimetro.
- 2) **SETUP CON 7 ESTENSIMETRI:** gli estensimetri sono stati applicati tutti lungo l'asse del rinforzo nella parte incollata, secondo la spaziatura seguente:

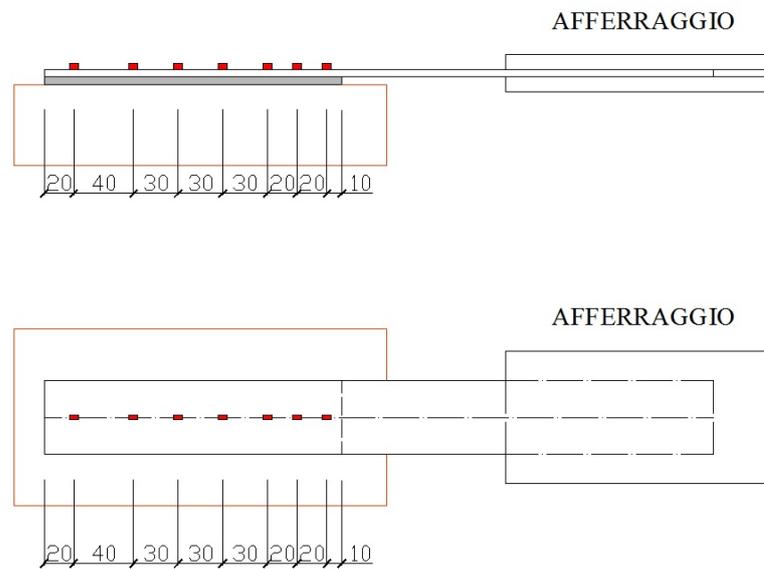


Figura 5.9 - Setup con 7 estensimetri.

Va notato che, nonostante in figura venga indicato un mattone come campione, la spaziatura degli estensimetri a partire dal tratto di inizio incollaggio è stata la stessa anche nelle prove sui muretti.

Ciò è avvenuto perché, nonostante le dimensioni dei campioni risultino diverse, le dimensioni del tratto incollato sono invece le stesse.

Allo stesso modo, la disposizione a 7 estensimetri è la stessa indipendentemente dalla finitura superficiale del mattone o del muretto.

- 3) **SETUP CON 9 ESTENSIMETRI:** prevede l'applicazione dei 7 estensimetri nella parte incollata, lungo l'asse del rinforzo, come avviene nel setup precedente, ma con in più l'aggiunta di due estensimetri nel tratto libero.

Gli interassi tra gli estensimetri e il posizionamento dei due estensimetri nel tratto libero sono indicati nella figura seguente:

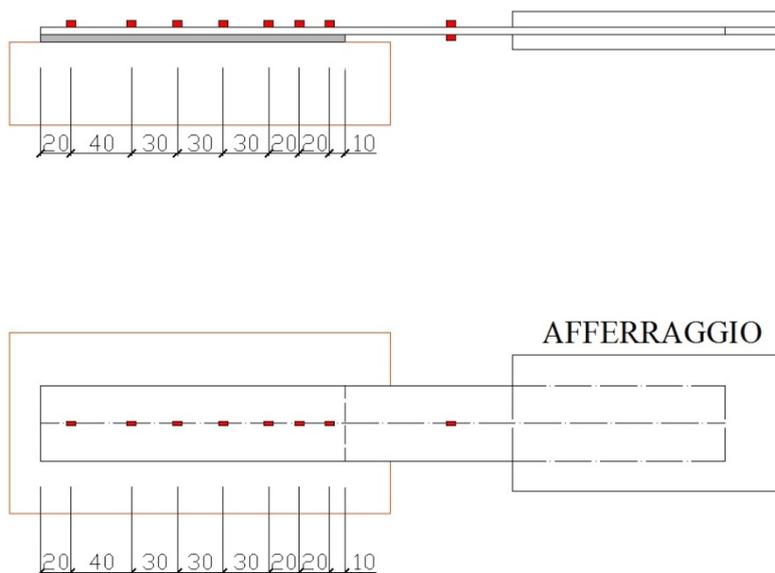


Figura 5.10 - Setup con 9 estensimetri.

Si precisa che i due estensimetri sulla parte libera sono stati collocati al centro del tratto libero, uno nella parte superiore del rinforzo e uno in quella inferiore, in posizione speculare rispetto all'asse del rinforzo stesso. Tale scelta permette, come già accennato, di eliminare i contributi deformativi di tipo flessionale, in modo da giungere ad un diagramma tensione – deformazione riferito ad una sollecitazione di pura trazione. Da questo diagramma si ricava in maniera semplice il modulo elastico effettivo del composito, che spesso risulta sensibilmente diverso da quello indicato dal produttore e riferito alla sola fibra.

5.4 POSIZIONAMENTO LVDT

La collocazione dei trasduttori di spostamento avviene fissandoli rigidamente ad un supporto esterno, che garantisce il corretto posizionamento degli strumenti, mentre la sonda viene posta a contatto con una basetta metallica, incollata al rinforzo (*figura 5.11*).

Lo spostamento della sonda dell'induttivo viene visto in termini di variazione di potenziale elettrico, che viene rilevato dal sistema di acquisizione.

Nelle prove svolte è stato necessario posizionare due LVDT per misurare l'allungamento del composito.

La loro collocazione è indicata nelle *figure 5.12 e 5.13*.



Figura 5.11 - Collocazione dei trasduttori di spostamento. Sono visibili: la struttura metallica esterna di supporto alla quale gli induttivi vengono rigidamente collegati e la base di misura sulla quale la sonda viene posta a contatto.

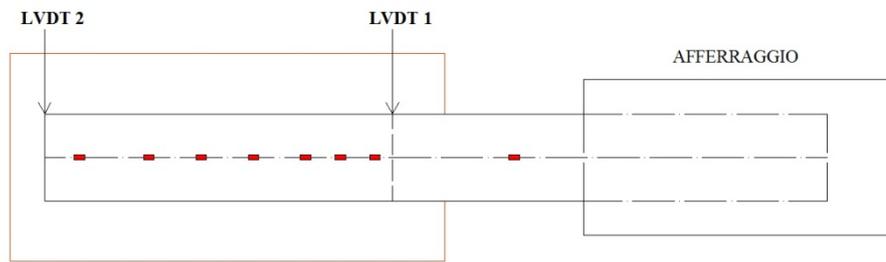


Figura 5.12 - Punti nei quali gli LVDT misurano lo spostamento.

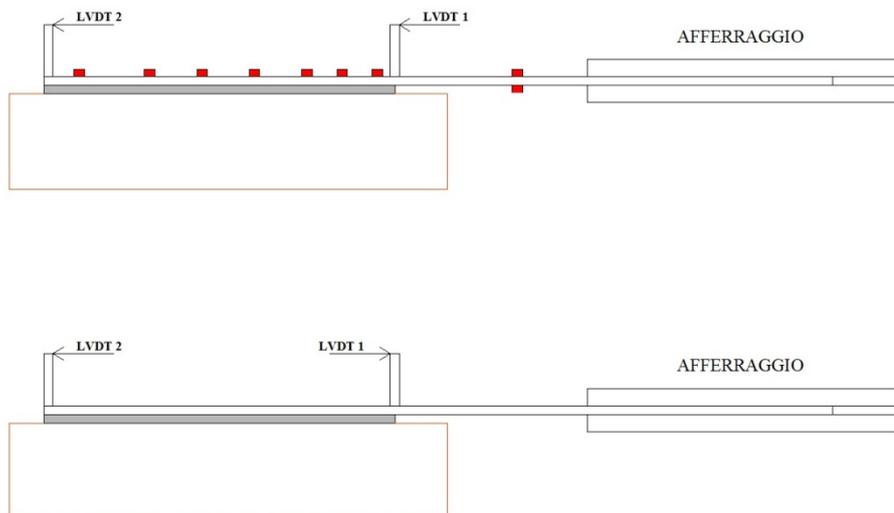


Figura 5.13 - Posizionamento preferibile degli induttivi nelle prove con gli estensimetri (sopra) e senza (sotto).

Lo scopo degli LVDT è quello di misurare gli spostamenti dei punti indicati, posizionati all'inizio e alla fine della parte incollata.

La conoscenza di questi due spostamenti permette di risalire semplicemente all'allungamento del composito nel tratto interessato.

Si fa presente che è necessario posizionare gli induttivi il più in basso possibile, in modo da mitigare l'effetto di possibili movimenti indesiderati della basetta metallica.

Questa infatti è incollata sul rinforzo, ma dato che il composito ha una superficie piuttosto irregolare, in cui sono presenti diversi avvallamenti, potrebbe ruotare rispetto alla verticale a causa del fatto che tali irregolarità tendono a modificarsi durante la prova, oppure in seguito a effetti flessionali locali o ancora a causa di movimenti repentini di distacco del rinforzo dal substrato.

La collocazione dell'induttivo in basso piuttosto che in alto serve a mitigare le conseguenze di queste rotazioni sulla misura che si sta facendo.

La *figura 5.13* merita una breve spiegazione: fermo restando il posizionamento dei punti di misura, infatti, è possibile collocare l'induttivo da una parte oppure da quella opposta.

Visto l'ingombro dell'afferraggio in altezza, che va ad imporre una quota minima dell'LVDT rispetto al composito, il posizionamento dell'induttivo in quella zona non è consigliato.

Ecco perché nelle prove senza estensimetri si preferisce effettuare le letture come indicato nella stessa figura in basso.

La presenza dei cavi di collegamento degli estensimetri al sistema di acquisizione, tuttavia, rende praticamente impossibile tale posizionamento nelle prove con questa strumentazione.

Anche se si riuscisse a posizionarsi leggermente più in basso, infatti, il rischio di danneggiare i cavi o le terminazioni degli estensimetri risulterebbe troppo elevato. Ciò spiega perché, in questo caso, è risultata preferibile l'alternativa indicata sempre in *figura 5.13* (in alto).

Si fa presente che, nonostante le figure riportate siano riferite alle prove su mattoni, le stesse considerazioni valgono anche per le prove svolte sui muretti.

Quindi è stato adottato lo stesso posizionamento degli LVDT anche nelle prove eseguite su campioni di muratura e, in generale, per qualsiasi tipo di finitura superficiale.

In ogni prova, gli induttivi sono stati collegati al sistema MGC, utilizzando le impostazioni riportate in seguito:

- **tipo di trasduttore:** IND FULL BRIDGE
- **excitation (alimentazione):** 1V
- **unità di misura:** in entrata mV/V, in uscita mm
- **zero point:** in entrata 0, in uscita 0
- **valore nominale:** in uscita escursione in mm dell'LVDT (10 o 20 nelle prove svolte), in entrata 80 mV/V

5.5 CELLA DI CARICO

La cella di carico, utilizzata per misurare il carico applicato al rinforzo, è posizionata al termine del martinetto ad azione manuale, prima dell'afferraggio ed è visibile in *figura 5.14*.

Essa, come indicato al capitolo 4, è stata collegata al sistema di amplificazione MGC utilizzando le impostazioni seguenti:

- **tipo di trasduttore:** SG FULL BRIDGE
- **alimentazione:** 5V
- **unità di misura:** in entrata mV/V, in uscita kg
- **zero point:** in entrata 0, in uscita 0
- **scala (valore nominale):** in uscita 10000 kg, in entrata 2 mV/V



Figura 5.14 - Particolare della cella di carico.

5.6 MODALITÀ DI PROVA

Le prove sono state svolte applicando una forza di trazione al rinforzo, trasmessa dal sistema di tiro al composito attraverso le due piastre di afferraggio.

Il martinetto impiegato è stato pilotato manualmente mediante uso di una manovella ad asse verticale (visibile in *figura 5.15*).

L'applicazione del carico avviene ruotando la manovella, mentre un riduttore di giri rende lento e progressivo lo spostamento della vite senza fine.

La prova viene eseguita in controllo di spostamento.

Man mano che si applica il carico, il sistema di acquisizione registra in tempo reale i dati forniti da estensimetri, LVDT e cella di carico.

Prima di iniziare ogni prova è necessario definire, per ogni strumento utilizzato, i parametri corretti per il suo funzionamento.

Per quanto riguarda gli estensimetri, è necessario definire il corretto voltaggio di alimentazione (pari a 2.5 V), regolare il grado di amplificazione del segnale e bilanciare il ponte di Wheatstone.

Queste fasi vengono completate agendo opportunamente sulle manopole del sistema di amplificazione (2150).

Per quanto riguarda gli LVDT, dopo aver completato il loro posizionamento e aver inserito i parametri corretti all'interno del MGC, è sufficiente azzerare la lettura prima di iniziare la prova.

L'azzeramento è un'operazione necessaria anche per la cella di carico, dopo aver ovviamente inserito i parametri giusti all'interno del sistema di amplificazione.

Si procede poi assicurandosi di aver inserito tutte le costanti di taratura all'interno del software e si selezionano i canali dai quali effettuare l'acquisizione.

Completate queste fasi, si comincia ad applicare carico al campione fino a giungere ad un valore pari a 100 kg, dopo il quale si effettua lo scarico fino a tornare allo zero.

Completato il ciclo di carico-scarico iniziale, che serve a garantire un eventuale assestamento del campione, inizia la prova vera e propria, che ha luogo facendo crescere la forza fino all'innescò del meccanismo di debonding, che si è manifestato per valori diversi di carico a seconda della tipologia di campione.

Si procede quindi ad applicare carico fino al completo distacco del rinforzo dal substrato, continuando a monitorare le letture degli strumenti grazie al sistema di acquisizione.



Figura 5.15 - Sistema di tiro: sono visibili la manovella ad asse verticale e il riduttore posto subito dopo la manovella.

CAPITOLO 6

RISULTATI DELLE PROVE

6.1 INTRODUZIONE

All'interno di questo capitolo è presente una descrizione dettagliata di tutte le prove di aderenza condotte su mattoni e muretti rinforzati mediante tessuto in fibra di vetro laminato in situ.

Le prove sono state svolte presso il LISG (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica).

Per ogni prova sarà indicata la strumentazione utilizzata (posizionata in accordo con quanto già descritto al capitolo precedente) e saranno discussi i risultati ottenuti in termini di diagrammi forza – allungamento, deformazioni, tensioni tangenziali e scorrimento.

L'utilizzo della stessa tipologia di tessuto in fibra di vetro e la definizione della medesima area di incollaggio, permettono di poter confrontare efficacemente i risultati delle varie prove.

A tal proposito, diversi confronti fra i risultati ottenuti saranno presentati nel corso del capitolo 7.

6.2 PROVE DI ADERENZA SU MATTONI E MURETTI NON RASATI

Si presentano ora i risultati delle prove svolte su mattoni e muretti delle quattro tipologie senza applicazione di alcuna rasatura superficiale (ovvero con finitura di tipo A).

Per la descrizione delle sigle utilizzate e per l'elenco completo delle prove svolte si rimanda al § 2.4 della presente trattazione.

6.2.1 PROVA B1A2a

La prova in oggetto è stata condotta il giorno 01/06/2011, adottando un setup composto dalla cella di carico, da 7 estensimetri e 2 trasduttori di spostamento (*figura 6.1*).

La collocazione dei due LVDT per la determinazione dell'allungamento del rinforzo è stata quella classica adottata anche nelle altre prove strumentate con estensimetri (e già descritta al § 5.4).

Il primo induttivo (che misura lo spostamento nella sezione di primo ancoraggio) è stato collocato in modo che potesse eseguire la lettura da davanti, senza transitare pericolosamente sopra le terminazioni e i cavi degli estensimetri, rischiando poi di danneggiarli.

In questa prova, data l'assenza dei due estensimetri sul tratto libero, non è stato misurato il modulo elastico.

La descrizione completa degli strumenti utilizzati e dei canali di acquisizione impiegati è riportata nella *tabella 6.1*.

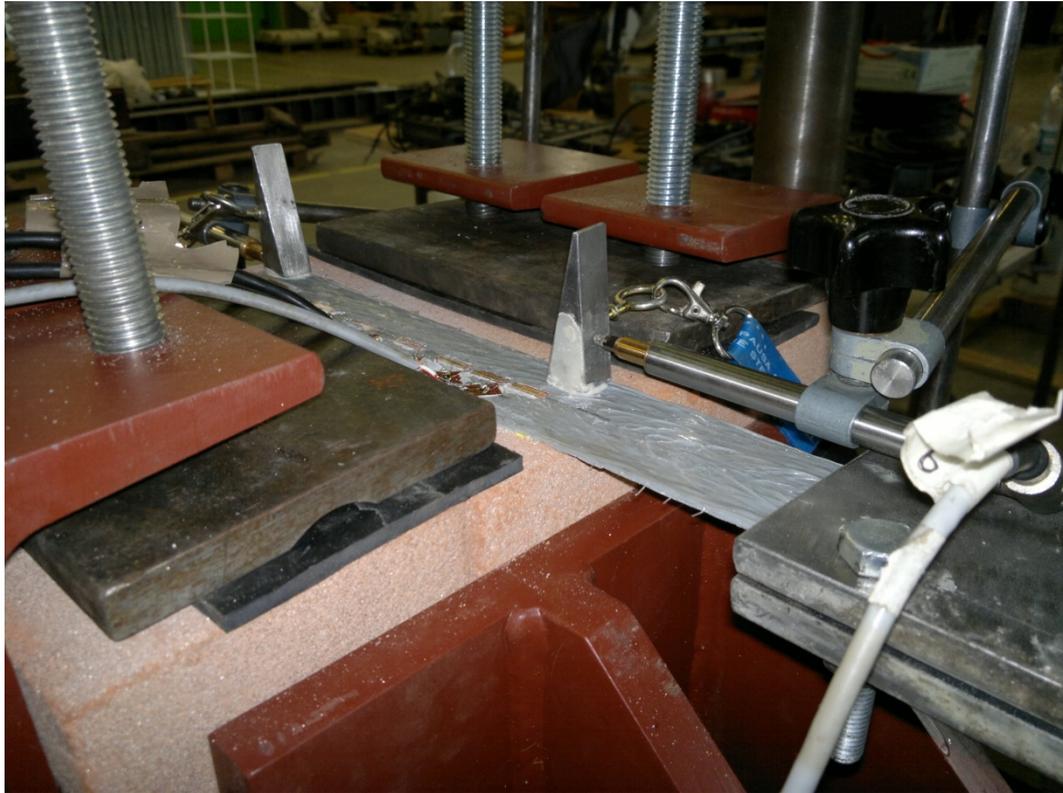


Figura 6.1 - Setup prova B1A2a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.1 - Strumenti utilizzati durante la prova B1A2a e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e i valori registrati dai due LVDT, collegati ai canali 1 e 2, per prima cosa è stato possibile costruire il grafico carico-allungamento, indicato in *figura 6.2*.

Si fa presente che, come per le altre prove svolte che verranno descritte in seguito, l'allungamento del rinforzo viene calcolato direttamente come differenza degli spostamenti registrati rispettivamente dal primo e dal secondo induttivo.

In *figura 6.3* viene invece mostrato il grafico carico-allungamento ottenuto con un procedimento alternativo: il carico è stato registrato sempre utilizzando le letture della cella di carico, ma l'allungamento è stato computato mediante integrazione, per ogni livello di forza, delle deformazioni registrate dagli estensimetri, anziché utilizzare le letture degli LVDT.

Il calcolo dell'allungamento, secondo questa modalità, può essere condotto applicando la formula seguente:

$$\Delta l = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2} \right) \cdot (z_i - z_{i-1}) \quad (6.1)$$

in cui si è indicato con Δl l'allungamento, mentre ε_i e ε_{i-1} rappresentano i valori di deformazione registrati rispettivamente nelle sezioni z_i e z_{i-1} .

Avendo disposto sempre 7 estensimetri lungo la zona incollata, n risulta pari a 7.

Confronti e considerazioni sui diagrammi ricavati attraverso le due diverse metodologie saranno riportati al § 7.4.

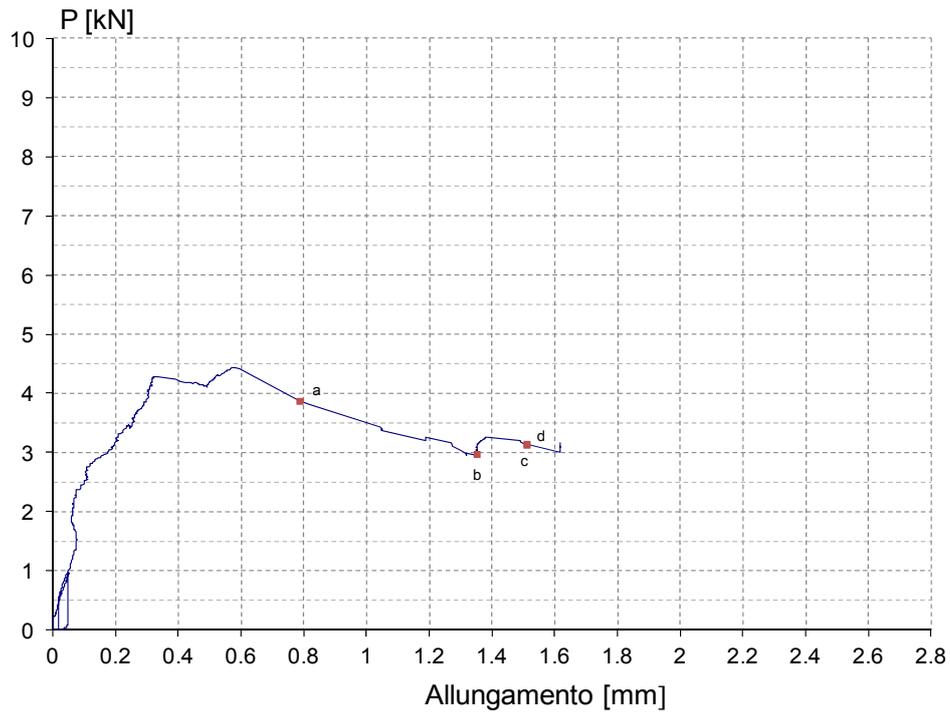


Figura 6.2 - Grafico carico-allungamento ottenuto utilizzando le letture dei trasduttori di spostamento (prova B1A2a).

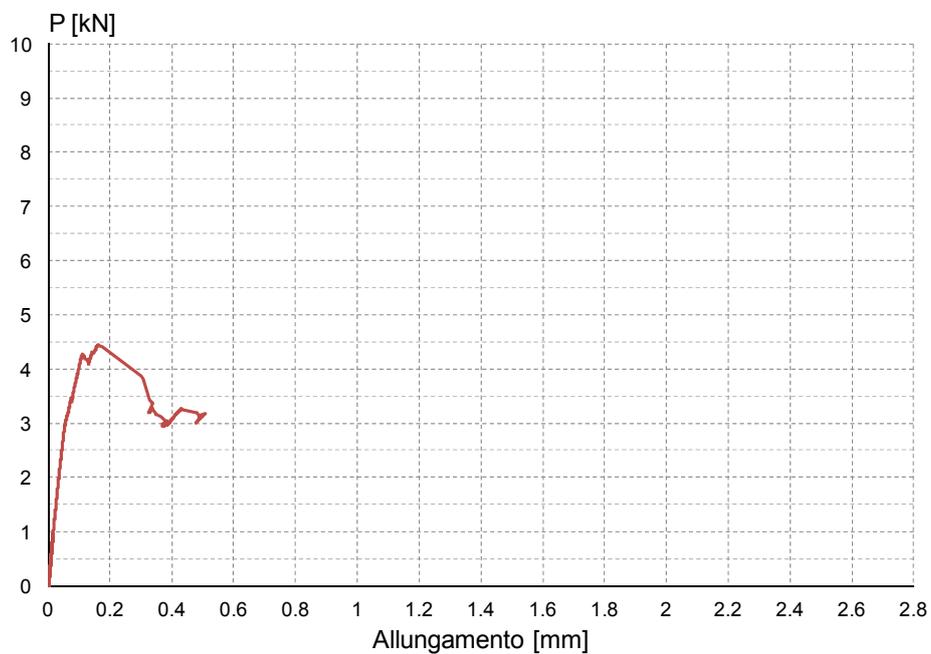


Figura 6.3 - Grafico carico-allungamento in cui l'allungamento è stato computato mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova B1A2a).

Prima di iniziare la prova vera e propria è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico fino al livello di circa 1 kN, in modo da permettere l'assestamento del campione.

Si precisa che la prova viene condotta in controllo di spostamento.

Al termine del ciclo iniziale, il carico è cresciuto fino a raggiungere un primo picco di 4.27 kN, con un successivo ramo di leggera discesa per poi risalire ed arrivare alla forza massima registrata di 4.44 kN.

Il ramo di softening che si è verificato subito dopo risulta piuttosto accentuato e termina con un tratto finale più variegato fino all'ultimo valore registrato pari a circa 3.17 kN.

I punti segnalati in *figura 6.2* sono rappresentativi dei livelli di carico scelti dopo il picco per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino durante la fase di debonding.

Data la mancanza dei due estensimetri nel tratto libero, in questa prova non è stato possibile misurare il modulo elastico del composito, ma tale misura è stata eseguita nel corso di altre prove, in modo da giungere ad un valore medio significativo da utilizzare nel corso dell'elaborazione dei dati.

Si può già anticipare che il valore trovato è stato pari a 123767 MPa.

I valori di deformazione registrati dai 7 estensimetri posizionati nella zona incollata in funzione del carico applicato sono riportati in *figura 6.4*.

Dal grafico si può notare come gli estensimetri più vicini alla sezione di primo ancoraggio (indicati con numeri inferiori) siano i primi a deformarsi, già con carichi piuttosto bassi, mentre gli altri praticamente non registrano ancora alcuna deformazione.

Questo fenomeno è tipico delle prove di aderenza: infatti la forza applicata al rinforzo si trasferisce provocando deformazioni più elevate dapprima nella parte iniziale del composito e solo a carichi più elevati e con l'innescarsi del fenomeno di debonding comincia la deformazione del rinforzo anche procedendo verso la parte posteriore.

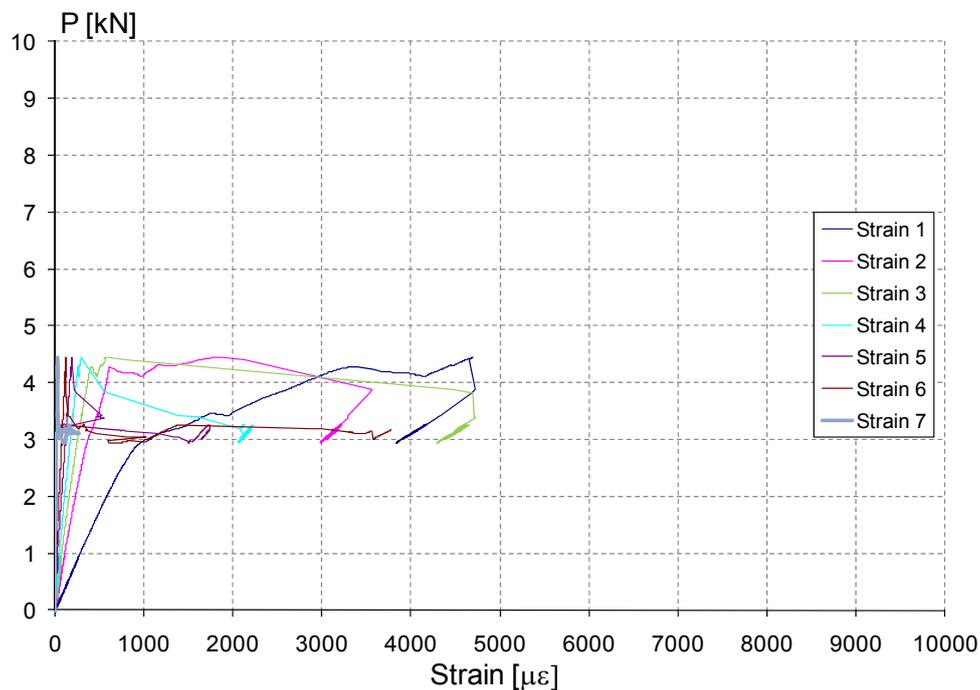


Figura 6.4 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B1A2a).

L'andamento delle deformazioni lungo l'asse del rinforzo, in funzione del livello di carico selezionato, viene invece rappresentato in *figura 6.5*.

L'asse z utilizzato ha la funzione di misurare la distanza (ovvero la posizione) dell'estensimetro rispetto alla sezione dove inizia l'incollaggio del rinforzo.

I profili illustrati sono relativi ai diversi livelli di carico indicati all'interno della figura stessa, che sono stati scelti in modo da avere un quadro generale dell'evoluzione dello stato deformativo del composito al procedere del meccanismo di debonding.

I punti indicati in figura rappresentano i valori effettivamente letti dagli estensimetri e il collegamento avviene utilizzando dei tratti lineari.

Il valore di deformazione nella sezione iniziale di ancoraggio (ovvero nella posizione $z = 0$) non viene letto da alcun estensimetro, ma viene ricavato semplicemente utilizzando la formula seguente:

$$\varepsilon_0 = \frac{\bar{P}}{E_{FRP} \cdot A_{FRP}} \quad (6.2)$$

in cui \bar{P} rappresenta il livello di carico considerato, A_{FRP} indica l'area della sezione trasversale del composito, mentre E_{FRP} è il modulo elastico del rinforzo.

Dal grafico si può notare che, per valori di carico inferiori a quello che comincia ad originare il distacco del composito dal substrato, le deformazioni diminuiscono piuttosto rapidamente procedendo dalla sezione iniziale verso la parte finale del composito.

In questa fase l'interfaccia mostra un comportamento di tipo elastico-lineare.

Quando però viene raggiunto il carico che innesca il distacco del rinforzo a partire dalla zona iniziale di ancoraggio, le deformazioni tendono ad assumere un valore pressoché costante in questa zona.

Questo andamento tipico prefigura l'innesco del fenomeno di debonding, che poi andrà propagandosi lungo il rinforzo, con un progressivo aumento delle deformazioni nei punti che interessano questo fenomeno.

Le curve indicate come a,b,c,d sono relative a livelli di carico registrati già oltre il picco del diagramma carico-allungamento.

Va rilevato che, una volta innescato, il fenomeno di debonding procede inesorabilmente verso la parte posteriore del rinforzo ed è spesso improvviso (meccanismo di tipo fragile).

Si precisa che i valori di deformazione riportati in *figura 6.5* sono quelli effettivamente registrati durante la prova.

Tuttavia, il diagramma presenta alcuni tratti che vanno modificati in funzione di alcune considerazioni di carattere generale:

- la forza applicata al rinforzo provoca una deformazione dello stesso a partire dalla sezione di primo ancoraggio e pertanto ci si aspetta che la deformazione in generale debba diminuire o al più rimanere costante procedendo lungo l'asse del rinforzo; non sono pertanto spiegabili aumenti di deformazione che si verificano procedendo verso la parte finale del composito, a meno che questi non siano determinati da eventi di tipo flessionale
- nella valutazione globale del meccanismo di debonding non sono di interesse fenomeni locali provocati da irregolarità o inflessioni locali del composito, che comportano quindi picchi deformativi oppure improvvisi cali di deformazione, a seconda della modalità di inflessione
- nella valutazione delle deformazioni, qualora ci siano rilevazioni discordanti, è opportuno considerare come più attendibile la deformazione calcolata nella sezione $z = 0$ utilizzando la (6.2), in quanto dipende da quantità note con sufficiente accuratezza
- la valutazione della deformazione nella sezione di inizio incollaggio costituisce anche un limite superiore per le altre deformazioni che vengono registrate lungo l'asse: infatti, assumendo che questa sia nota e più attendibile rispetto alle altre deformazioni registrate, in quanto queste ultime potrebbero derivare anche da irregolarità o inflessioni locali, in assenza di altri carichi applicati non ha senso registrare un aumento di deformazione procedendo lungo l'asse del rinforzo.

Facendo queste considerazioni, è possibile modificare il diagramma riportato in *figura 6.5*, rendendolo di più facile comprensione e interpretazione.

Tutte le modifiche apportate sono state appena motivate e conducono al diagramma regolarizzato riportato in *figura 6.6*.

Si precisa che, per il calcolo delle quantità che verranno definite in seguito, si considereranno d'ora in poi i valori delle deformazioni modificati e non quelli registrati direttamente attraverso gli estensimetri.

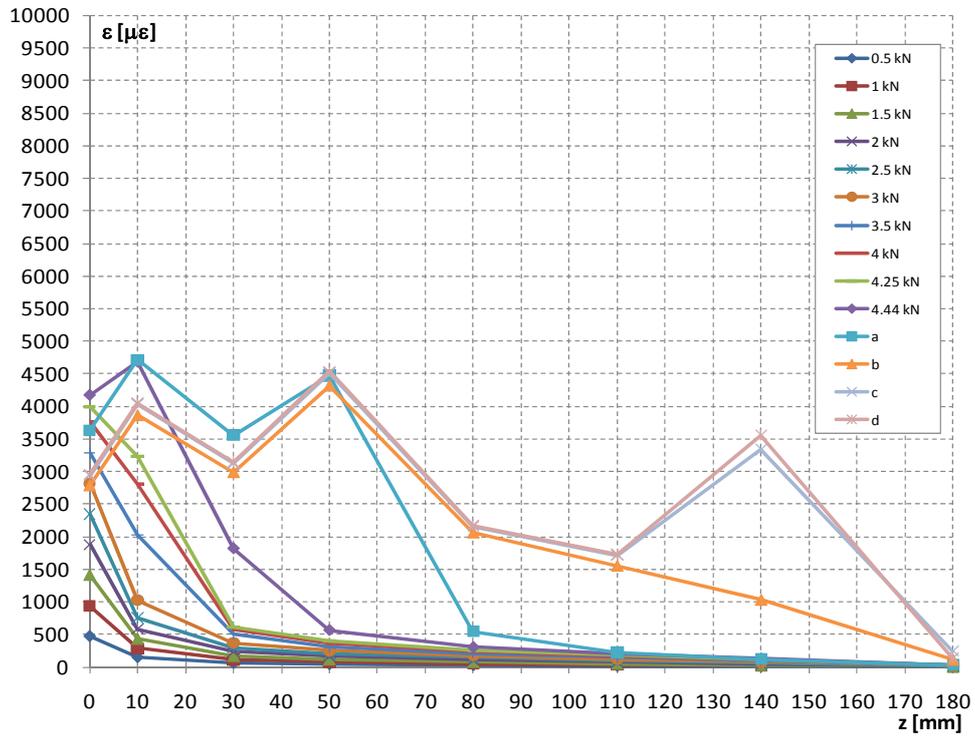


Figura 6.5 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova B1A2a (diagramma originale).

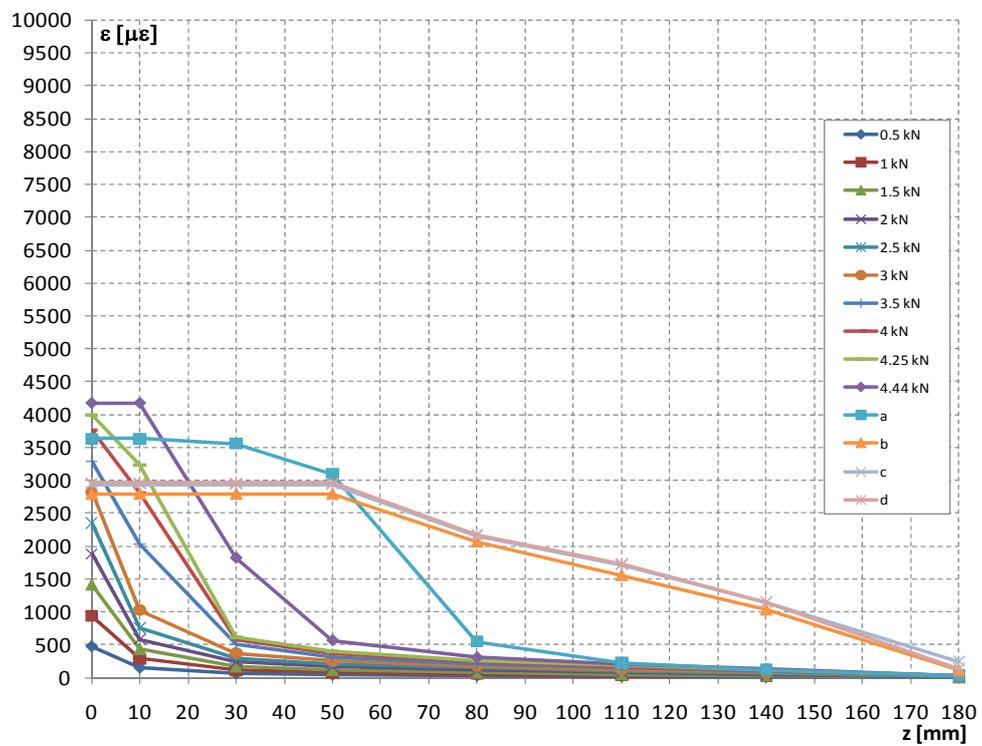


Figura 6.6 - Deformazioni lungo il rinforzo per la prova B1A2a (diagramma modificato).

Utilizzando le deformazioni indicate in *figura 6.6*, relative ai livelli di carico indicati, è possibile costruire un grafico che mostri gli andamenti della tensione tangenziale lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.7*).

Il valore della tensione tangenziale, riportato in ogni punto del diagramma in funzione del livello di carico, viene calcolato come valore medio delle tensioni valutate tra due sezioni successive sezioni z_i e z_{i+1} , utilizzando la seguente espressione:

$$\tau_{i+1/2} = - \frac{E_{FRP} \cdot A_{FRP} \cdot (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{B_{FRP} \cdot (z_{i+1} - z_i)} \quad (6.3)$$

in cui ε_i e ε_{i+1} rappresentano i valori di deformazione registrati rispettivamente nelle sezioni z_i e z_{i+1} , B_{FRP} indica la larghezza del rinforzo (pari a 50 mm) e A_{FRP} denota invece l'area effettiva del composito.

Dopo aver effettuato questo calcolo, si può assumere che il valor medio rimanga costante all'interno del tratto considerato, cioè quello delimitato dalle sezioni z_i e z_{i+1} .

Eseguendo l'operazione definita dalla (6.3) per tutti i valori di deformazione, in corrispondenza di ogni livello di carico, è possibile ottenere il diagramma indicato in *figura 6.7*.

Questo diagramma mostra un andamento tipico:

- per bassi livelli di carico (ovvero per carichi inferiori rispetto a quello che provoca l'innescio del distacco del composito) le tensioni tangenziali assumono valori massimi in prossimità delle sezioni iniziali del rinforzo, per poi decrescere rapidamente man mano che si procede verso la parte terminale della zona di incollaggio

- quando invece si innesca il meccanismo di debonding, i picchi tensionali subiscono un progressivo abbattimento e si spostano man mano verso la zona terminale del rinforzo.

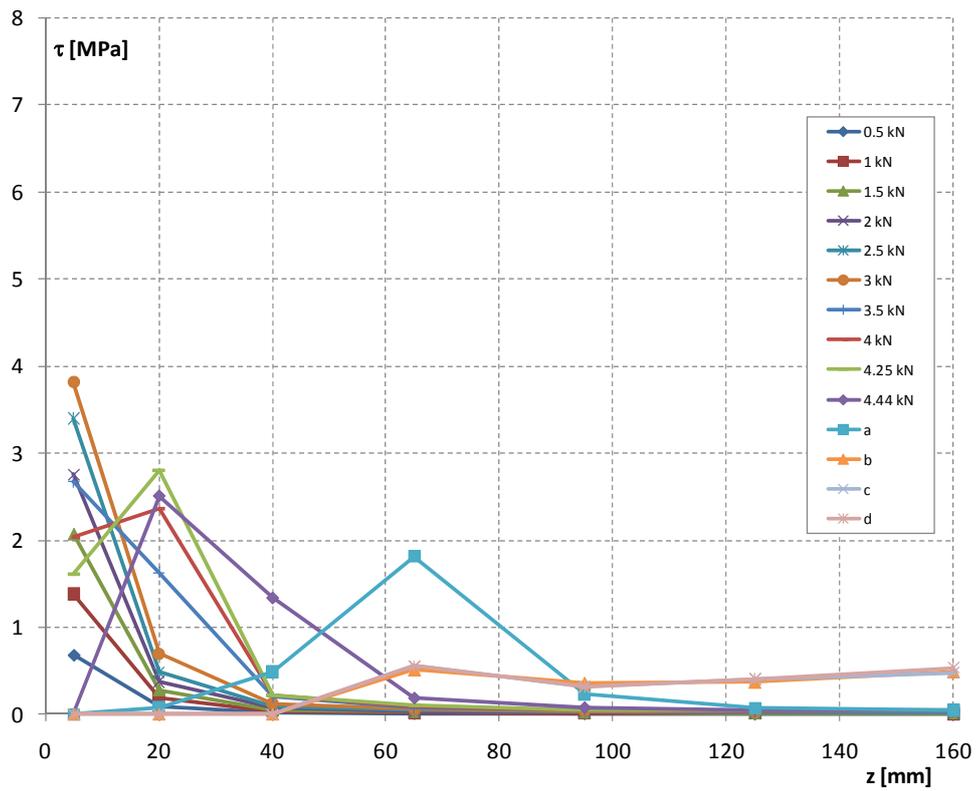


Figura 6.7 – Tensioni tangenziali lungo l’asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova B1A2a).

L'area sottesa dalle curve rappresentate in *figura 6.7* rappresenta fisicamente lo scorrimento all'interfaccia tra rinforzo e substrato se sono soddisfatte le ipotesi di seguito indicate:

- 1) perfetta aderenza tra rinforzo e substrato in corrispondenza della sezione terminale z_m in cui si è misurata la deformazione. Ciò implica l'assenza di scorrimento in corrispondenza di questa sezione (ovvero $s(z_m) = 0$, avendo indicato lo scorrimento con la lettera s).
Questa ipotesi sembra piuttosto forte, ma è verificata con buona approssimazione qualora si adotti una lunghezza di incollaggio maggiore di quella effettiva di ancoraggio; si tratta quindi di una ipotesi che risulta ragionevolmente soddisfatta in riferimento alle prove svolte.
- 2) le deformazioni che si verificano nel campione (muratura o mattone) durante la prova sono trascurabili rispetto a quelle misurate sul rinforzo, per cui si può giustificare l'assunzione che queste risultino addirittura nulle
- 3) l'andamento delle deformazioni tra due sezioni successive poste all'ascissa z_i e z_{i+1} assume un andamento lineare

Sotto queste ipotesi è possibile calcolare lo scorrimento all'ascissa generica z' , compresa tra le ascisse z_i e z_{i+1} , utilizzando la seguente espressione:

$$s(z') = s(z_{i+1}) - \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{z_{i+1} - z_i} \cdot \frac{(z_{i+1} - z')^2}{2} + \varepsilon_{i+1} \cdot (z_{i+1} - z') \quad (6.4)$$

Se si ricerca il valore medio dello scorrimento tra due sezioni successive collocate all'ascissa z_i e z_{i+1} , questo può essere determinato semplicemente eseguendo una media:

$$s_{medio} = \frac{s_{i+1} + s_i}{2} \tag{6.5}$$

Gli scorrimenti in funzione dell'ascissa z , calcolati per i diversi livelli di carico, sono rappresentati in *figura 6.8*.

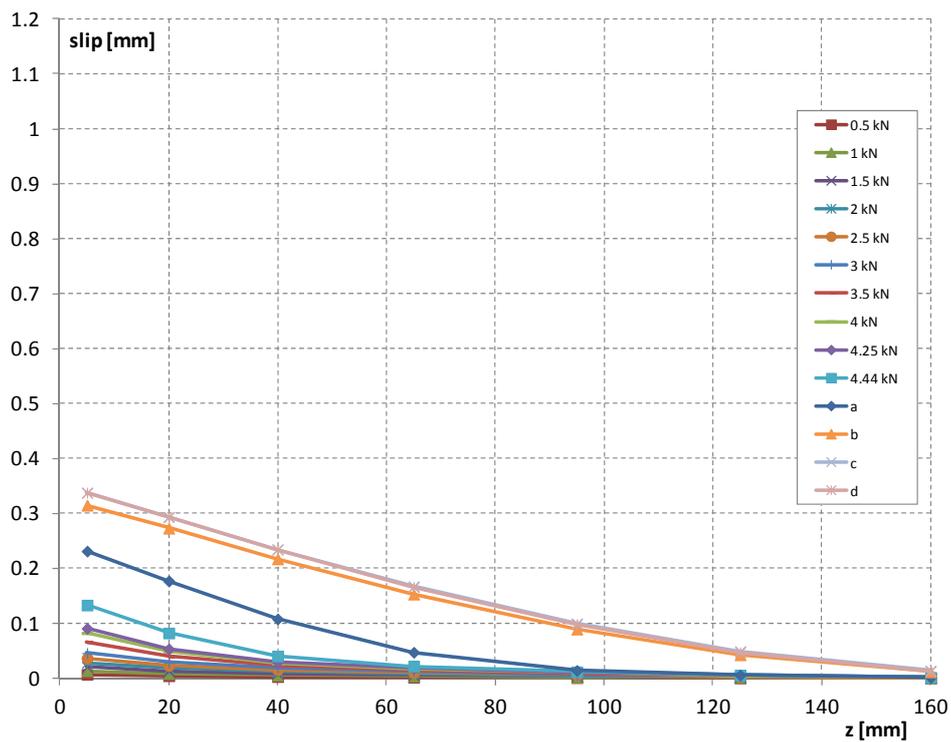


Figura 6.8 - Scorrimenti in funzione dell'ascissa z per i diversi livelli di carico (prova B1A2a).

Il diagramma rappresentato merita un breve commento: visto che gli scorrimenti vengono ottenuti tramite una procedura di integrazione, sia in questo caso che nelle prove svolte in seguito, il grafico presenterà sempre un andamento piuttosto regolare.

Note le tensioni tangenziali e gli scorrimenti, il passo successivo è quello di rappresentare il loro legame.

La calibrazione di una legge che rappresenti al meglio i dati sperimentali verrà effettuata per tutte le prove svolte con estensimetri al § 7.6.

Al termine della descrizione dei risultati ottenuti, si presentano alcune immagini del campione a distacco del rinforzo avvenuto (*figure 6.9 e 6.10*).

Come si può vedere dalla *figura 6.10*, il distacco è avvenuto secondo la modalità preferibile, mediante asportazione di parte del substrato, senza originare crisi adesive o miste all'interfaccia.

Ciò è indice di una corretta applicazione del rinforzo e permette di mobilitare al meglio la resistenza del materiale che è stato rinforzato.

Il carico massimo registrato (pari a 4.44 KN) è risultato tuttavia piuttosto basso.

Ciò ovviamente dipende dalle caratteristiche del substrato, non dotato di particolare resistenza (come già lasciavano intravedere le prove di compressione condotte sul mattone di tipo B1), ma ha anche una ulteriore spiegazione.

Come si può vedere in *figura 6.11*, infatti, la faccia superiore del mattone risulta piuttosto concava e ciò determina la nascita di tensioni di peeling normali all'interfaccia che tendono a favorire il distacco del rinforzo.

Le tensioni normali che nascono a causa di questa geometria determinano quindi un abbassamento della forza massima sopportabile dal rinforzo prima che avvenga il suo distacco dal supporto.

Come si vedrà nel corso delle altre prove, la mancata planarità della faccia superiore del mattone è una caratteristica che si è verificata in altri casi.

Nel caso dei mattoni di tipo B1, tutti i campioni di questa tipologia hanno manifestato tale caratteristica, in maniera più o meno accentuata.

Confronti esaustivi fra le forze sopportate dai vari campioni, in funzione della tipologia di mattone utilizzata e della finitura superficiale, verranno condotti nel corso del capitolo 7.

Una ulteriore considerazione va fatta in merito alla faccia del campione sul quale è stato applicato il rinforzo: questa non è la superficie dove nelle applicazioni reali viene incollato il rinforzo (mentre lo sarà nelle prove condotte sui muretti), ma una applicazione sulla faccia laterale del campione, viste le dimensioni ridotte, sarebbe risultata del tutto improponibile.

Ciò potrebbe influenzare leggermente il risultato, visto che il processo di fabbricazione del mattone potrebbe condurre a caratteristiche leggermente diverse a seconda della faccia utilizzata, ma la strada di adottare anche per i mattoni singoli la faccia laterale come substrato non è risultata purtroppo percorribile.



Figura 6.9 - Distacco della parte terminale del rinforzo.



Figura 6.10 - Superfici al termine della prova B1A2a.



Figura 6.11 - Concavità della faccia superiore del mattone di tipo B1.

6.2.2 PROVA B1A1a

La prova B1A1a, eseguita il 23/06/2011, rappresenta il completamento delle prove sui mattoni singoli di tipo B1 non dotati di alcuna rasatura.

La strumentazione utilizzata per lo svolgimento di questa prova non è stata la stessa della prova B1A2a svolta in precedenza: infatti, visto l'esito ritenuto soddisfacente della prima prova sul mattone B1, si è optato per non applicare più gli estensimetri e utilizzare solamente cella di carico e trasduttori di spostamento.

Gli strumenti utilizzati sono pertanto solamente tre e sono riportati nella *tabella 6.2*.

La *figura 6.12* presenta invece una vista del setup di prova utilizzato.

La disposizione degli LVDT è conforme a quanto già indicato nel corso del § 5.4.

L'impiego della cella di carico e dei trasduttori di spostamento ha consentito di avere a disposizione i dati necessari all'elaborazione del diagramma carico-allungamento riportato in *figura 6.13*.

I diagrammi di deformazioni, tensioni tangenziali e scorrimenti non sono invece disponibili per questa prova, vista l'assenza degli estensimetri.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.2 - Strumenti utilizzati durante la prova B1A1a e canali di acquisizione.

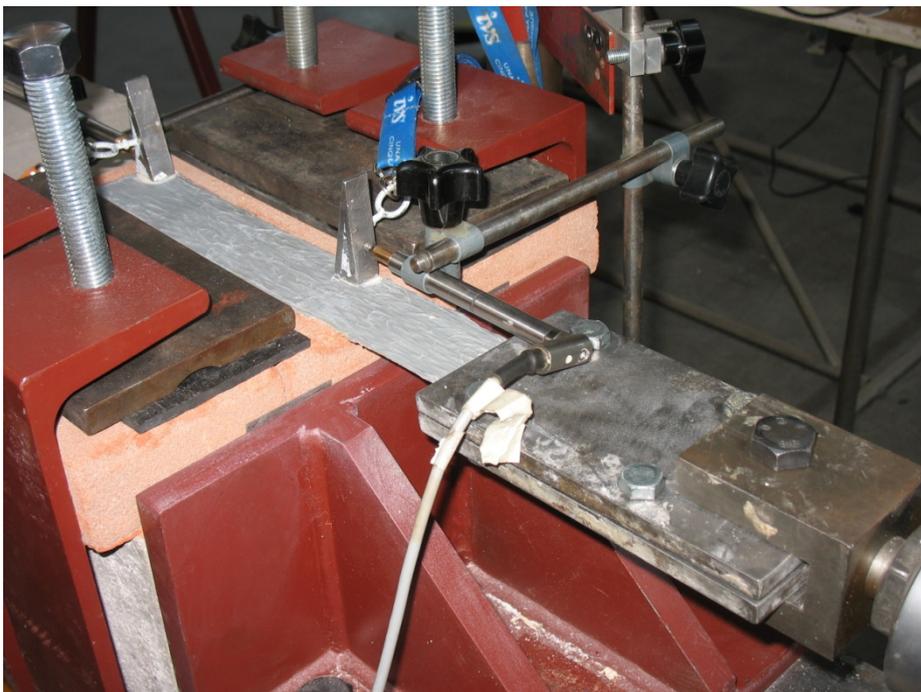


Figura 6.12 - Setup prova B1A1a.

Come criterio utilizzato nel corso di tutte le prove svolte, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico per permettere l'assestamento del campione: il carico massimo applicato durante questa fase è stato pari a 1 kN.

Terminato il ciclo iniziale, il carico è stato aumentato fino a raggiungere un valore massimo di 4.472 kN, dopo il quale non si è verificato un immediato tratto di discesa, ma un breve tratto quasi orizzontale.

Al termine di questo tratto, si è poi verificato un ramo di softening con un netto aumento degli allungamenti registrati e una diminuzione del carico registrato, fino a giungere all'ultimo valore registrato di circa 3 kN, dopo il quale si è verificato il completo distacco del rinforzo.

Il carico di picco rilevato è assolutamente in linea con quello della prova B1A2a e conferma il comportamento del mattone di tipo B1, che, sia a causa delle caratteristiche di resistenza non particolarmente elevate, sia per la superficie

particolarmente concava (si veda a tal proposito la *figura 6.11* riportata al § 6.2.1) non riesce a raggiungere valori rilevanti della forza massima registrata.

In questo ambito, la mancata planarità della faccia superiore del campione gioca senza dubbio un ruolo fondamentale, perché comporta la nascita di tensioni normali all'interfaccia (tensioni di peeling) che tendono a favorire il distacco del rinforzo, abbassando notevolmente il carico massimo che può essere applicato.

Un trattamento della superficie del campione allo scopo di regolarizzarla non avrebbe risolto il problema: lo sfruttamento di uno strato di mattone decisamente più profondo, infatti, non avrebbe condotto ad una prova rappresentativa delle reali caratteristiche del substrato.

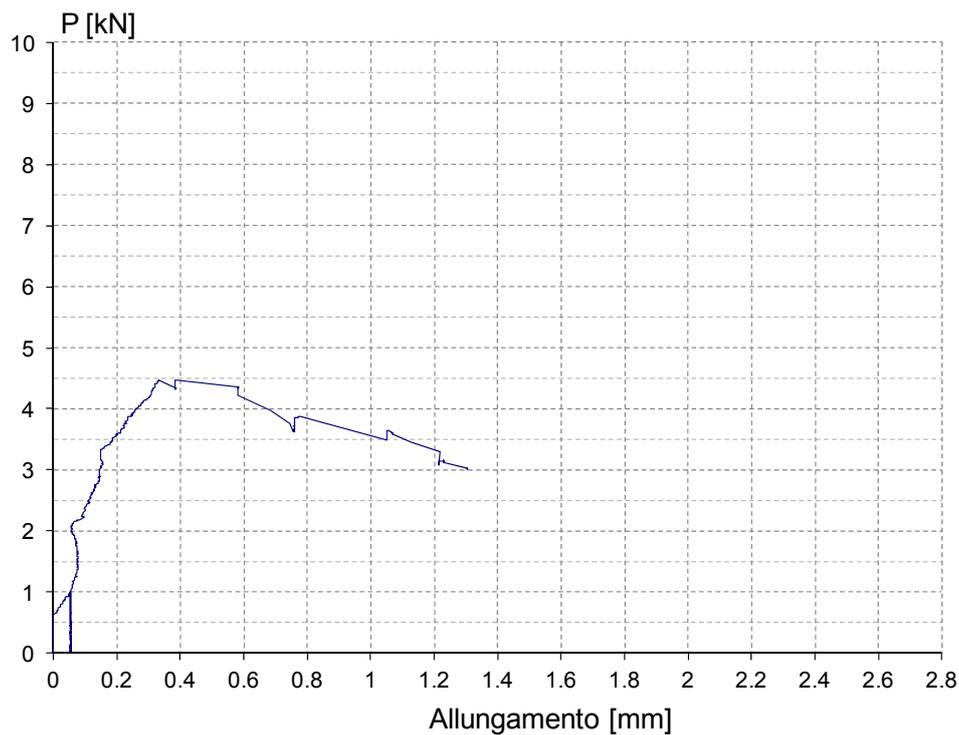


Figura 6.13 - Grafico carico-allungamento per la prova B1A1a.

La modalità di distacco del rinforzo è visibile in *figura 6.14*: la crisi è ancora una volta quella preferibile, con asportazione di una parte del substrato e senza alcuna traccia di crisi adesive o miste.

Ciò è indice di una corretta applicazione del rinforzo e quindi dello sfruttamento ottimale delle caratteristiche che il substrato poteva offrire.

Il distacco di una piccola porzione di mattone sulla parte anteriore indica che la distanza adottata tra bordo del campione e inizio dell'incollaggio non è stata propriamente sufficiente.

Tuttavia va rilevato che, a causa dell'impiego di una lunghezza di ancoraggio molto elevata e pari a 200 mm, non è stato possibile adottare una distanza maggiore.

Come risulta evidente dalla figura, infatti, ci si è spinti al massimo nell'incollaggio verso il bordo posteriore del campione e un ulteriore arretramento non sarebbe stato possibile.



Figura 6.14 - Campione B1A1a al termine della prova.

6.2.3 PROVA M1A1a

La prova M1A1a è stata condotta in data 01/07/2011 su un campione di muratura privo di rasatura, utilizzando un setup costituito da 2 trasduttori di spostamento e 9 estensimetri, oltre ovviamente alla cella di carico, necessaria in tutte le prove svolte.

La collocazione di estensimetri ed LVDT è avvenuta secondo le modalità già descritte ai paragrafi 5.3 e 5.4.

La collocazione di 2 estensimetri anche sulla parte libera del rinforzo, tra il bordo anteriore del campione e l'afferraggio (*figura 6.16*), ha permesso di misurare il modulo elastico del rinforzo.

L'unica differenza rispetto alle prove sui mattoni, a parte ovviamente le dimensioni globali del campione, è stata la scelta di una maggiore distanza libera tra l'inizio della zona di incollaggio e il bordo anteriore del provino: mentre infatti sui mattoni ci si è dovuti limitare a 30 mm a causa delle limitazioni dimensionali dei campioni, qui è stato possibile spingersi a 100 mm.

Questa scelta non condiziona assolutamente il confronto tra le prove su mattoni e muretti e serve a garantire un debonding del rinforzo più "pulito", senza asportazioni di porzioni di materiale non desiderate sulla parte anteriore.

Si fa presente che un minore danneggiamento dei campioni garantisce anche la possibilità di ripetere la prova sulla faccia inferiore dello stesso campione, in modo da acquisire altri dati utili, senza procedere alla realizzazione *ex novo* di altri campioni.

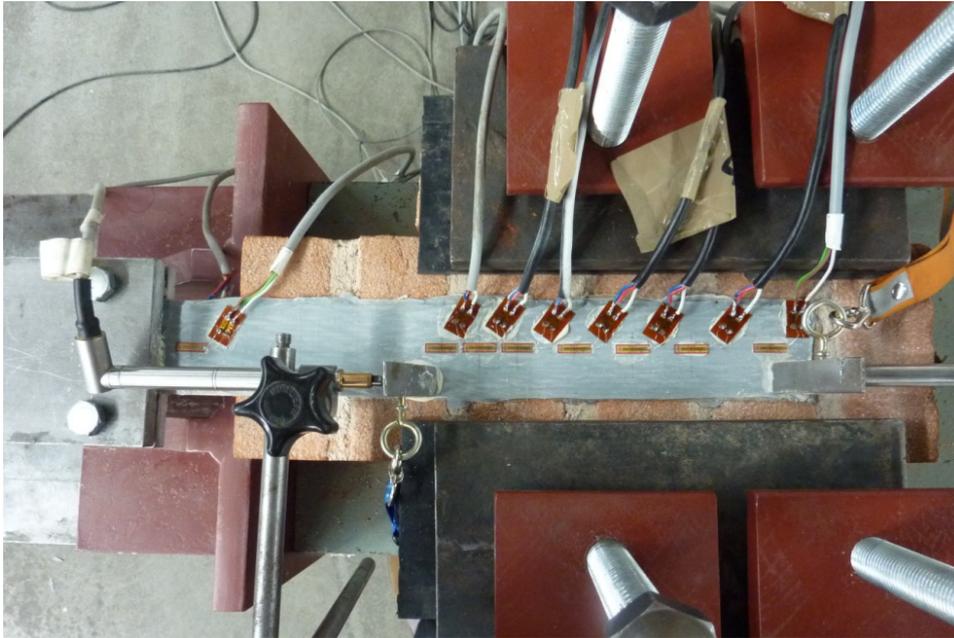


Figura 6.15 - Setup prova M1A1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata (M-L)
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata (L-M)
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata (M-L)
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata (M-L)
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
10	Estensimetro E8 (10 mm)	tratto libero, sopra
11	Estensimetro E9 (10 mm)	tratto libero, sotto

Tabella 6.3 - Strumenti utilizzati durante la prova M1A1a, collocazione (M = mattone, L = letto di malta) e canali di acquisizione.



Figura 6.16 - Collocazione estensimetri nel tratto libero per la misura del modulo elastico.

Come risultato della prova, si presenta innanzitutto il diagramma carico-allungamento per il rinforzo utilizzato (*figura 6.17*), ottenuto utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza degli spostamenti registrati dai due LVDT.

La prima considerazione da fare è che, a differenza di altre prove condotte su muretti non rasati (che verranno discusse in seguito), in questo caso non sono evidenziabili i tipici gradini che segnano il passaggio da un mattone all'altro.

Il diagramma presenta infatti, dopo il primo ciclo di carico-scarico, un tratto in cui il carico aumenta progressivamente fino al picco (dove assume un valore massimo pari a 5.339 kN), per poi scendere attraverso un ramo di softening quasi lineare fino all'ultimo valore registrato prima del completo distacco del rinforzo.

I punti segnalati sul diagramma, come nelle altre prove svolte, sono rappresentativi dei livelli di carico scelti dopo il picco per l'elaborazione dei dati sperimentali e la costruzione dei diagrammi successivi.

In *figura 6.18* invece viene riportato il diagramma carico – allungamento determinato calcolando il valore in ascissa tramite integrazione delle deformazioni registrate dagli estensimetri per tutti i livelli di carico.

Il calcolo dell'allungamento secondo questa metodologia può essere effettuato applicando la (6.1).

Utilizzando le letture degli estensimetri posizionati nel tratto libero è stato possibile costruire il grafico tensione-deformazione riportato in *figura 6.19*.

La tensione è stata calcolata semplicemente come rapporto tra il carico applicato (espresso in N) e l'area della sezione del rinforzo (in mm^2).

La deformazione invece è stata ottenuta come media delle due deformazioni registrate dagli estensimetri collocati nel tratto libero, in modo da escludere dal computo possibili contributi di tipo flessionale.

Occorre rilevare che nel diagramma, in realtà, non è stato riportato il diagramma tensione-deformazione nel composito per intero, ma solo il tratto che occorre per il calcolo del modulo elastico, ovvero quello compreso tra il 20% e l'80% del carico massimo registrato.

Questa scelta è motivata dalla necessità di eliminare dal computo l'eventuale assetamento iniziale del provino e comunque di considerare il tratto ad andamento elastico-lineare, senza giungere troppo vicino al carico massimo, in corrispondenza del quale generalmente si ha una diminuzione della pendenza.

Noto tale diagramma, il modulo elastico è completamente definito conoscendo la pendenza della curva rappresentata.

Operativamente, all'interno del foglio di calcolo è stata generata una linea di tendenza: l'equazione della retta che approssima al meglio i dati rilevati è stata quindi indicata in figura; moltiplicando il coefficiente angolare della retta per 10^6 si ottiene direttamente il modulo elastico cercato (espresso in N/mm^2), che in questo caso è risultato pari a 118500 MPa.

Si fa presente che, nel corso della rielaborazione dei dati sperimentali, è stato utilizzato sempre lo stesso valore del modulo elastico E, ottenuto dalla media di quelli rilevati nel corso delle prove B3A2a, B4B1a e M1A1a, pari a 123767 MPa.

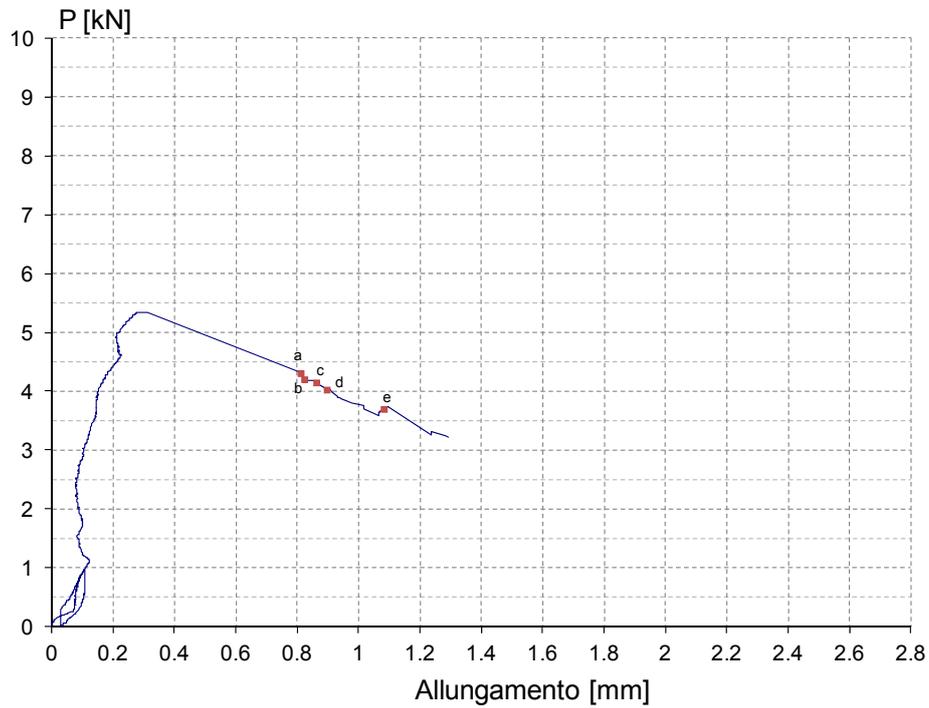


Figura 6.17 - Grafico carico-allungamento ottenuto impiegando le letture dei trasduttori di spostamento (prova M1A1a).

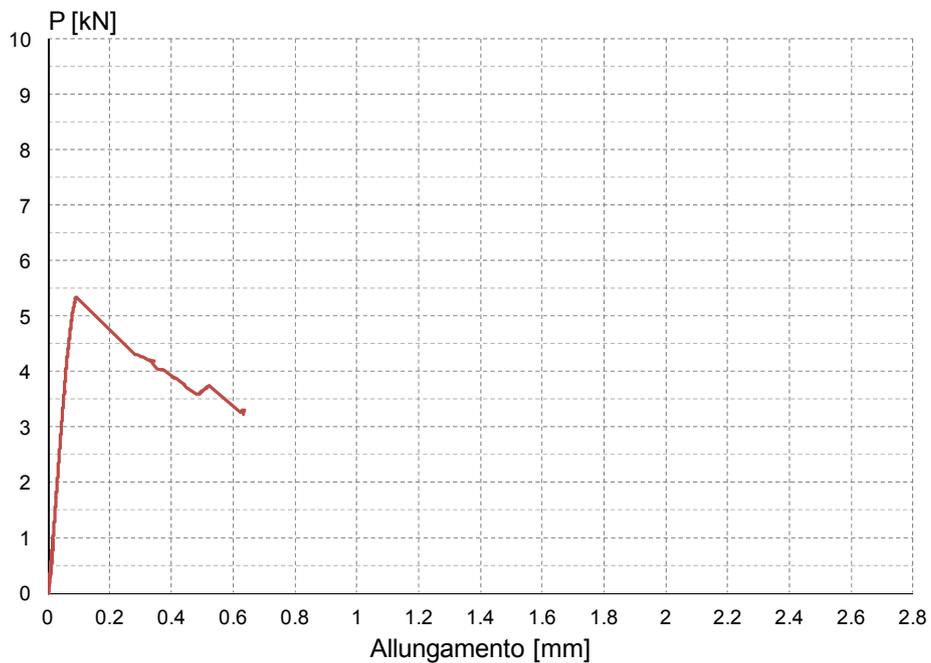


Figura 6.18 - Grafico carico-allungamento in cui l'allungamento è stato computato tramite integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova M1A1a).

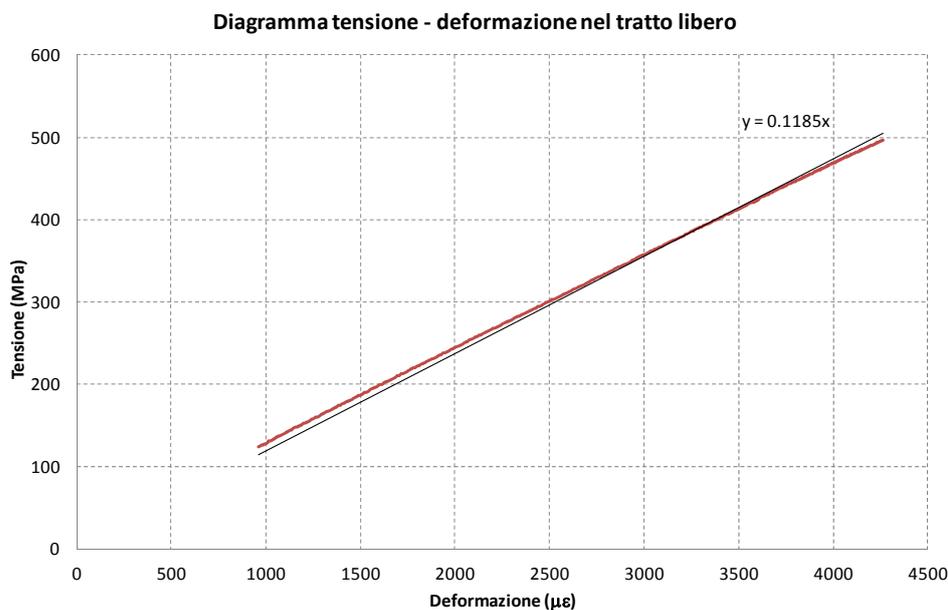


Figura 6.19 - Grafico tensione-deformazione del rinforzo nel tratto libero (prova M1A1a).

Le deformazioni registrate dai 7 estensimetri collocati lungo l'asse del rinforzo, all'interno della zona incollata, possono essere correlate alla forza registrata per mezzo della cella di carico, ottenendo il grafico rappresentato in *figura 6.20*.

L'andamento delle deformazioni lungo l'asse del composito, costruito utilizzando i dati sperimentali e fissando diversi livelli di carico, è rappresentato in *figura 6.21*.

Il diagramma, che rappresenta le deformazioni effettivamente registrate per mezzo degli estensimetri, può modificato sfruttando le considerazioni già espresse al § 6.2.1 ottenendo il risultato riportato in *figura 6.22*.

Per quanto riguarda le correzioni apportate al diagramma, si segnala in particolare lo spostamento sull'asse positivo delle deformazioni delle letture negative registrate dall'estensimetro cinque, evidentemente coinvolto in fenomeni di inflessione di tipo locale.

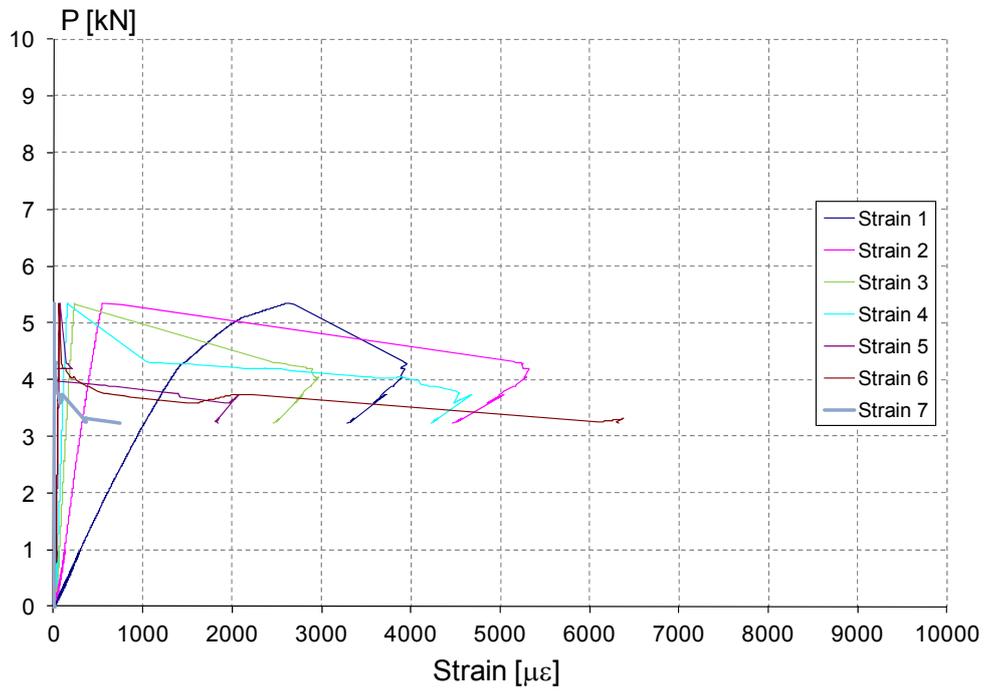


Figura 6.20 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova M1A1a).

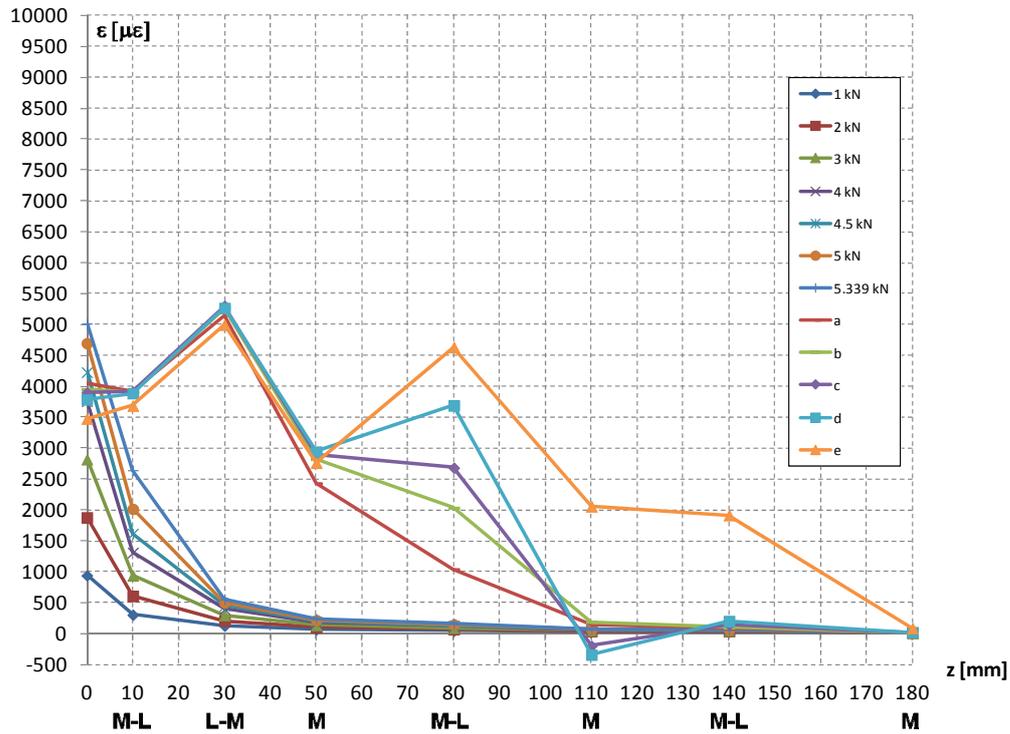


Figura 6.21 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova M1A1a (diagramma originale).

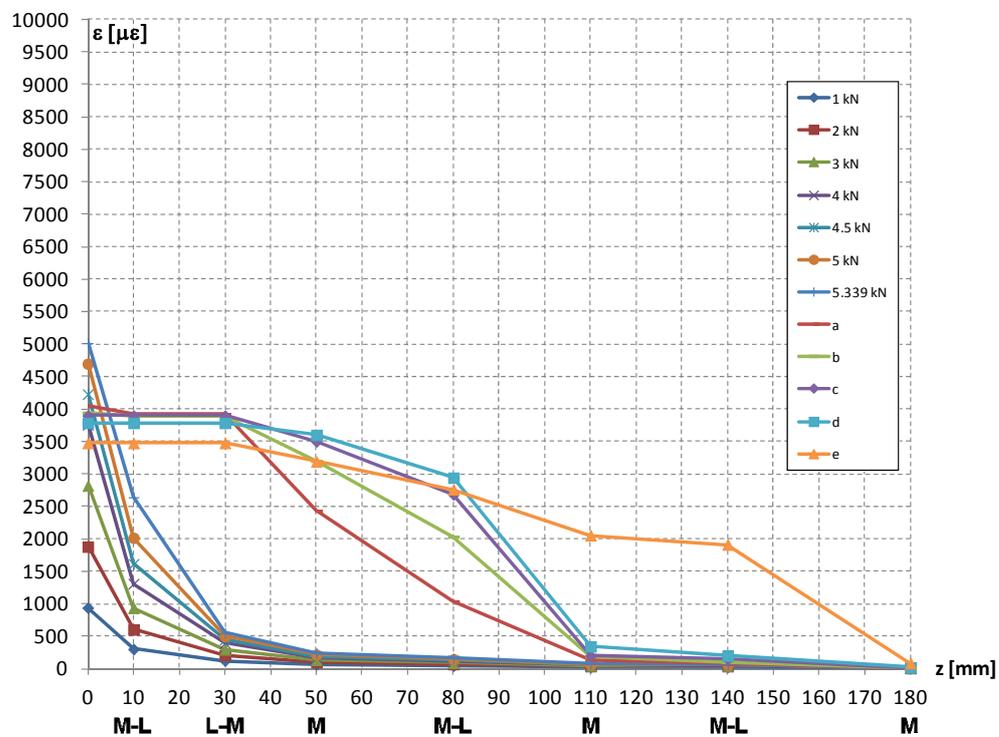


Figura 6.22 - Deformazioni lungo il rinforzo per la prova M1A1a (diagramma modificato).

La costruzione del diagramma delle tensioni tangenziali in funzione dei livelli di carico scelti è avvenuta, come per le altre prove, basandosi sui valori del diagramma regolarizzato delle deformazioni e applicando la (6.3).

Il risultato ottenuto è visibile in *figura 6.23*.

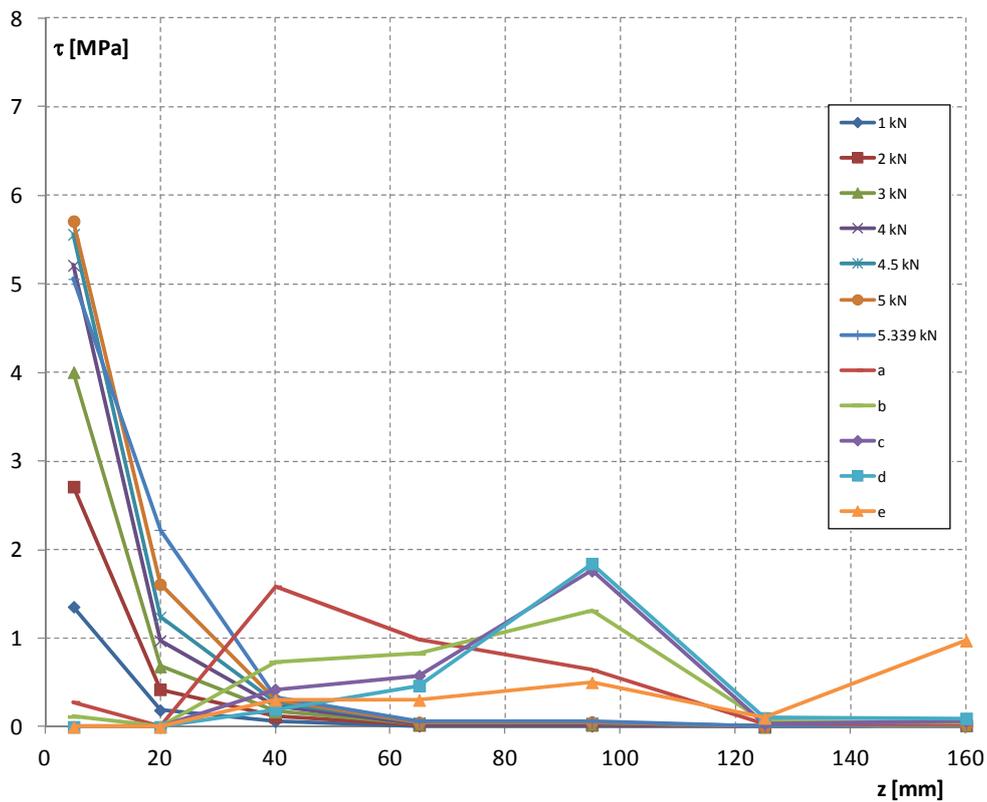


Figura 6.23 - Andamento della tensione tangenziale lungo l'asse del rinforzo in funzione dei carichi indicati (prova M1A1a).

In *figura 6.24* viene invece rappresentato l'andamento degli scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa: il diagramma, come già rilevato per le altre prove, assume una forma sempre piuttosto regolare, visto che la determinazione degli scorrimenti è basata su una procedura di integrazione.

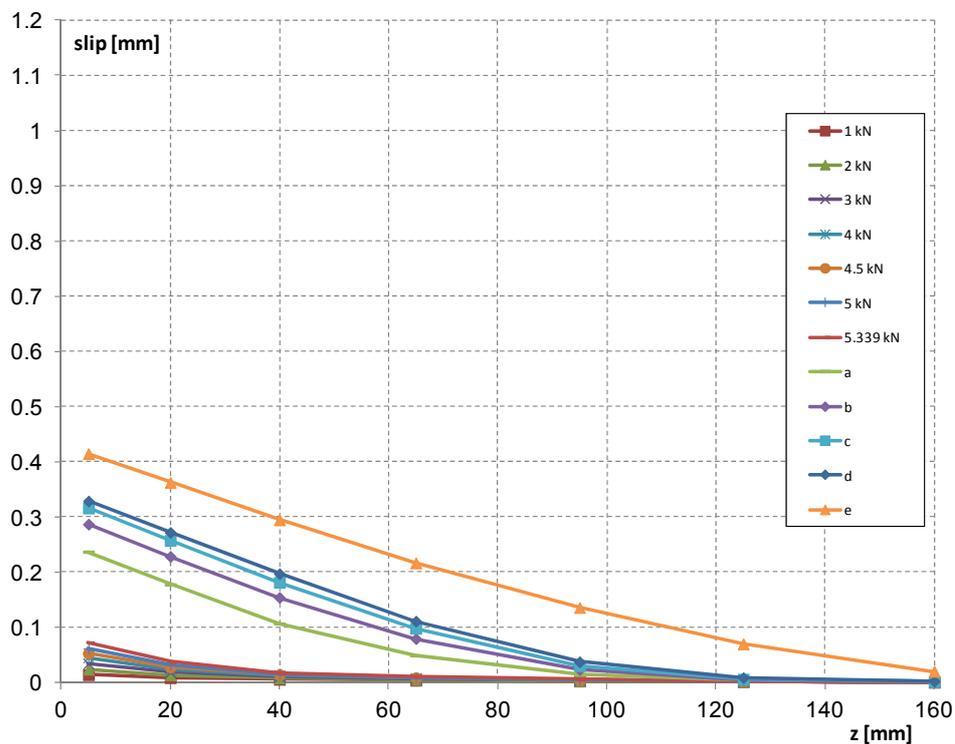


Figura 6.24- Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova M1A1a).

A completamento della descrizione della prova si riportano infine le immagini del campione dopo lo svolgimento della prova: in *figura 6.26* sono chiaramente visibili i rilievi che si formano in corrispondenza dei letti di malta, che vanno poi a determinare un vero e proprio meccanismo di ingranamento su scala macroscopica.

La presenza di questa dentatura, insieme al fatto che questi mattoni singolarmente presentano sulla faccia superiore una concavità piuttosto accentuata che favorisce il distacco del composito, possono spiegare l'aumento della forza massima registrata passando dalle prove sui mattoni di tipo B1 alle prove sui muretti costruiti utilizzando la stessa tipologia di mattone.



Figura 6.25 - Campione al termine della prova (M1A1a).



Figura 6.26 - Formazione di una vera e propria dentatura in corrispondenza dei letti di malta.

6.2.4 PROVA M1A1c

La prova M1A1c, condotta il giorno 06/07/2011, rappresenta il completamento delle prove sui muretti di tipo M1 privi di rasatura.

La strumentazione utilizzata per lo svolgimento della prova è indicata nella *tabella 6.4*: si è optato per non applicare più gli estensimetri (come invece è stato fatto nella prova precedente) e utilizzare solamente cella di carico e trasduttori di spostamento, collocando questi in maniera conforme a quanto descritto al § 5.4.

La *figura 6.27* presenta una vista del setup di prova utilizzato.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.4 - Strumenti utilizzati durante la prova M1A1c e canali di acquisizione.

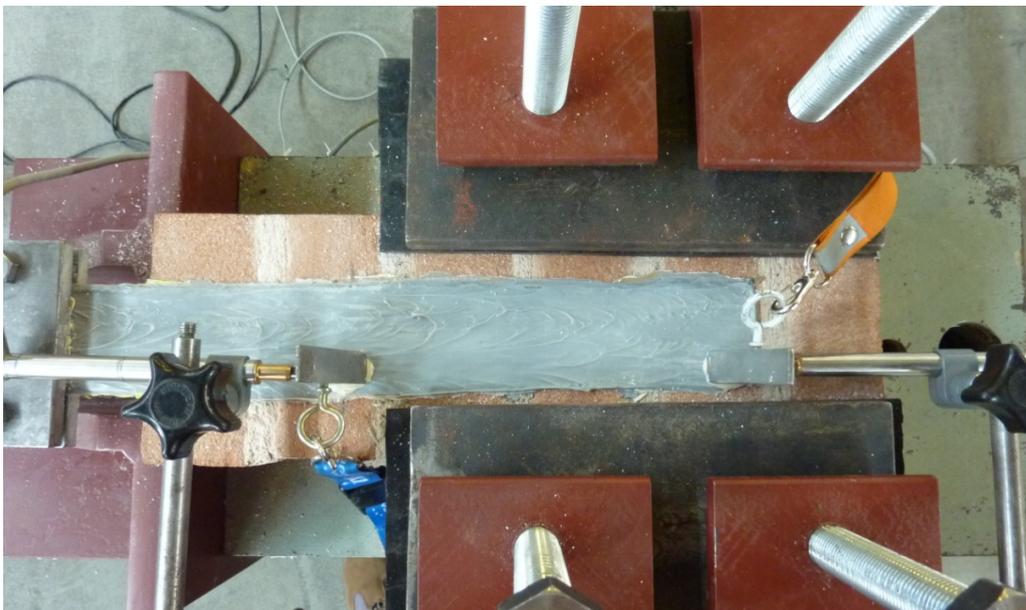


Figura 6.27 - Setup prova M1A1c.

L'impiego della cella di carico e dei trasduttori degli LVDT ha consentito di avere a disposizione i dati necessari all'elaborazione del diagramma carico-allungamento (figura 6.28).

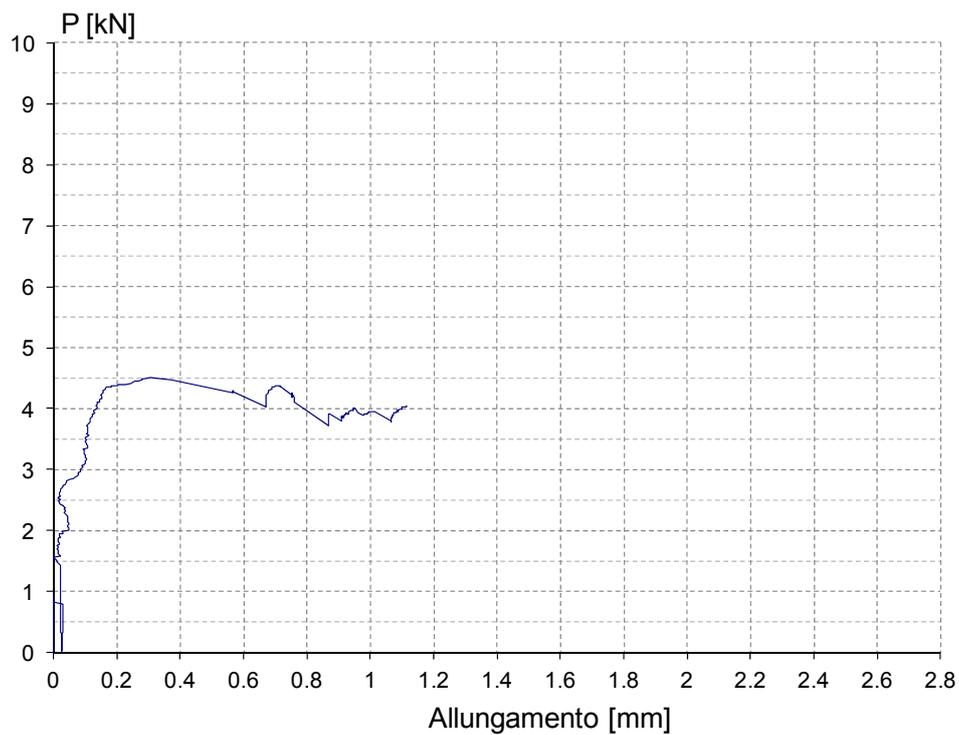


Figura 6.28 - Grafico carico-allungamento per la prova M1A1c.

Come per le altre prove svolte, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico per permettere l'assestamento del campione (fino ad un valore pari a 1 kN).

Terminato il ciclo iniziale, ha avuto inizio la prova vera e propria condotta in controllo di spostamento e il carico è aumentato fino a raggiungere un valore di picco di 4.503 kN.

In seguito al picco, si è verificato un ramo di discesa a pendenza non molto elevata, con un tratto finale più vario che ha condotto all'ultimo valore registrato di 4.04 kN.

Il carico massimo registrato è risultato inferiore a quello rilevato nel corso della prova precedente e conferma le caratteristiche di resistenza non particolarmente elevate di questa tipologia di mattone.

La modalità di distacco del rinforzo è visibile in *figura 6.29*: la crisi è ancora una volta quella preferibile, con asportazione di una parte del substrato e senza alcuna traccia di crisi adesive o miste.

Ciò è indice di una corretta applicazione del rinforzo e quindi dello sfruttamento ottimale delle caratteristiche che il substrato poteva offrire.

In *figura 6.31* è invece presentato un aspetto ricorrente che si è verificato nelle prove sui muretti non rasati: così come nella prova precedente, infatti, in corrispondenza dei letti di malta avviene il distacco di una parte più profonda del substrato, modalità che genera una vera e propria dentatura che tende ad opporsi allo scorrimento del composito durante la prova.

Questo particolare può servire a spiegare la tendenza generale all'aumento del carico massimo registrato che si è verificata passando dalle prove sui mattoni a quelle sui muretti, con poche eccezioni.

A tal proposito, confronti esaustivi fra i risultati ottenuti nelle varie prove saranno presentati nel corso del capitolo 7.

Un altro particolare che merita attenzione è la rottura del campione in corrispondenza di un letto di malta che è stata rilevata al termine della prova (*figura 6.32*).

Questo particolare, che può essere stato determinato da un appoggio non perfetto del muretto in qualche punto e dalla successiva azione forse troppo energica del contrasto laterale, non sembra comunque avere influenzato i risultati.

Questo giudizio è motivato dal fatto che la rottura si è manifestata solo durante il sollevamento del campione al termine della prova e che l'azione del sistema di contrasto laterale non avrebbe comunque permesso movimenti verticali degni di nota in quella zona.



Figura 6.29 - Campione M1A1c al termine della prova.

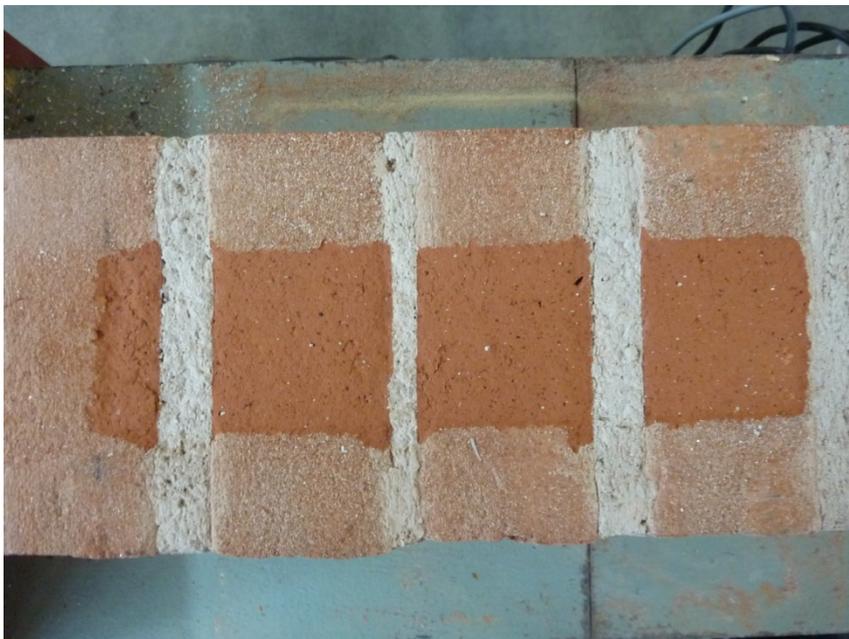


Figura 6.30 - Campione M1A1c: particolare della superficie.



Figura 6.31 – Formazione della dentatura in corrispondenza dei letti di malta.



Figura 6.32 – Rottura indesiderata del campione M1A1c.

6.2.5 PROVA B2A1a

La prova B2A1a è stata eseguita il 08/06/2011, utilizzando una strumentazione composta da 7 estensimetri (disposti lungo l'asse del campione nella zona incollata) e 2 trasduttori di spostamento, oltre all'impiego della cella di carico.

Il setup di prova è mostrato in *figura 6.33*.

La disposizione di estensimetri e LVDT è la stessa adottata anche nelle altre prove con analoga strumentazione ed è già stata descritta ai paragrafi 5.3 e 5.4.

In questa prova non sono presenti estensimetri sul tratto libero, pertanto non è stata eseguita la misura del modulo elastico.

La disposizione dei trasduttori di spostamento è la stessa già impiegata nelle prove strumentate con estensimetri, con il primo induttivo posizionato sulla parte anteriore del campione e non sopra agli estensimetri stessi, in modo da evitare possibili danneggiamenti.

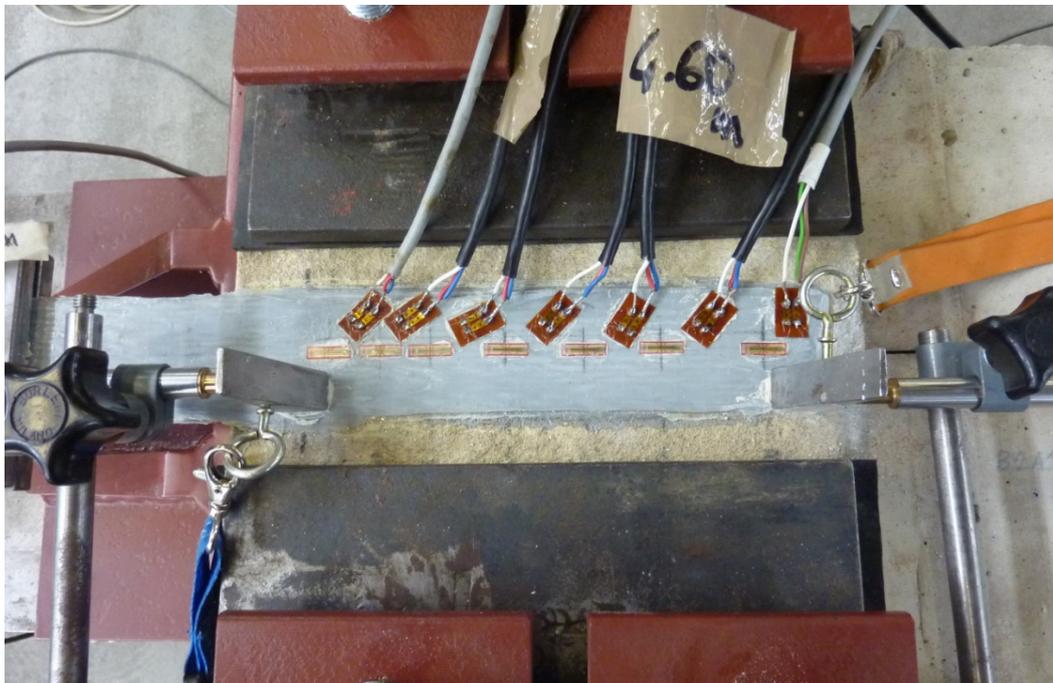


Figura 6.33 - Setup prova B2A1a.

La *tabella 6.5* mostra una lista completa degli strumenti utilizzati nel corso della prova e indica il loro collegamento al sistema di acquisizione, in funzione del canale utilizzato.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.5 - Strumenti utilizzati durante la prova B2A1a e canali di acquisizione.

Il diagramma carico – allungamento per la prova in oggetto, determinato utilizzando i valori registrati dalla cella di carico e facendo la differenza delle letture dei due induttivi, viene riportato in *figura 6.34*.

Lo stesso diagramma, ottenuto però ricavando l'allungamento tramite integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (applicando la (6.1)) è riportato in *figura 6.35*.

Come si può vedere dal diagramma indicato in *figura 6.34* è stato eseguito un primo ciclo di carico fino a raggiungere un valore pari a circa 1 kN e poi si è passati allo scarico fino a tornare ad un livello di carico nullo.

Terminato il ciclo, che è utile per permettere l'assestamento del campione, è iniziata la prova vera e propria, che è stata condotta in controllo di spostamento ed è terminata con il completo distacco del rinforzo dal supporto.

L'andamento del diagramma mostra un primo ramo crescente con una elevata pendenza fino ad un valore del carico pari a circa 4.5 kN, dopo il quale si evidenzia una netta perdita di rigidità del sistema.

Il secondo tratto, dotato di una pendenza pressoché definita, termina con un picco del carico registrato pari a 6.34 kN, un valore piuttosto elevato rispetto a quelli registrati nel corso delle prove sui mattoni di tipo B1, ma che risulterà comunque inferiore rispetto ai carichi massimi rilevati sui mattoni B3.

Ciò lascia intravedere, per il mattone di tipo B2, una resistenza del substrato intermedia fra quella del mattone tipo B1 e quella del mattone tipo B3.

Questa considerazione è confermata dall'esito delle prove di compressione svolte sui mattoni (§ 2.5.1).

Dopo il picco, è stato registrato un ramo di softening (che ha visto il carico decrescere fino ad un valore pari a 4.83 kN) e poi si è presentato un ulteriore ramo di crescita del carico rilevato, con una pendenza inferiore a quella dei tratti crescenti registrati in precedenza.

Il massimo valore del carico registrato al termine di questo tratto è stato pari a circa 6 kN.

Nel tratto che intercorre tra questo valore e il picco registrato precedentemente l'allungamento del rinforzo è aumentato in maniera piuttosto significativa.

Il tratto finale del diagramma è un altro ramo di softening, molto breve, che termina con il valore finale registrato di 5.48 kN, dopo il quale il carico è tornato a zero, essendo il rinforzo già completamente staccato dal campione.

I livelli di carico selezionati dopo il picco per l'elaborazione dei dati successivi sono indicati in *figura 6.34*.

In *figura 6.36* invece sono riportati i valori di deformazione registrati dai 7 estensimetri durante la prova in funzione del carico applicato.

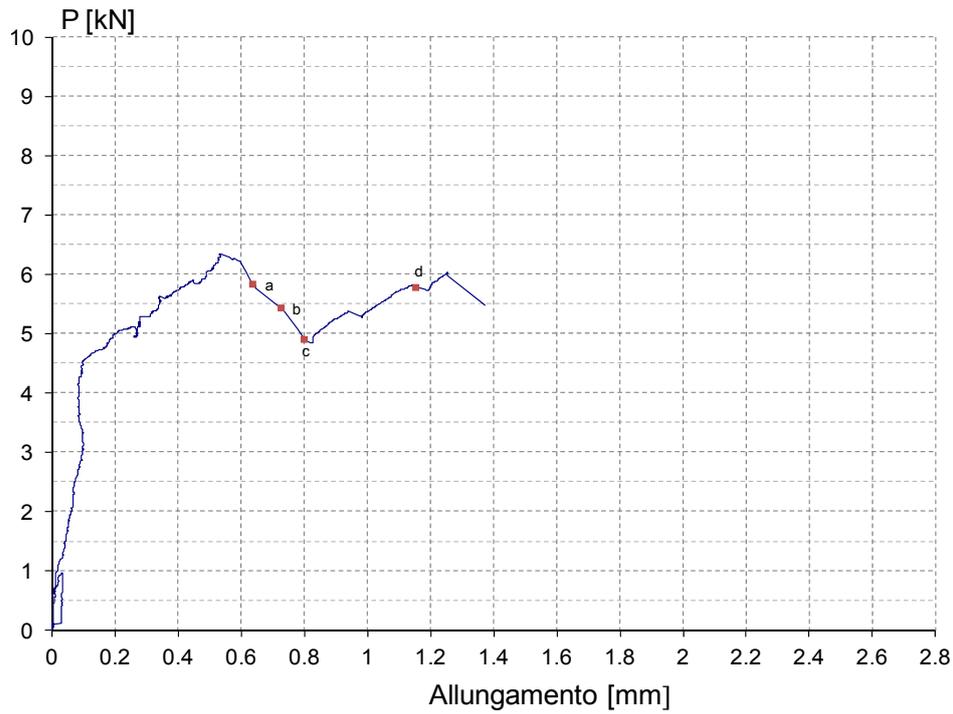


Figura 6.34 - Grafico carico-allungamento ottenuto impiegando le letture degli LVDT (prova B2A1a).

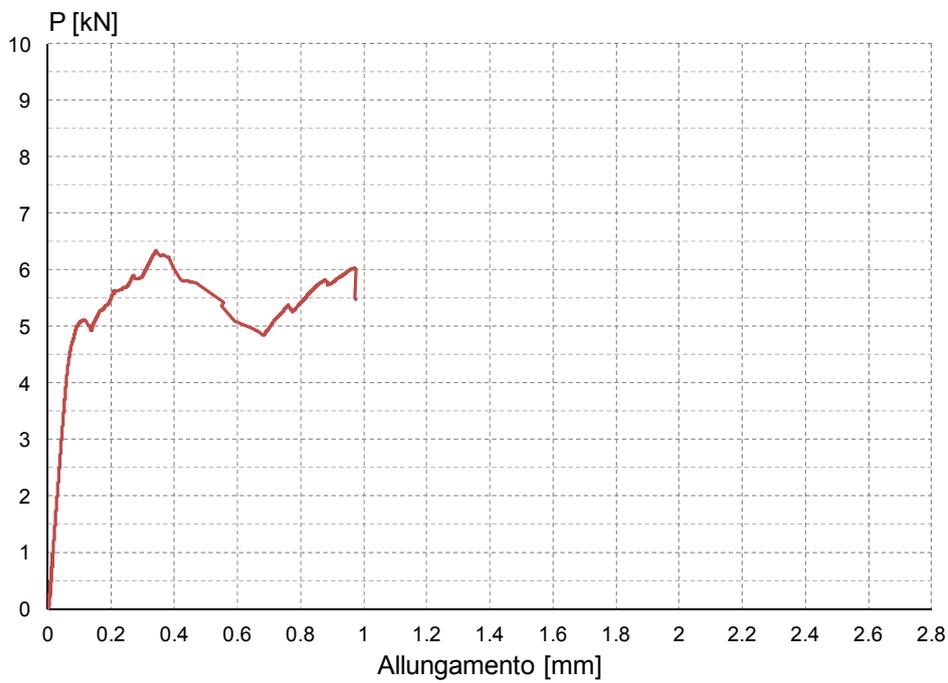


Figura 6.35 - Grafico carico-allungamento in cui l'allungamento è stato computato mediante procedura di integrazione delle deformazioni (prova B2A1a).

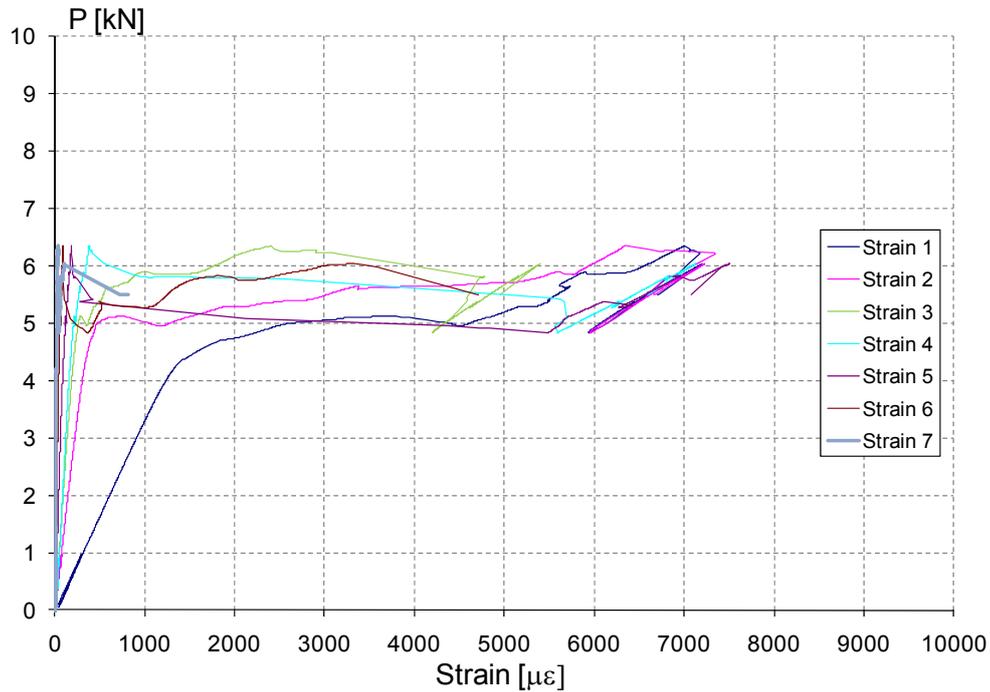


Figura 6.36 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B2A1a)

L'andamento delle deformazioni lungo l'asse del rinforzo, all'interno della zona di incollaggio, in funzione del livello di carico selezionato è visibile in *figura 6.37*.

In tale figura sono stati riportati i valori registrati effettivamente durante la prova dagli estensimetri, senza alcuna correzione.

Basandosi sulle considerazioni già espresse al § 6.2.1, è possibile ottenere il diagramma modificato riportato subito dopo quello originale, in *figura 6.38*.

Utilizzando i valori indicati nel diagramma regolarizzato delle deformazioni e applicando la (6.3) è possibile ottenere il diagramma che rappresenta la variazione delle tensioni tangenziali lungo il rinforzo, in funzione del livello di carico considerato (*figura 6.39*).

Il diagramma dello scorrimento lungo il rinforzo nella zona incollata, calcolato per i livelli di carico già definiti, è rappresentato invece in *figura 6.40*.

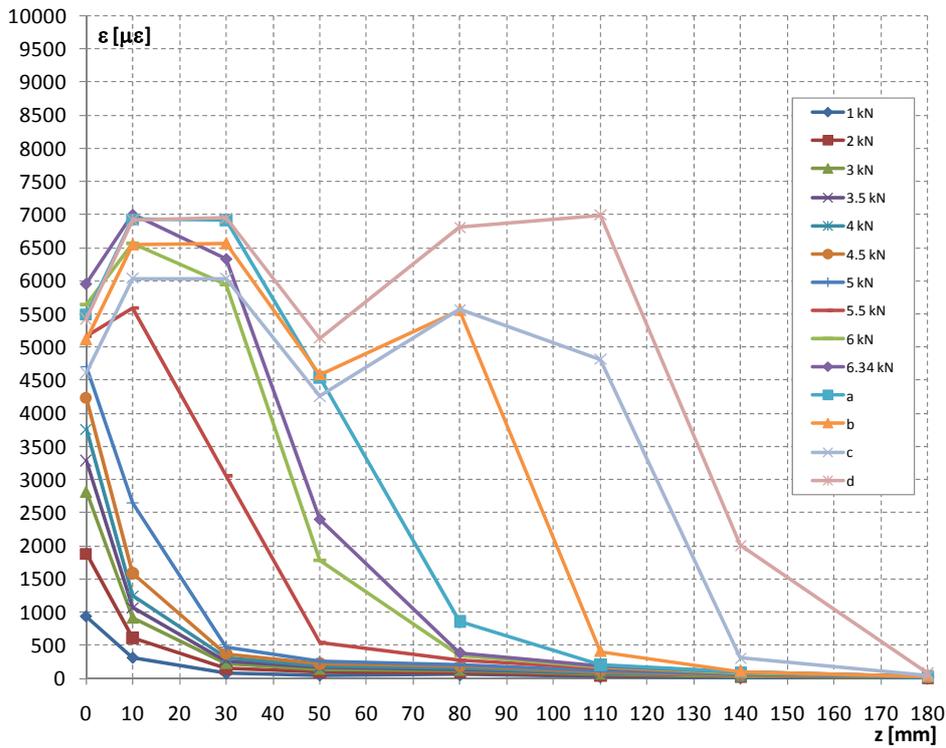


Figura 6.37 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova B2A1a (diagramma originale).

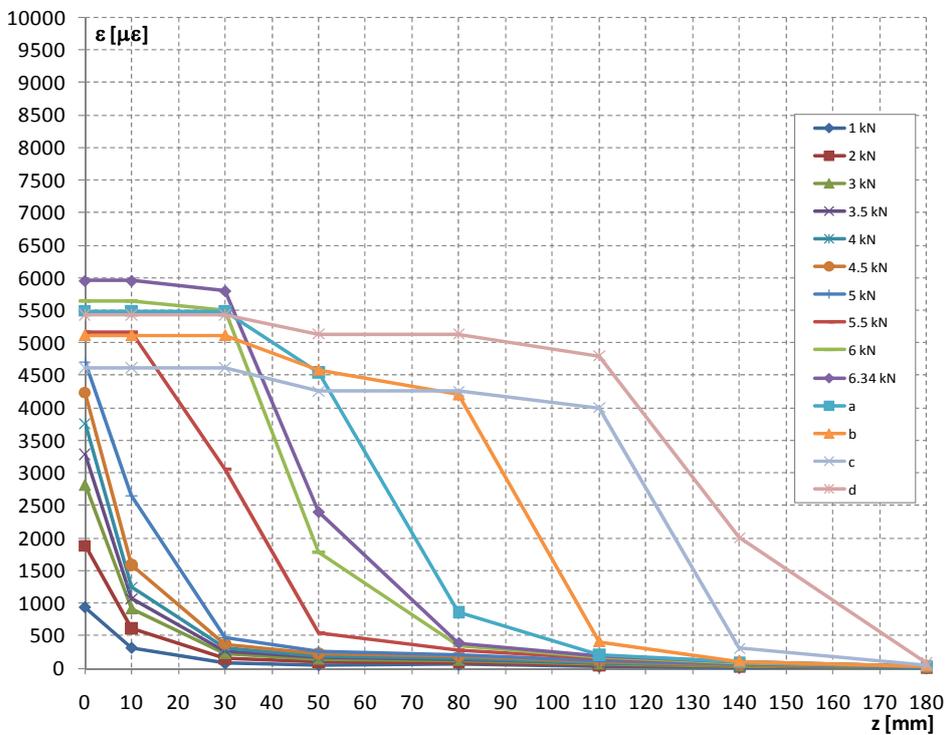


Figura 6.38 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova B2A1a (diagramma modificato).

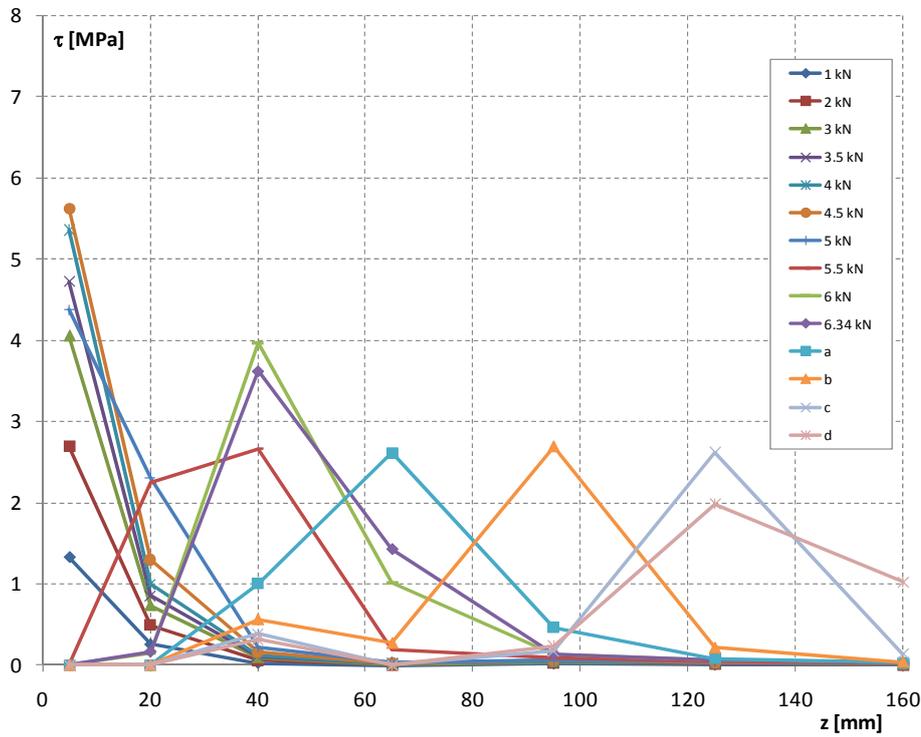


Figura 6.39 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova B2A1a).

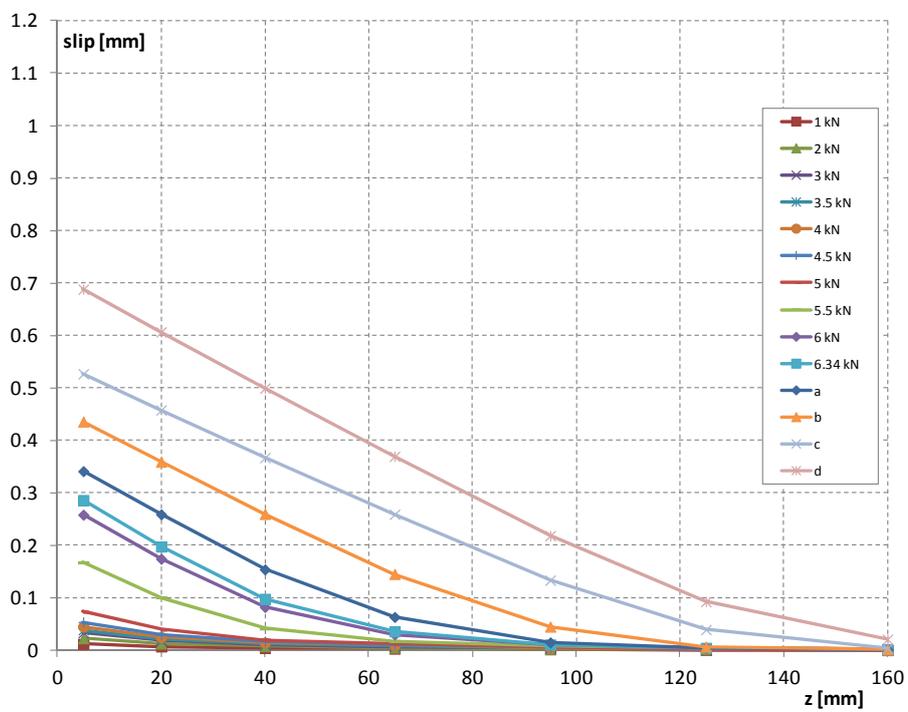


Figura 6.40 - Scorrimenti in funzione dell'ascissa z per i diversi livelli di carico (prova B2A1a).

Come rilevato nel corso delle altre prove, il diagramma indicato in *figura 6.40* risulta sempre piuttosto regolare.

Il legame tra tensione tangenziale e scorrimento e la calibrazione di una legge atta a descrivere al meglio i dati sperimentali ottenuti saranno discussi nell'ambito del § 7.6.

La *figura 6.41* mostra che il distacco del composito è avvenuto con asportazione di parte del substrato, senza che si siano verificate crisi adesive o miste all'interfaccia: questa è senza dubbio la modalità preferibile ed è indice di una corretta applicazione del rinforzo.

Come è accaduto in altre prove, il distacco è avvenuto con asportazione di una parte di mattone dal bordo anteriore.

A tal proposito, si fa presente che un ulteriore arretramento della zona di incollaggio atto a mitigare o impedire tale fenomeno non sarebbe stato possibile, a causa della lunghezza di ancoraggio adottata (pari a 200 mm) che è molto elevata rispetto alle dimensioni del campione.



Figura 6.41 - Distacco del rinforzo: superfici (prova B2A1a).

6.2.6 PROVA B2A2a

La prova B2A2a è l'unica che si distingue fra tutte le altre per quanto riguarda la tecnica di misura delle deformazioni del composito.

In questo caso, infatti, anziché impiegare il setup con i 7 estensimetri disposti lungo la zona incollata del rinforzo, è stata impiegata la tecnica della Digital Image Correlation (DIC).

Si tratta di un metodo ottico per misurare le deformazioni della superficie di un oggetto che impiega una sequenza di immagini registrate ad intervalli temporali prefissati per accurate misure di deformazione 2D o 3D.

Il metodo ovviamente non richiede contatto diretto con l'oggetto di cui si vogliono misurare le deformazioni e prevede l'impiego di fotocamere per la registrazione delle immagini della superficie, che vengono poi post-processate per analizzare la deformazione che si è manifestata.

Nel caso di misure 2D è sufficiente una unica fotocamera, ma è necessario accertarsi che il movimento avvenga essenzialmente in un piano.

Se invece si vogliono eseguire misure 3D è necessario l'impiego di due fotocamere (3D Stereo Image Correlation).

Nel caso della prova in oggetto è stata utilizzata quest'ultima tecnica.

Scendendo più in dettaglio sui principi di funzionamento di questo metodo, la Digital Image Correlation prevede di scegliere una zona prestabilita del campione sulla quale eseguire le misure di spostamenti e deformazioni e di prepararla adeguatamente affinché questa possa essere identificata correttamente nell'ambito della post-elaborazione delle immagini.

Si tratta di creare uno schema discreto di punti di cui seguire l'andamento nel corso dell'evoluzione della prova: questa operazione può essere condotta efficacemente generando un insieme di punti scuri su sfondo bianco.



Figura 6.42 – Collocazione delle fotocamere nell'ottica della 3D Stereo Image Correlation.

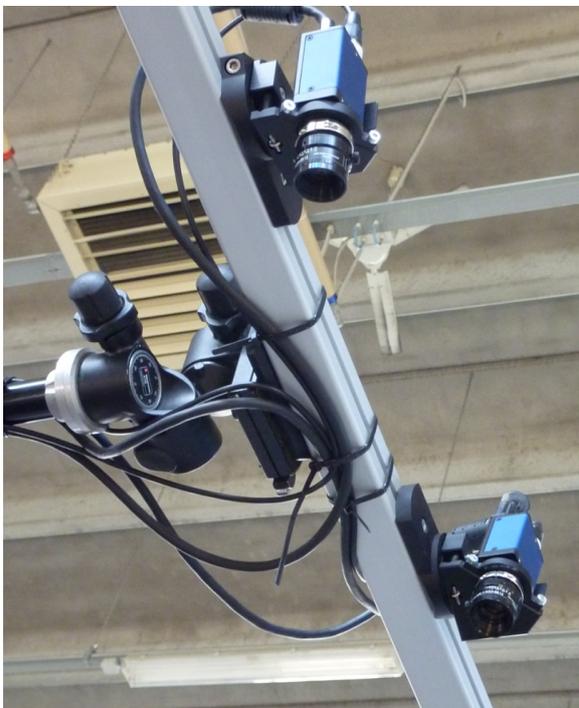


Figura 6.43 – Particolare dell'apparecchiatura.

Le fasi della preparazione superficiale, oltre ad una levigatura preventiva del rinforzo per garantire il minor disturbo possibile alla misura, hanno quindi previsto nell'ordine una colorazione preventiva della zona interessata utilizzando vernice di colore bianco (*figura 6.44*) e successivamente la spruzzatura di vernice scura piuttosto nebulizzata mediante utilizzo di un apposito compressore e di un aerografo (*figura 6.45*).

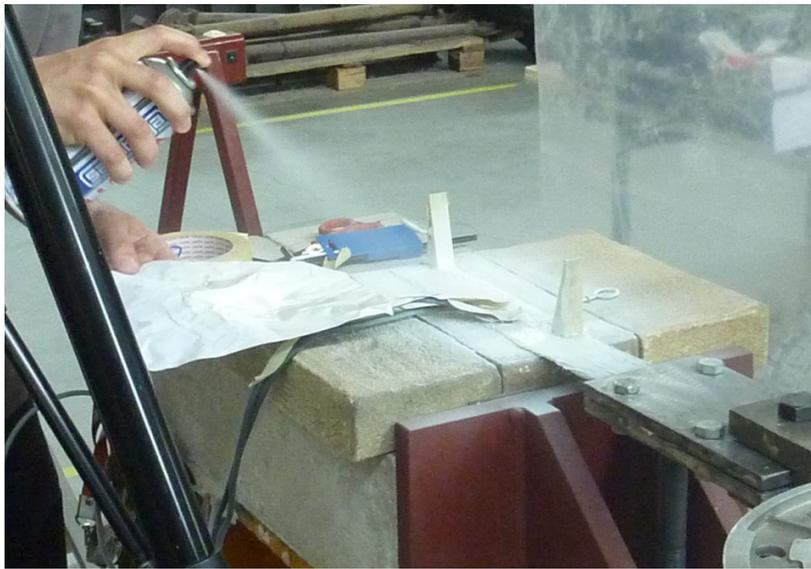


Figura 6.44 – Preparazione superficiale: colorazione con vernice di colore bianco.



Figura 6.45 – Nebulizzazione per la creazione dei punti (pixel) scuri.

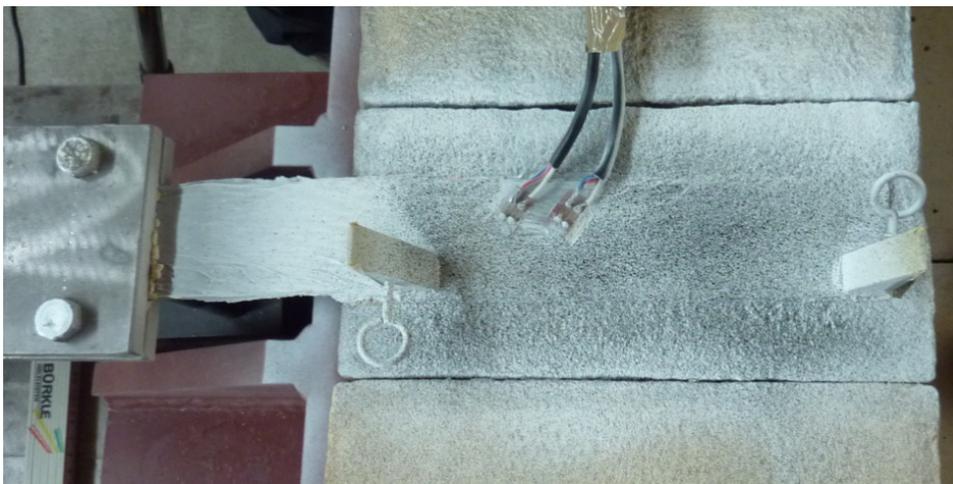


Figura 6.46 – Campione al termine della preparazione superficiale.

Va notato che al campione sono stati aggiunti due estensimetri (e precisamente il secondo e il terzo partendo dal bordo anteriore del campione, nella stessa posizione che questi occupavano nelle altre prove) per eseguire un confronto incrociato delle deformazioni ottenute in quella specifica zona.

Questi sono stati adeguatamente coperti durante l'operazione di verniciatura per impedire che potessero venire in qualche modo danneggiati.

Si precisa inoltre che una strumentazione completa del campione impiegando tutti i 7 estensimetri non sarebbe stata possibile perché avrebbe creato troppo ingombro sulla superficie interessata dalla misura e avrebbe determinato problemi per la tecnica della Digital Image Correlation.

Il confronto tra le misure di deformazione ottenute secondo le due metodologie e la loro correlazione verranno discussi in seguito.

La preparazione superficiale condotta secondo le modalità appena descritte ha creato nella zona di incollaggio uno schema di punti ben identificabile nel corso della sequenza di immagini acquisite e adatto ad essere seguito nel corso della deformazione del composito.

Il metodo infatti prevede una discretizzazione della zona appena trattata, che viene suddivisa in tanti piccoli sottoinsiemi (subsets) ben identificabili e diversi gli uni dagli altri, seguendo il loro spostamento durante la prova.

La diversità locale di un insieme di punti rispetto ad un altro è assicurata dall'operazione di nebulizzazione che in generale non potrà mai creare una verniciatura assolutamente omogenea, ma è anche affidata all'esperienza dell'operatore, che dovrà originare uno schema adeguato.

Si fa presente a tal proposito che uno schema (pattern) con un elevato numero di punti (che risultano quindi molto vicini tra loro) non sempre aggiunge precisione alla misura, anzi potrebbe addirittura peggiorare le cose, generando troppo rumore sulle immagini acquisite e quindi in fase di post - elaborazione.

Il miglior risultato si ottiene cercando di correlare con esperienza il pattern alle caratteristiche della strumentazione ottica impiegata e al setup adottato.

La *figura 6.47* mostra il principio di funzionamento della tecnica: si tratta di seguire localmente lo spostamento dei diversi sottoinsiemi di punti (uno è indicato in rosso in figura) durante lo svolgimento della prova.

L'operazione viene eseguita impiegando un apposito software che opera sulla sequenza di immagini acquisite.

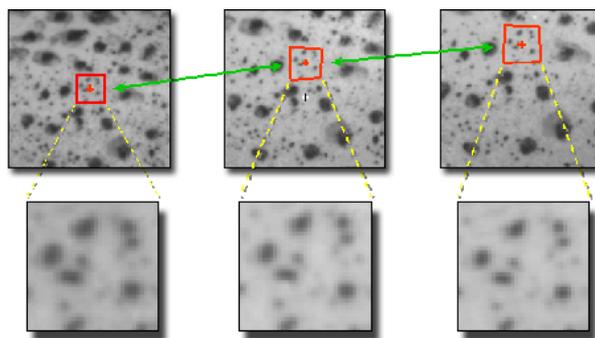


Figura 6.47 – Principio di funzionamento della Digital Image Correlation: in rosso è indicato il sottoinsieme di punti (subset) che viene seguito localmente durante la deformazione.

Obiettivo della prova è stato monitorare l'evoluzione delle deformazioni nel composito e verificarne la corrispondenza locale con le letture degli estensimetri, soprattutto nel caso di deformazioni di piccola entità.

Prima di iniziare il test, è stato necessario assicurarsi di avere le corrette condizioni di illuminazione: una sola luce non sarebbe stata sufficiente e avrebbe creato troppe ombre a causa della superficie piuttosto scabra e irregolare del rinforzo, due luci avrebbero già migliorato l'effetto, ma la scelta finale è stata quella di affidarsi alla luce naturale che ha creato poche variazioni di illuminazione nel provino.

Oltre alla scelta delle condizioni di luce, necessaria per garantire l'ottimale acquisizione delle immagini, è stato necessario procedere alla scelta dell'angolazione ottimale tra le due fotocamere e alla calibrazione della strumentazione.

L'angolo stereoscopico utilizzato è stato di circa 30° e dopo aver eseguito accuratamente la calibrazione, è stato possibile iniziare la prova.

All'inizio è stato scelto di acquisire una immagine al secondo poi, in prossimità di carichi elevati dove lo scopo era seguire l'andamento delle deformazioni durante lo sviluppo del meccanismo di debonding, si è passati a 5 immagini al secondo.

Va fatto notare che in generale il tempo di acquisizione può essere ridotto compatibilmente con le caratteristiche della strumentazione, facendo però attenzione anche ai limiti imposti dalla velocità di trasferimento dell'interfaccia di collegamento adottata e da memoria e capacità di archiviazione del computer utilizzato.

Durante lo svolgimento della prova sono state acquisite approssimativamente 2000 immagini in un lasso temporale di circa 7 minuti.

Il software impiegato mostra le due immagini acquisite in maniera sincronizzata durante la prova (*figura 6.48*) e i risultati vengono poi elaborati successivamente.



Figura 6.48 – Acquisizione delle immagini durante la prova.

Si riportano alcune immagini che mostrano l'evoluzione dello stato tensionale lungo il rinforzo: le *figure 6.49a* e *6.49b* sono relative ad una fase iniziale della prova, mentre le *figure 6.50a* e *6.50b* mostrano una fase intermedia. Le *figure 6.51a* e *6.51b* sono infine relative alla fase terminale della prova.

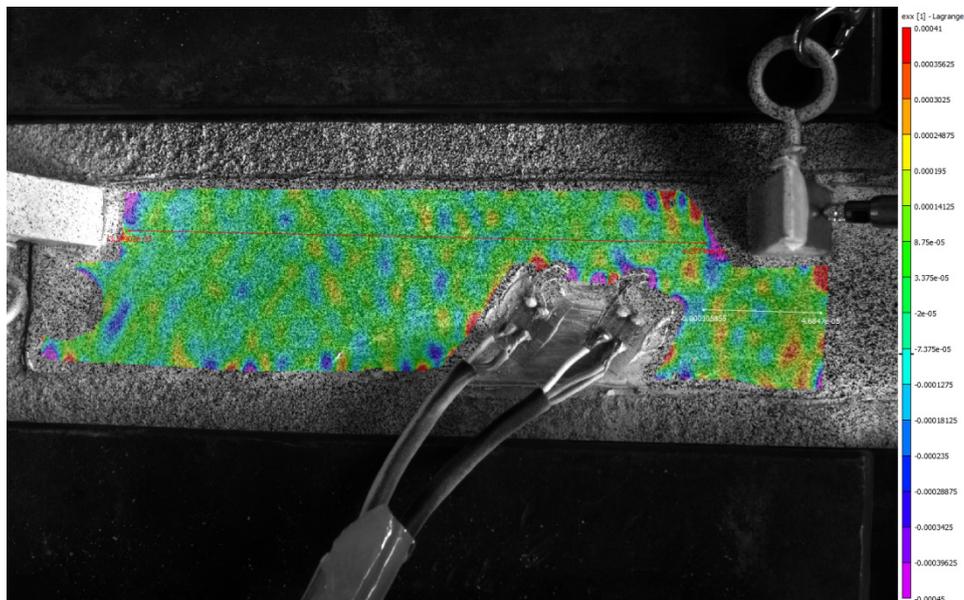


Figura 6.49a – Deformazioni nella fase iniziale della prova B2A2a.

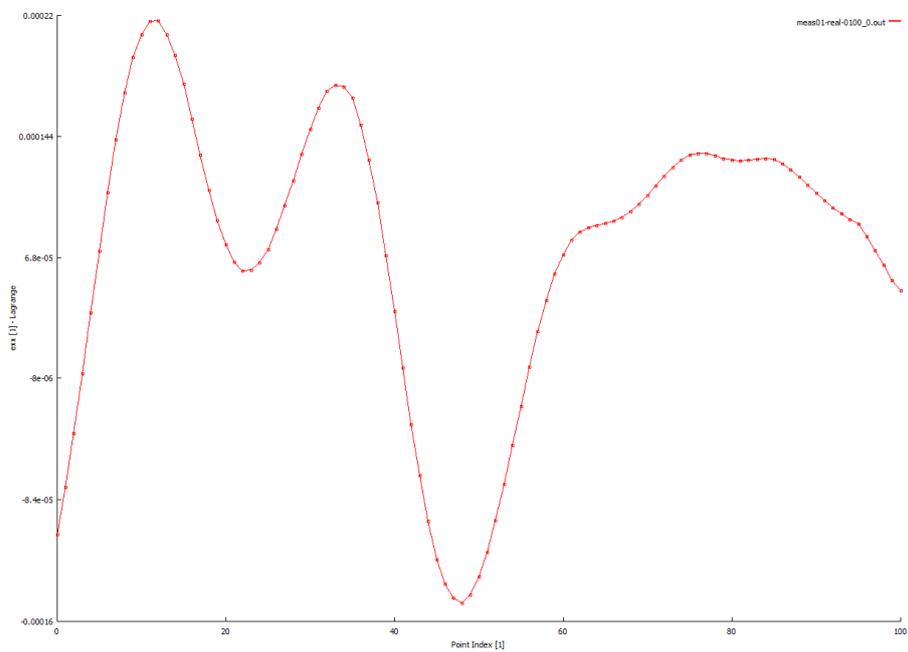
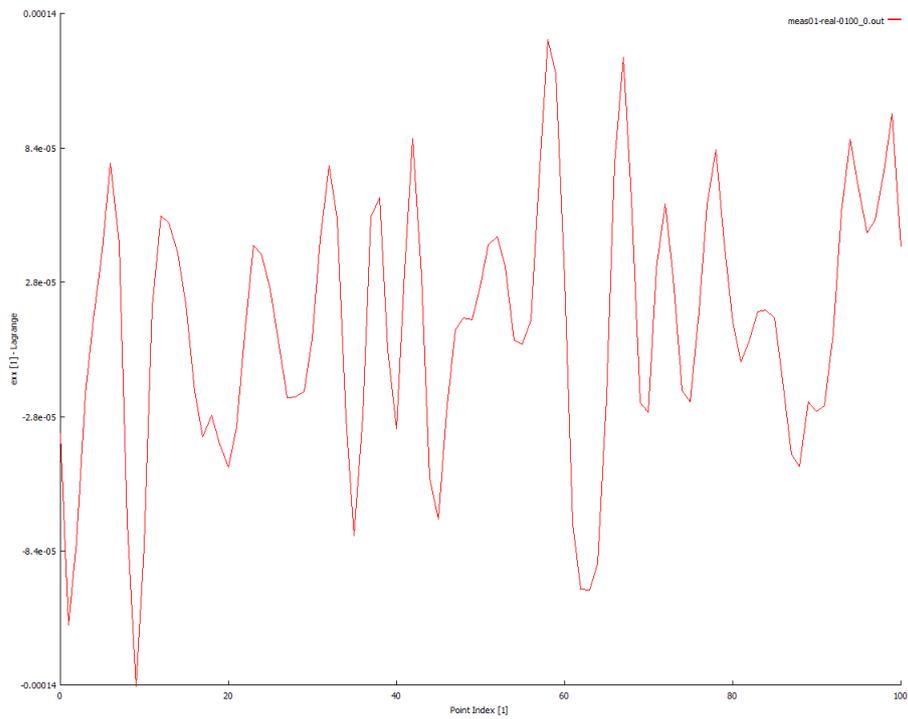


Figura 6.49b – Deformazioni nella fase iniziale della prova B2A2a lungo l’asse longitudinale (tracciato in alto in figura 6.49a) e lungo la zona iniziale dell’incollaggio sulla destra (prima della collocazione degli estensimetri).

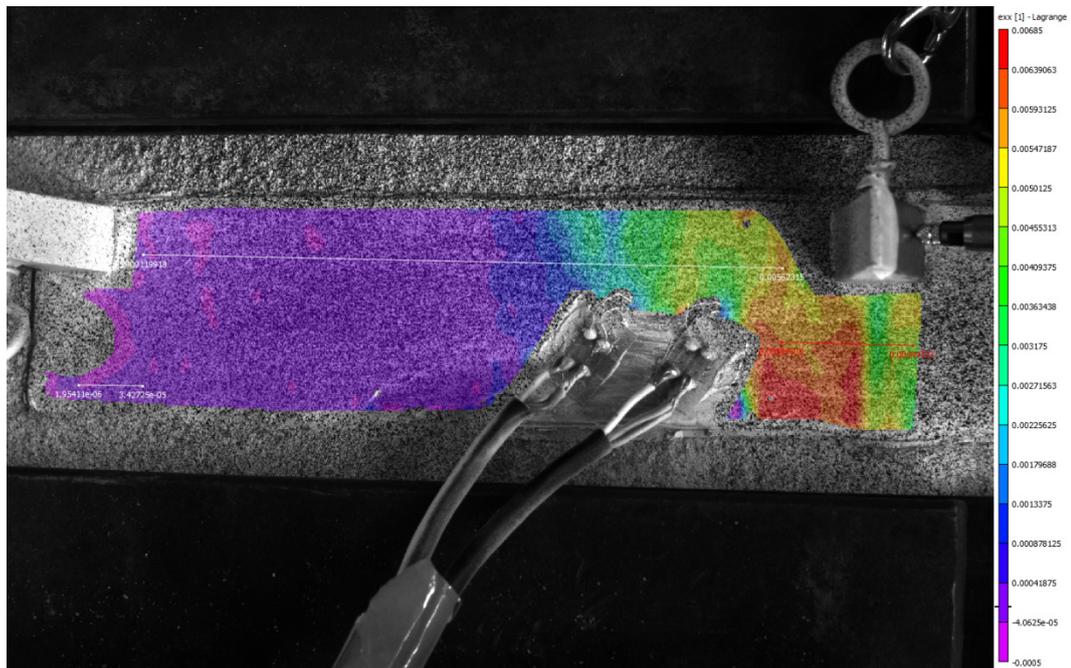


Figura 6.50a – Deformazioni in una fase intermedia della prova B2A2a.

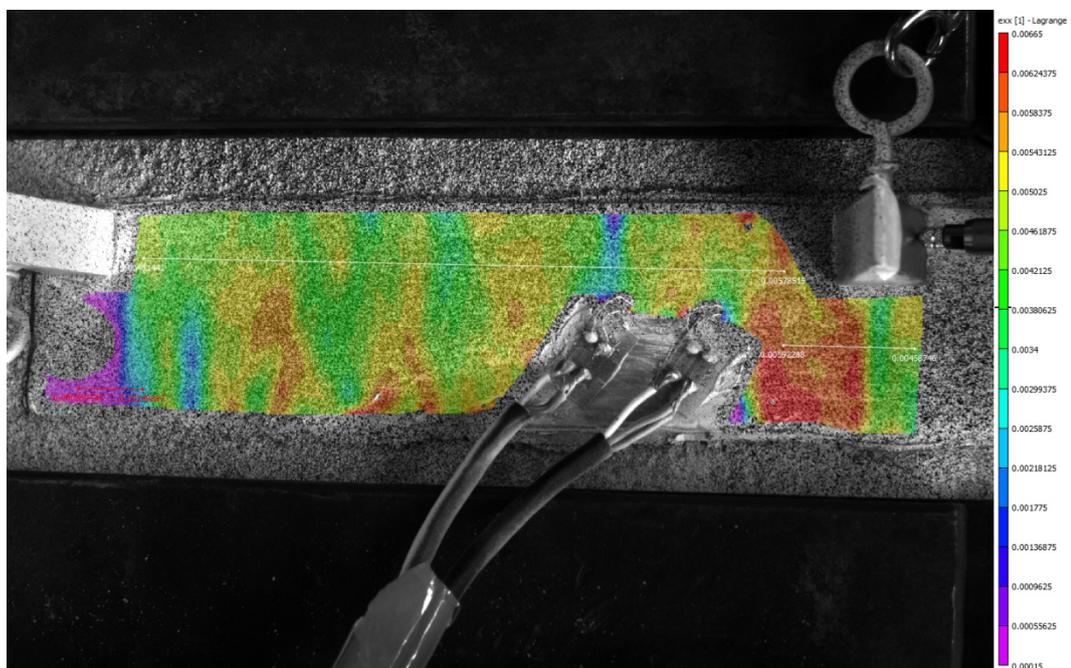


Figura 6.51a – Deformazioni in una fase terminale della prova B2A2a.

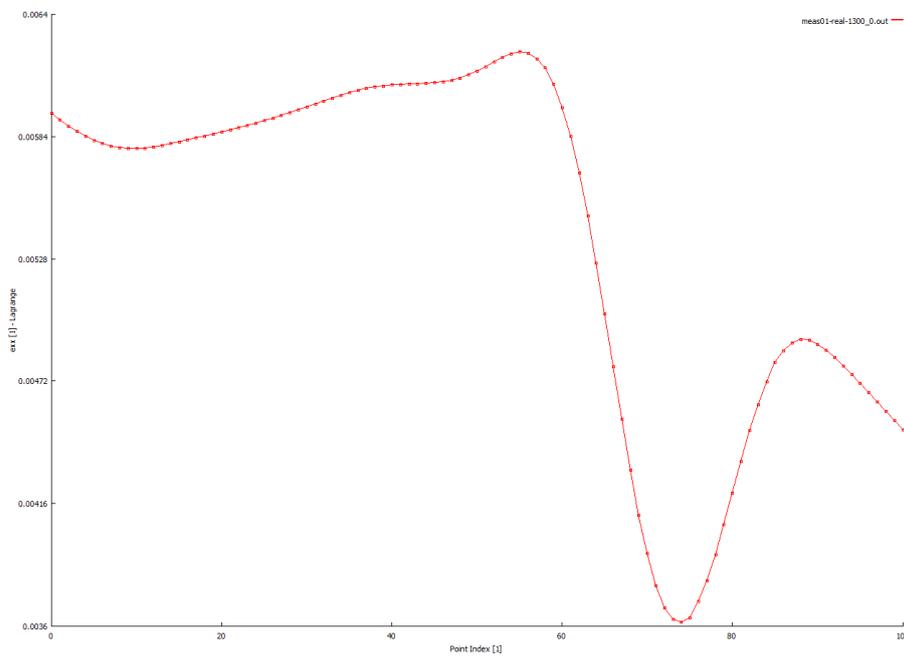
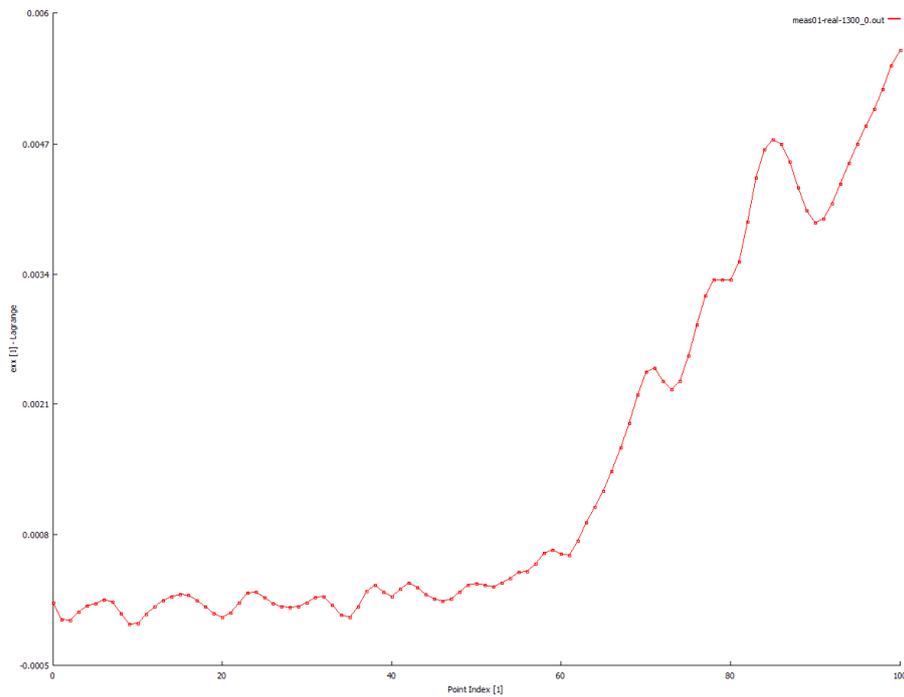


Figura 6.50b – Deformazioni in una fase intermedia della prova B2A2a, lungo l’asse longitudinale (tracciato in alto in figura 6.50a) e all’inizio della zona di incollaggio sulla destra, prima degli estensimetri (si veda sempre la figura 6.50a).

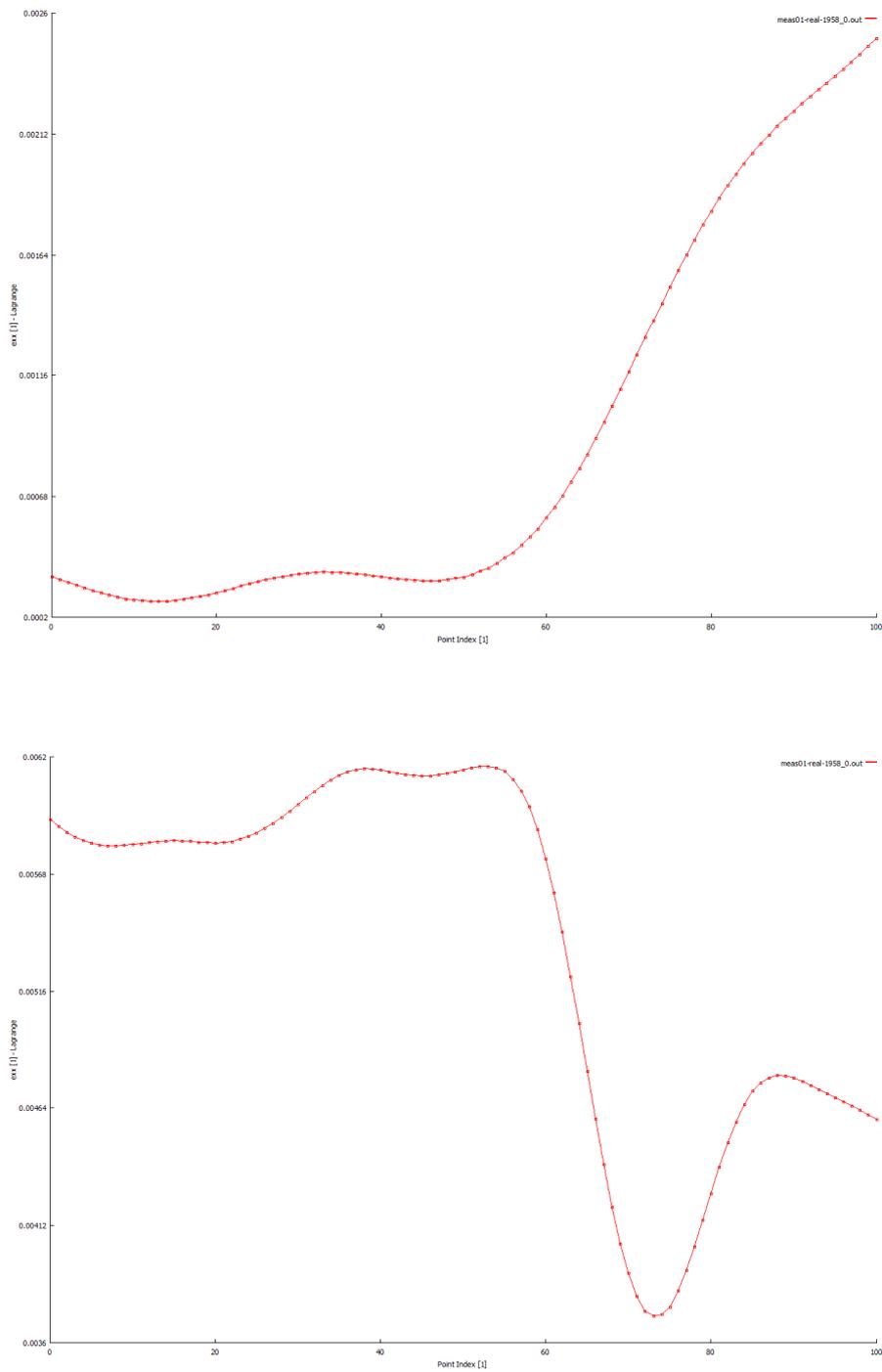


Figura 6.51b – Deformazioni in una fase terminale della prova B2A2a, lungo l’asse longitudinale (tracciato in alto in figura 6.51a) e all’inizio della zona di incollaggio sulla destra, prima degli estensimetri (come indicato sempre in figura 6.51a).

Per poter eseguire il confronto fra i risultati ottenuti tramite la Digital Image Correlation e i valori letti dagli estensimetri è stato scelto di estrarre i dati dell'elaborazione in corrispondenza del punto P1 indicato in *figura 6.52*.

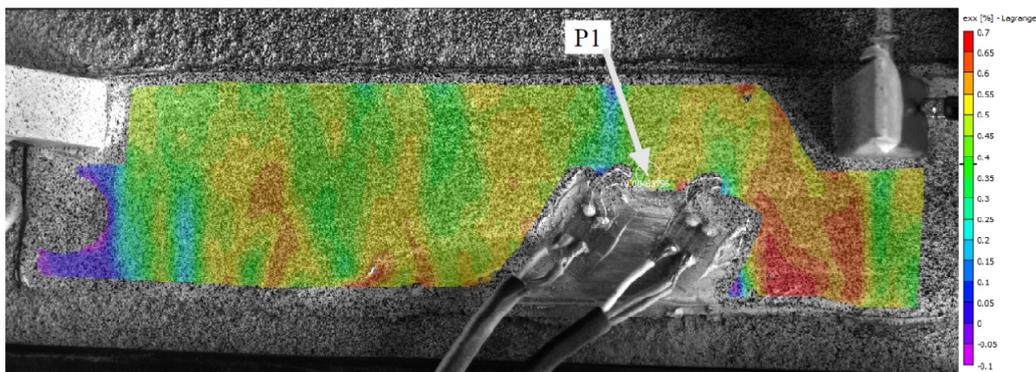


Figura 6.52 – Punto P1 in cui estrarre i dati per il confronto con i valori letti dagli estensimetri.

I diagrammi delle deformazioni che sono stati ricavati e le correlazioni con i dati letti dagli estensimetri sono presentati nelle figure successive.

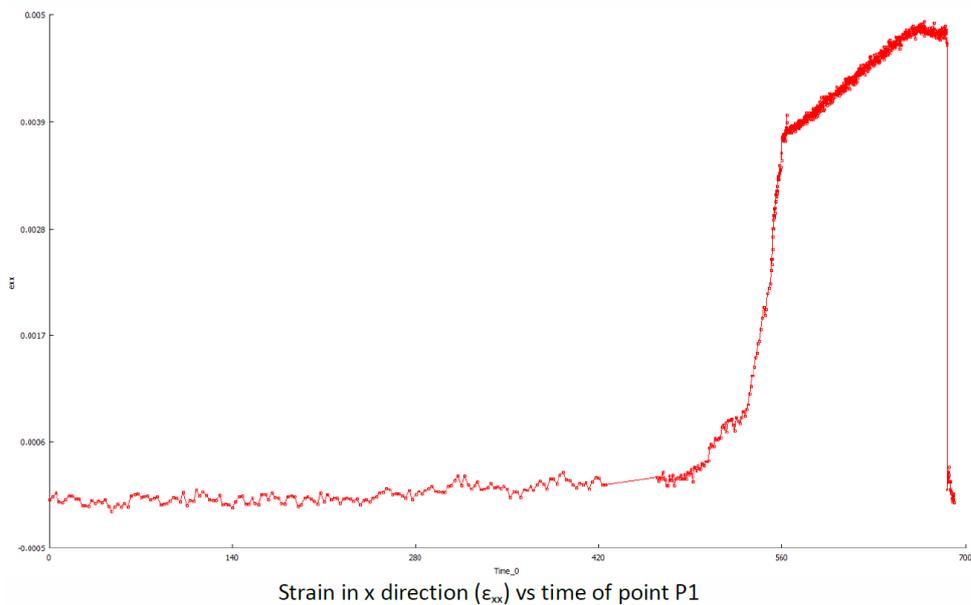


Figura 6.53 – Andamento delle deformazioni in direzione x (lungo l'asse del composito) nel tempo del punto P1.

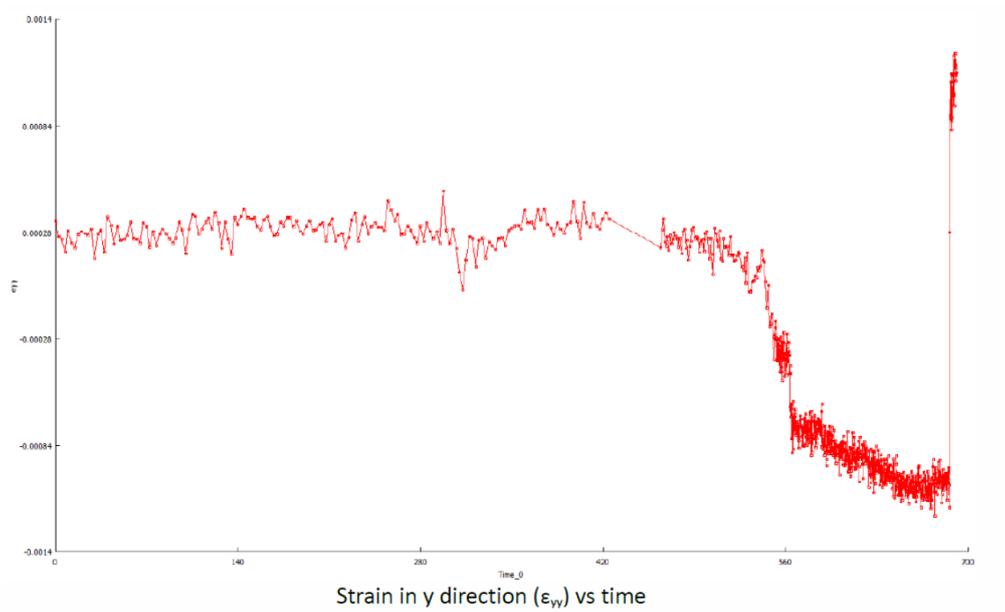


Figura 6.54 – Andamento delle deformazioni in direzione y nel tempo del punto P1.

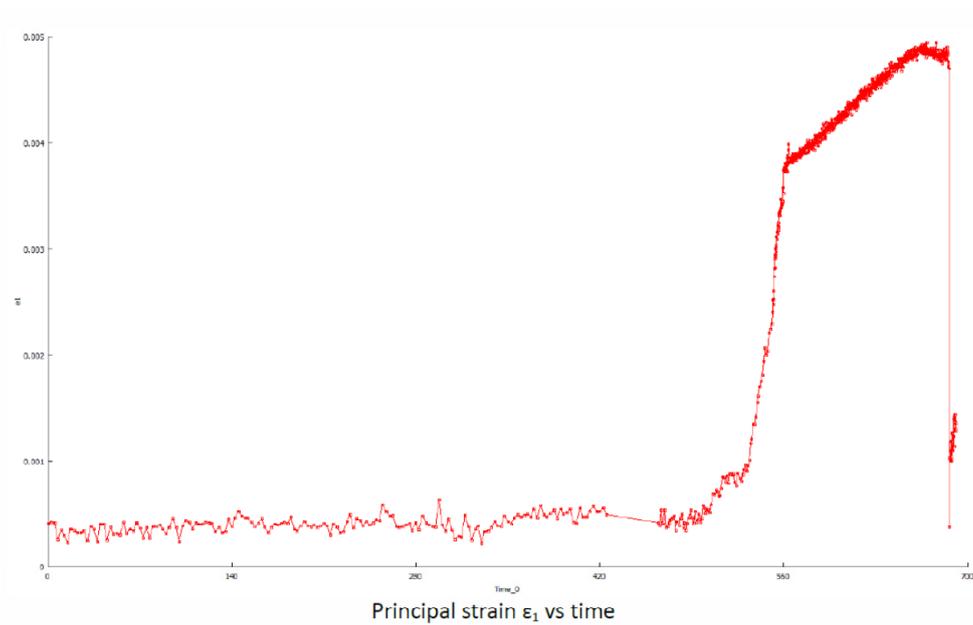


Figura 6.55 – Andamento della deformazione principale ϵ_1 nel tempo.

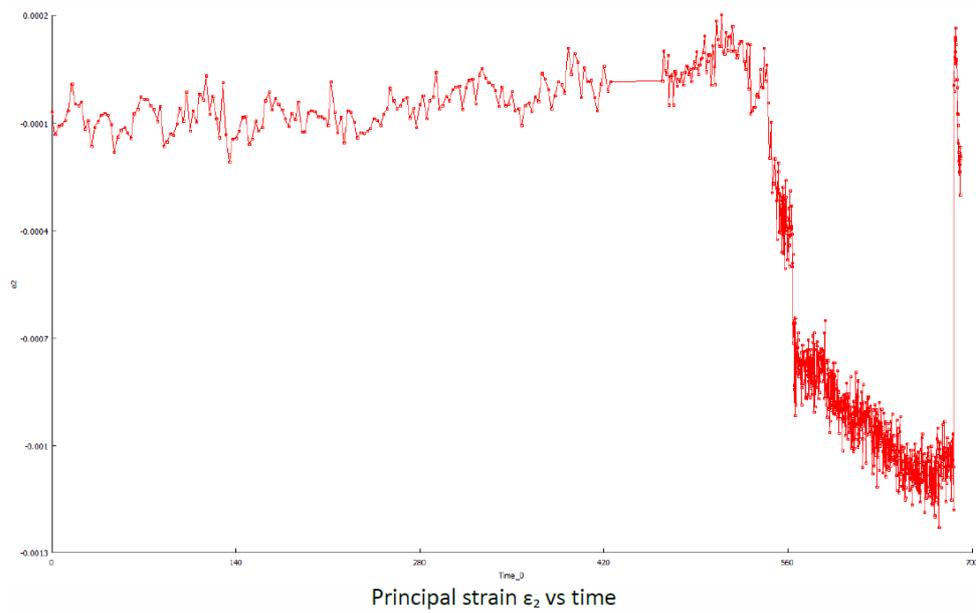


Figura 6.56 – Andamento della deformazione principale ϵ_2 nel tempo.

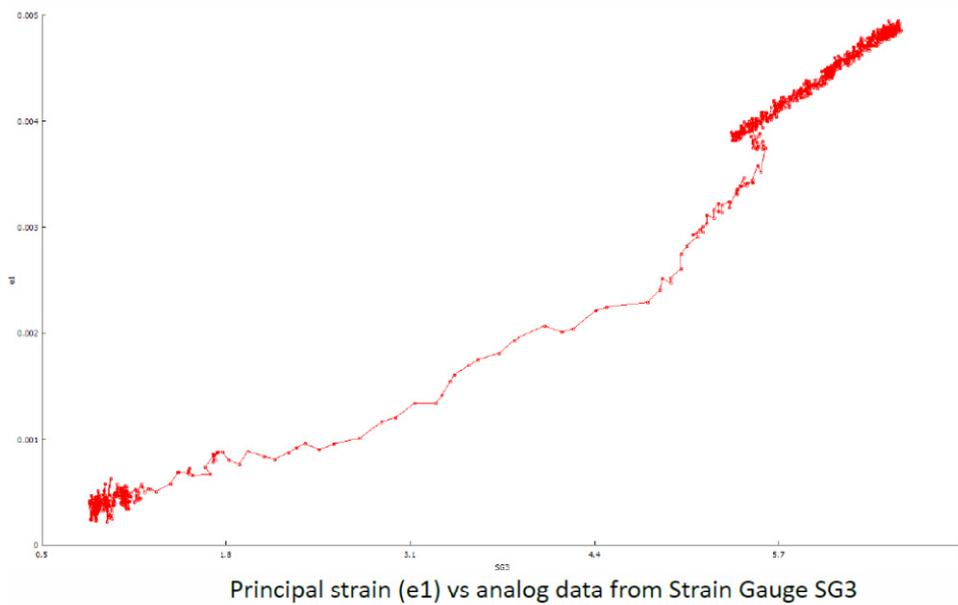


Figura 6.57 – Correlazione tra la deformazione ricavata tramite la Digital Image Correlation e i valori letti dall'estensimetro 3.

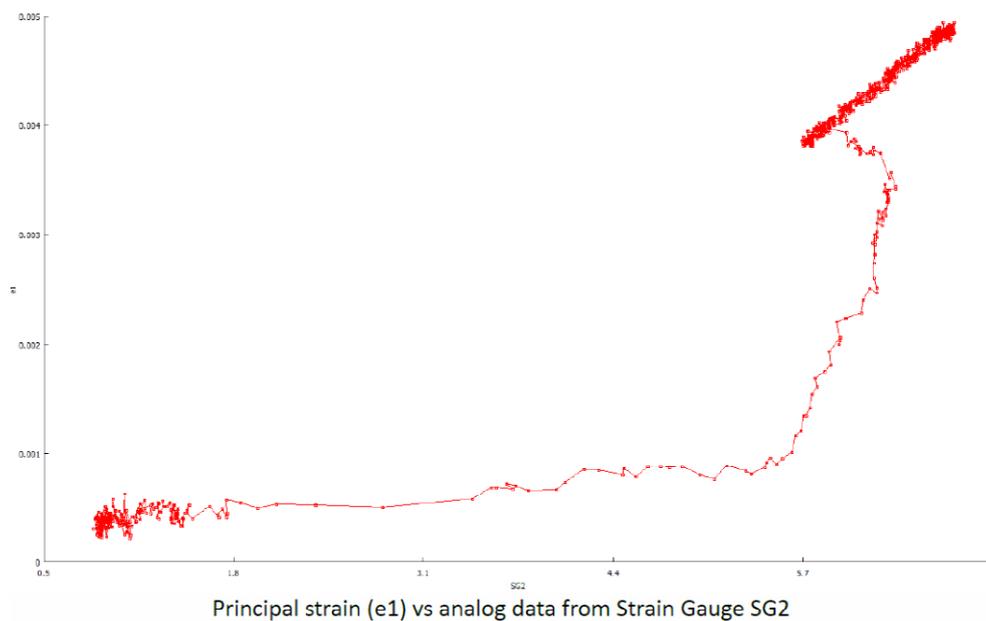


Figura 6.58 – Correlazione tra la deformazione ricavata tramite la Digital Image Correlation e i valori letti dall'estensimetro 2.

I risultati delle correlazioni mostrano alcuni tratti lineari dove si nota una ottima corrispondenza tra le due tecniche, ma anche alcune zone intermedie dove il legame appare più problematico.

Si fa notare infatti che per avere una perfetta correlazione tra le due modalità di misura i punti dovrebbero disporsi tutti su una unica retta.

Si riporta inoltre anche il legame tra gli spostamenti nella parte iniziale del rinforzo determinati attraverso le due tecniche (*figura 6.59*).

Dal diagramma si può notare come in una prima fase l'induttivo impiegato ha rilevato variazioni di spostamento, mentre le misure ottiche non hanno rilevato praticamente nulla.

Ciò potrebbe essere dovuto o a rotazioni indesiderate della base di misura del primo trasduttore di spostamento in questa fase che non trovano riscontro nella misura ottica oppure a cambi di posizione del setup ottico (si potrebbe pensare ad

esempio anche all'effetto della dilatazione termica sul treppiede di sostegno della strumentazione ottica).

Non è da escludere, tuttavia, che il risultato possa essere frutto di una maggiore sensibilità dei trasduttori di spostamento rispetto all'apparecchiatura ottica.

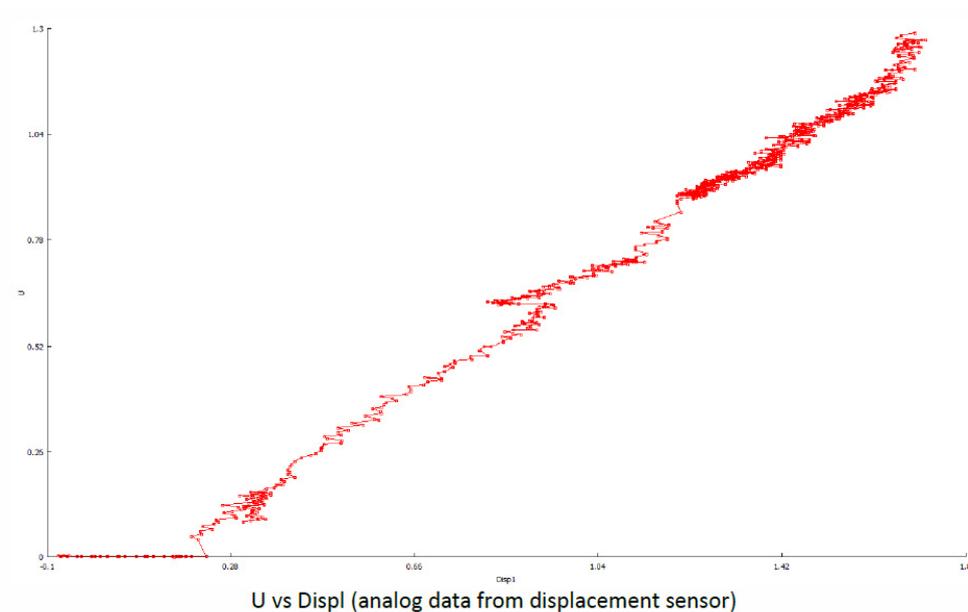


Figura 6.59 – Correlazione tra lo spostamento del punto P1 ricavato attraverso la Digital Image Correlation e i valori registrati per mezzo del primo LVDT.

A completamento della descrizione si riportano alcune immagini che mostrano la modalità di distacco del rinforzo, che è avvenuta correttamente con asportazione di parte del substrato, confermando la corretta realizzazione della procedura di incollaggio.

Il carico massimo registrato durante la prova è stato pari a 510 kg.

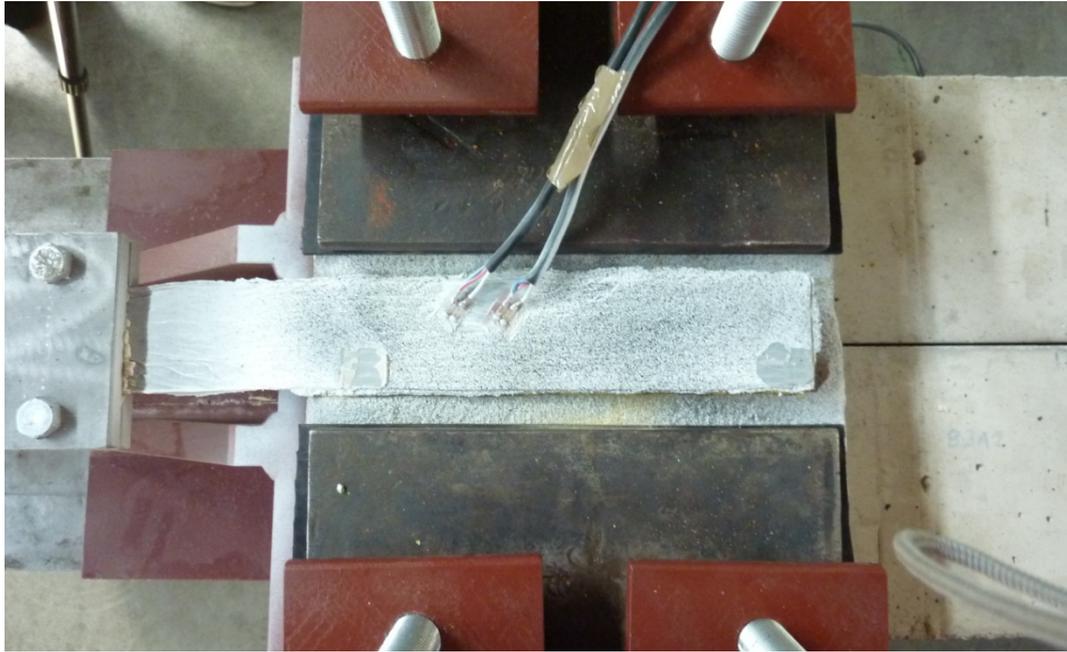


Figura 6.60 – Campione al termine della prova: distacco del rinforzo.



Figura 6.61 – Campione al termine della prova: dettaglio delle superfici.

6.2.7 PROVA M2A1a

La prova in oggetto è stata eseguita in data 05/07/2011, utilizzando una strumentazione composta dalla cella di carico, da 2 LVDT e da 7 estensimetri.

In questa prova non sono stati impiegati estensimetri sulla parte libera del rinforzo per la misura del modulo elastico.

Il setup di prova impiegato è visibile in figura 6.62.

Una descrizione degli strumenti utilizzati, della loro collocazione e dei canali di acquisizione impiegati è presente nella tabella 6.6.

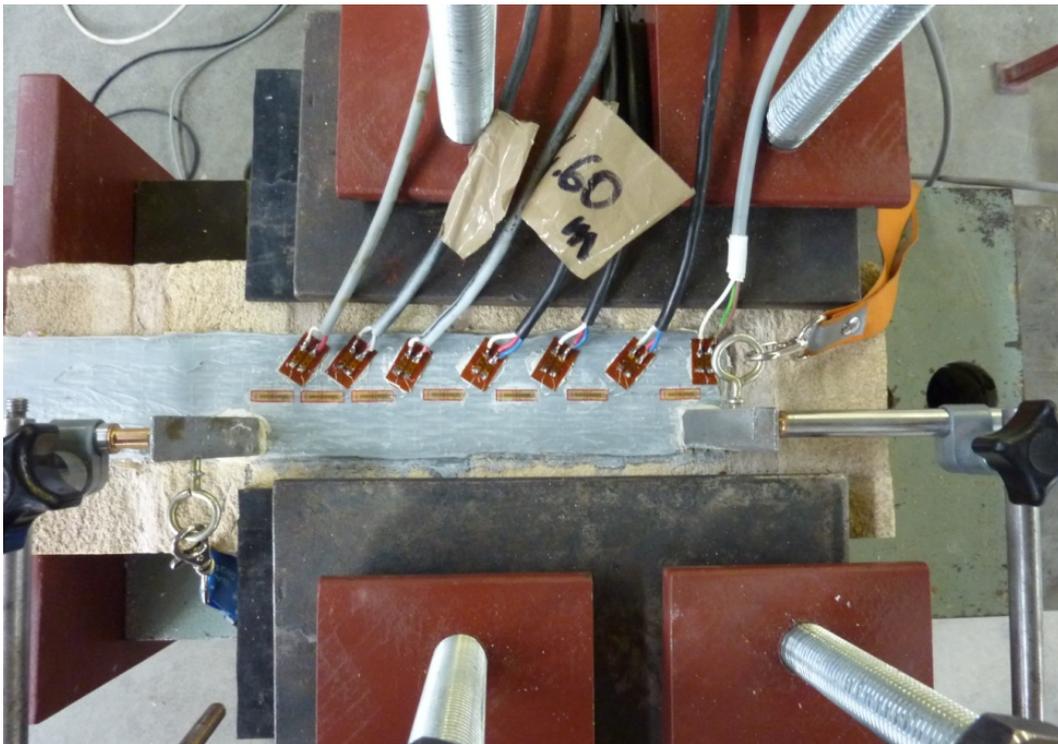


Figura 6.62 - Setup prova M2A1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata (L-M)
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata (M-L)
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata (M-L)
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata (M)

Tabella 6.6 - Strumenti utilizzati durante la prova M2A1a, loro collocazione (M = mattone, L = letto di malta) e canali di acquisizione.

Impiegando i dati forniti dalla cella di carico e dai due LVDT è stato possibile innanzitutto costruire il diagramma carico-allungamento (*figura 6.63*).

Nel grafico sono indicati anche i livelli di carico scelti per le successive elaborazioni dopo la forza massima registrata.

Il diagramma evidenzia un primo tratto di crescita del carico caratterizzato da una certa pendenza e un secondo tratto a pendenza minore prima di giungere al picco, in corrispondenza di un carico pari a 6.80 kN.

Subito dopo il picco, è presente un ramo di softening piuttosto accentuato, che porta ad un netto aumento dell'allungamento registrato, prima di un altro ramo di crescita del carico, seguito da un brevissimo tratto finale di discesa che termina non appena è avvenuto il completo distacco del rinforzo.

Se si ricava l'allungamento seguendo una modalità alternativa, ovvero integrando i valori di deformazione registrati dagli estensimetri per ogni livello di carico (applicando la (6.1)), si ottiene il diagramma riportato in *figura 6.64*.

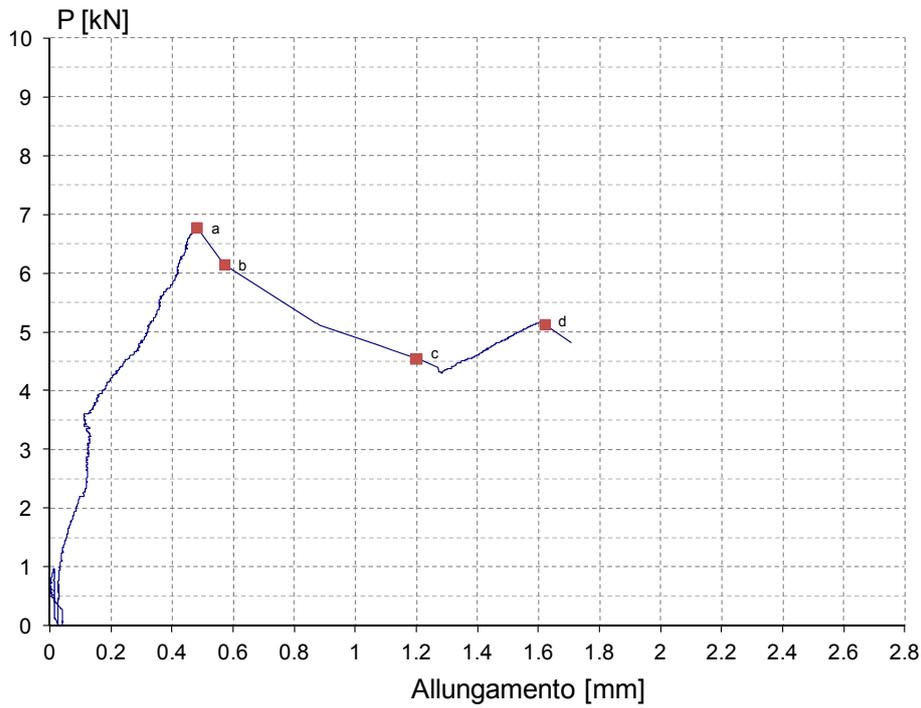


Figura 6.63 - Grafico carico-allungamento ottenuto utilizzando la cella di carico e gli LVDT (prova M2A1a).

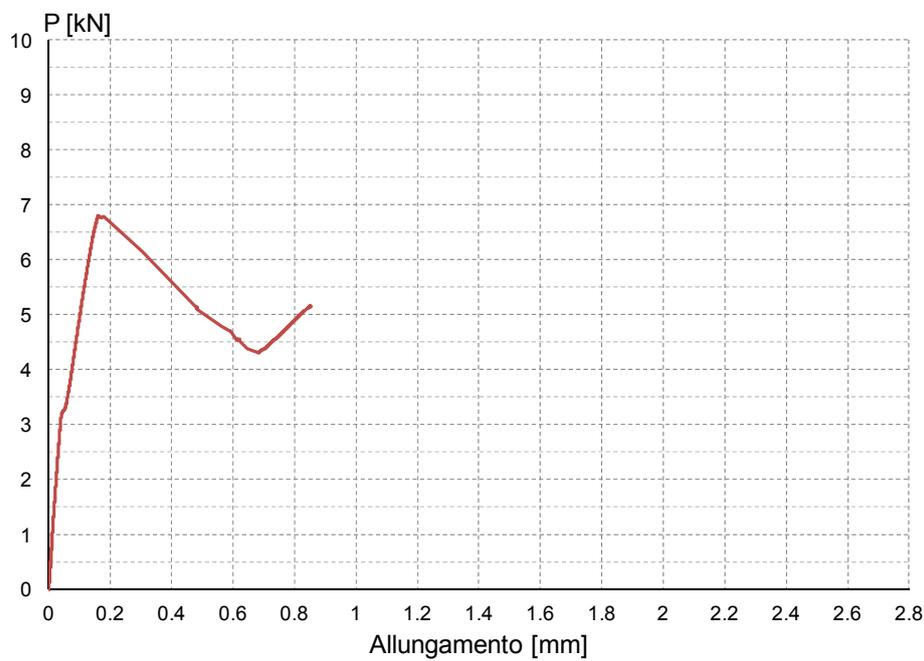


Figura 6.64 - Grafico carico-allungamento in cui l'allungamento è stato calcolato integrando le deformazioni in corrispondenza di ogni livello di carico (prova M2A1a).

Grazie all'impiego dei 7 estensimetri nella zona di incollaggio del rinforzo, è stato possibile monitorare le deformazioni durante lo svolgimento della prova (figure 6.65, 6.66 e 6.67).

La prima figura citata mostra, come al solito, le letture degli estensimetri in funzione del carico applicato, mentre le altre due rappresentano l'andamento delle deformazioni lungo l'asse del composito secondo i livelli di carico scelti, rispettivamente in forma originale (secondo i dati sperimentali) e modificata (ovvero dopo aver interpretato e corretto i dati ottenuti).

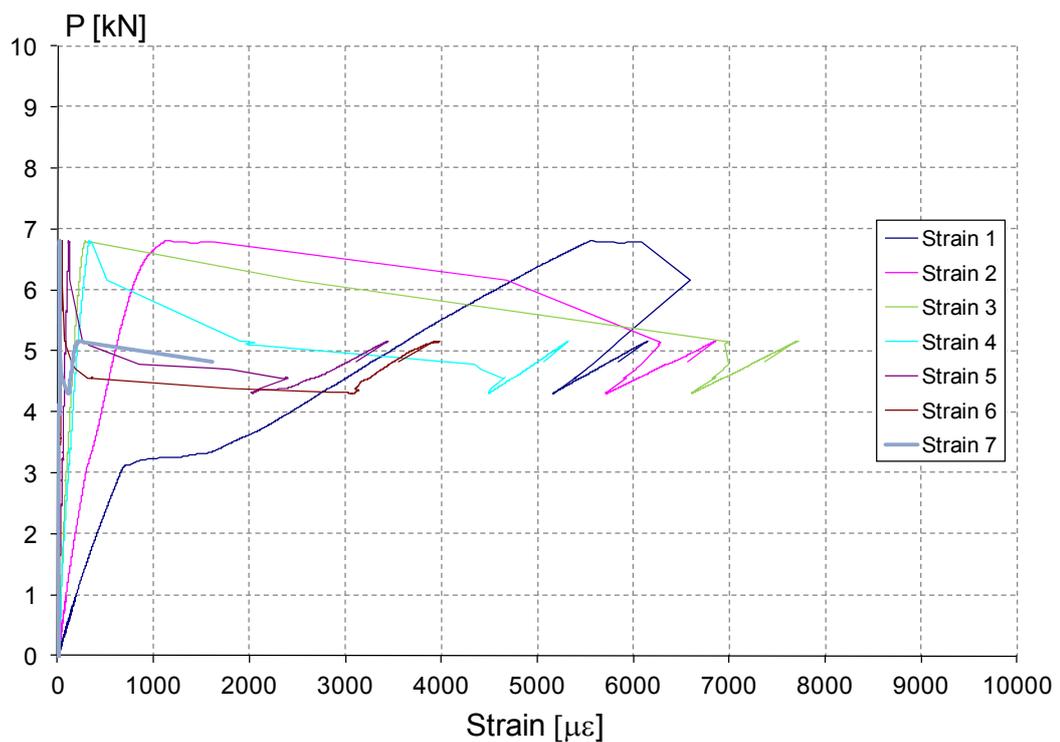


Figura 6.65 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova M2A1a)

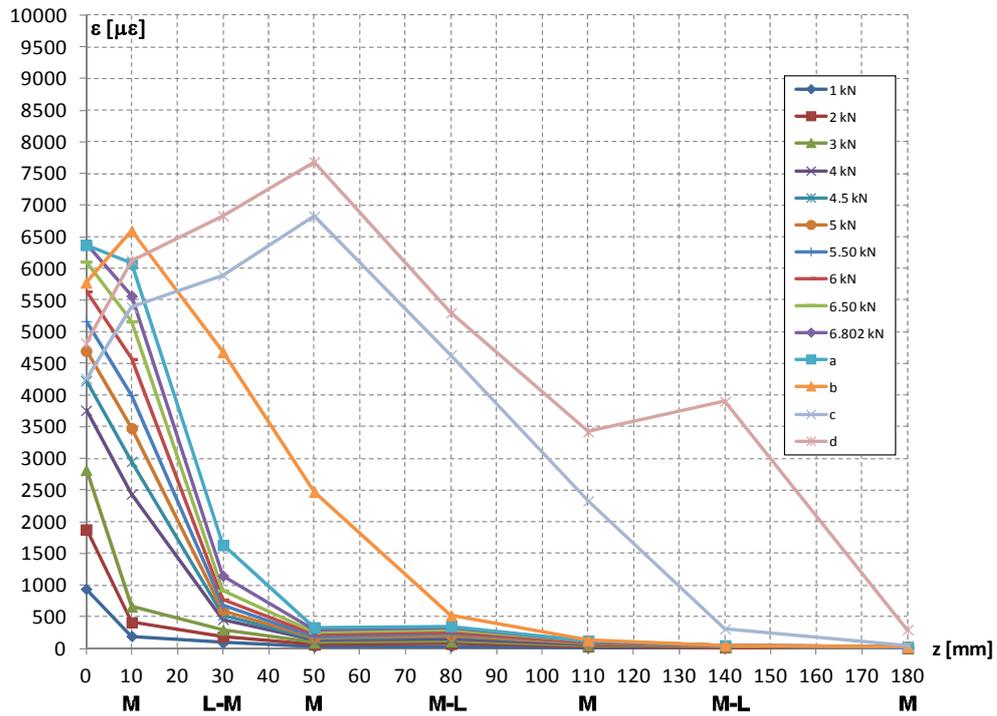


Figura 6.66 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova M2A1a (originale).

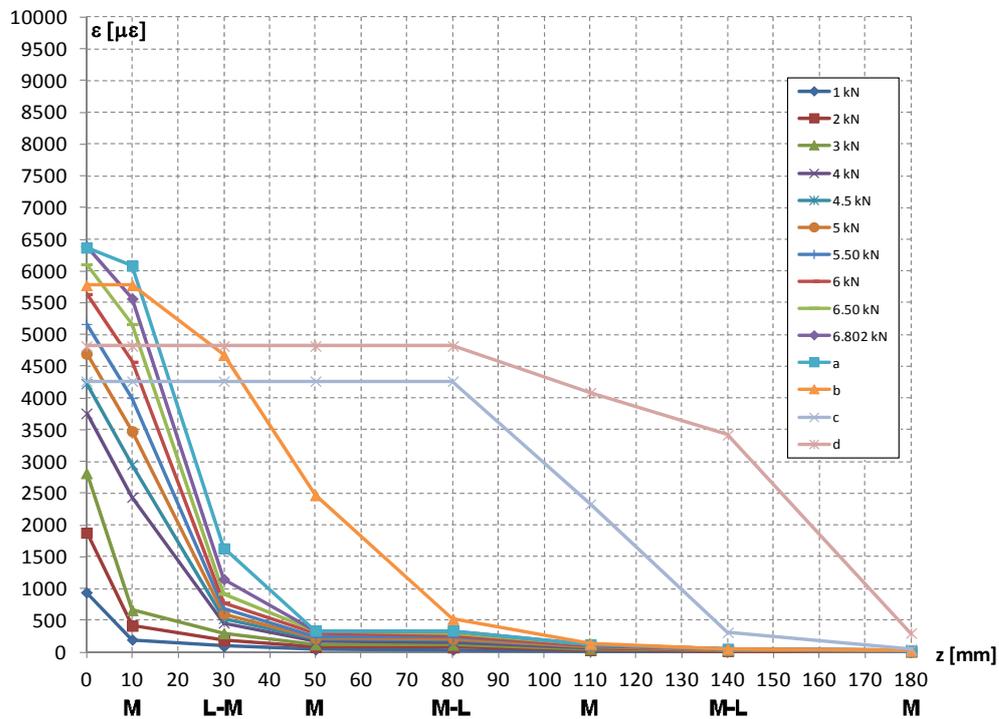


Figura 6.67 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo in funzione dei livelli di carico per la prova M2A1a (diagramma modificato).

In questo caso le modifiche apportate al diagramma sono state modeste e hanno interessato la parte iniziale, dove è stato imposto il rispetto del valore massimo di deformazione ammissibile, calcolabile attraverso la (6.2) e il penultimo punto della curva d, che è stato spostato sulla retta congiungente le letture degli estensimetri adiacenti.

Il diagramma che rappresenta l'andamento delle tensioni tangenziali in funzione dei livelli di carico scelti è indicato in *figura 6.68*.

Questo grafico è stato ottenuto partendo dai valori delle deformazioni regolarizzati e applicando per tutti i livelli di carico scelti la (6.3).

Il diagramma dello scorrimento in funzione dell'ascissa z è invece riportato in *figura 6.69*: il grafico è stato ottenuto secondo quanto indicato al § 6.2.1.

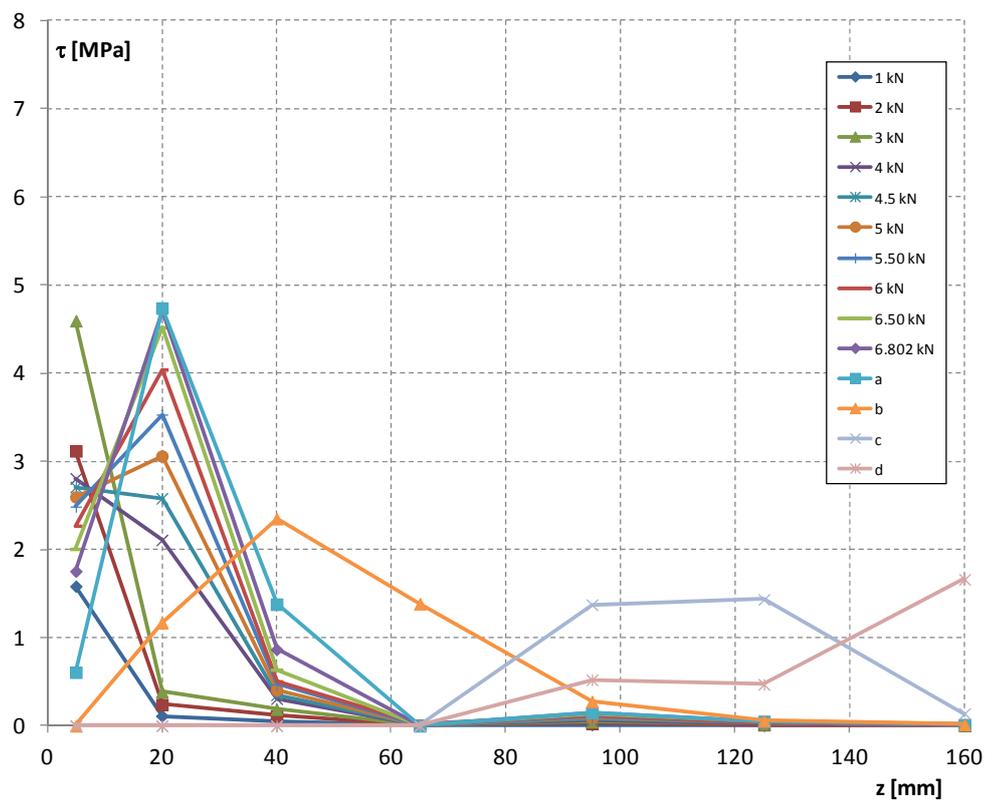


Figura 6.68 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova M2A1a).

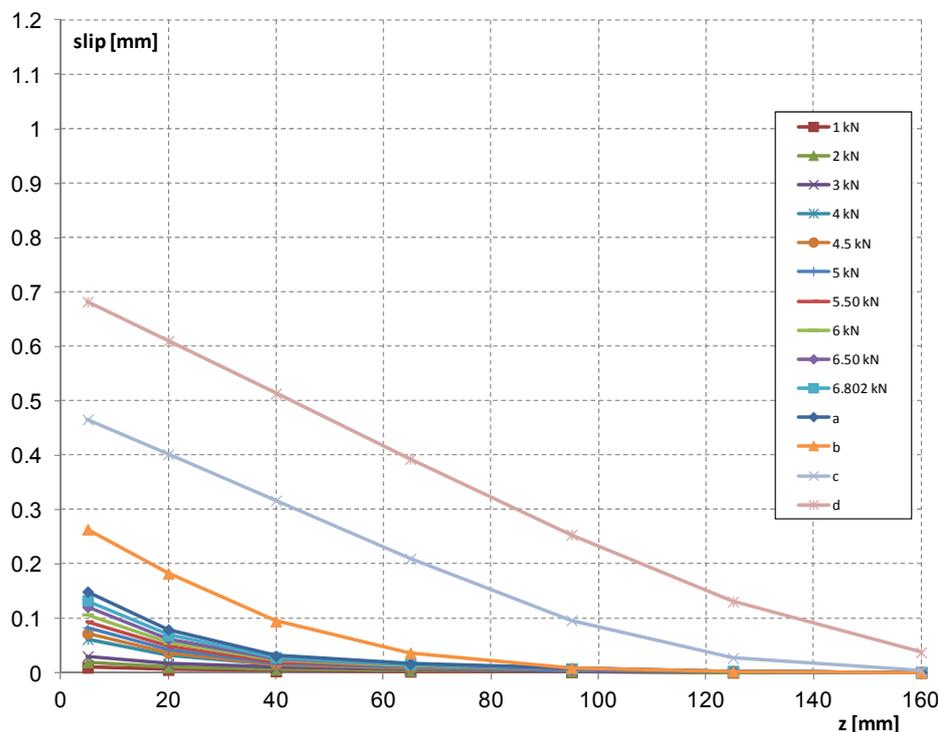


Figura 6.69 - Scorrimenti in funzione dell'ascissa z per i diversi livelli di carico (prova M2A1a)

A completamento della descrizione della prova si riportano alcune immagini che mostrano le modalità di distacco del rinforzo dal substrato, avvenuto, come nelle altre prove su muretti non rasati, mediante asportazione di parti di malta e mattone.

L'asportazione di uno strato di malta di maggior spessore rispetto al mattone ha generato, come già visto per le prove su muretti di tipo M1 non rasati, delle spiccate protuberanze in corrispondenza dei letti di malta, che sicuramente giocano un ruolo nell'ostacolare lo scorrimento del composito rispetto al substrato.

Questo fenomeno, che si è presentato in tutte le prove condotte su muretti non rasati, può in parte spiegare il trend di crescita del carico passando dalle prove sui mattoni a quelle sui muretti di tipologia 2.

Questo concetto sarà ripreso e chiarito meglio all'interno del capitolo 7, dove saranno presentati diversi confronti fra i risultati ottenuti nel corso delle prove.



Figura 6.70 - Campione M2A1a al termine della prova.



Figura 6.71 – Particolare del substrato dopo il distacco del rinforzo.



Figura 6.72 – Formazione dei “denti” di malta sulla parte di substrato asportata.

6.2.8 PROVA M2A1c

La prova M2A1c, condotta in data 07/07/2011, rappresenta il completamento delle prove sui muretti di tipo M2 privi di rasatura.

La strumentazione utilizzata per lo svolgimento della prova è indicata nella *tabella 6.7*: in questa prova non sono stati applicati estensimetri e pertanto sono stati utilizzati solamente cella di carico e trasduttori di spostamento.

La disposizione degli LVDT è conforme a quanto già indicato al § 5.4.

La *figura 6.73* presenta una vista del setup utilizzato.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.7 - Strumenti utilizzati durante la prova M2A1c e canali di acquisizione.

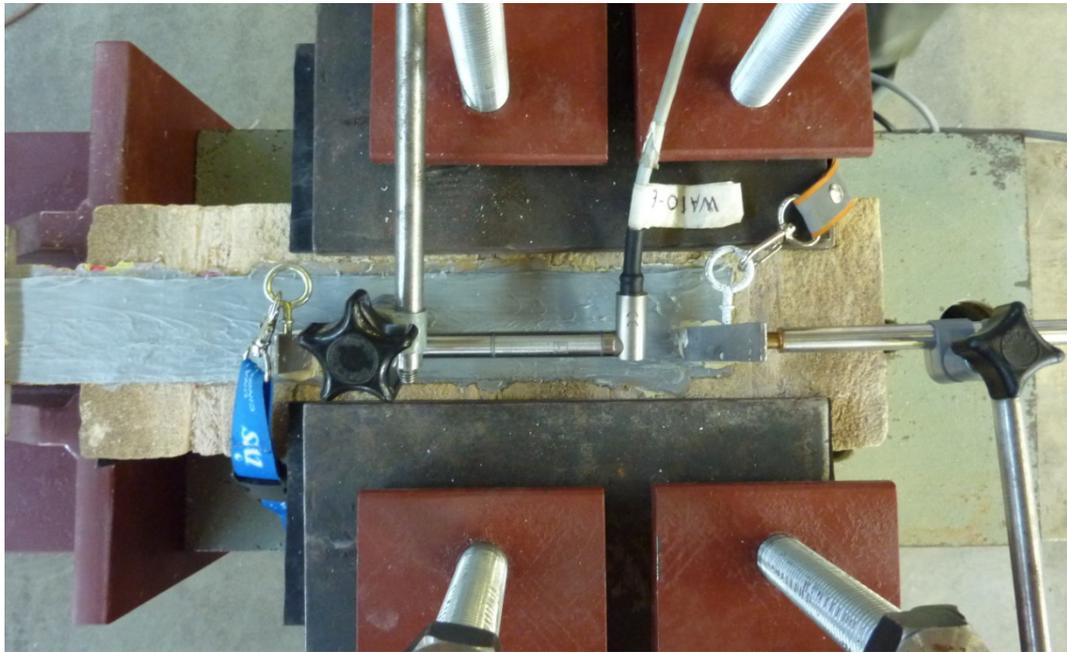


Figura 6.73 - Setup prova M2A1c.

Visto che sul campione non sono stati collocati estensimetri e non essendoci quindi alcun rischio di danneggiare eventuali fili o terminazioni, si è scelto di collocare il trasduttore di spostamento posizionato all'inizio della zona di incollaggio in maniera che potesse effettuare la lettura in verso concorde rispetto a quello posteriore.

Questa scelta è motivata dalla necessità di rimanere ad un'altezza molto bassa per tutelarsi nei confronti di eventuali rotazioni della basetta su cui poggia l'LVDT.

Collocando lo strumento nella maniera opposta, l'ingombro dato dall'asse di tiro avrebbe obbligato a posizionare lo strumento ad un'altezza maggiore.

L'impiego della cella di carico e dei trasduttori di spostamento ha consentito di avere a disposizione i dati necessari all'elaborazione del diagramma carico-allungamento (*figura 6.74*).

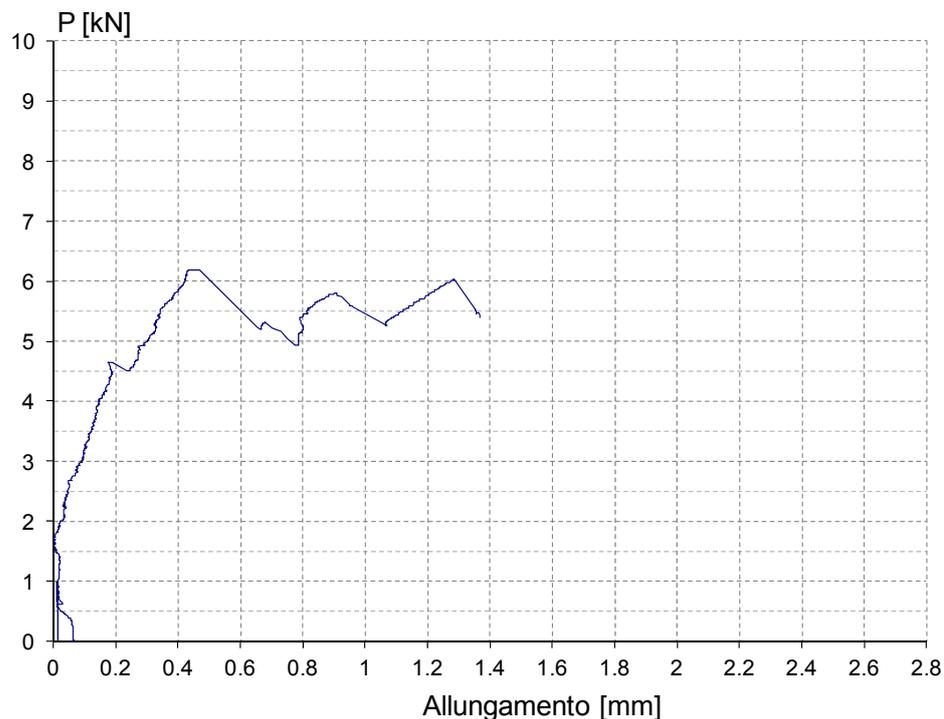


Figura 6.74 - Grafico carico-allungamento per la prova M2A1c.

Come per le altre prove svolte, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico per permettere l'assestamento del campione (fino ad un valore pari a 1kN) e solo in seguito ha avuto inizio la prova vera e propria, condotta in controllo di spostamento fino al completo distacco del rinforzo.

In figura è chiaramente visibile un primo ramo di crescita del carico che porta, dopo un leggero salto, al massimo valore del carico registrato, pari a 6.191 kN.

Dopo il picco si presenta una fase transitoria, con brusche variazioni del valore del carico registrati.

Queste variazioni, che assumono il carattere di veri e propri salti, si possono spiegare ammettendo che essi avvengano durante la fase di debonding in corrispondenza del passaggio da un mattone al successivo.

Va rilevato inoltre che la formazione di una vera e propria dentatura in corrispondenza dei letti di malta, man mano che il substrato viene asportato, può

sicuramente contribuire a rendere più evidenti questi salti e può aiutare a raggiungere dei picchi più elevati.

L'asportazione di una porzione di materiale più rilevante in prossimità dei giunti di malta risulta chiaramente visibile in *figura 6.77*.

Per una spiegazione più approfondita del fenomeno si rimanda al § 6.2.11, dove si presenta una spiegazione più dettagliata per quanto concerne la prova M3A1a.

La modalità di distacco del rinforzo nel suo complesso è invece ben descritta in *figura 6.75*: la crisi è ancora una volta quella preferibile, con asportazione di una parte del substrato e senza alcuna traccia di crisi adesive o miste.

Ciò, come verrà più volte ribadito, è indice di una corretta applicazione del rinforzo e quindi dello sfruttamento ottimale delle caratteristiche del substrato.



Figura 6.75 - Campione M2A1c al termine della prova.



Figura 6.76 - Campione M2A1c: particolare della superficie.



Figura 6.77 – Formazione della dentatura in corrispondenza dei letti di malta.

6.2.9 PROVA B3A2a

Questa prova è stata condotta il 26/05/2011, utilizzando una strumentazione composta da 9 estensimetri (7 lungo il tratto incollato e 2 sul tratto libero per la misura del modulo elastico, come descritto al § 5.3) e 3 LVDT, oltre ovviamente alla cella di carico, utilizzata in tutte le prove.

La collocazione dei due trasduttori di spostamento per la determinazione dell'allungamento del rinforzo è stata quella classica adottata anche nelle altre prove (e già descritta al § 5.4), mentre il terzo LVDT è stato utilizzato solo in questa prova per monitorare gli spostamenti dell'asse di tiro, in vista dello sviluppo di una futura motorizzazione del sistema stesso.

Il setup di prova nel suo complesso, a parte l'aggiunta del terzo induttivo, è assolutamente analogo a quello impiegato anche nelle altre prove sui mattoni ed è già stato descritto compiutamente al capitolo precedente.

La strumentazione impiegata è visibile in dettaglio in *figura 6.79*, mentre nella *tabella 6.8* sono descritte in dettaglio le caratteristiche degli strumenti utilizzati, oltre ai canali di acquisizione utilizzati.

Si fa presente che in questa prova l'orientamento dell'induttivo adibito a leggere lo spostamento all'inizio della parte incollata è stato obbligato, vista la presenza degli altri due LVDT.

Negli altri casi, in presenza di estensimetri, si è preferito posizionare il primo LVDT in modo che potesse eseguire la lettura da davanti, anziché da dietro, in modo da non rischiare di danneggiare le terminazioni della strumentazione o gli estensimetri stessi.

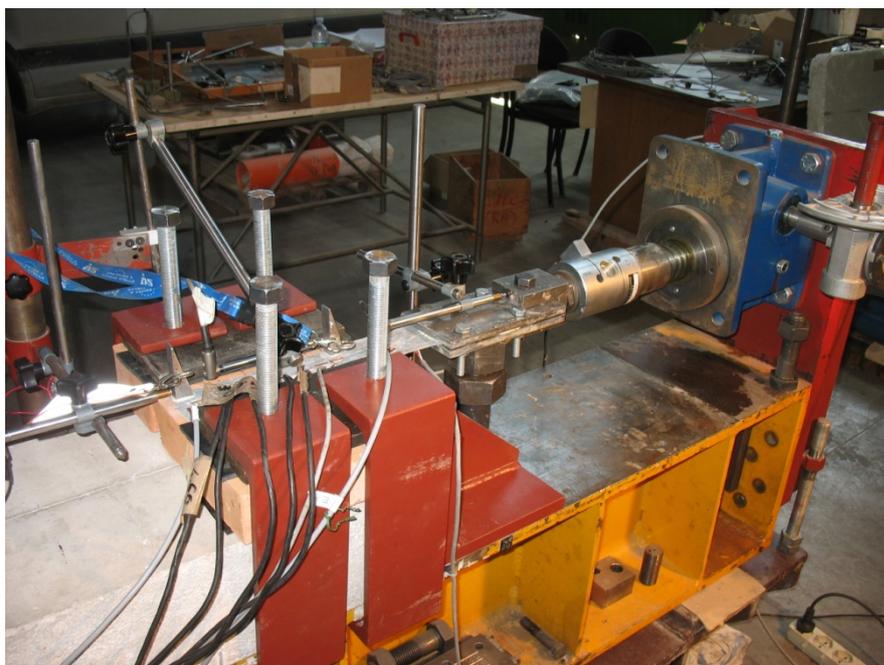


Figura 6.78 - Prova B3A2a.



Figura 6.79 - Setup prova B3A2a

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	LVDT HBM WA / 20 mm	misura spostamenti sistema di tiro
4	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
10	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata
11	Estensimetro E8 (10 mm)	tratto libero, sopra
12	Estensimetro E9 (10 mm)	tratto libero, sotto

Tabella 6.8 - Strumenti utilizzati durante la prova B3A2a e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza dei valori registrati dagli LVDT collegati al canale 1 e 2, è stato possibile costruire il grafico carico – allungamento relativo al rinforzo applicato (*figura 6.80*).

Come si può vedere dal grafico, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico fino ad un carico di circa 1 kN per permettere al campione di assestarsi.

Terminata questa fase, il carico è cresciuto fino a raggiungere un valore di picco pari a 7.082 kN, dopo il quale è stato registrato un netto ramo di softening, con un grande aumento dell'allungamento misurato, per poi concludere con un ultimo tratto dall'andamento più variegato, che ha visto una tendenza generale all'aumento del carico fino al completo distacco del rinforzo (avvenuto ad un carico pari a 5.561 kN).

I punti segnalati in figura sono rappresentativi dei livelli di carico scelti dopo il picco per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di debonding.

Un'altra possibilità per ottenere il diagramma carico - allungamento è quella di correlare le letture della cella di carico all'allungamento determinato non grazie agli LVDT, ma tramite integrazione delle deformazioni registrate durante la prova per tutti i livelli di carico.

La procedura può essere condotta utilizzando la (6.1), riportata al § 6.2.1.

Il risultato ottenuto è mostrato in *figura 6.81*.

Gli allungamenti calcolati attraverso i due metodi risultano in questo caso piuttosto simili.

In *figura 6.82* viene invece riportato il grafico tensione – deformazione rilevato nel tratto libero e utilizzato per il calcolo del modulo elastico del rinforzo.

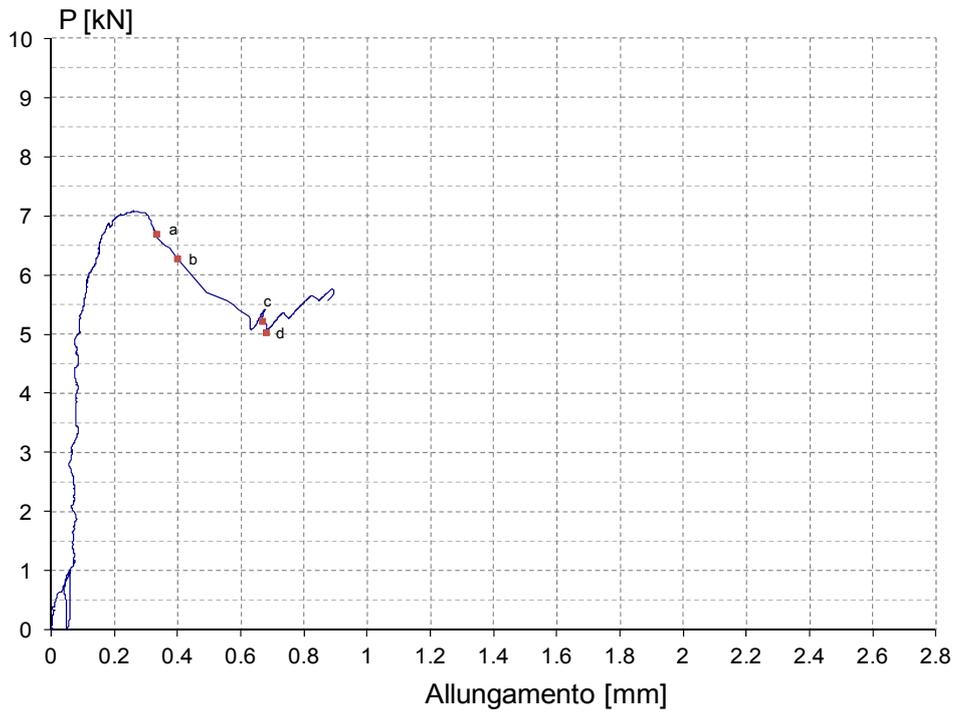


Figura 6.80 - Grafico carico-allungamento per la prova B3A2a (ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT).

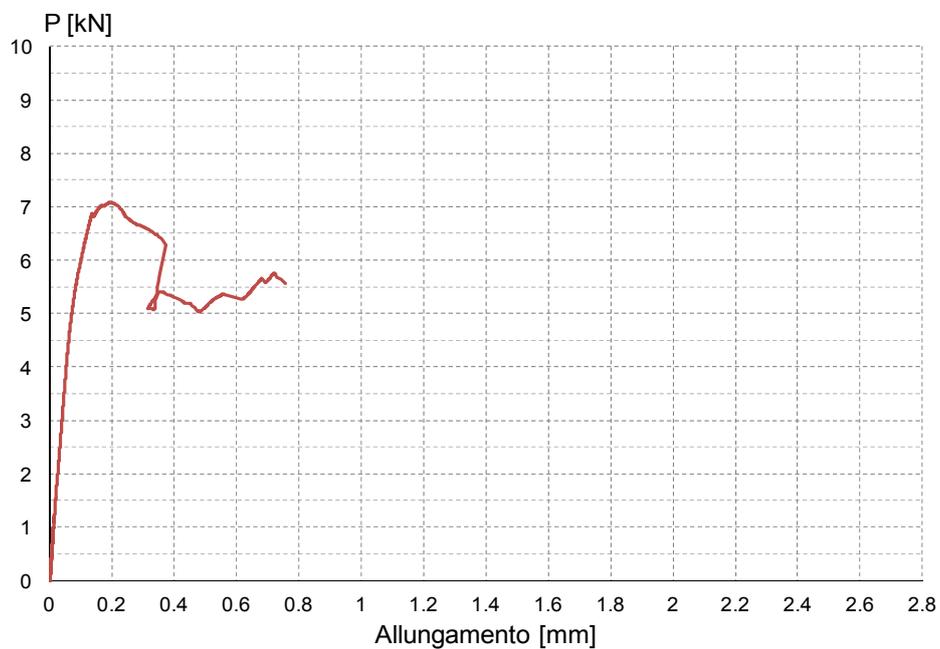


Figura 6.81 - Grafico carico-allungamento in cui l'allungamento è stato calcolato integrando le deformazioni in corrispondenza di ogni livello di carico (prova B3A2a).

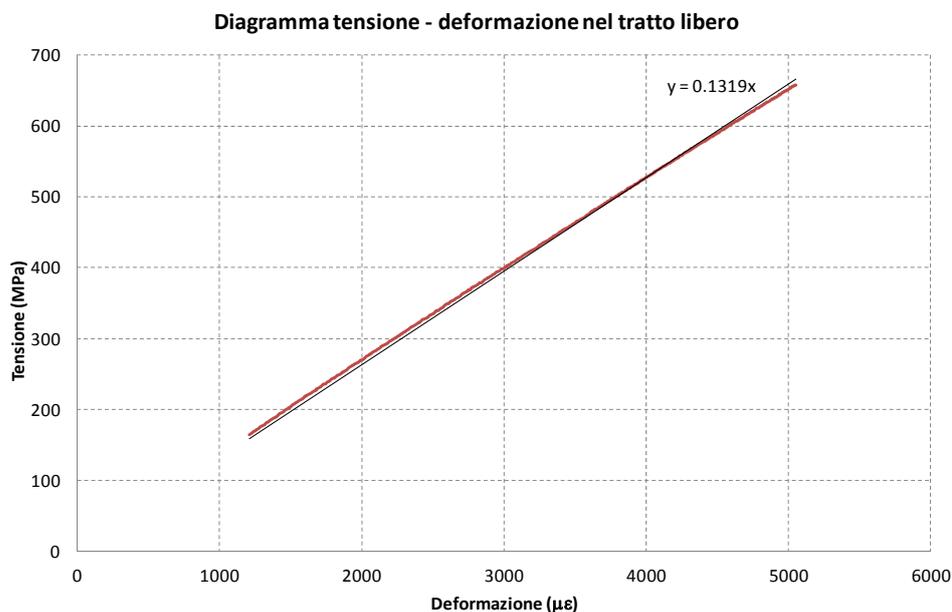


Figura 6.82 - Grafico tensione-deformazione del composito nel tratto libero (prova B3A2a).

La tensione è stata calcolata semplicemente come rapporto fra il carico applicato (in N) e l'area della sezione del rinforzo (in mm^2).

La deformazione rappresentata invece è data dalla media tra le deformazioni registrate dai due estensimetri collocati nel tratto libero: questa scelta serve a fare in modo che la deformazione sia effettivamente quella determinata dallo sforzo assiale applicato, eliminando dal calcolo possibili contributi di tipo flessionale.

In figura, in realtà, non è riportato il grafico per intero, ma solo il tratto utilizzato per il calcolo del modulo elastico, compreso tra il 20% e l'80% del carico massimo registrato.

Questa scelta è motivata dalla necessità di eliminare dal computo l'eventuale assetamento iniziale del provino e comunque di considerare il tratto ad andamento elastico-lineare, senza giungere troppo vicino al carico massimo, in corrispondenza del quale generalmente ci si discosta dalla linearità.

Nota tale diagramma, il modulo elastico è completamente definito conoscendo la pendenza della curva rappresentata.

Tracciando una linea di tendenza è possibile ricavare tramite foglio di calcolo l'equazione della retta che meglio approssima i dati sperimentali, il cui coefficiente angolare (moltiplicato per 10^6) permette direttamente di ricavare il modulo elastico cercato (espresso in N/mm^2).

Come si può evincere dalla figura, applicando le considerazioni appena esposte, è stato ricavato un modulo elastico pari a 131900 MPa.

Nella rielaborazione dei dati delle prove sperimentali è stata fatta la scelta di utilizzare sempre lo stesso modulo elastico E , trattandosi in tutti i casi dello stesso rinforzo, che è stato calcolato eseguendo la media fra tutti quelli ricavati nel corso delle prove B3A2a, B4B1a e M1A1a, ottenendo un valore di 123767 MPa.

Le deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato sono riportate in *figura 6.83*.

Le letture dell'estensimetro 4 non sono indicate, a causa di un malfunzionamento dello stesso.

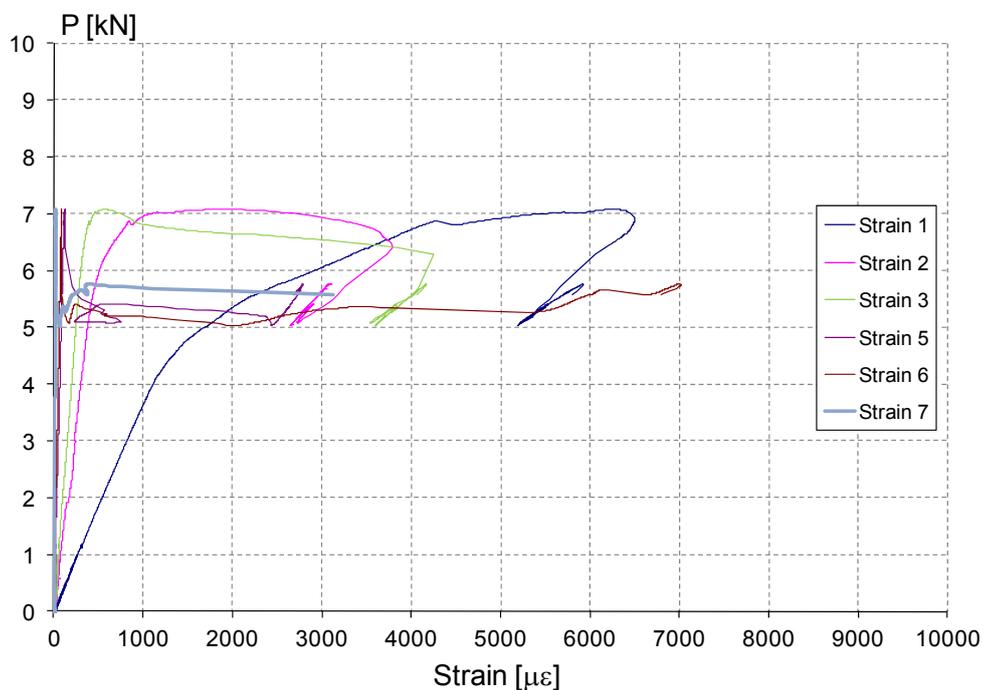


Figura 6.83 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B3A2a).

La *figura 6.84* mostra invece l'andamento delle deformazioni misurate lungo l'asse del rinforzo nella zona incollata, in funzione dei livelli di carico selezionati. I profili illustrati sono relativi ai livelli di forza indicati all'interno della figura stessa, che sono stati scelti in modo da avere un quadro generale dell'evoluzione dello stato deformativo del composito al procedere del fenomeno di debonding.

Le curve indicate come a,b,c,d sono relative a livelli di carico registrati già oltre il picco del diagramma carico-allungamento.

Sfruttando le considerazioni già espresse al § 6.2.1, è possibile modificare il diagramma riportato in *figura 6.84*, relativo ai valori effettivamente registrati durante le prove, rendendolo di più facile comprensione e interpretazione.

Le modifiche apportate conducono al diagramma modificato riportato in *figura 6.85*.

Utilizzando le deformazioni regolarizzate, relative ai livelli di carico indicati, è possibile costruire il grafico che mostra l'andamento delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.86*).

Si ricorda che il calcolo può essere eseguito utilizzando la (6.2).

Gli scorrimenti in funzione dell'ascissa z , calcolati per i diversi livelli di carico e ottenuti secondo quanto già indicato al § 6.2.1, sono invece rappresentati in *figura 6.87*.

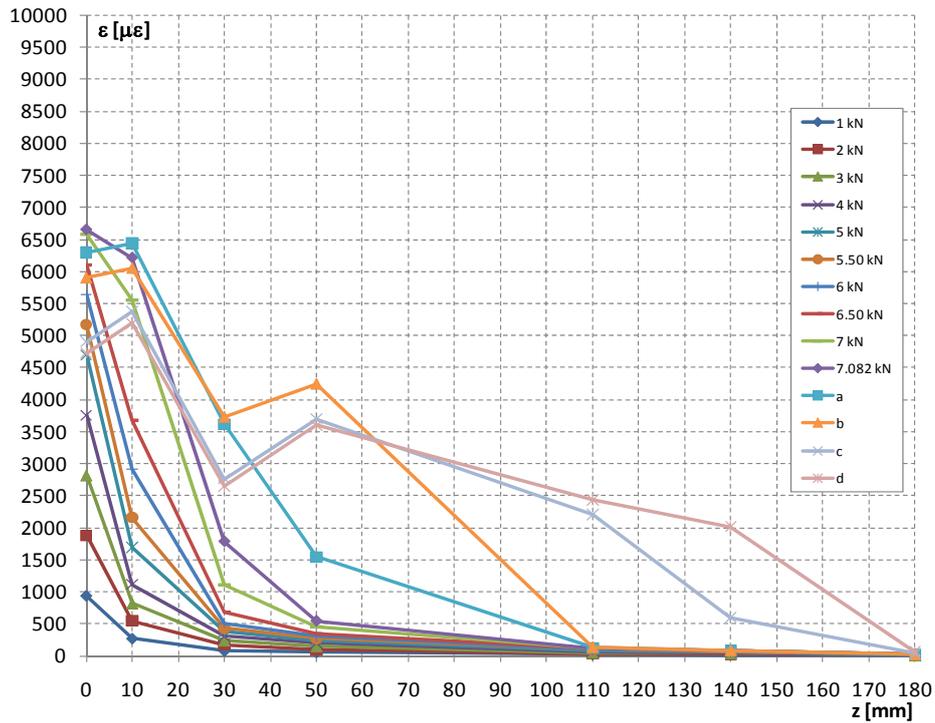


Figura 6.84 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova B3A2a (diagramma originale).

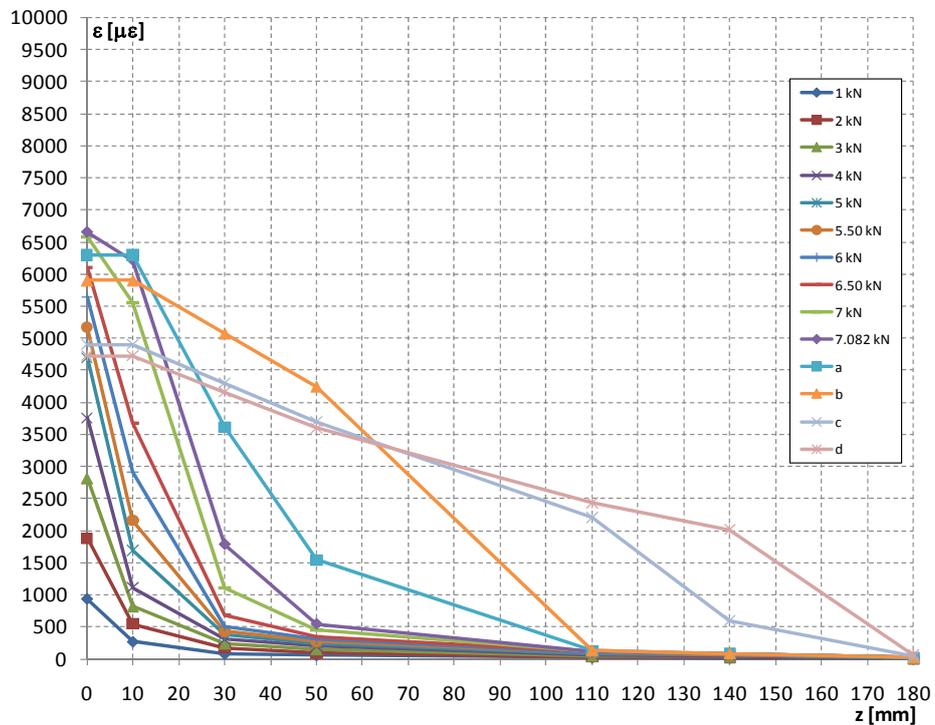


Figura 6.85 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo relative alla prova B3A2a (diagramma modificato).

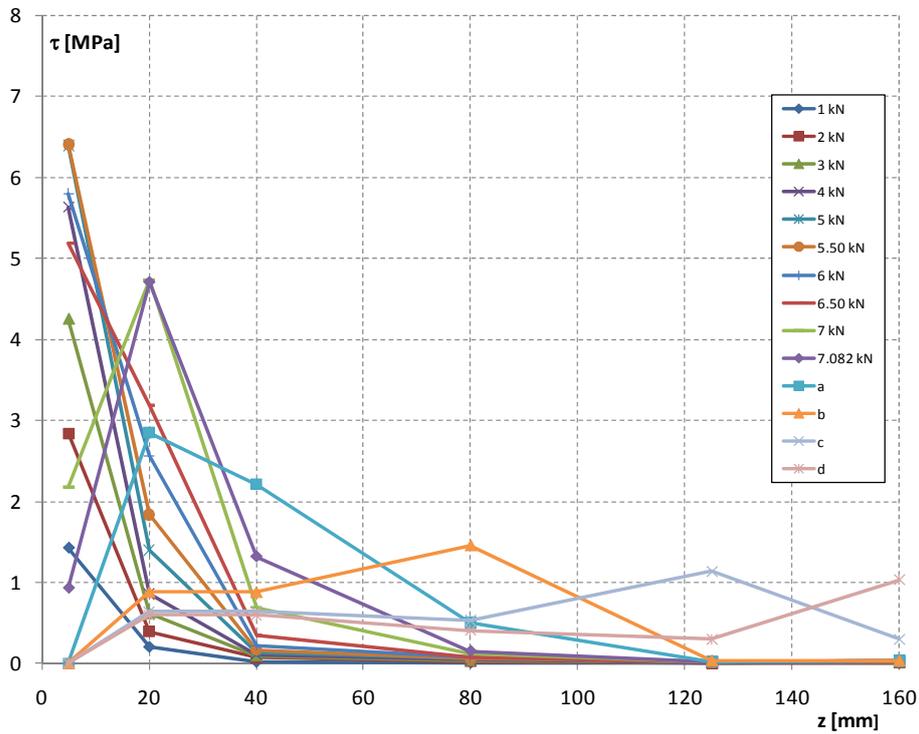


Figura 6.86 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova B3A2a).

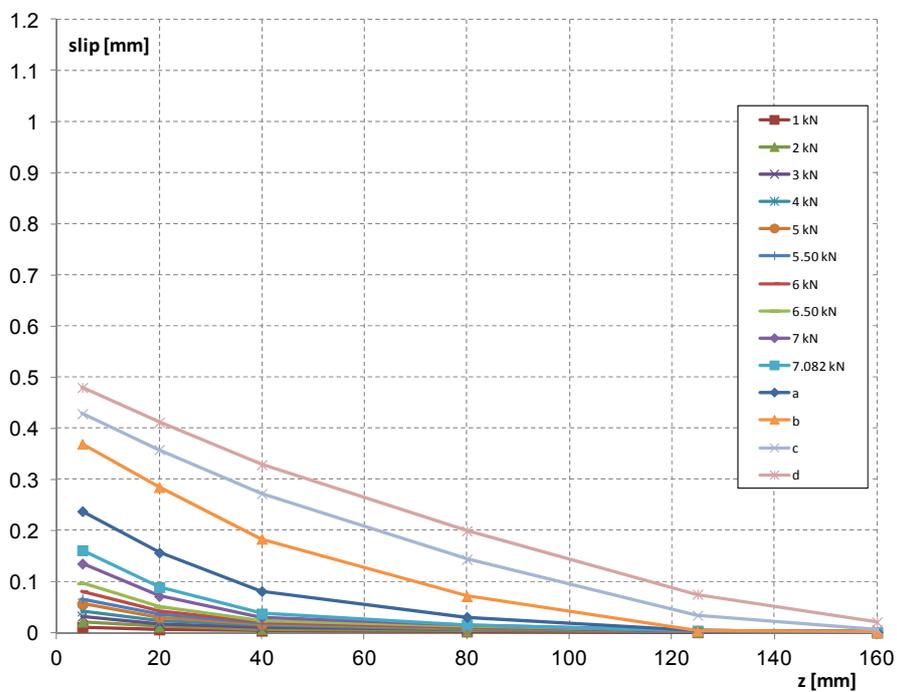


Figura 6.87 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z .

Come completamento alla descrizione della prova svolta si riportano alcune immagini del campione dopo il distacco del rinforzo, che è avvenuto, come nelle altre prove svolte su mattoni non rasati, mediante asportazione di uno strato superficiale di mattone.

Questa modalità è assolutamente quella preferibile perché assicura che il rinforzo è stato applicato correttamente e permette di mobilitare al meglio la resistenza del materiale che è stato rinforzato.

Il distacco di una piccola porzione di mattone sulla parte anteriore indica che la distanza di 30 mm adottata tra bordo del campione e inizio dell'incollaggio non è stata propriamente sufficiente.

Tuttavia va rilevato che, a causa dell'impiego di una lunghezza di ancoraggio molto elevata e pari a 200 mm, le dimensioni del campione non hanno permesso di adottare una distanza maggiore.

Come risulta evidente dalla *figura 6.89*, infatti, ci si è spinti al massimo nell'incollaggio verso il bordo posteriore del campione e un ulteriore arretramento non sarebbe stato possibile.

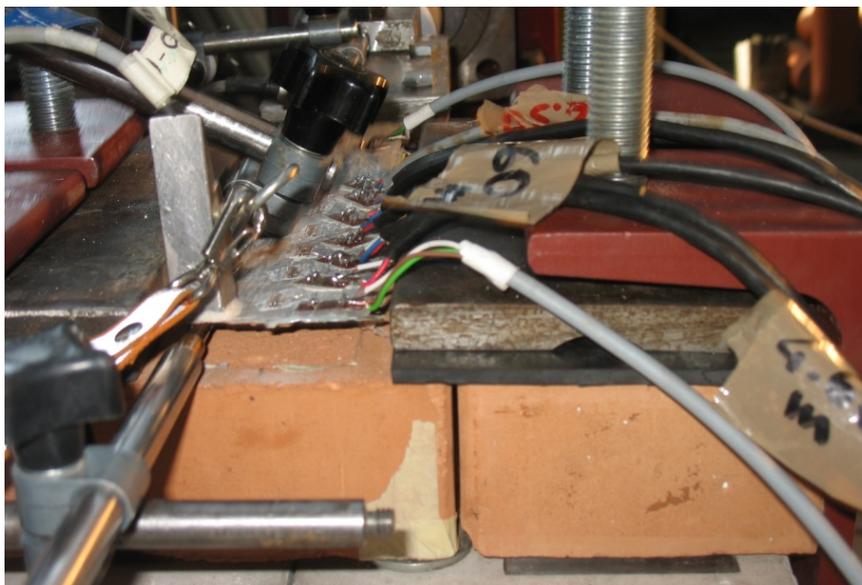


Figura 6.88 - Distacco completo del rinforzo a fine prova.



Figura 6.89 - Superfici al termine della prova B3A2a.

6.2.10 PROVA B3A1a

Con la prova B3A1a, condotta il 17/06/2011, sono terminate le prove sui mattoni singoli di tipo B3 senza rasatura superficiale.

Visto l'esito soddisfacente della prova B3A2a, non è stato ritenuto necessario ripeterla adottando l'intera strumentazione, ma ci si è limitati ad utilizzare la cella di carico per la misura della forza applicata e i trasduttori di spostamento per poi procedere al calcolo dell'allungamento.

In questa prova, pertanto, non è stato applicato alcun estensimetro, né sulla zona incollata, né sul tratto libero.

Gli LVDT sono stati collocati nella stessa posizione delle altre prove eseguite, secondo le modalità descritte al § 5.4.

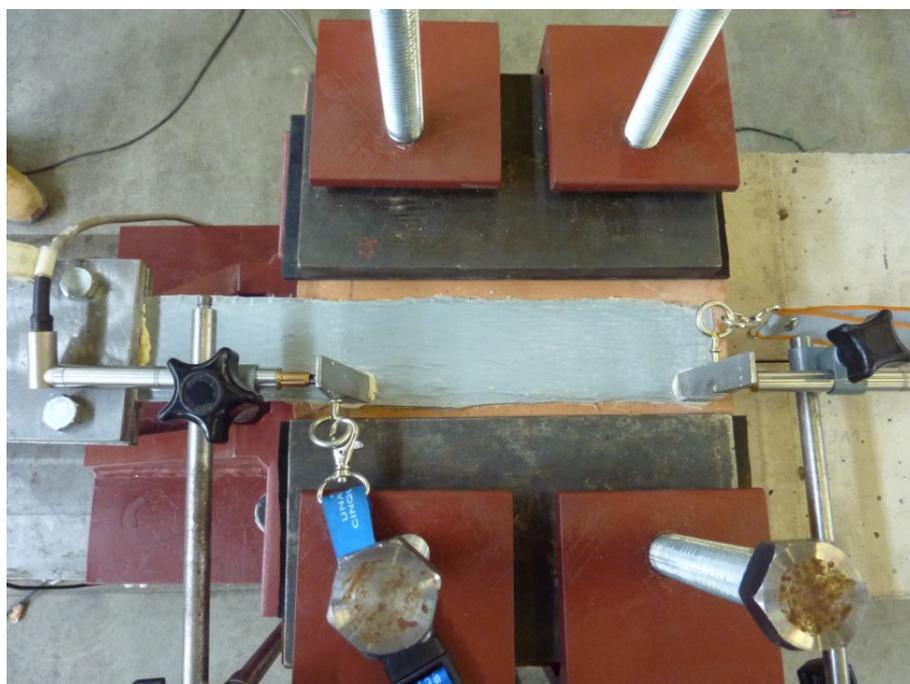


Figura 6.90 - Setup prova B3A1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.9 - Strumenti utilizzati durante la prova B3A1a e canali di acquisizione.

La strumentazione impiegata durante l'esecuzione della prova ha fornito i dati necessari alla costruzione del diagramma carico-allungamento del rinforzo (*figura 6.91*).

Non è stato possibile ovviamente effettuare misure di deformazioni e quindi risalire all'andamento di tensioni tangenziali e scorrimenti a causa dell'assenza degli estensimetri lungo l'asse del composito.

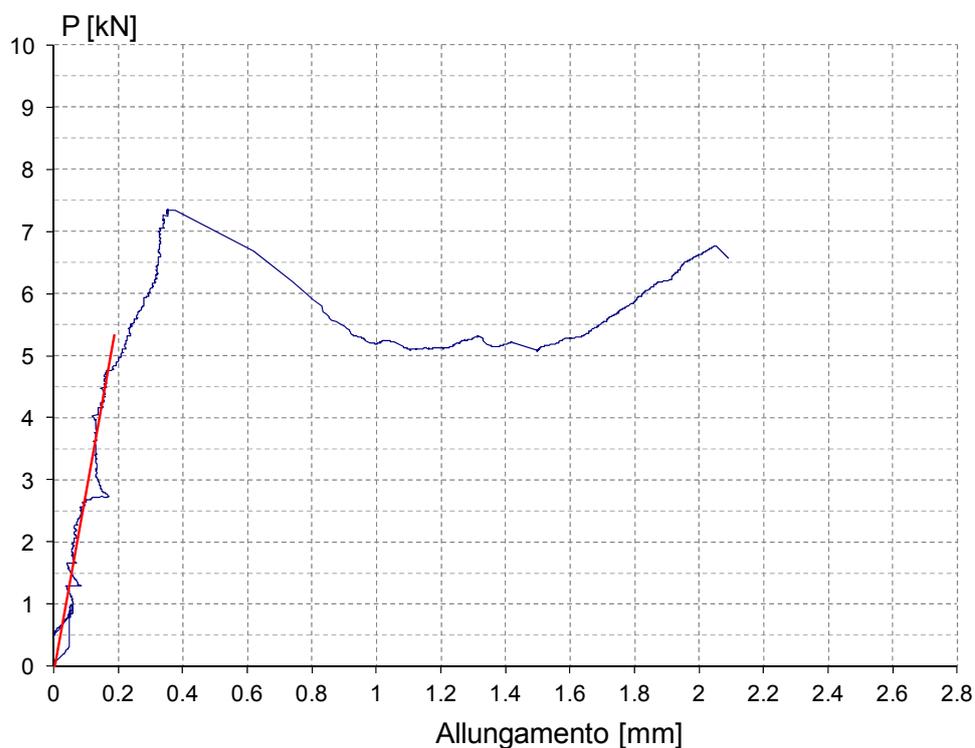


Figura 6.91 - Grafico carico-allungamento (prova B3A1a).

Il grafico è stato ottenuto combinando le letture della cella di carico con l'allungamento misurato allo stesso istante temporale.

Il valore dell'allungamento è stato determinato mediante differenza degli spostamenti registrati rispettivamente dagli induttivi collocati al canale 1 e 2.

Come per le altre prove, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico fino ad un valore massimo della forza applicata di circa 1 kN.

Questo ciclo iniziale, comune a tutte le prove svolte, serve ad assicurare l'assestamento del campione prima dell'esecuzione della prova vera e propria.

Come si può vedere dal grafico, il carico è cresciuto fino a raggiungere un valore di picco pari a 7.356 kN, un valore piuttosto elevato anche in rapporto alle altre prove svolte e comunque maggiore rispetto alla prova B3A2a (dove la registrazione massima è stata di 7.082 kN).

Questo valore conferma le buone caratteristiche del mattone di tipo B3, come già si era visto nel corso della prova precedente.

A conferma delle proprietà del mattone di tipo B3, si ricorda che anche nelle prove di compressione il mattone in oggetto aveva mostrato una resistenza elevata in rapporto alle altre tipologie.

La faccia superiore del campione inoltre risulta più regolare e livellata rispetto ad altri tipi di mattone, come ad esempio i B1 e B4 e ciò favorisce il raggiungimento di carichi più elevati.

Oltre il picco, il campione ha fatto registrare un ramo di softening piuttosto accentuato, che ha visto il carico diminuire fino ad un valore prossimo ai 5 kN, che si è mantenuto pressoché costante per un tratto significativo, con un netto aumento dell'allungamento registrato.

L'ultimo tratto del diagramma, che porta al completo distacco del rinforzo, è nuovamente un tratto a carico crescente, ma con una pendenza sensibilmente inferiore a quella del primo tratto fino al picco.

L'ultimo valore registrato, prima che si assistesse al completo distacco dell'FRP, è stato pari a 6.56 kN.

Il comportamento registrato non è sembrato particolarmente fragile, in quanto dopo il picco si è sviluppato un lungo tratto del diagramma che ha visto aumentare l'allungamento in maniera significativa prima di giungere alla conclusione della prova.

La modalità di distacco del composito è ben visibile in *figura 6.92*: le superfici non mostrano alcun segno di crisi adesiva o mista, ma è avvenuta una pura crisi coesiva con asportazione di parte del substrato.

Inoltre, in tale prova non si è verificato alcun distacco sulla parte anteriore del provino: si tratta di una delle modalità preferibili.

La *figura 6.93* mostra una particolarità di questa prova: sulla superficie del mattone sono chiaramente visibili delle lamelle, tipiche ad esempio delle prove di aderenza condotte su elementi in calcestruzzo.

Si tratta di puntoni compressi, inclinati di 45° rispetto alla direzione di applicazione della forza, che si oppongono allo scorrimento del rinforzo.

Questo meccanismo resistente è visibile solitamente su elementi in calcestruzzo, dove le forze in gioco sono più elevate, ma non è facilmente identificabile sui mattoni o sui muretti utilizzati durante le prove.

Questo è uno dei casi in cui, tuttavia, tale fenomeno è risultato visibile.

Si ricorda che confronti più approfonditi fra le diverse prove svolte, sia tra mattoni dello stesso tipo, sia tra campioni di diversa tipologia, saranno condotti in maniera esaustiva al capitolo 7.



Figura 6.92 - Superfici dopo lo svolgimento della prova B3A1a.



Figura 6.93 - Particolare della superficie del campione.

6.2.11 PROVA M3A1a

Questa prova, eseguita il 29/06/2011, è stata la prima condotta in ordine temporale su campioni di muratura rinforzati con GFRP.

Nella prova in oggetto è stato utilizzato un setup a 7 estensimetri e 2 LVDT, secondo le modalità già descritte ai paragrafi 5.3 e 5.4, oltre ovviamente alla cella di carico, necessaria in tutte le prove svolte.

Gli estensimetri sono stati collocati unicamente sulla zona incollata del rinforzo, senza applicare quelli sul tratto libero per la misura del modulo elastico.

La strumentazione impiegata è visibile in dettaglio in *figura 6.94*, mentre la descrizione degli strumenti e dei canali impiegati è presente all'interno della *tabella 6.10*.

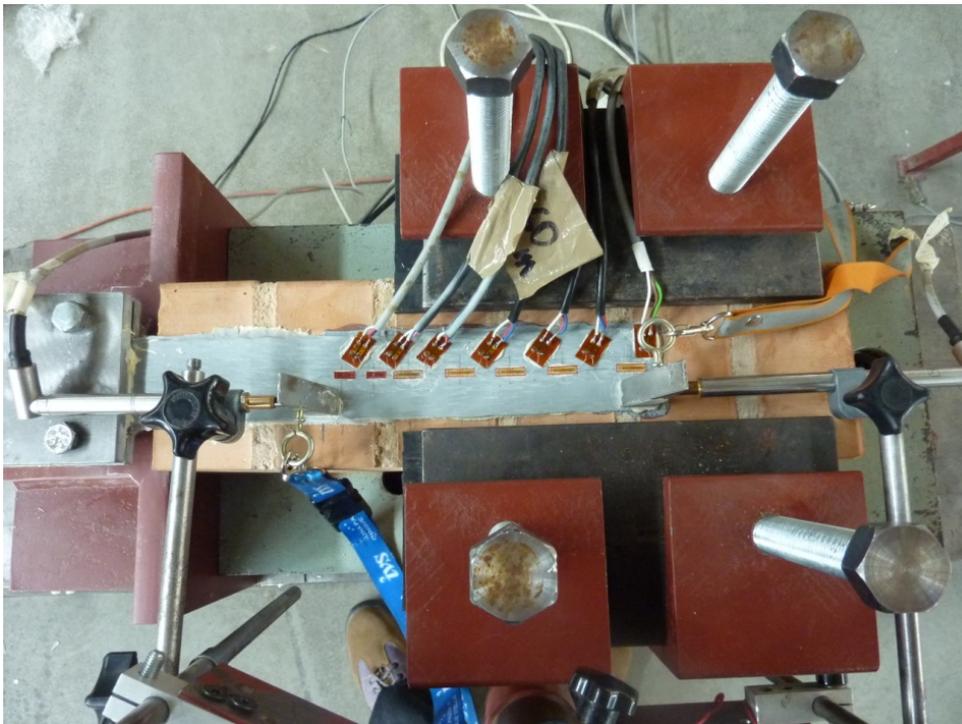


Figura 6.94 - Setup prova M3A1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (6 mm)	lungo zona incollata (M)
4	Estensimetro E2 (6 mm)	lungo zona incollata (M-L)
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata (L-M)
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata (L)

Tabella 6.10 - Strumenti utilizzati durante la prova M3A1a, collocazione (M = mattone, L = letto di malta) e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza dei valori registrati dai trasduttori di spostamento collegati ai canali 1 e 2, è stato possibile innanzitutto costruire il grafico carico-allungamento riportato in *figura 6.95*.

Un'altra possibilità per ottenere il diagramma carico - allungamento è quella di correlare le letture della cella di carico all'allungamento determinato non grazie agli LVDT, ma tramite integrazione delle deformazioni registrate in corrispondenza di tutti i livelli di carico.

La procedura può essere condotta utilizzando la (6.1), riportata al § 6.2.1.

Il risultato ottenuto è mostrato in *figura 6.96*.

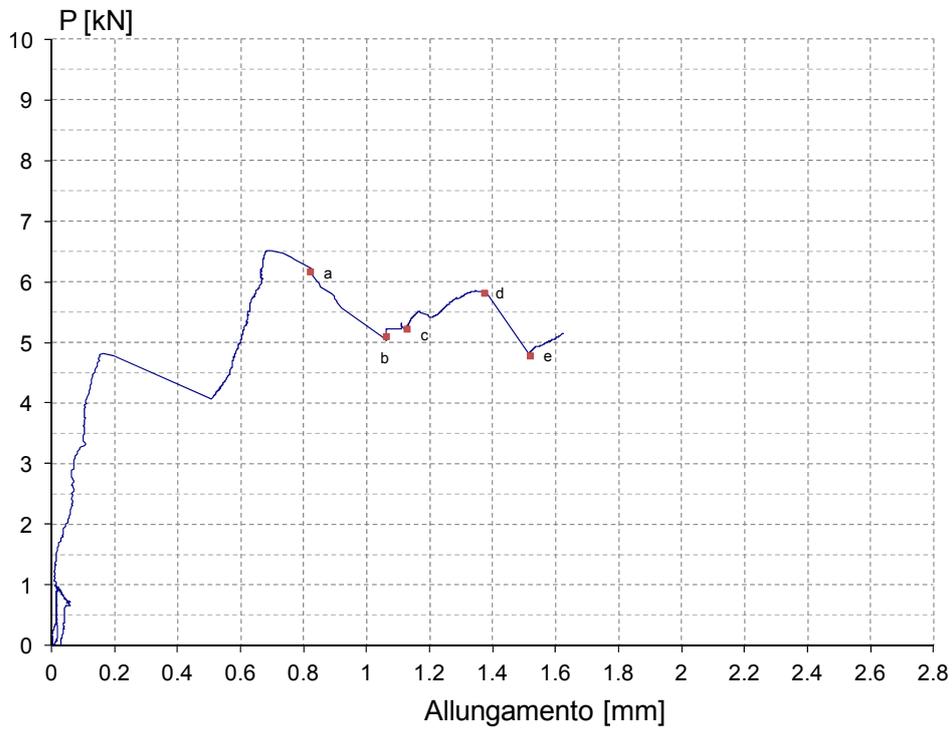


Figura 6.95 - Grafico carico-allungamento ottenuto utilizzando le letture degli LVDT (prova M3A1a).

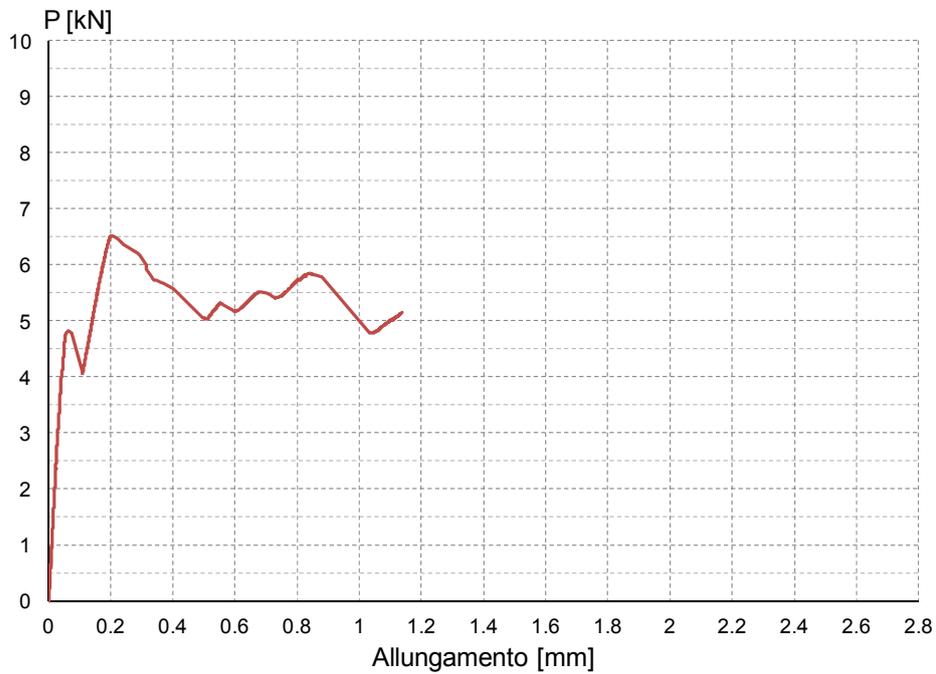


Figura 6.96 - Grafico carico-allungamento ricavato computando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova M3A1a).

Il grafico di *figura 6.95* evidenzia un comportamento ricorrente nelle prove svolte sui muretti, ma che non è mai stato registrato nelle prove condotte sui mattoni: come si può vedere dalla figura, infatti, sono chiaramente evidenziabili diversi gradini (o salti) nel diagramma carico-allungamento.

La genesi di questi gradini va ricercata nelle particolarità che il campione di muratura presenta rispetto ad un singolo mattone: questo infatti è caratterizzato dalla successione di mattoni e giunti di malta, materiali dalle caratteristiche diverse che danno origine ad una diversa penetrazione della resina epossidica e che presentano una diversa resistenza superficiale.

I gradini si possono spiegare facendo riferimento alla *figura 6.97*: come si può vedere, l'incollaggio ha interessato, partendo dalla parte anteriore del campione e procedendo verso la parte posteriore (nella figura da sinistra verso destra), mezzo mattone circa, poi due mattoni interi e infine una piccola parte dell'ultimo mattone.

I gradini riportati nel grafico sono proprio rappresentativi di questa situazione: applicando un carico crescente al rinforzo, questo inizialmente sfrutta il suo ancoraggio sul primo mezzo mattone finché non inizia il distacco di questa parte e si assiste ad una diminuzione del carico registrato (primo gradino del diagramma). Continuando a caricare, il rinforzo è ora ancorato sul secondo mattone e può sfruttare una maggiore resistenza del substrato, quindi il carico può crescere maggiormente rispetto a prima finché non si ha un distacco anche in questa parte (secondo gradino del diagramma).

Procedendo con l'applicazione della forza, il rinforzo è ora ancorato sul terzo mattone e su una porzione dell'ultimo: l'ancoraggio e il distacco in corrispondenza del terzo mattone comportano la nascita di un terzo gradino nel grafico, mentre l'esiguità della zona di ancoraggio sull'ultimo mattone può comportare solo una lieve crescita del carico (ultimo breve ramo del diagramma), finché il composito non si distacca definitivamente.

I gradini sono quindi rappresentativi dell'evoluzione del meccanismo di debonding nel campione: ogni gradino corrisponde all'ancoraggio e al successivo

distacco del rinforzo in corrispondenza di uno dei mattoni che costituiscono il muretto.

Dalla prova è inoltre emerso un altro comportamento interessante: guardando la porzione di substrato che è stata asportata (*figura 6.98*), si vede come la resina epossidica riesca a penetrare meglio nei giunti di malta rispetto alla superficie del mattone e quindi come l'asportazione coinvolga uno strato maggiore di questa (grazie anche alla minore resistenza meccanica) rispetto al mattone.

Ciò comporta la formazione sul composito di veri e propri "denti" di malta, che si oppongono allo scorrimento del rinforzo mediante un effetto di ingranamento.

Questo meccanismo può consentire di raggiungere carichi più elevati e può aiutare a spiegare i maggiori carichi registrati su molti muretti rispetto ai corrispondenti mattoni.

I corsi di malta, quindi, che dovrebbero costituire l'elemento debole da cui dovrebbe originarsi il distacco del composito, in realtà suppliscono a questo effetto mediante formazione di un meccanismo macroscopico di aggrappaggio meccanico.



Figura 6.97 - Collocazione del rinforzo rispetto al campione.

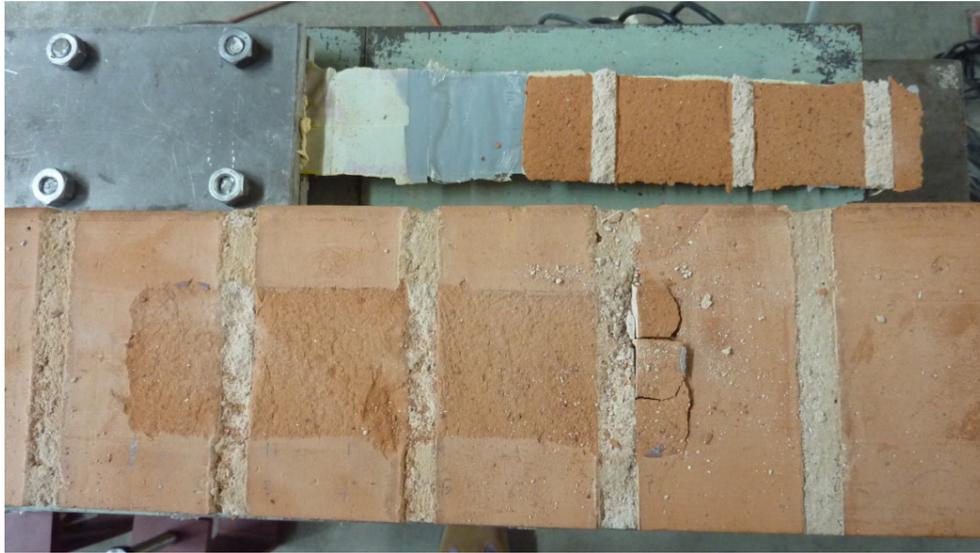


Figura 6.98 - Formazione di denti di malta nel rinforzo

Gli estensimetri collocati nella zona di incollaggio hanno permesso di registrare le deformazioni che si sono verificate in questa area.

In *figura 6.99* sono indicate le letture degli estensimetri in funzione del carico applicato, mentre in *figura 6.100* viene riportato l'andamento delle deformazioni lungo l'asse del rinforzo in riferimento ai livelli di carico fissati, senza alcuna correzione rispetto ai valori effettivamente rilevati.

Le correzioni da apportare al diagramma delle deformazioni sono già state motivate al § 6.2.1 e permettono di ottenere l'andamento indicato in *figura 6.101*.

Il diagramma modificato appare assolutamente più regolare di quello senza correzioni: quest'ultimo infatti ha mostrato, durante la fase di debonding, un picco marcato nella prima parte (giustificabile considerando gli effetti flessionali locali a cui poteva essere soggetto il rinforzo, anche in virtù della formazione dei denti di malta, che possono aver contribuito a creare questa inflessione), seguito dalla lettura del secondo estensimetro sempre molto bassa, addirittura negativa in molte fasi.

La collocazione del secondo estensimetro, a cavallo tra mattone e letto di malta, può essere sufficiente a spiegare questo andamento anomalo, che tuttavia potrebbe essere stato determinato anche da un malfunzionamento dello strumento.

Visto che questi fenomeni locali non offrono una spiegazione del fenomeno di debonding nella sua globalità, si è scelto nel diagramma modificato di trascurare questa lettura e affidarsi a quelle adiacenti.

Inoltre, come già spiegato al § 6.2.1, è stato adottato come criterio quello di considerare come massimo valore ammissibile di deformazione quello teorico ricavabile dalla (6.2).

Queste considerazioni hanno portato al tracciamento del diagramma corretto riportato in *figura 6.101*.

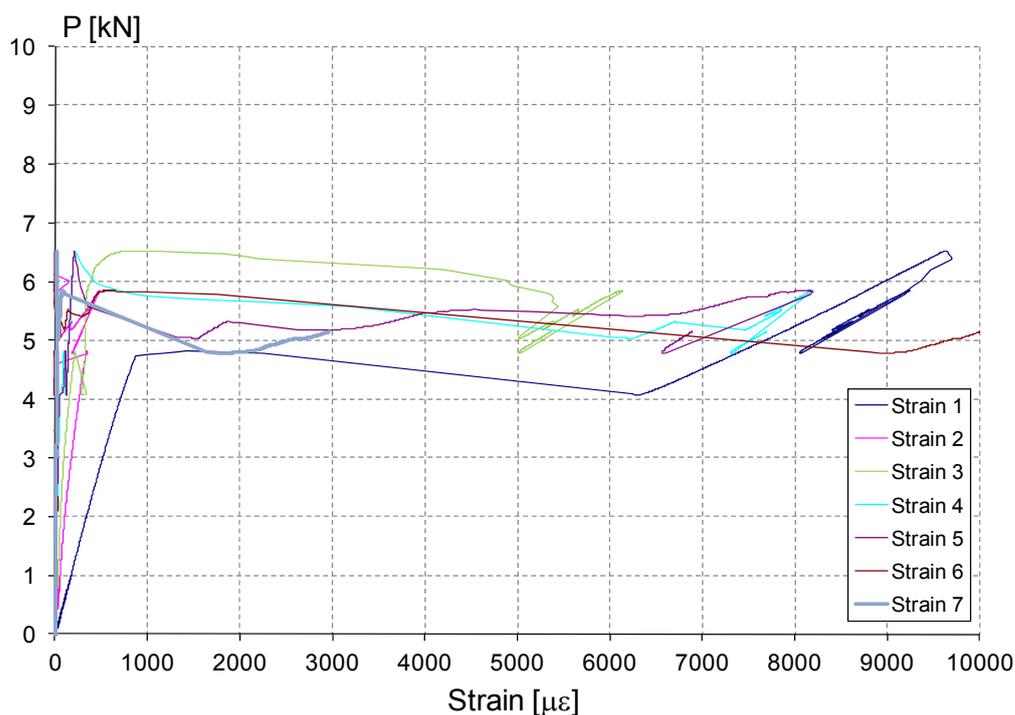


Figura 6.99 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova M3A1a).

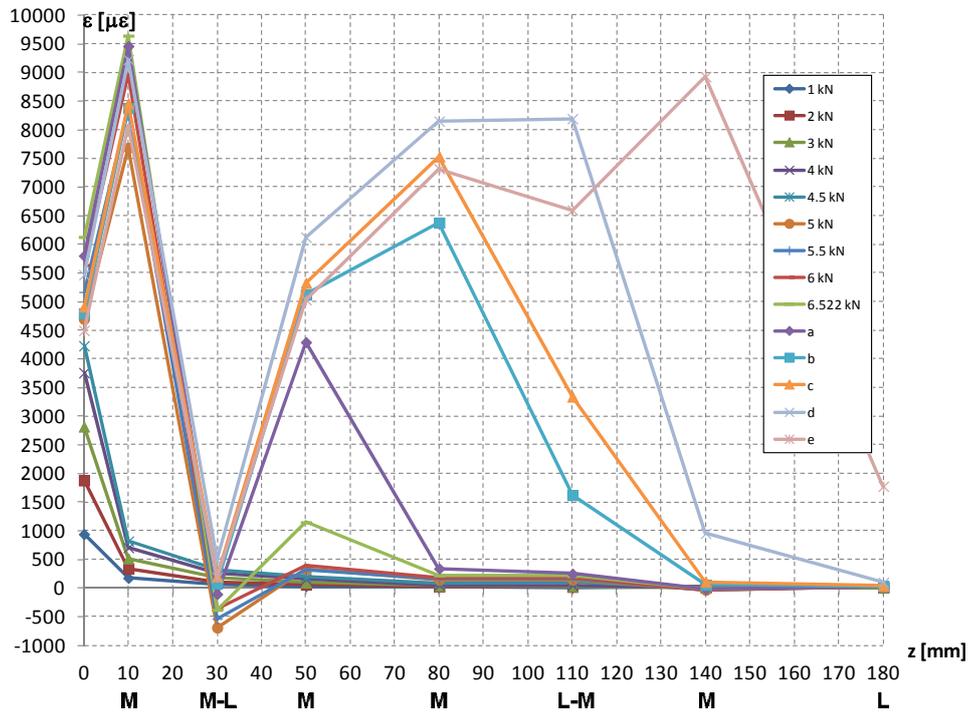


Figura 6.100 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo nella prova M3A1a (diagramma originale).

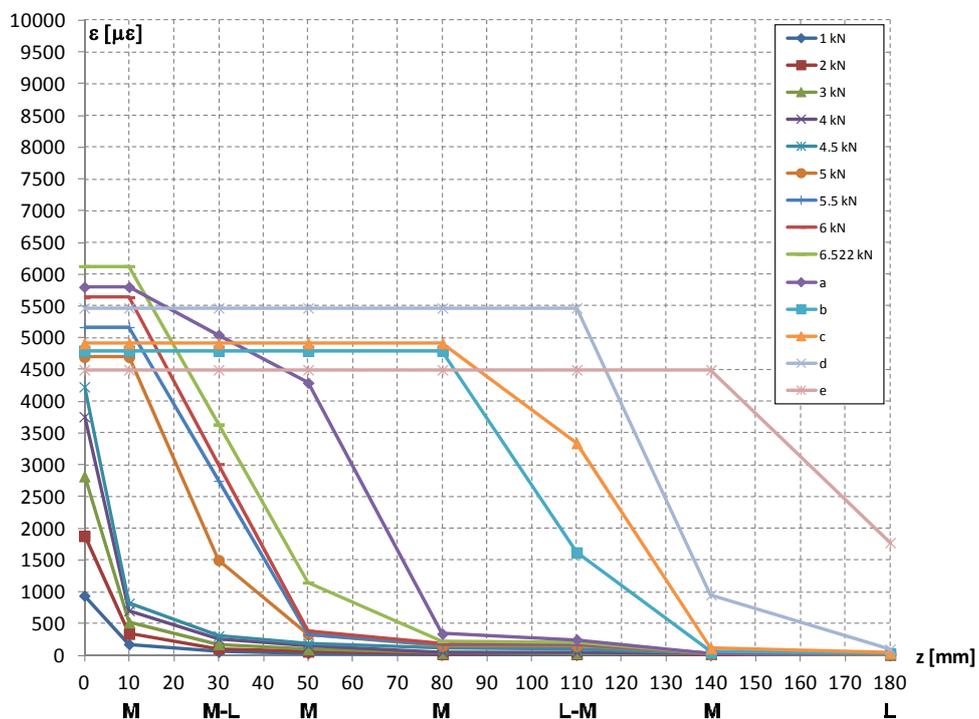


Figura 6.101 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate nel corso della prova M3A1a (diagramma modificato).

Utilizzando le deformazioni riportate nel diagramma corretto in funzione dei livelli di carico indicati e facendo uso della (6.3) è stato possibile determinare l'andamento delle tensioni tangenziali lungo l'asse del rinforzo (*figura 6.102*).

Il diagramma merita una considerazione: il primo tratto dove si verifica il picco della tensione tangenziale (a partire dalla curva corrispondente ad un livello di carico di 5 kN) appare piuttosto strano e schiacciato, cosa che lascia presupporre che il picco si sia verificato nella zona dove non si aveva una efficace lettura della deformazione, ovvero circa in mezzeria del tratto orizzontale.

In *figura 6.103* viene invece presentato l'andamento degli scorrimenti lungo il composito in funzione dei diversi livelli di carico, ottenuto utilizzando le espressioni (6.4) e (6.5).

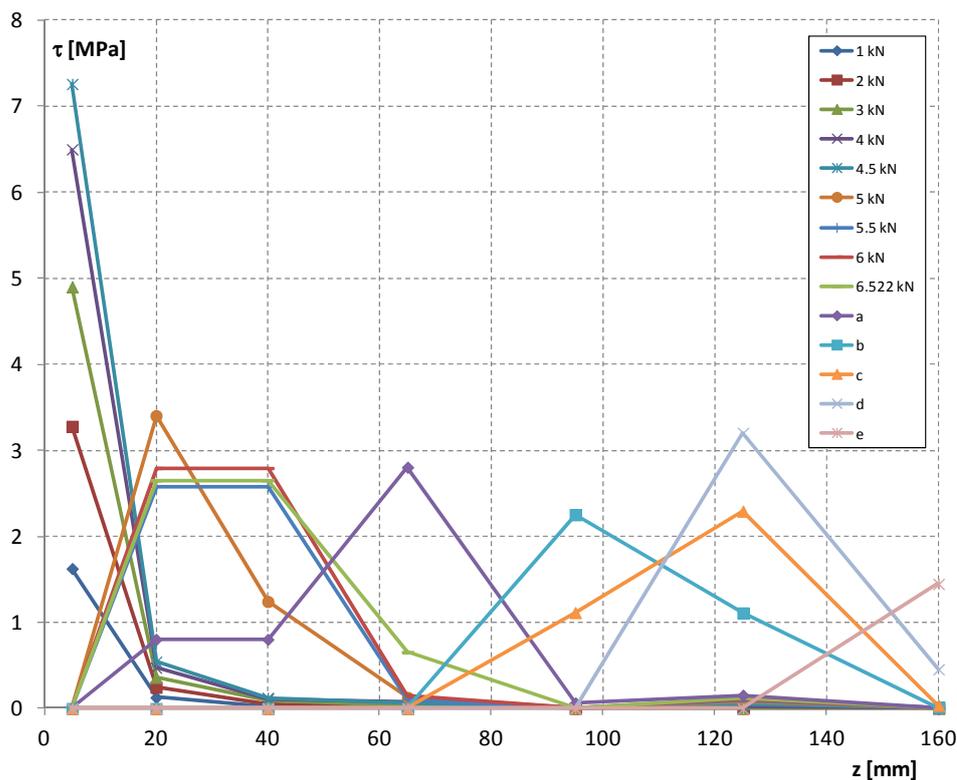


Figura 6.102 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova M3A1a).

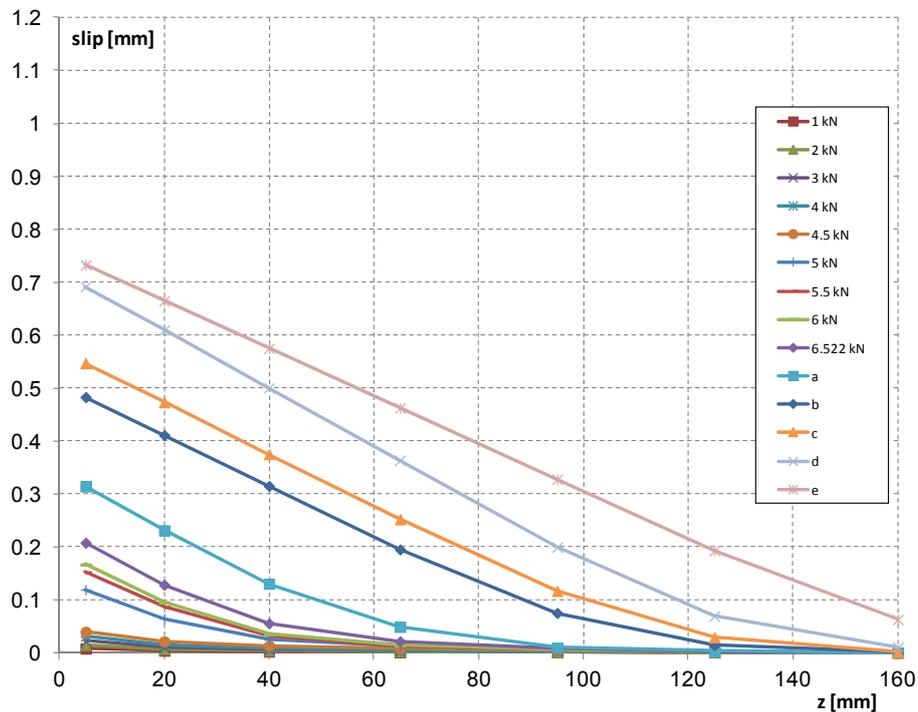


Figura 6.103 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova M3A1a).

Per completare la descrizione della prova svolta, si riportano alcune immagini che mostrano il campione al termine della prova, a distacco del rinforzo avvenuto (figure 6.104 e 6.105).

Il distacco è avvenuto correttamente attraverso asportazione di una parte del substrato, ma a differenza dei mattoni singoli si è formata una evidente dentatura in corrispondenza dei letti di malta che, come già descritto precedentemente, ha contribuito a impedire, per quanto possibile, lo scorrimento del composito, determinando probabilmente una crescita della forza massima applicabile al rinforzo.



Figura 6.104 - Superfici al termine della prova M3A1a.



Figura 6.105 - Particolare del substrato (prova M3A1a).

6.2.12 PROVA M3A1c

Questa prova è stata eseguita in data 07/07/2011, utilizzando una strumentazione composta dalla cella di carico e da due trasduttori di spostamento.

In questo caso non sono stati collocati estensimetri, né sulla zona incollata, né sul tratto libero del rinforzo.

Gli strumenti impiegati sono visibili in dettaglio in *figura 6.106* e sono descritti all'interno della *tabella 6.11*, unitamente ai canali di acquisizione utilizzati.

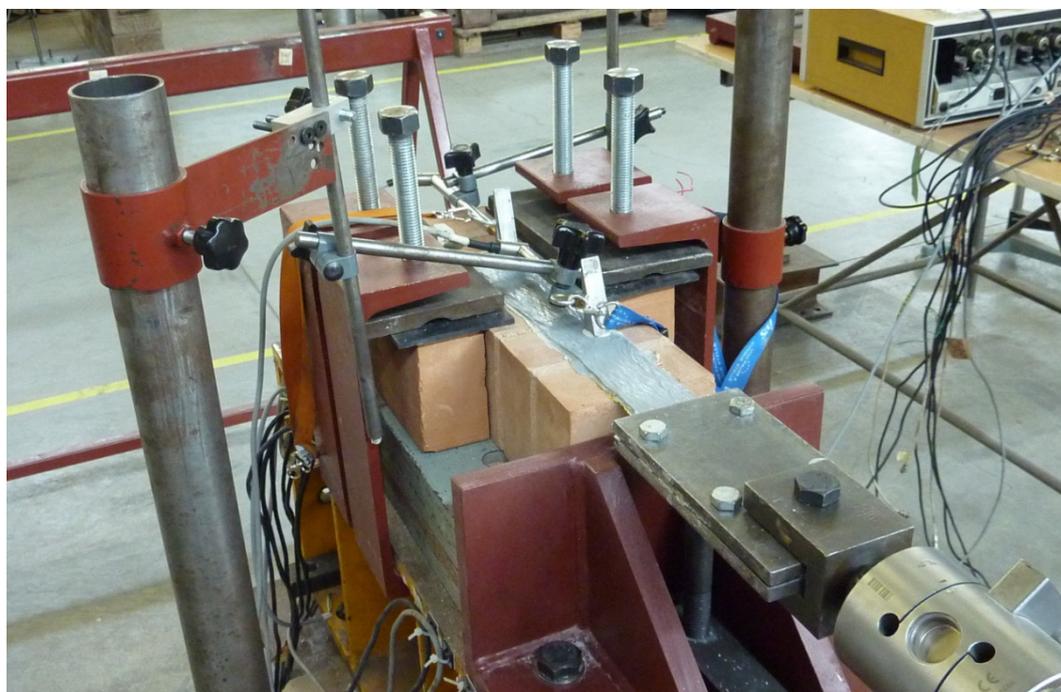


Figura 6.106 - Setup prova M3A1c.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.11 - Strumenti utilizzati durante la prova M3A1c e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza dei valori registrati dagli LVDT collegati ai canali 1 e 2, è stato possibile costruire il grafico carico-allungamento del composito (*figura 6.107*).

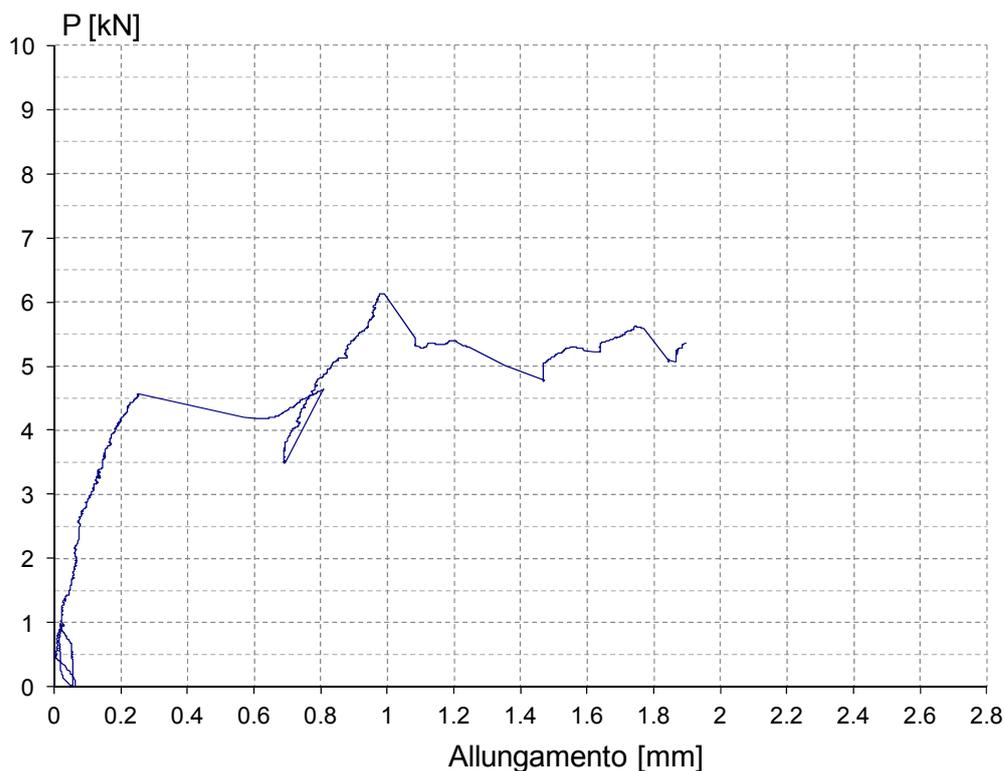


Figura 6.107 - Diagramma carico-allungamento (prova M3A1c).

Il grafico, come già evidenziato nel corso della prova M3A1a, mostra i tipici salti, che sono risultati ricorrenti in molte prove svolte sui muretti non rasati.

La loro origine va ricercata sicuramente nel passaggio da un mattone al successivo nel corso della fase di debonding, secondo quanto già descritto al § 6.2.11.

Nel diagramma si nota anche un altro particolare interessante: dopo il primo picco e la successiva lieve discesa del carico, si assiste infatti a un improvviso cappio prima di procedere con il successivo ramo di crescita.

Questo evento è giustificabile fisicamente facendo riferimento alla *figura 6.108*: durante la prova infatti è avvenuta una improvvisa rottura del campione in corrispondenza dell'ultimo letto di malta, che ha originato un lieve movimento del muretto, con gli effetti visibili nel grafico.

Si fa presente che, nonostante la *figura 6.108* si riferisca alla fase in cui si era già verificato il completo distacco del rinforzo, in realtà la rottura è avvenuta ben prima, nel corso dello svolgimento della prova.

A distacco del composito avvenuto è stato possibile osservare ancora una volta come si siano formate i classici rilievi in corrispondenza dei letti di malta tipici delle prove su muretti non rasati.

La loro formazione è motivata dal fatto che la resina epossidica riesce a penetrare meglio nei giunti di malta rispetto alla superficie del mattone e quindi l'asportazione del substrato va a coinvolgere uno strato di maggior spessore di questa, grazie anche alla minore resistenza meccanica rispetto al mattone.

Ciò, come già visto, comporta la formazione di una vera e propria dentatura, che si oppone macroscopicamente allo scorrimento del rinforzo.

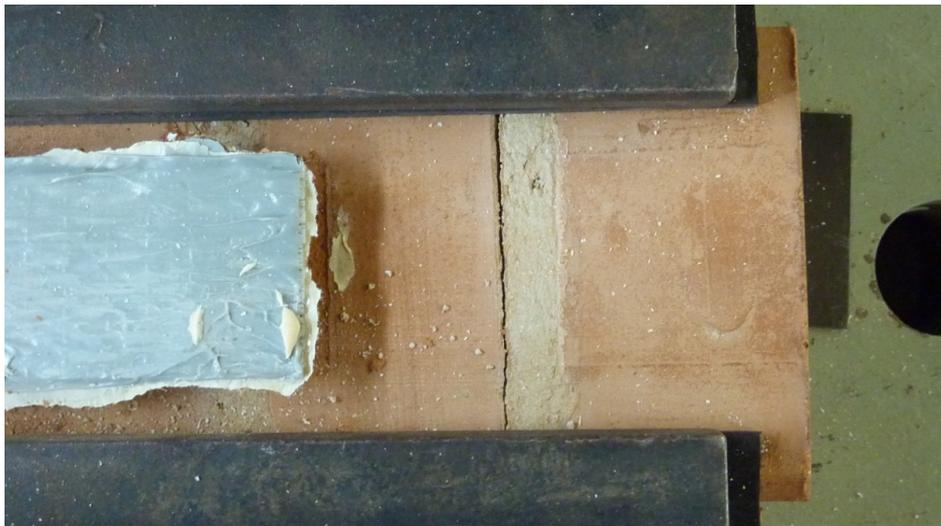


Figura 6.108 – Rottura del campione durante la prova.

A completamento della descrizione della prova svolta, si riportano alcune immagini che mostrano il campione al termine della prova, a distacco del rinforzo avvenuto (*figure 6.109 e 6.110*).

Il distacco è avvenuto correttamente attraverso asportazione di una parte del substrato, ma a differenza dei mattoni singoli è ben visibile la dentatura che si è formata in corrispondenza dei letti di malta.



Figura 6.109 – Campione M3A1c al termine della prova.



Figura 6.110 – Superficie del muretto al termine della prova M3A1c.

6.2.13 PROVA B4A1a

Con la prova B4A1a, eseguita il 10/06/2011 è stato testato anche l'ultimo tipo di mattone disponibile: quello di recupero.

La strumentazione utilizzata è indicata nella *tabella 6.12*, insieme ai canali di acquisizione utilizzati.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (6 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (6 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (6 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.12 - Strumenti utilizzati durante la prova B4A1a e canali di acquisizione.

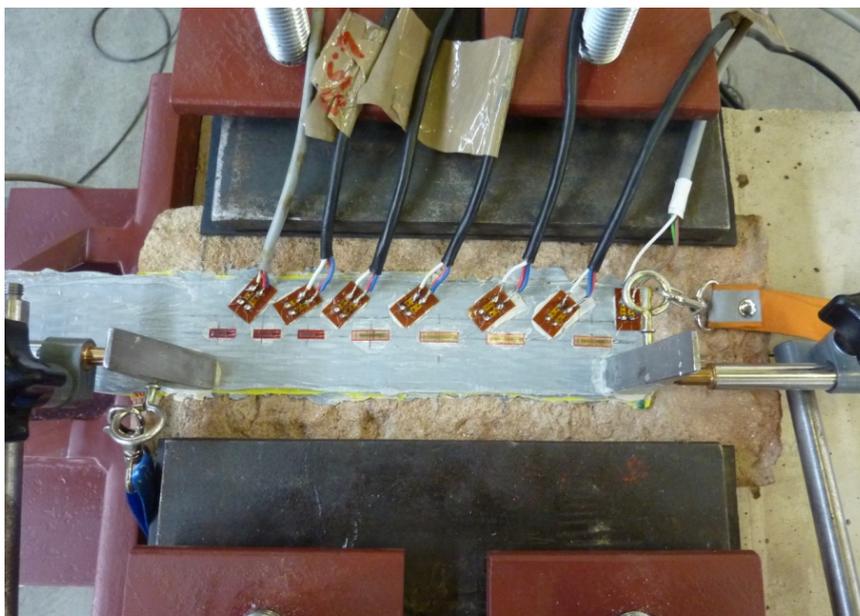


Figura 6.111 - Setup prova B4A1a.

Si tratta degli strumenti impiegati anche nelle altre prove, con un setup composto da 7 estensimetri sulla zona incollata, 2 LVDT e dalla cella di carico (*figura 6.111*).

L'impiego di 3 estensimetri di caratteristiche diverse all'inizio della zona di incollaggio (caratterizzati da una base minore) è stato suggerito dalla presenza di evidenti irregolarità superficiali del mattone e dalla distanza ravvicinata degli strumenti stessi.

Gli estensimetri sul tratto libero per la misura del modulo elastico in questa prova non sono stati impiegati.

Prima dell'esecuzione della prova, un particolare del campione è risultato subito evidente: la diffusa irregolarità della faccia superiore del campione, infatti, avrebbe potuto creare problemi, in quanto l'eventuale sfregamento del rinforzo contro una protuberanza piuttosto tagliente sarebbe stato in grado di determinarne il danneggiamento (*figura 6.112*).

Fortunatamente, dopo aver messo il rinforzo applicato sul campione in asse rispetto al sistema di tiro, è risultato evidente come questa problematica, anche se per poco, non si sarebbe verificata.

L'irregolarità della faccia del campione, tuttavia, ha giocato un altro ruolo: scongiurato il possibile danneggiamento, infatti, una superficie così disomogenea avrebbe potuto sicuramente determinare la nascita di effetti locali rilevanti sul composito.

Questi effetti, uniti a possibili flessioni determinate da un allineamento non perfetto dell'asse di tiro (problematica che si può ridurre, ma mai del tutto eliminare), sarebbero stati in grado di causare un apprezzabile aumento delle tensioni agenti sul composito.

Ciò, purtroppo, si è effettivamente verificato nel corso della prova e ha causato la rottura del rinforzo, prima che questo completasse il distacco dal supporto (*figura 6.113*).



Figura 6.112 - Particolare della superficie irregolare del mattone.

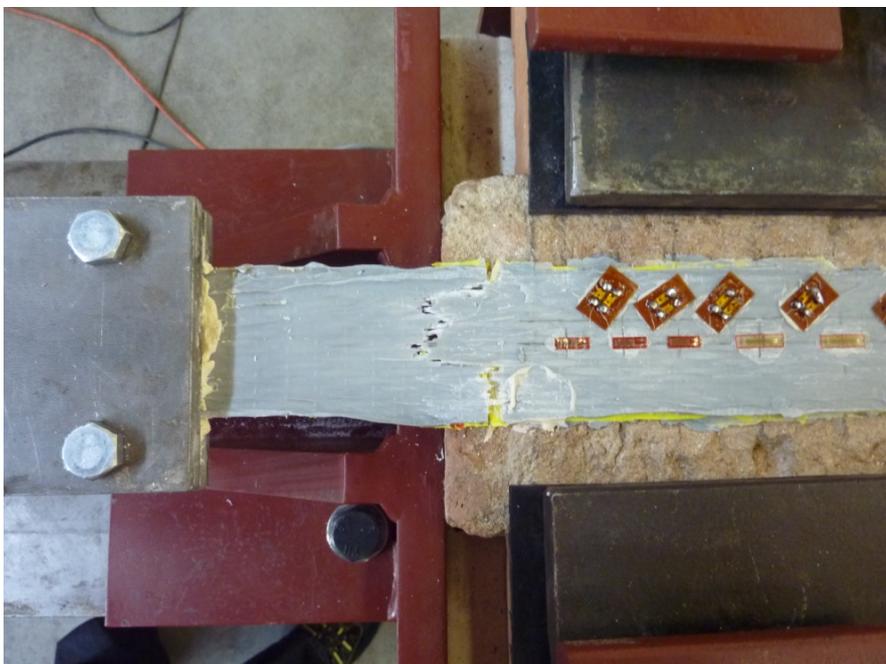


Figura 6.113 - Rottura del rinforzo prima di giungere al completo distacco dell'FRP dal supporto.

Nella descrizione dei risultati ottenuti in questa prova, quindi, tutti i diagrammi termineranno con un carico che non è stato quello che ha condotto al completo debonding del rinforzo, ma quello che ha determinato invece la rottura del rinforzo stesso.

Il diagramma carico – allungamento (*figura 6.114*) termina in corrispondenza di un carico pari a 7.38 kN.

Lo stesso diagramma, ottenuto però calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni (applicando la relazione (6.1)), mostra un andamento simile.

Occorre subito soffermarsi sul carico di picco registrato, che è risultato decisamente elevato in confronto alle altre tipologie di mattone testate: sembra che la rugosità della superficie di questo mattone, decisamente maggiore rispetto agli altri, aiuti a raggiungere una migliore aderenza tra FRP e substrato.

Questa caratteristica superficiale, unita alla resistenza dei mattoni di tipo B4 piuttosto elevata, può spiegare il carico raggiunto che, senza la rottura del rinforzo, sarebbe risultato ancora più elevato.

La rugosità superficiale, infatti, può determinare il coinvolgimento di uno strato più ampio di mattone durante la fase di distacco del composito (grazie alla maggiore penetrazione della resina epossidica) e può quindi portare ad un aumento dell'energia di frattura con conseguente innalzamento della forza massima sopportabile dal campione.

Essa, inoltre, può favorire l'instaurarsi di un meccanismo di aggrappaggio meccanico migliore e quindi favorevole all'aderenza (cfr. § 1.8).

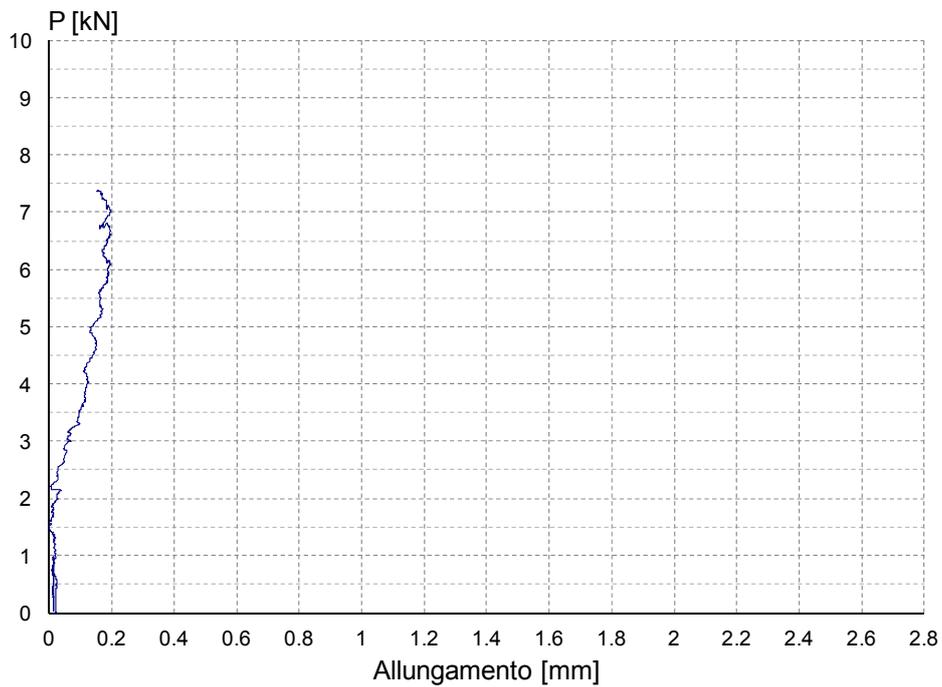


Figura 6.114 - Grafico carico-allungamento ottenuto utilizzando le letture degli LVDT (prova B4A1a).

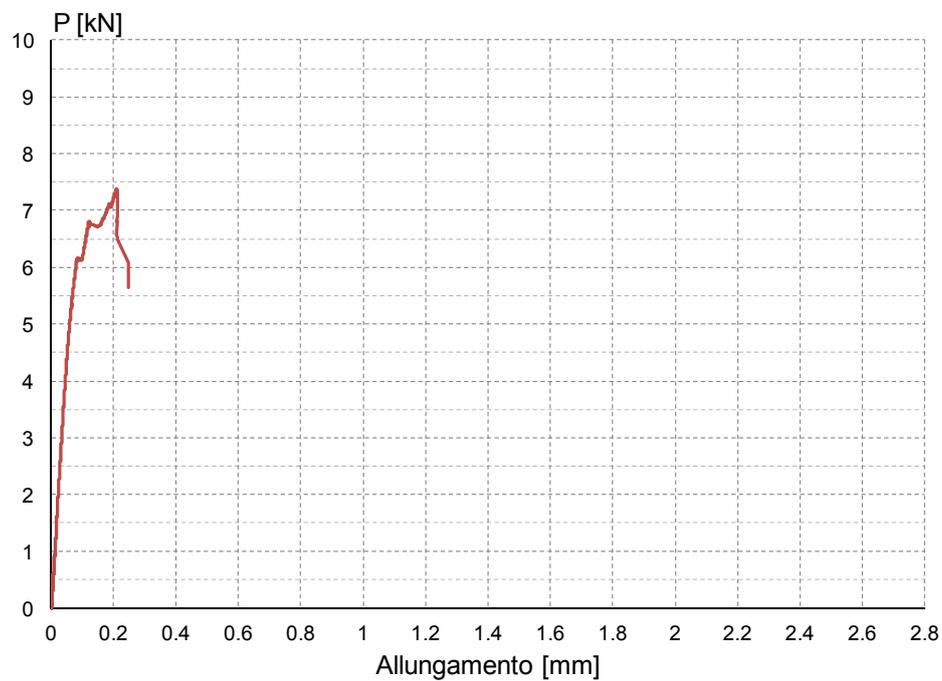


Figura 6.114b - Grafico carico-allungamento ricavato computando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova B4A1a).

Terminate queste considerazioni preliminari, si riportano le deformazioni registrate dagli estensimetri durante la prova in funzione del carico applicato (*figura 6.115*).

L'andamento delle deformazioni lungo l'asse del rinforzo, in funzione dei livelli di carico scelti, è invece rappresentato in *figura 6.116*.

Questa figura si riferisce ai valori effettivamente registrati durante la prova, quindi si tratta del diagramma originale (non modificato).

Il diagramma corretto, invece è rappresentato in *figura 6.117*.

Per completezza, si riportano comunque a seguire i diagrammi ricavati dall'elaborazione dei dati ottenuti fino alla rottura del rinforzo.

Il diagramma di *figura 6.118* offre una visione dell'evoluzione delle tensioni tangenziali d'interfaccia che concorda con le deformazioni riportate in *figura 6.117*: come si può vedere dalla posizione del picco, infatti, il distacco del composito stava interessando solo la parte iniziale della zona di incollaggio.

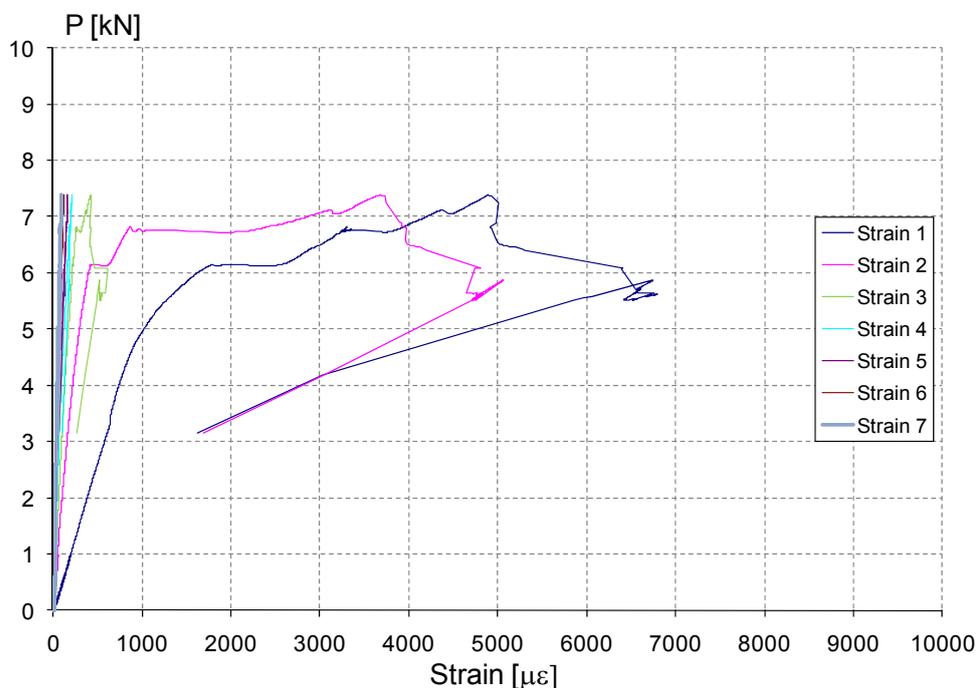


Figura 6.115 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B4A1a).

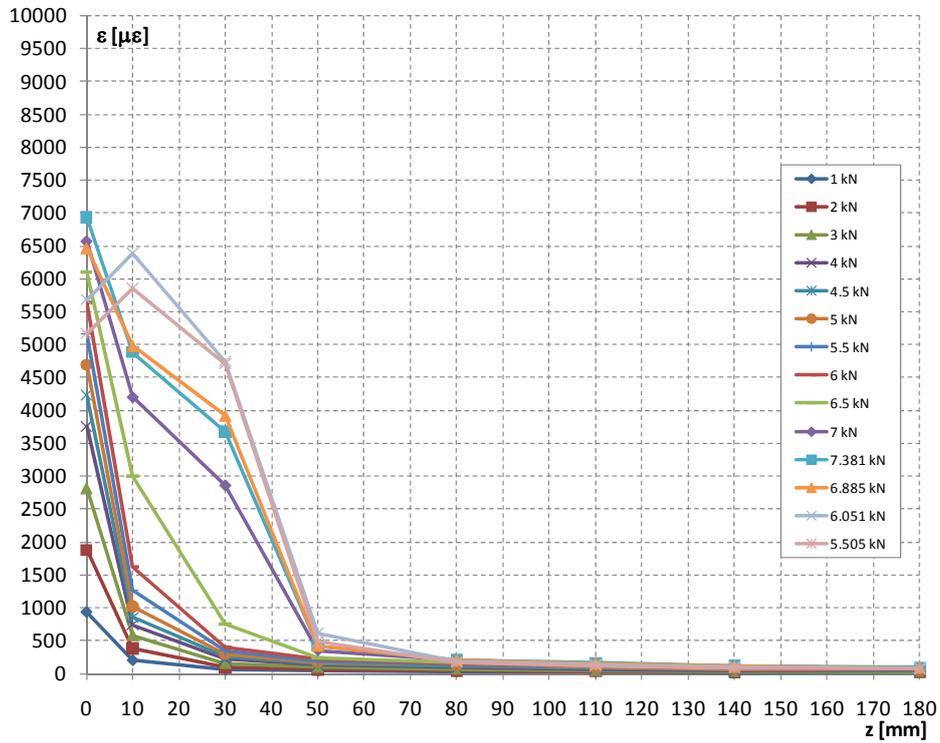


Figura 6.116 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova B4A1a (diagramma originale)

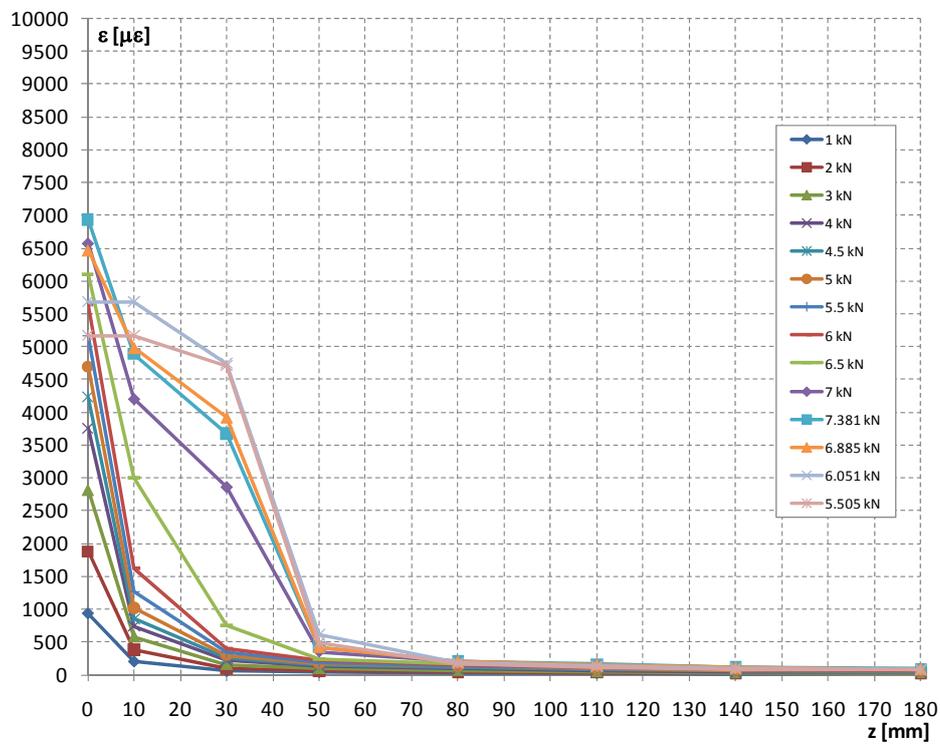


Figura 6.117 - Deformazioni lungo il rinforzo nella prova B4A1a (diagramma modificato).

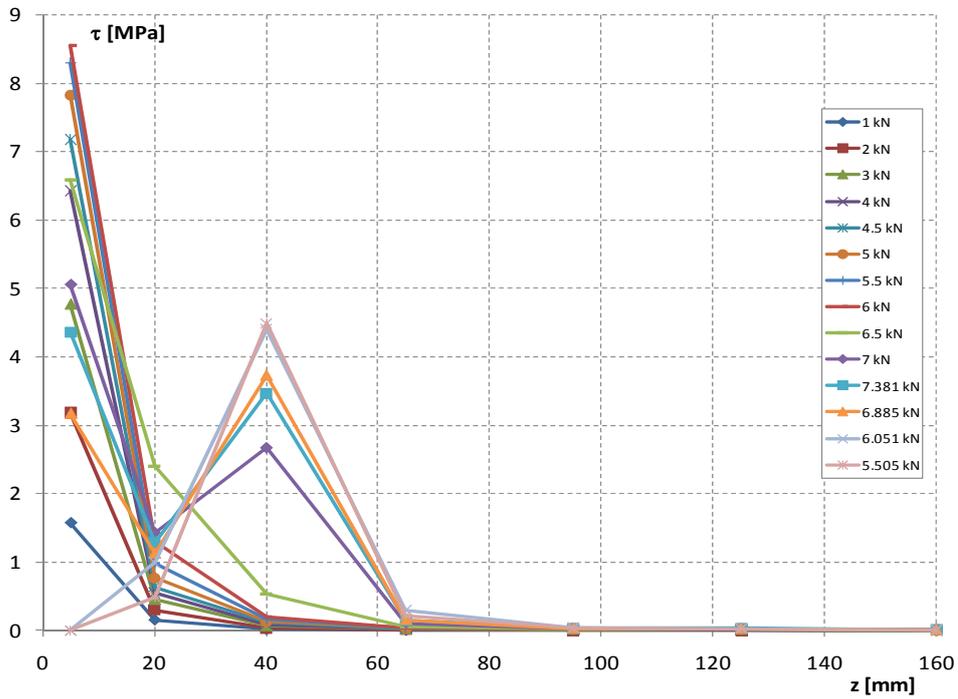


Figura 6.118 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito nella prova B4A1a.

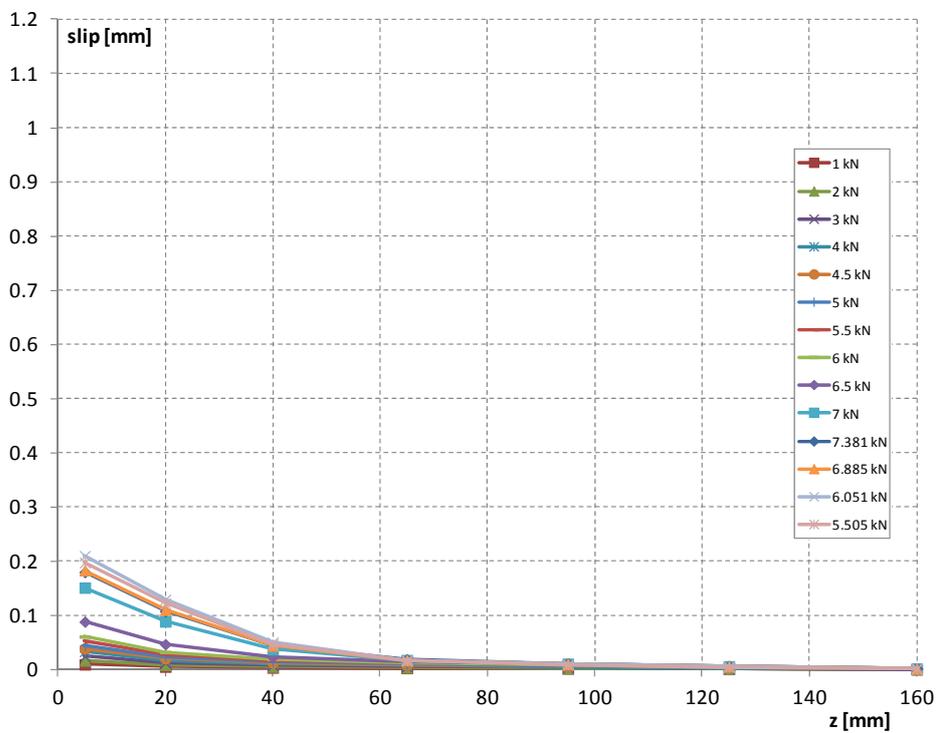


Figura 6.119 - Scorrimenti lungo l'asse del composito in funzione dei diversi livelli di carico (prova B4A1a).

6.2.14 PROVA B4A2a

La prova B4A2a è stata condotta il 15/06/2011, utilizzando la stessa strumentazione utilizzata anche per la prova B4A1a, ovvero applicando sul campione 7 estensimetri sulla zona incollata, 2 trasduttori di spostamento e utilizzando, come al solito, la cella di carico per la misurazione del carico applicato.

Questa prova può essere vista come una ripetizione della prova B4A1a, visto che prevede l'utilizzo della stessa tipologia di mattone e della stessa strumentazione.

Ciò si è reso necessario a causa della rottura imprevista del rinforzo che si è verificata nel corso dello svolgimento della prova precedente.

La strumentazione utilizzata, unitamente ai canali impiegati per l'acquisizione, è indicata nella *tabella 6.13*.

Anche in questa prova non sono stati impiegati estensimetri sul tratto libero per la misura del modulo elastico.

Il setup utilizzato è visibile in *figura 6.120*.

Anche per questo campione, come per il precedente B4A1a, va segnalata una marcata irregolarità della superficie sulla parte anteriore dello stesso (*figura 6.121*).

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (6 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (6 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (6 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.13 - Descrizione della strumentazione impiegata durante la prova B4A2a.

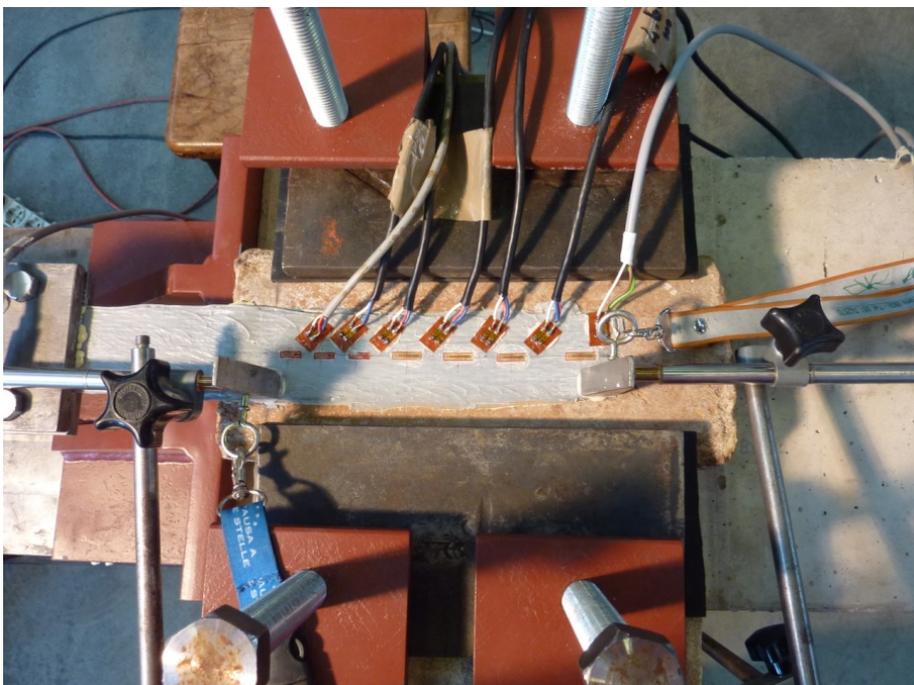


Figura 6.120 - Setup prova B4A2a.



Figura 6.121 - Irregolarità del mattone sulla parte anteriore.

La presenza di una evidente protuberanza, ben più marcata rispetto al campione B4A1a, avrebbe potuto causare un danneggiamento del rinforzo, ma fortunatamente ciò non è avvenuto.

Una irregolarità così evidente, tuttavia, gioca un ruolo importante nell'insorgere di eventi flessionali di tipo locale e di tensioni di peeling nella concavità successiva, con queste ultime che possono ridurre in maniera significativa la forza necessaria a provocare il distacco del rinforzo.

Questa problematica purtroppo non è eliminabile in provini così irregolari: una eventuale regolarizzazione della superficie del mattone prima dell'applicazione del rinforzo, infatti, sarebbe stata possibile, ma avrebbe comunque condizionato la prova, visto che sarebbe stata coinvolta una parte del mattone molto più interna rispetto a quella utilizzata normalmente nel rinforzo.

Le caratteristiche di questa superficie, spesso, proprio per il processo di fabbricazione del mattone, sono significativamente diverse da quelle della superficie esterna.

Va rilevato inoltre che, a rigore, anche la faccia superiore del mattone non è quella di applicazione del rinforzo nei casi reali, ma una applicazione del rinforzo sulla faccia laterale sarebbe stata praticamente irrealizzabile.

Perciò la scelta è stata quella di condizionare il meno possibile la prova, lasciando senza trattamento le irregolarità sulla superficie del mattone.

Il primo diagramma che è stato possibile ricavare dalla prova è quello carico – allungamento (*figura 6.122*).

Tale diagramma è stato costruito utilizzando, come nelle prove precedenti, le letture della cella di carico (per la valutazione della forza applicata) e i valori registrati dagli LVDT (per il calcolo dell'allungamento del rinforzo).

Il grafico carico-allungamento costruito calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate dagli estensimetri per tutti i livelli di carico è riportato invece in *figura 6.123*.

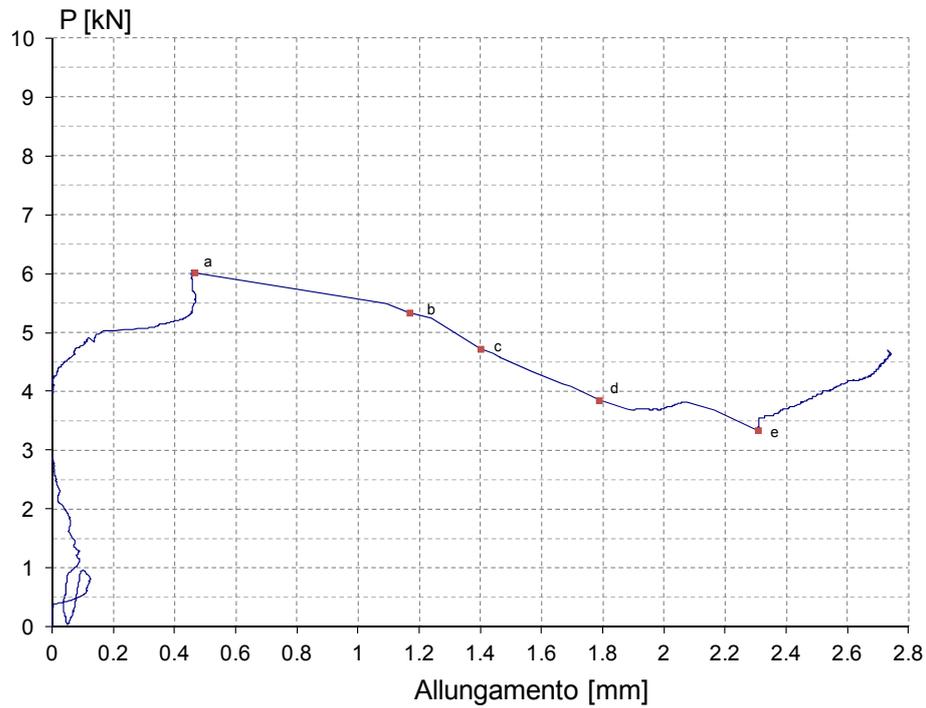


Figura 6.122 - Grafico carico-allungamento ottenuto utilizzando le letture degli LVDT (prova B4A2a).

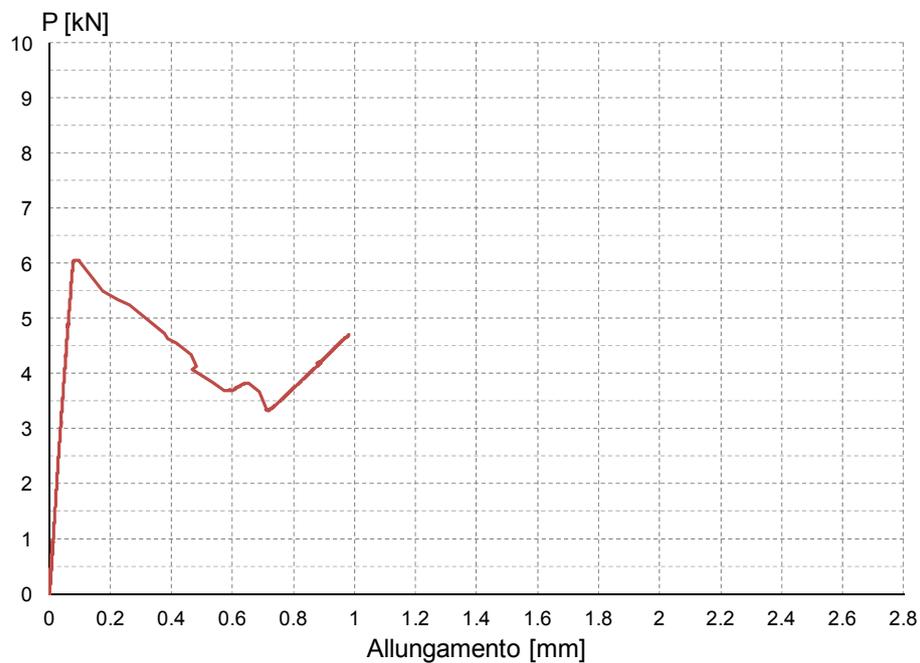


Figura 6.123 - Grafico carico-allungamento ricavato computando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova B4A2a).

Come consuetudine, è stato condotto un ciclo di carico-scarico giungendo fino ad un livello di 1 kN per permettere l'assestamento del campione, poi ha avuto inizio la prova vera e propria, condotta in controllo di spostamento.

Va rilevato che, in questo specifico caso, la pendenza iniziale del diagramma ricavata attraverso l'impiego dei trasduttori di spostamento risulta ben poco attendibile.

L'andamento può essere spiegato ammettendo che ci siano stati movimenti o rotazioni indesiderate di uno dei due LVDT (molto probabilmente il primo, posizionato all'inizio della zona di incollaggio).

Per questo risulta più conveniente affidarsi alla pendenza del primo tratto ricavata calcolando l'allungamento attraverso integrazione delle deformazioni, mentre il tratto dopo il picco, così come riportato in *figura 6.122*, risulta convincente.

Il diagramma proposto, in sostituzione di quello sperimentale di *figura 6.122*, viene indicato in *figura 6.123b*.

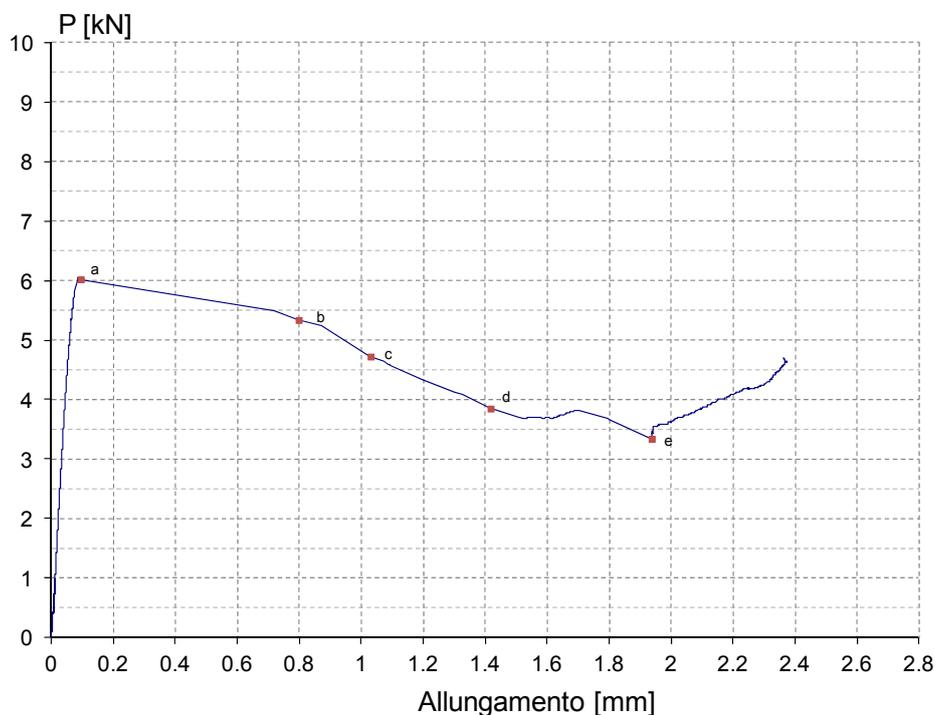


Figura 6.123b - Grafico carico-allungamento modificato.

Le deformazioni rilevate durante la prova in funzione del carico applicato sono rappresentate in *figura 6.124*.

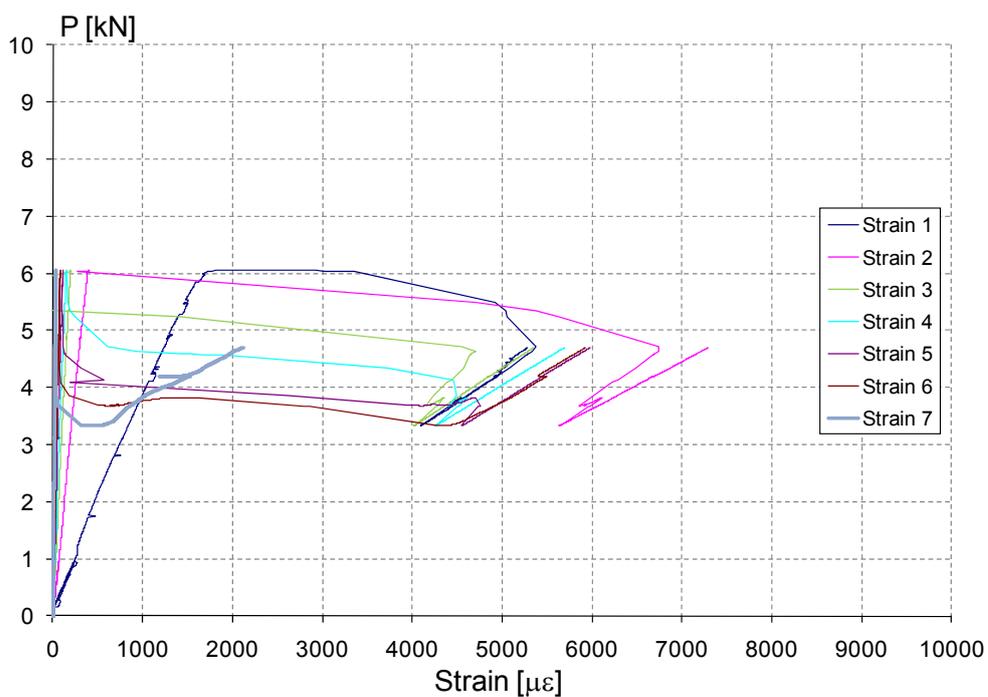


Figura 6.124 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B4A2a).

L'andamento delle deformazioni lungo l'asse del rinforzo riferite ai livelli di carico selezionati è rappresentato invece in *figura 6.125*, senza alcuna modifica rispetto ai valori registrati effettivamente durante la prova.

Come per le altre prove, basandosi sulle considerazioni già espresse al § 6.2.1 a proposito dell'andamento delle deformazioni lungo il rinforzo, è possibile correggere il diagramma, giungendo a quello regolarizzato riportato in *figura 6.126*.

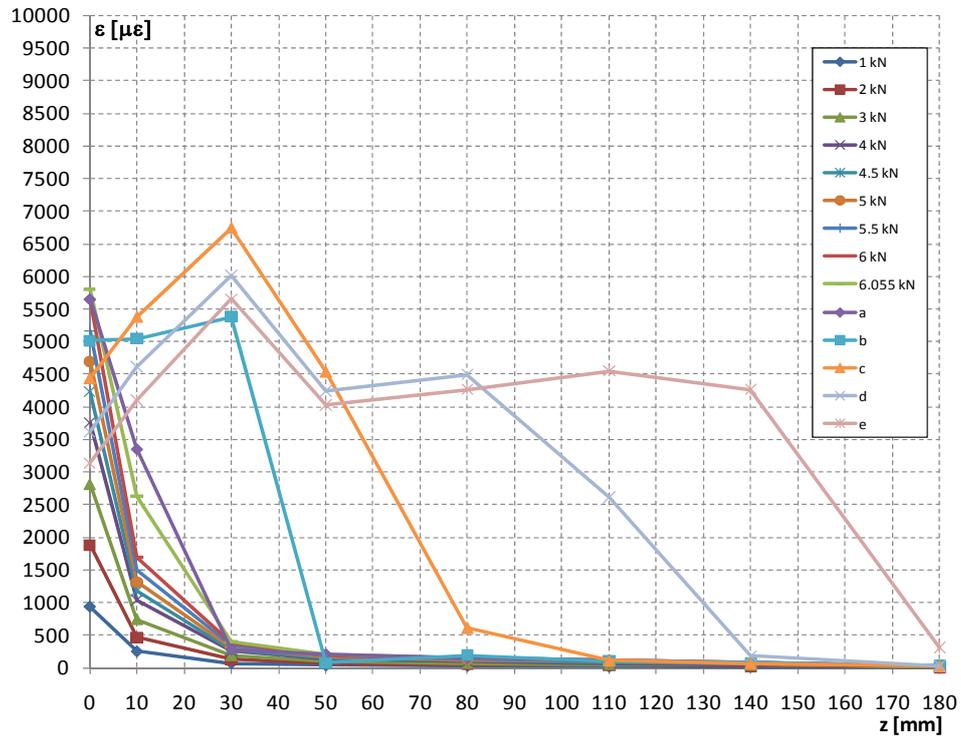


Figura 6.125 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova B4A2a (diagramma originale).

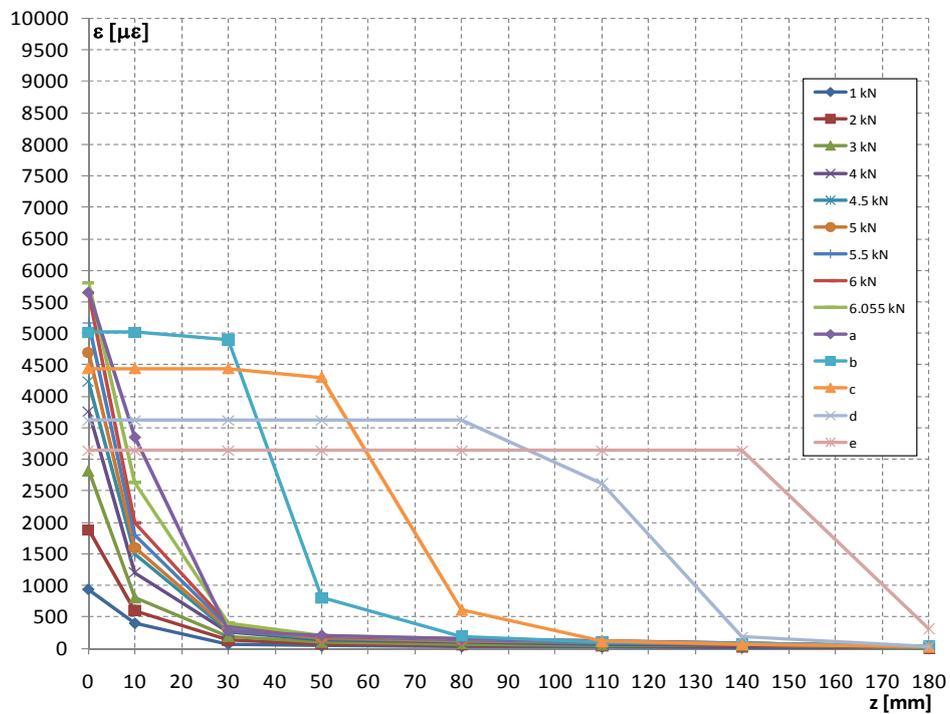


Figura 6.126 - Deformazioni lungo il rinforzo nella prova B4A2a (diagramma modificato).

A differenza della prova precedente, non essendosi verificata la rottura del rinforzo, è stato possibile giungere ad una analisi completa del fenomeno di debonding, come si può intuire dai diagrammi che sono stati riportati.

L'evoluzione del fenomeno presenta i tratti tipici già riscontrati in precedenza: finché si è in presenza di carichi relativamente bassi, le deformazioni presentano una rapida diminuzione procedendo dalla sezione iniziale verso la parte finale della zona di incollaggio, poi, in presenza dal carico che innesca l'inizio del distacco del rinforzo, le deformazioni cominciano ad assumere un andamento pressoché costante nella zona iniziale in cui sta iniziando a manifestarsi tale distacco, per poi diminuire velocemente nella parte ancora non interessata dal debonding.

Il fenomeno, una volta innescato, prosegue inesorabilmente verso la parte finale della zona di incollaggio: questo percorso è evidenziato dalla progressiva crescita delle deformazioni registrate lungo l'asse del rinforzo (si vedano a tal proposito le curve a, b, c, d, e).

Si precisa che le curve indicate utilizzando le lettere anziché il valore del carico sono relative a livelli di carico registrati già oltre il picco del diagramma carico-allungamento.

Utilizzando i valori di deformazione dopo la regolarizzazione e facendo uso della (6.3), applicata ai vari livelli di carico, è immediato ottenere il diagramma delle tensioni tangenziali lungo l'asse longitudinale del rinforzo, all'interno della zona di incollaggio del composito (*figura 6.127*).

Il diagramma presenta l'andamento tipico già discusso durante la descrizione delle prove precedenti e rappresenta un modo alternativo al diagramma delle deformazioni per seguire l'evoluzione del fenomeno di debonding, attraverso l'analisi della posizione e dell'entità dei picchi tensionali che si sono verificati.

L'andamento degli scorrimenti in funzione dell'ascissa z , calcolato per i diversi livelli di carico, è invece riportato in *figura 6.128*.

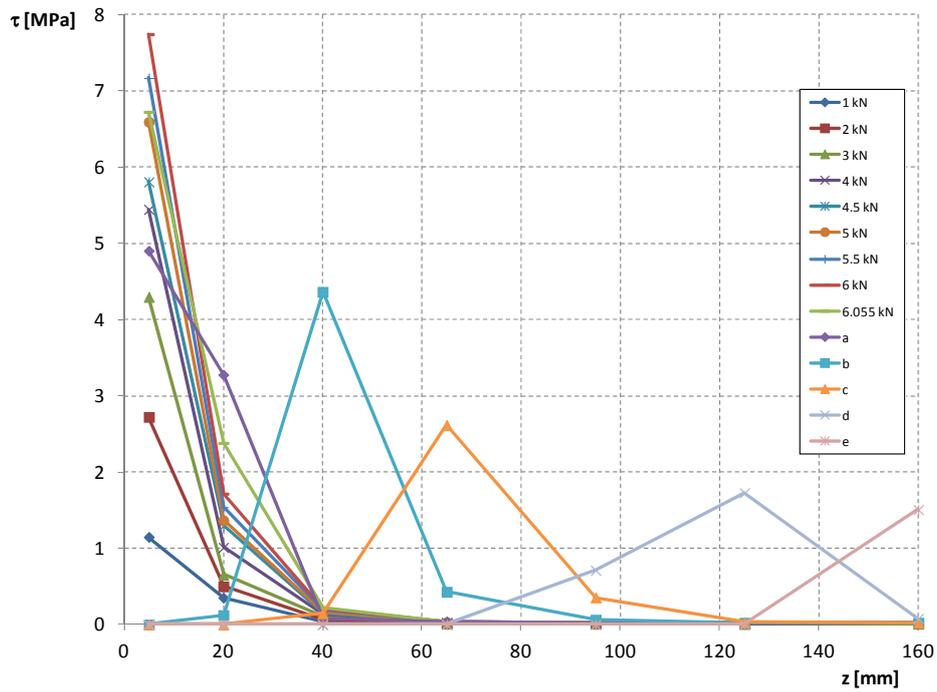


Figura 6.127 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova B4A2a).

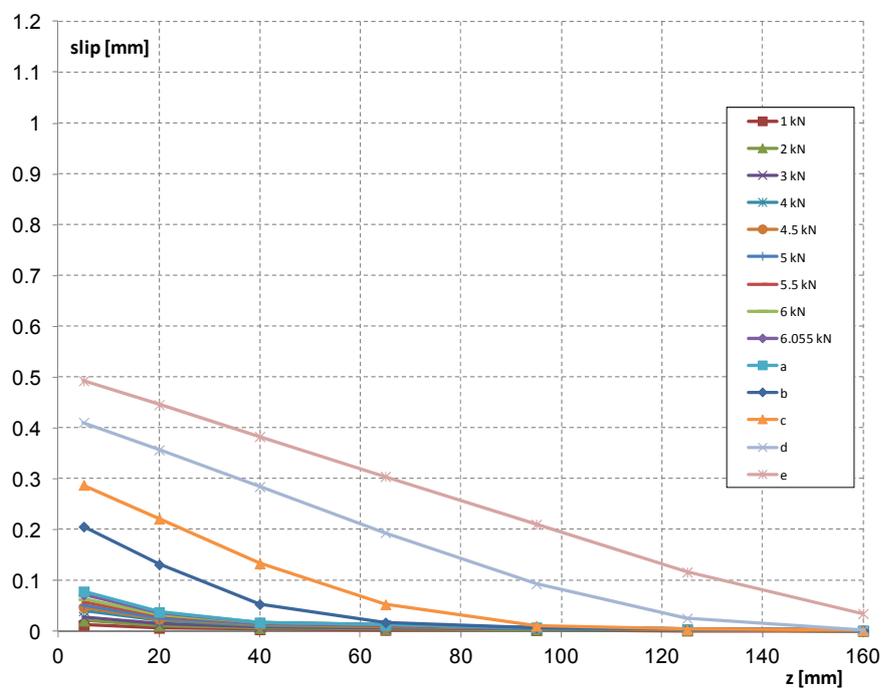


Figura 6.128 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova B4A2a).

Completando la descrizione della prova eseguita, si riportano alcune immagini che rappresentano la modalità di distacco del rinforzo (*figure 6.129, 6.130 e 6.131*).



Figura 6.129 - Evoluzione del distacco del rinforzo durante lo svolgimento della prova.



Figura 6.130 - Campione al termine della prova B4A2a.



Figura 6.131 - Particolare: distacco di una porzione di mattone sulla parte anteriore.

La marcata irregolarità della faccia superiore del campione (*figura 6.129*) ha sicuramente determinato la nascita di tensioni di peeling di una certa entità, che possono determinare un significativo abbassamento del carico massimo supportabile durante la prova.

Il distacco del rinforzo è comunque avvenuto mediante asportazione di parte del substrato, senza crisi adesiva o mista e si è quindi manifestato secondo la modalità preferibile (*figura 6.130*).

Come già registrato in altre prove, tuttavia, si è verificato il distacco di una piccola porzione di mattone sulla parte anteriore (*figura 6.131*), meccanismo che sarebbe stato possibile scongiurare solo con un arretramento della zona di incollaggio, accorgimento non attuabile in tutti i campioni a causa delle ovvie limitazioni dimensionali.

Anche se in questo caso un leggero arretramento sarebbe stato consentito, questa modalità non è comunque stata adottata per garantire una adeguata uniformità e la possibilità di un confronto oggettivo tra le prove.

6.2.15 PROVA M4A1c

La prova M4A1c è stata condotta in data 12/07/2011, utilizzando la stessa strumentazione impiegata anche durante le prove B4A1a e B4A2a, costituita da 7 estensimetri sulla zona incollata, 2 trasduttori di spostamento e, come al solito, dalla cella di carico per la misurazione del carico applicato.

La strumentazione utilizzata, unitamente ai canali impiegati per l'acquisizione, è indicata in dettaglio nella *tabella 6.14*.

Anche in questa prova non sono stati impiegati estensimetri sul tratto libero per la misura del modulo elastico.

Il setup di prova utilizzato è visibile in *figura 6.132*.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata (L)
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata (L-M)
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata (M)
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata (L-M)

Tabella 6.14 - Strumenti utilizzati durante la prova M4A1c, collocazione (M = mattone, L = letto di malta) e canali di acquisizione.



Figura 6.132 - Setup prova M4A1c.

Il primo diagramma che è stato possibile ricavare dalla prova è quello carico – allungamento (*figura 6.133*).

Tale diagramma è stato costruito utilizzando le letture della cella di carico (per la valutazione della forza applicata) e i valori registrati dagli LVDT (per il calcolo dell'allungamento del rinforzo).

I punti indicati in figura segnalano i livelli di carico selezionati, dopo il primo picco del diagramma carico-allungamento, per le successive elaborazioni (diagrammi di deformazioni, tensione tangenziale e scorrimento).

Come al solito, è stato condotto un ciclo di carico-scarico giungendo fino ad un carico di circa 1 kN, per permettere l'assestamento del campione, dopo il quale ha avuto inizio la prova vera e propria, che è terminata solo quando è avvenuto il completo distacco del rinforzo dal substrato.

Il diagramma ha mostrato ancora una volta i tipici salti registrati in molte delle prove condotte sui muretti non rasati: si ricorda che la loro genesi è riconducibile

all'evoluzione del fenomeno di debonding, che vede il rinforzo ancorarsi compiutamente prima in corrispondenza di un mattone, poi staccarsi da esso e passare al successivo, fino a raggiungere la fine della zona di incollaggio (e quindi ad arrivare al completo distacco del rinforzo).

A differenza di altre prove, tuttavia, in questo caso il carico, pur mostrando i salti appena descritti, ha seguito una tendenza generale di crescita durante la fase di debonding, anziché diminuire progressivamente.

La formazione della dentatura sulla parte di substrato che viene man mano asportata (in corrispondenza dei letti di malta), tipica dei mattoni non rasati, può contribuire a rendere più evidenti i salti del diagramma carico-allungamento e può consentire di raggiungere carichi più elevati grazie al meccanismo macroscopico di ingranamento che si viene a creare.

Lo stesso diagramma carico-allungamento, ottenuto però calcolando l'allungamento non tramite differenza degli spostamenti registrati dagli LVDT, ma attraverso l'integrazione delle deformazioni rilevate per ogni livello di carico, viene riportato in *figura 6.134*.

La determinazione dell'allungamento secondo questa metodologia avviene applicando la (6.1) in corrispondenza di ogni intervallo di acquisizione (e quindi per tutti i livelli di carico registrati).

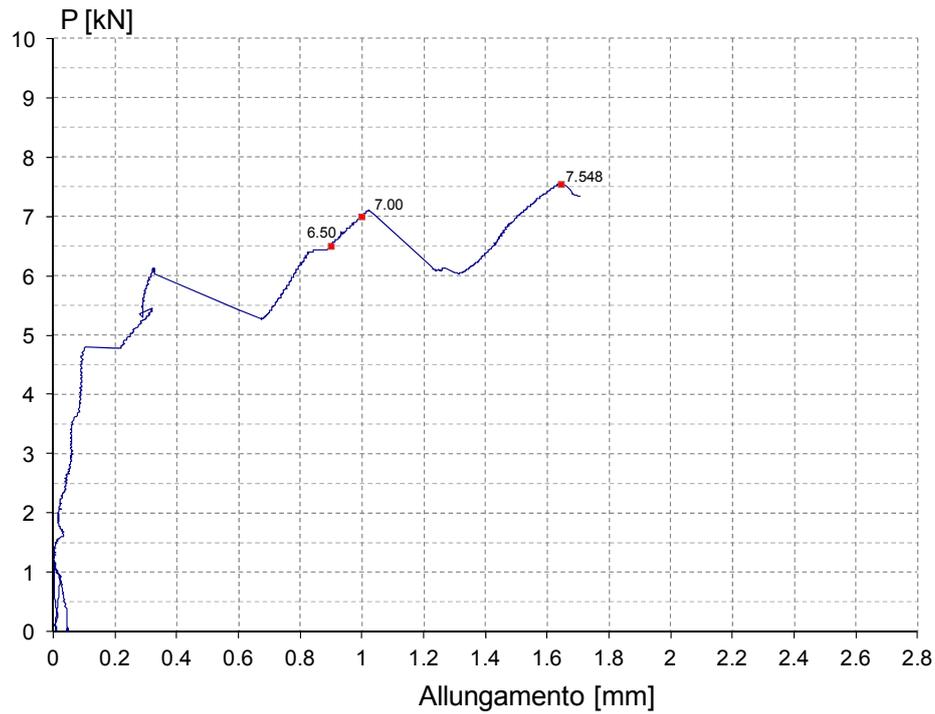


Figura 6.133 - Grafico carico-allungamento ottenuto utilizzando le letture degli LVDT (prova M4A1c).

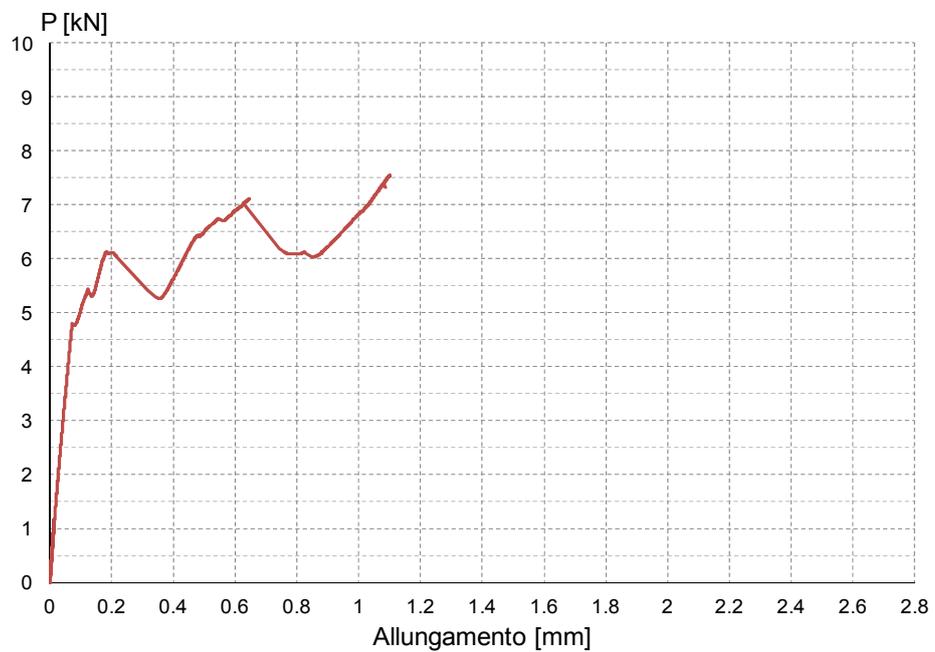


Figura 6.134 - Grafico carico-allungamento ricavato computando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova M4A1c).

Le deformazioni registrate dagli estensimetri durante la prova in funzione del carico applicato sono indicate in *figura 6.135*.

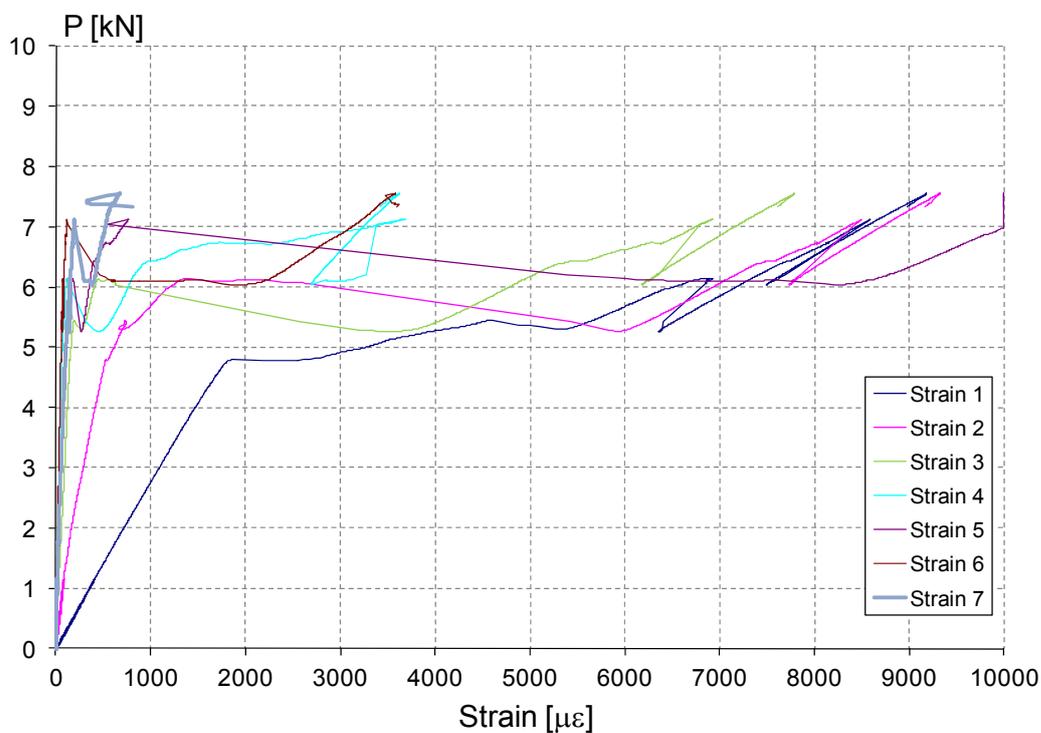


Figura 6.135 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova M4A1c).

L'andamento delle deformazioni lungo l'asse del rinforzo (riferito ai livelli di carico selezionati) è invece rappresentato in *figura 6.136*, senza alcuna modifica rispetto ai valori effettivamente registrati durante la prova.

Come appare evidente dalla figura, in corrispondenza di un livello di carico di 7.548 kN, l'estensimetro 5 è giunto a fondo scala.

Come per le altre prove, basandosi sulle considerazioni già espresse al § 6.2.1 a proposito dell'andamento delle deformazioni lungo il rinforzo, è possibile correggere il diagramma, giungendo a quello più regolare riportato in *figura 6.137*.

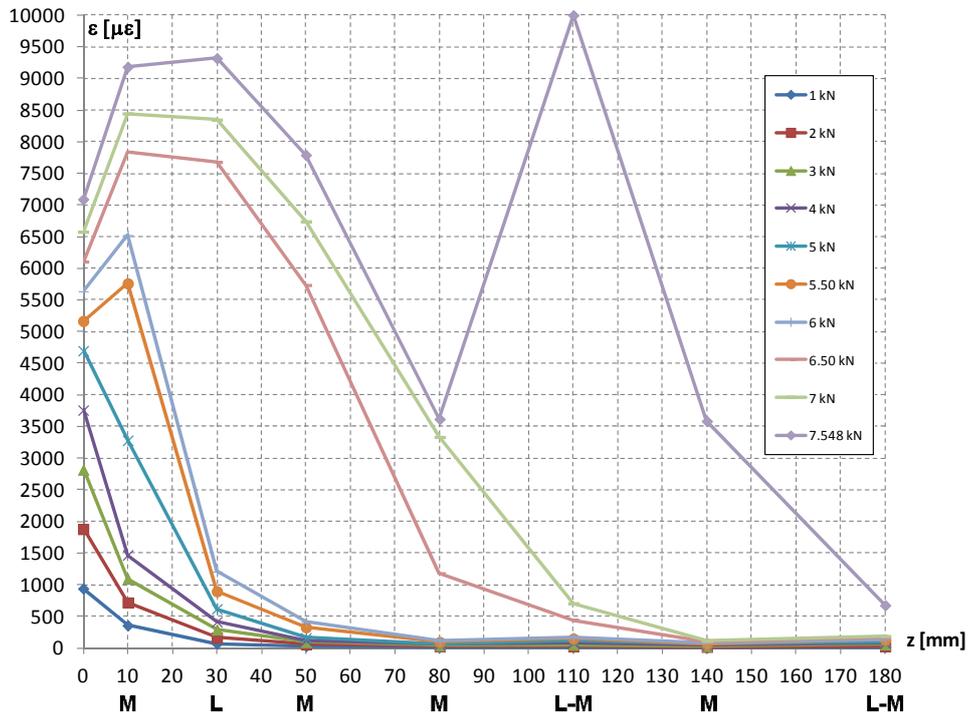


Figura 6.136 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova M4A1c (diagramma originale).

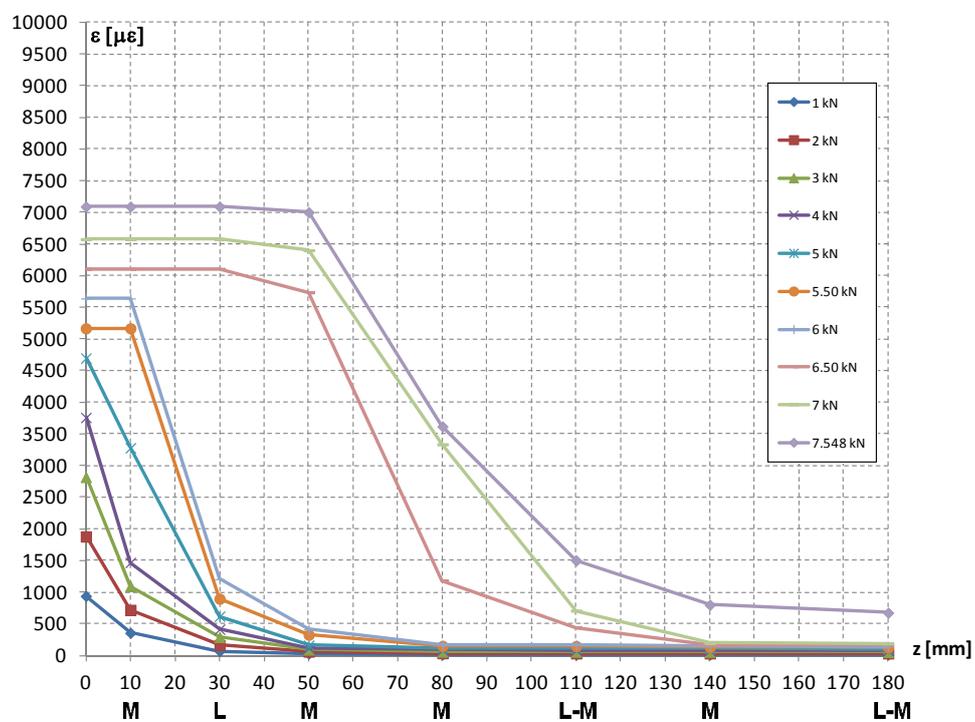


Figura 6.137 - Deformazioni lungo il rinforzo nella prova M4A1c (diagramma modificato).

Utilizzando i valori di deformazione riportati in *figura 6.137* e facendo uso della (6.3), applicata ai vari livelli di carico, è possibile ottenere l'andamento delle tensioni tangenziali lungo l'asse longitudinale del rinforzo, riportato in *figura 6.138*.

Il diagramma presenta l'andamento tipico già visto nel corso delle altre prove e rappresenta un modo alternativo al diagramma delle deformazioni per seguire l'evoluzione del fenomeno di debonding.

L'andamento degli scorrimenti in funzione dell'ascissa z , calcolato per i livelli di carico scelti, è invece indicato in *figura 6.139*.

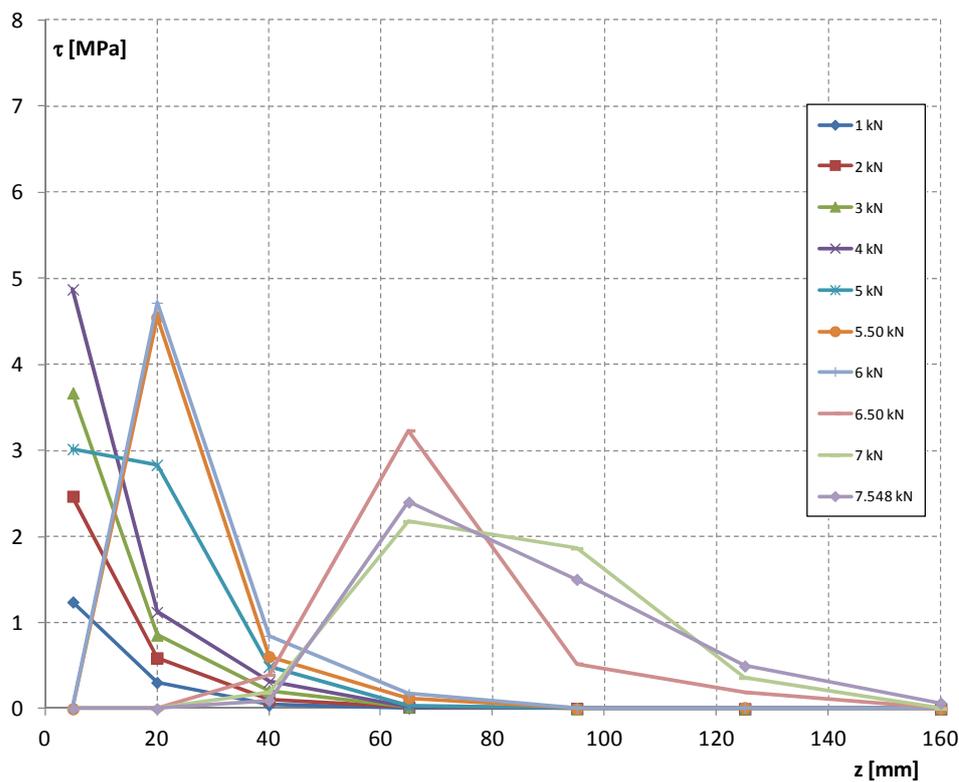


Figura 6.138 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova M4A1c).

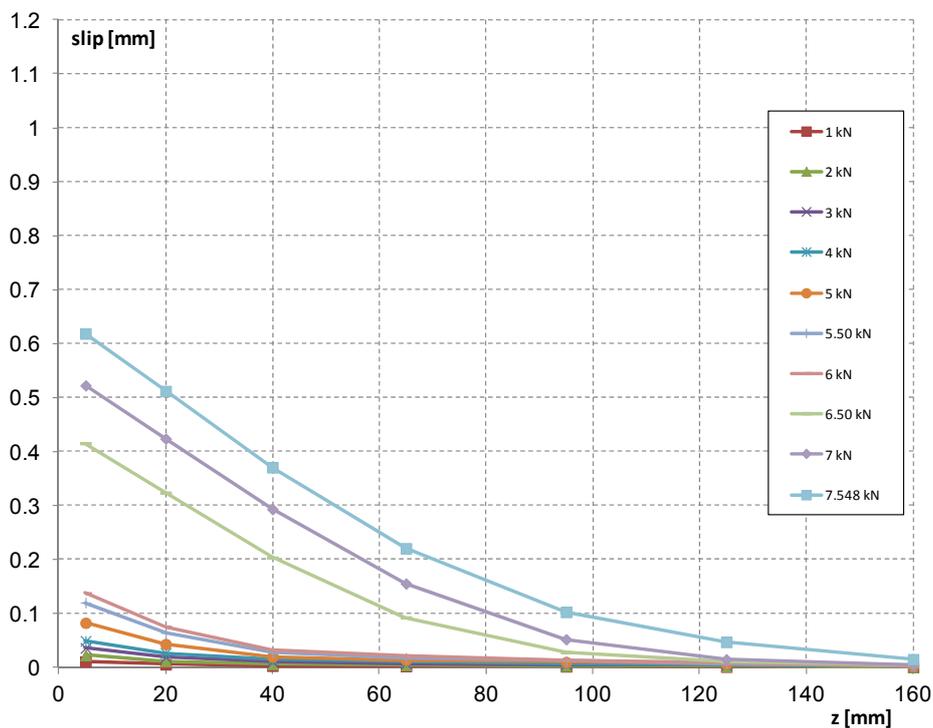


Figura 6.139- Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova M4A1c).

A completamento della descrizione della prova svolta si riportano alcune immagini che rappresentano la modalità di distacco del rinforzo, avvenuta nella maniera ottimale, ovvero con asportazione di una parte del substrato, senza traccia di crisi adesiva o mista.

I rilievi che si sono formati in corrispondenza dei letti di malta (*figura 6.142*) sono meno evidenti in questa prova rispetto ad altre condotte sempre su muretti non rasati.



Figura 6.140 – Campione M4A1c al termine della prova.



Figura 6.141 – Particolare del substrato.



Figura 6.142 – Dentatura in corrispondenza dei giunti di malta.

6.2.16 PROVA M4A1a

La prova M4A1a, condotta il giorno 13/07/2011, rappresenta il completamento delle prove sui muretti di tipo M4 privi di rasatura.

La strumentazione impiegata per lo svolgimento della prova è indicata nella *tabella 6.15*: in questo caso sono stati utilizzati solamente cella di carico e trasduttori di spostamento, senza l'applicazione di alcun estensimetro.

Si ricorda che la disposizione degli LVDT è conforme alle modalità già indicate al § 5.4.

La *figura 6.143* presenta una vista del setup di prova utilizzato.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.15 - Strumenti utilizzati durante la prova M4A1a e canali di acquisizione.



Figura 6.143 - Setup prova M4A1a.

Visto che in questo caso non vi era alcun rischio di danneggiare eventuali fili o terminazioni, si è scelto di collocare il trasduttore di spostamento posizionato all'inizio della zona di incollaggio in maniera che potesse effettuare la lettura in verso concorde rispetto a quello posteriore.

Questa scelta consente di posizionare il primo LVDT più in basso per tutelarsi nei confronti di eventuali rotazioni della basetta su cui poggia il trasduttore.

Collocando lo strumento in verso opposto, infatti, ci si sarebbe scontrati con l'ingombro dato dall'asse di tiro.

L'impiego della cella di carico e degli LVDT ha consentito di avere a disposizione i dati necessari all'elaborazione del diagramma carico-allungamento (*figura 6.144*).

Come consuetudine, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico per permettere l'assestamento del campione (fino ad un valore pari a 1kN) e poi ha avuto inizio la prova, condotta in controllo di spostamento fino al completo distacco del rinforzo.

In figura sono chiaramente visibili i classici salti già notati nella precedente prova M4A1c, la cui genesi è già stata spiegata in dettaglio al § 6.2.11.

Una ulteriore analogia con la prova precedente è data dalla tendenza generale di crescita del carico registrata nel corso dell'evoluzione del fenomeno di debonding.

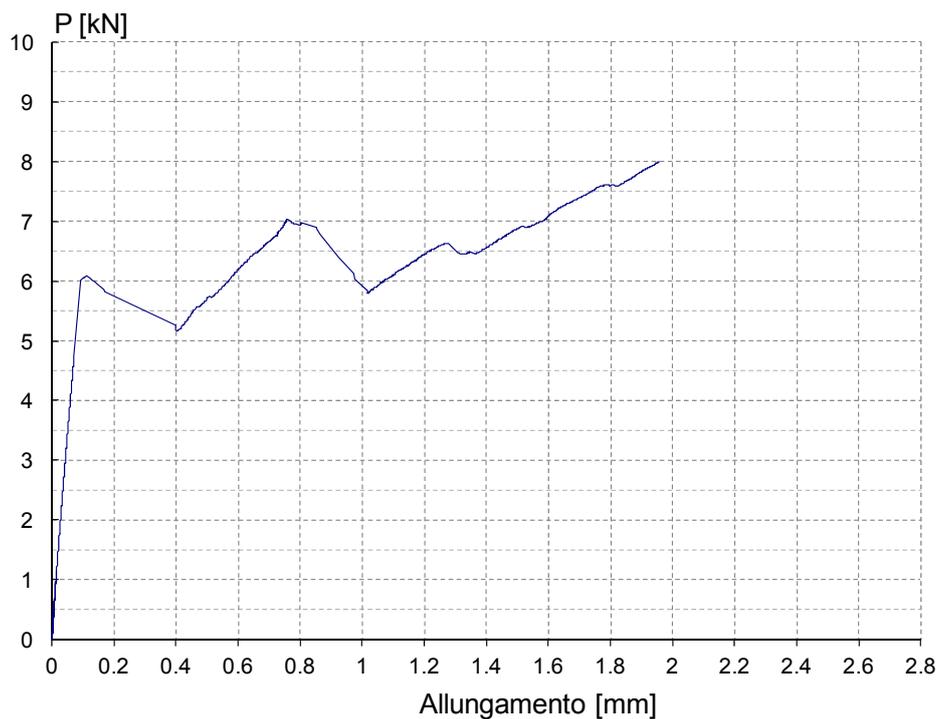


Figura 6.144 - Grafico carico-allungamento per la prova M4A1a.

La modalità di distacco del rinforzo nel suo complesso è ben descritta in *figura 6.145*: la crisi è ancora una volta quella preferibile, con asportazione di una consistente parte del substrato e senza alcuna traccia di crisi adesive o miste.

A tal proposito va rilevato che la marcata rugosità superficiale dei mattoni di tipo B4 sicuramente può favorire una maggiore penetrazione della resina epossidica e quindi determinare una migliore adesione del rinforzo al substrato.

Oltre a questo aspetto, va rilevata anche in questo caso l'evidente asportazione di una porzione maggiore di materiale in prossimità dei giunti di malta (*figura 6.147*).

È inoltre chiaramente visibile (*figura 6.146*) come ci sia stata una marcata asportazione del substrato in corrispondenza del penultimo mattone facente parte della zona di incollaggio: questo fatto può giustificare il trend di crescita del carico rilevato.

Va infatti ricordato come il coinvolgimento di una porzione di materiale più rilevante è indice di una crescita dell'energia di frattura e conseguentemente dell'aumento del carico massimo che può essere sopportato.

Con questo paragrafo termina la descrizione delle prove condotte su mattoni e muretti non rasati.

Di seguito, verranno descritti i risultati ottenuti sui campioni dotati di rasatura superficiale.



Figura 6.145 - Campione M4A1a al termine della prova.



Figura 6.146 - Campione M4A1a: particolare della superficie.



Figura 6.147 – Formazione della dentatura in corrispondenza dei letti di malta.

6.3 PROVE DI ADERENZA SU MATTONI E MURETTI CON RASATURA TIPO B

Si presentano ora i risultati delle prove svolte su mattoni e muretti delle quattro tipologie sui quali è stata preventivamente condotta una rasatura superficiale con malta Tassullo T30 V (finitura tipo B).

Le caratteristiche di questa malta e le prove di caratterizzazione svolte su di essa sono state descritte nel corso del capitolo 2.

Qualora siano necessari una descrizione delle sigle utilizzate oppure un elenco generale delle prove svolte, si rimanda al § 2.4.

6.3.1 PROVA B3B1a

Questa prova è stata condotta il 14/07/2011, utilizzando una strumentazione composta dalla cella di carico, da 7 estensimetri (come descritto al § 5.3) e 2 trasduttori di spostamento.

La collocazione dei due LVDT per la determinazione dell'allungamento del rinforzo è stata quella classica adottata anche nelle altre prove (e già descritta nel corso del § 5.4).

La strumentazione impiegata è visibile in dettaglio in *figura 6.148*, mentre nella *tabella 6.16* sono descritte in dettaglio le caratteristiche degli strumenti utilizzati, oltre ai rispettivi canali di acquisizione.

In questa prova, vista la presenza degli estensimetri, si è preferito posizionare il primo LVDT in modo che potesse eseguire la lettura da davanti, anziché da dietro, in modo da non rischiare di danneggiare le terminazioni della strumentazione o gli estensimetri stessi.

Questa scelta è stata adottata anche nelle altre prove condotte con il setup a 7 o 9 estensimetri.

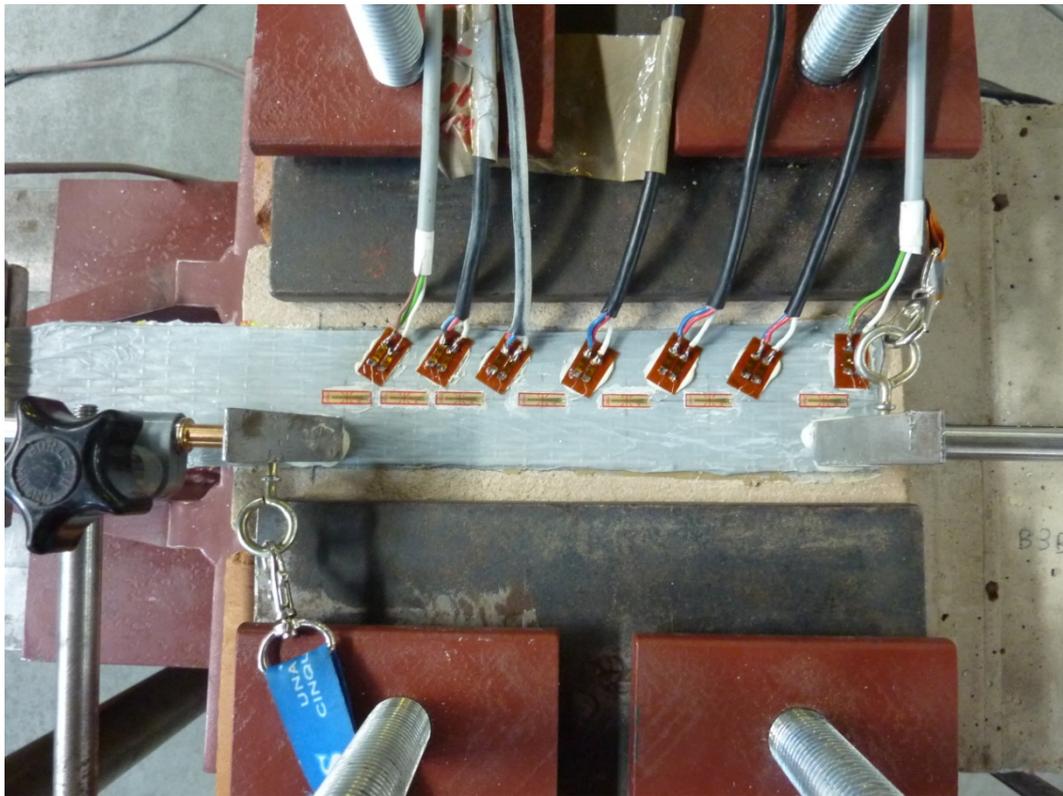


Figura 6.148 – Setup prova B3B1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.16 - Strumenti utilizzati durante la prova B3B1a e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e correlandole alla differenza dei valori registrati dagli LVDT collegati al canale 1 e 2, è stato possibile costruire il grafico carico – allungamento relativo al rinforzo applicato (*figura 6.149*).

Come nel corso delle altre prove, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico fino ad un carico di circa 1 kN per garantire l'assestamento del campione.

Terminata questa fase, il carico è cresciuto fino a raggiungere un primo picco pari a 3.3 kN, dopo il quale è stato registrato un tratto di leggera discesa, prima di un nuovo ramo di crescita del carico che ha portato al valore massimo registrato di 3.582 kN.

Appare subito evidente come tale valore risulti sensibilmente inferiore rispetto ai valori registrati nel corso delle prove sui mattoni B3 non rasati: ciò è indice di un funzionamento non ottimale della rasatura, che riesce a livellare le asperità superficiali ma che non offre una resistenza adeguata.

I punti segnalati in figura, come consuetudine, sono rappresentativi dei livelli di carico scelti dopo il picco per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di debonding.

Si fa presente che un'altra modalità per ottenere il diagramma carico - allungamento è quella di correlare le letture della cella di carico all'allungamento determinato non grazie agli LVDT, ma tramite integrazione delle deformazioni registrate dagli estensimetri in corrispondenza di ogni livello di forza (*figura 6.150*).

Il calcolo dell'allungamento secondo questa metodologia può essere eseguito applicando la (6.1).

Le deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato sono indicate in *figura 6.151*.

Conseguentemente al basso carico registrato, anche le deformazioni registrate si sono mantenute su livelli piuttosto bassi in confronto ad altre prove svolte.

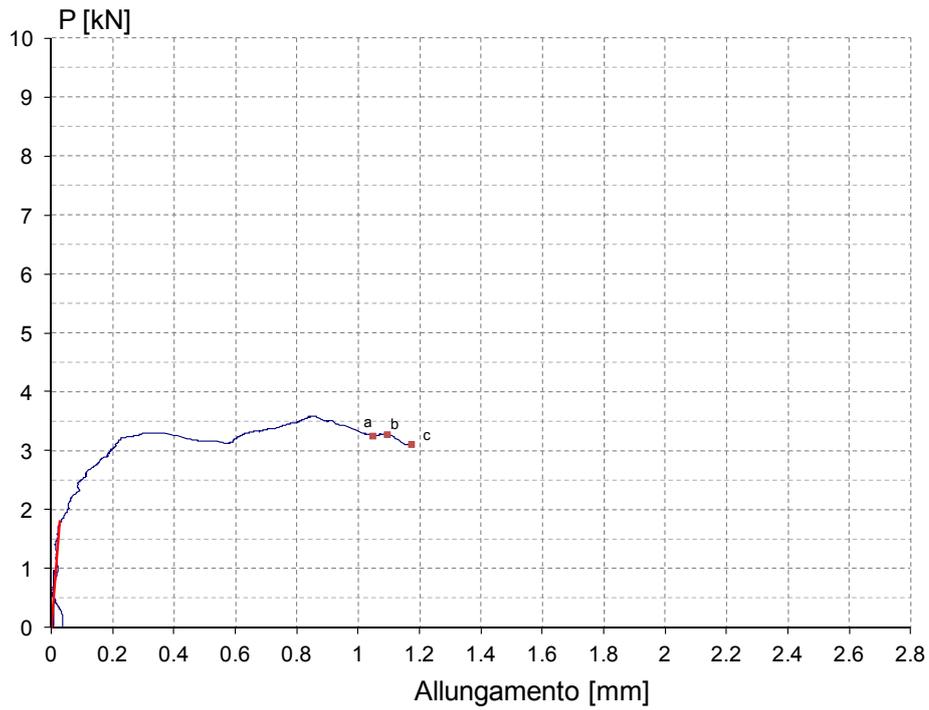


Figura 6.149 - Grafico carico-allungamento per la prova B3B1a (ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT).

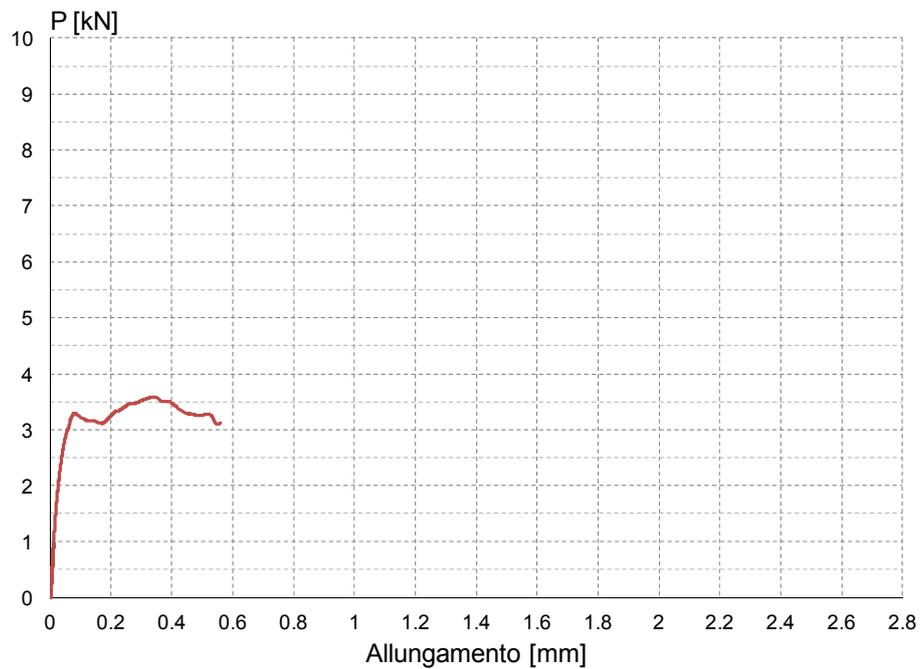


Figura 6.150 - Grafico carico-allungamento ricavato calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova B3B1a).

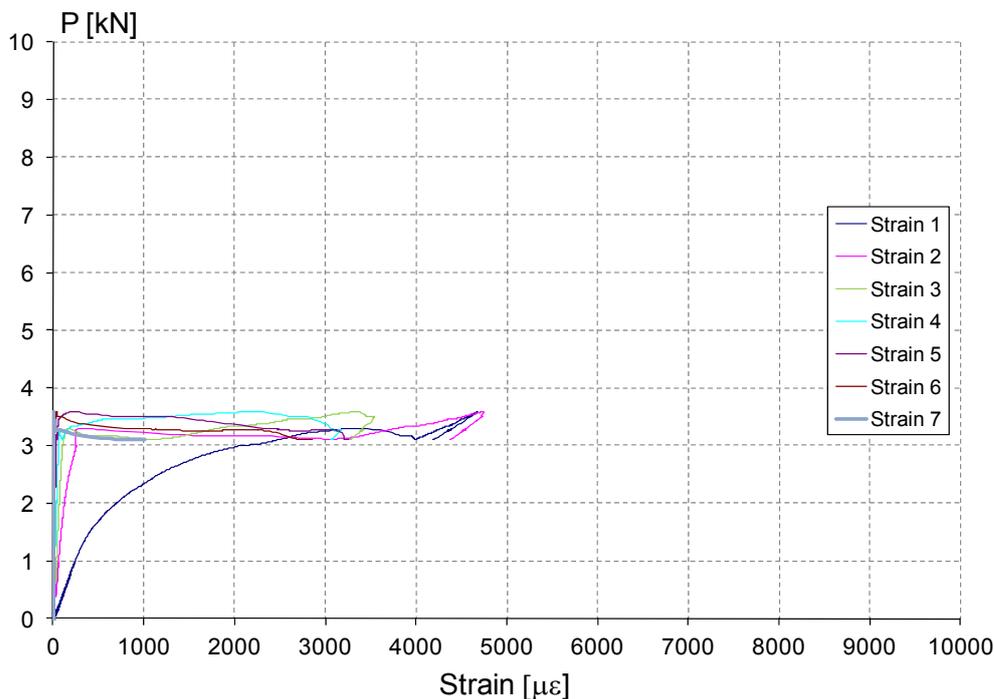


Figura 6.151 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B3B1a).

La *figura 6.152* mostra invece le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati lungo l'asse del rinforzo in riferimento al loro posizionamento sulla zona incollata, per ogni livello di carico scelto.

I profili illustrati sono stati scelti in modo da avere un quadro generale dell'evoluzione dello stato deformativo del composito al procedere del fenomeno di debonding.

Le curve indicate come a,b,c sono relative a livelli di carico registrati oltre il picco del diagramma carico-allungamento.

Sfruttando le considerazioni già espresse al § 6.2.1, è possibile modificare il diagramma riportato in *figura 6.152*, relativo ai valori effettivamente registrati durante le prove, ottenendo il diagramma regolarizzato rappresentato in *figura 6.153*.

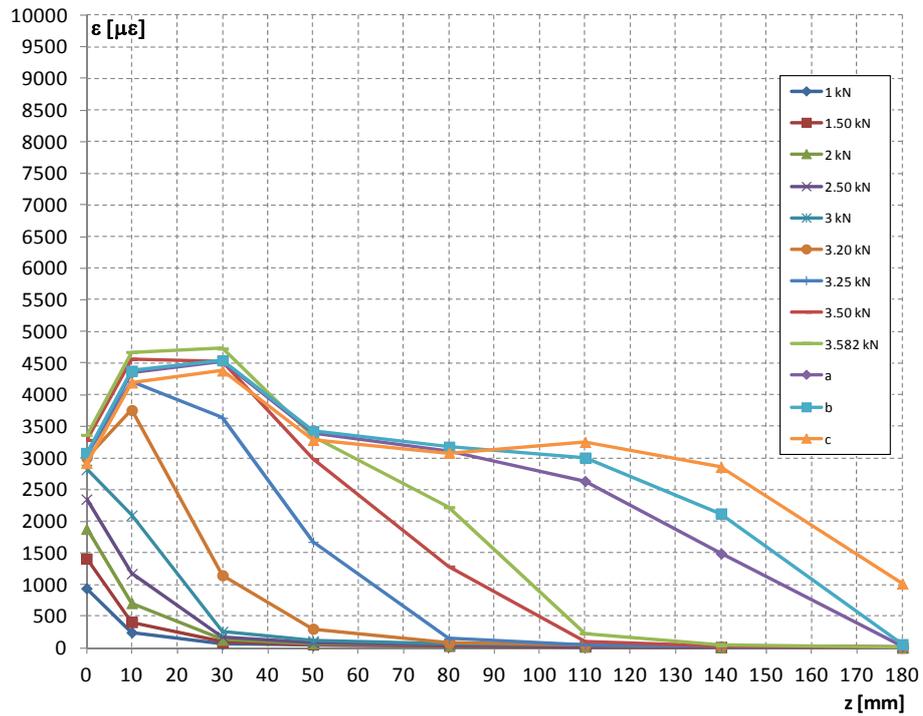


Figura 6.152 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova B3B1a (diagramma originale).

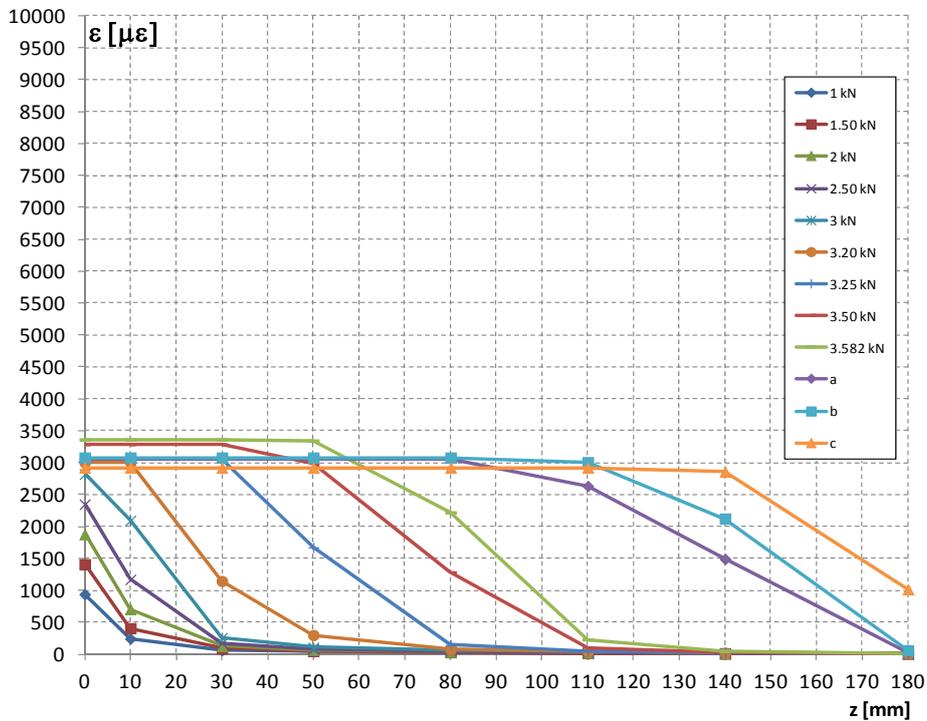


Figura 6.153 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova B3B1a (diagramma modificato).

Una prima caratteristica che risulta evidente è come il diagramma originale sia già dotato di una maggiore regolarità rispetto a quelli ottenuti nelle prove su mattoni e muretti non rasati.

Ciò ovviamente è dovuto all'effetto della rasatura che ha garantito una regolarizzazione della superficie, anche se purtroppo non ha presentato sufficienti caratteristiche di resistenza meccanica.

Si precisa che, come per le altre prove, il calcolo delle quantità che verranno definite in seguito, verrà effettuato considerando i valori delle deformazioni modificati e non quelli registrati direttamente attraverso gli estensimetri.

Utilizzando le deformazioni indicate in *figura 6.153*, relative ai livelli di carico indicati, è possibile costruire il grafico che mostra l'andamento delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.154*).

Si ricorda che il calcolo può essere eseguito facendo riferimento alla (6.3).

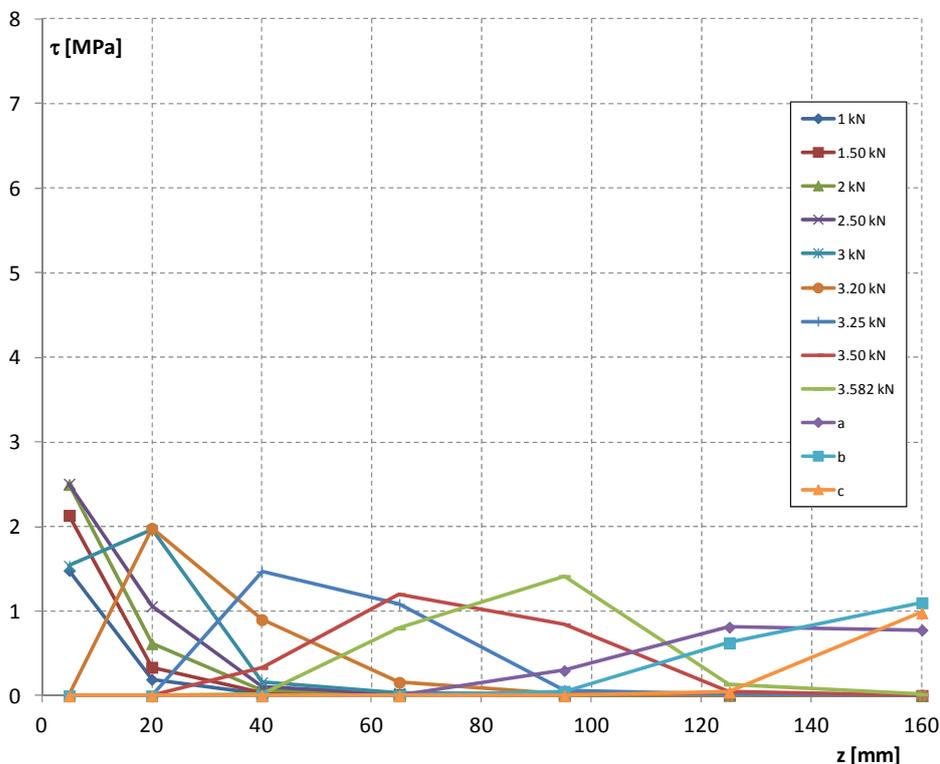


Figura 6.154 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova B3B1a).

Visto il modesto valore del carico massimo registrato, anche le tensioni tangenziali mostrano valori decisamente bassi, come si era già visto per il diagramma delle deformazioni.

Gli scorrimenti in funzione dell'ascissa z , calcolati per i diversi livelli di carico e ottenuti secondo quanto già indicato al § 6.2.1, sono rappresentati in *figura 6.155*.

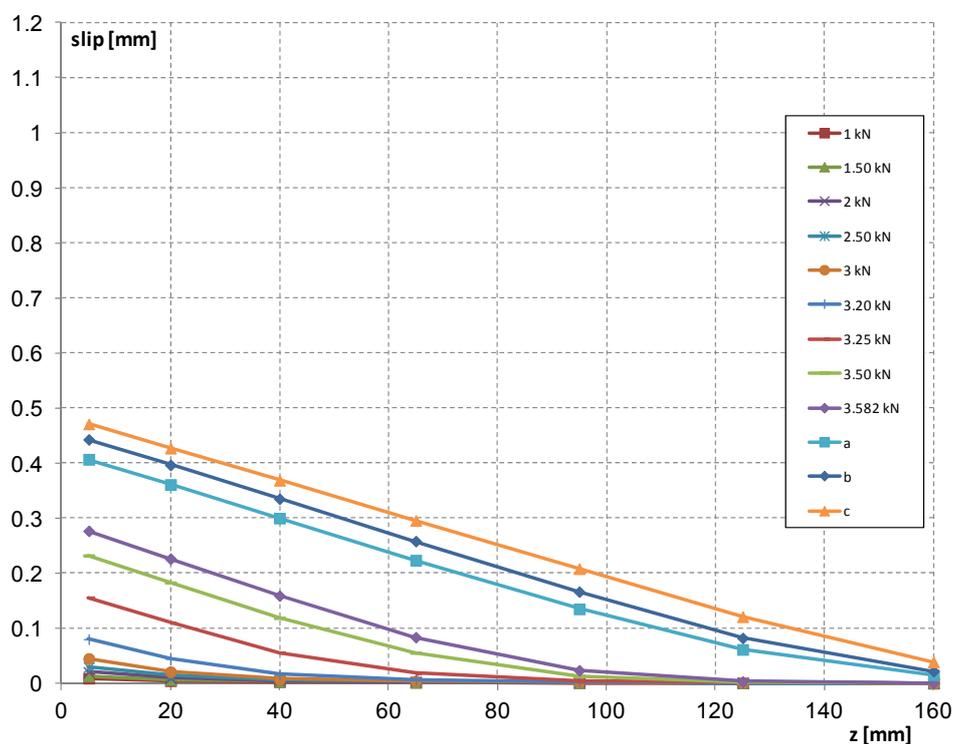


Figura 6.155 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova B3B1a).

Come completamento alla descrizione della prova svolta si riportano alcune immagini del campione dopo il distacco del rinforzo, che è avvenuto mediante asportazione di uno strato di malta.

Come risulta evidente dalle figure, la crisi si è manifestata all'interno della rasatura e non è stata intaccata alcuna parte del mattone B3.

La modalità di distacco evidenzia sicuramente la corretta applicazione del rinforzo, ma mette ancora più in evidenza come sia stata la malta l'elemento debole del sistema.

Questa prima prova su mattoni con rasatura di tipo B mostra quindi che la malta ha un effetto benefico di regolarizzazione della superficie, ma che deve essere altresì dotata di elevate caratteristiche meccaniche e di aderenza per poter contribuire alla crescita del carico massimo sopportabile dal campione.



Figura 6.156 - Distacco completo del rinforzo al termine della prova B3B1a.



Figura 6.157 - Superfici a fine prova.



Figura 6.158 – Dettaglio delle superfici.

6.3.2 PROVA M3B1a

La prova in oggetto è stata condotta il 21/07/2011, utilizzando un setup composto da 7 estensimetri (lungo la zona incollata del composito) e 2 trasduttori di spostamento.

L'impiego della cella di carico, come nelle altre prove, ha permesso la registrazione del carico applicato al rinforzo.

La strumentazione impiegata è visibile in *figura 6.159*, mentre all'interno della *tabella 6.17* sono indicati in dettaglio le caratteristiche degli strumenti utilizzati e i corrispondenti canali di acquisizione.

In questa prova non sono stati applicati estensimetri sul tratto libero del rinforzo per la misura del modulo elastico.

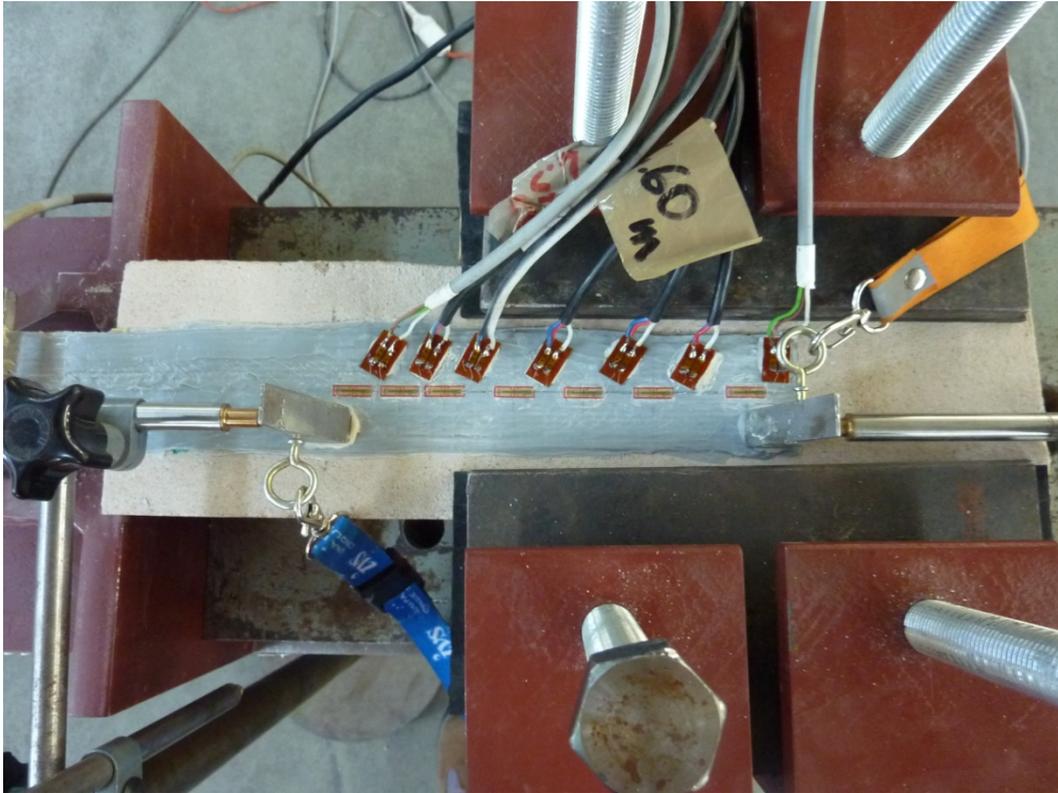


Figura 6.159 – Setup prova M3B1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.17 - Strumenti utilizzati durante la prova M3B1a e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza dei valori registrati dai due trasduttori di spostamento, è stato possibile costruire il grafico carico – allungamento riportato in *figura 6.160*.

È stato condotto, come nel corso delle altre prove, un primo ciclo di carico-scarico fino ad un livello di carico di 1 kN, per permettere al campione di assestarsi.

Terminata questa fase, il carico è cresciuto fino a raggiungere un primo picco pari a circa 3.2 kN.

Dopo il picco si è verificato un breve tratto di softening, prima di un nuovo ramo di crescita del carico che ha portato con un andamento un po' variegato al valore massimo registrato di 4.229 kN.

Al termine di questo tratto, si è verificato un brevissimo tratto di discesa finale del carico, al termine del quale si è verificato il completo distacco del rinforzo.

Il valore di picco registrato è risultato ancora piuttosto basso rispetto alle prove condotte su campioni non rasati costruiti con questa tipologia di mattone, ma rispetto alla prova B3B1a c'è stato comunque un significativo aumento.

Il punto segnalato in figura indica il livello di carico scelto per la valutazione dello stato deformativo e tensionale del provino dopo il picco.

Va rilevato come esso coincida con una delle ultime registrazioni e di conseguenza si otterrà uno degli ultimi andamenti di deformazione nel composito, poco prima del completo distacco del rinforzo.

La linea di tendenza tracciata in rosso indica la pendenza del diagramma nel primo tratto; il tracciamento della retta è servito per individuare compiutamente lo zero del diagramma, eliminando gli effetti di disturbo nel tratto iniziale.

Il diagramma carico - allungamento ottenuto combinando le letture della cella di carico con all'allungamento determinato tramite integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di forza è indicato in *figura 6.161*.

Si ricorda che il calcolo dell'allungamento in tal caso è stato eseguito grazie alla (6.1).

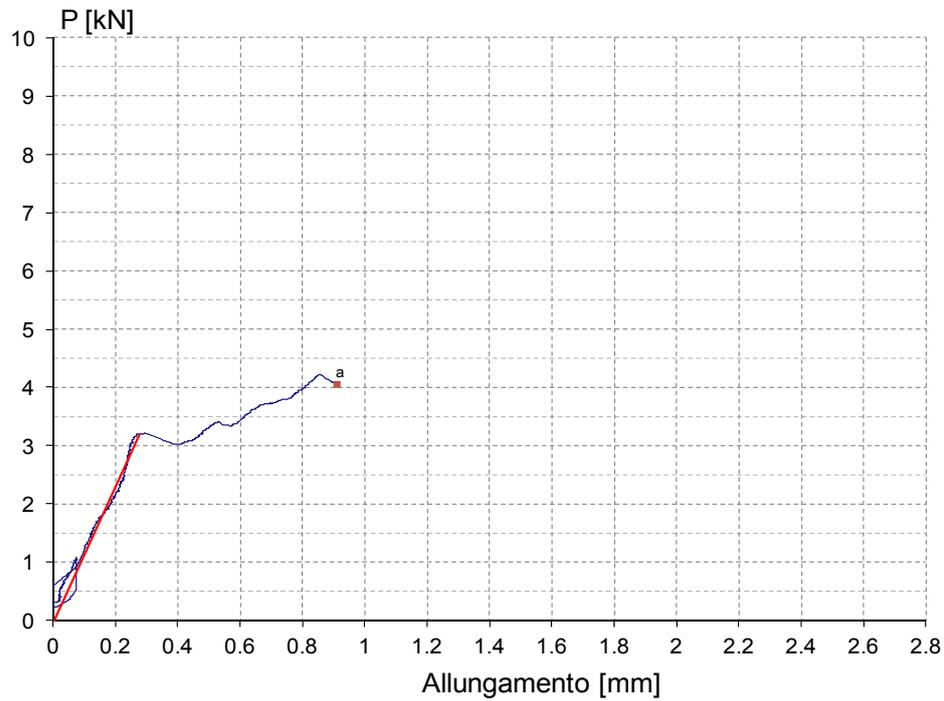


Figura 6.160 - Grafico carico-allungamento per la prova M3B1a (ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT).

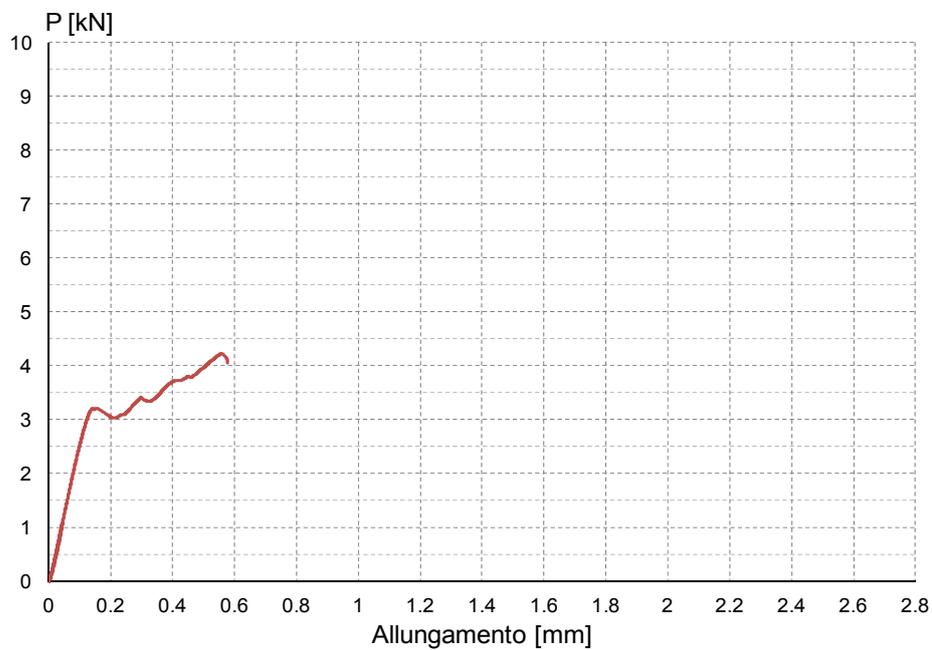


Figura 6.161 - Grafico carico-allungamento ricavato calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova M3B1a).

Le deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato sono indicate in *figura 6.162*.

L'entità modesta del carico di picco registrato giustifica le basse deformazioni che sono state rilevate.

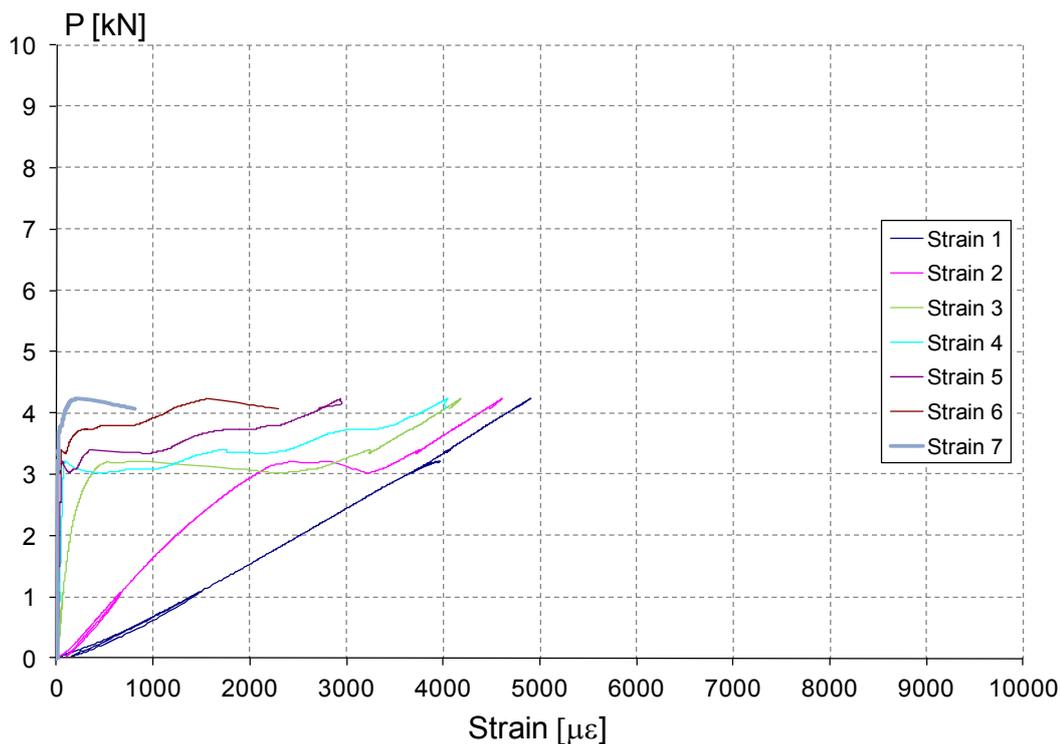


Figura 6.162 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova M3B1a).

La *figura 6.163* mostra invece l'andamento delle deformazioni lungo l'asse del rinforzo per ogni livello di carico scelto.

I profili illustrati, come al solito, tentano di descrivere al meglio l'evoluzione dello stato deformativo nel rinforzo durante lo svolgimento della prova.

Sfruttando le considerazioni indicate al § 6.2.1, è possibile modificare questo diagramma, relativo ai valori non corretti delle deformazioni, ottenendo quello regolarizzato rappresentato in *figura 6.164*.

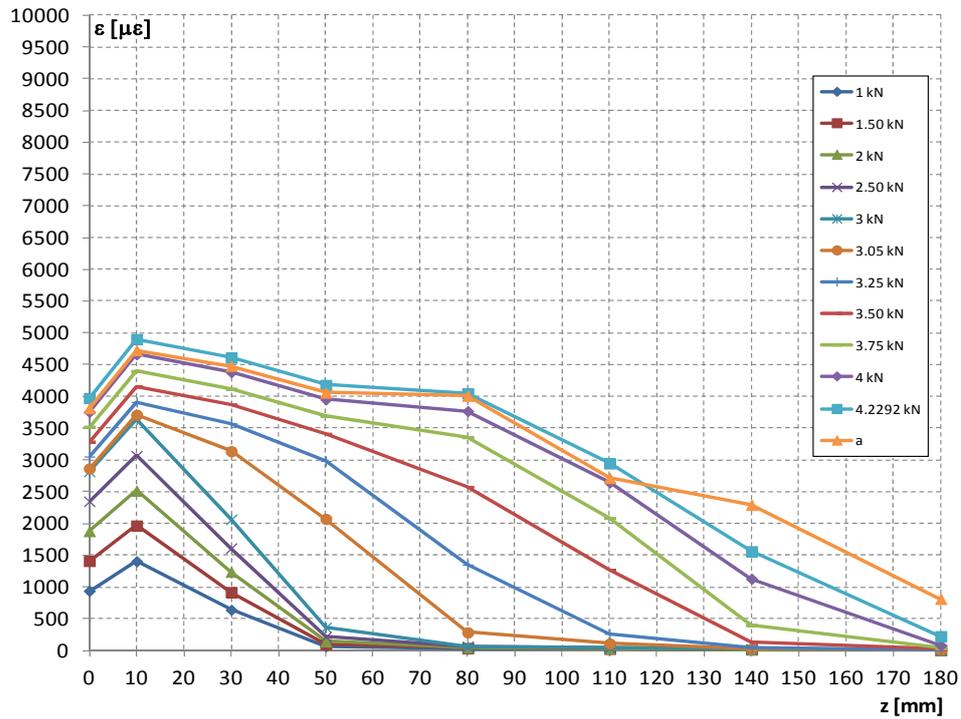


Figura 6.163 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova M3B1a (diagramma originale).

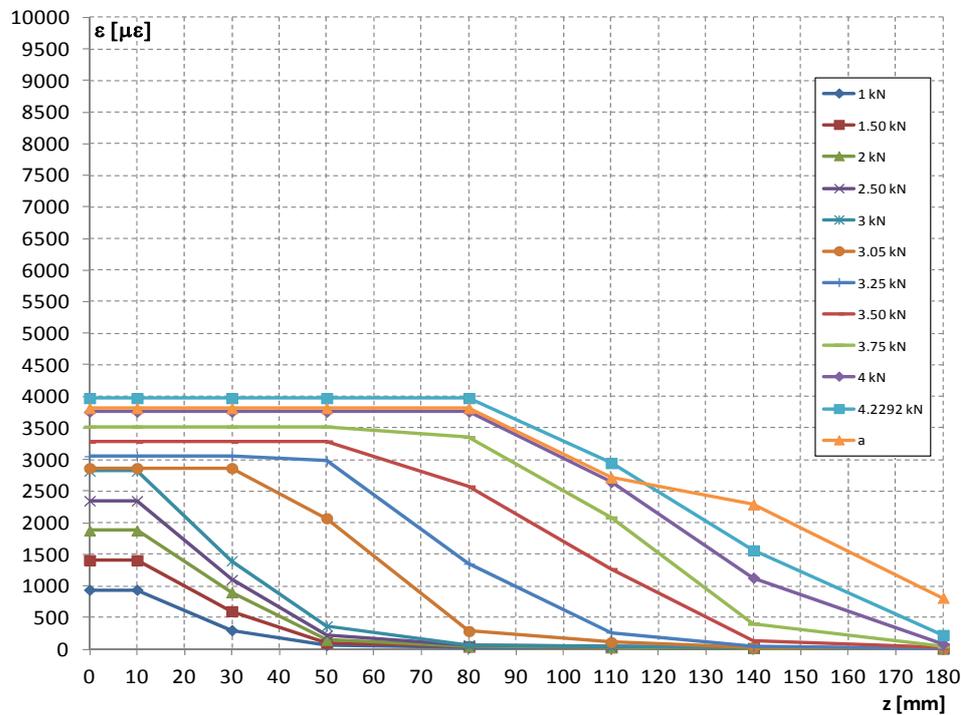


Figura 6.164 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova M3B1a (diagramma modificato).

Ancora una volta il diagramma originale mostra già in principio una maggiore regolarità rispetto a quelli ottenuti nelle prove su mattoni e muretti non rasati, grazie alla regolarizzazione superficiale operata dalla rasatura.

Partendo dalle deformazioni riportate in *figura 6.164*, relative ai livelli di carico indicati e utilizzando la (6.3), è possibile costruire un diagramma che mostri l'andamento delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.165*).

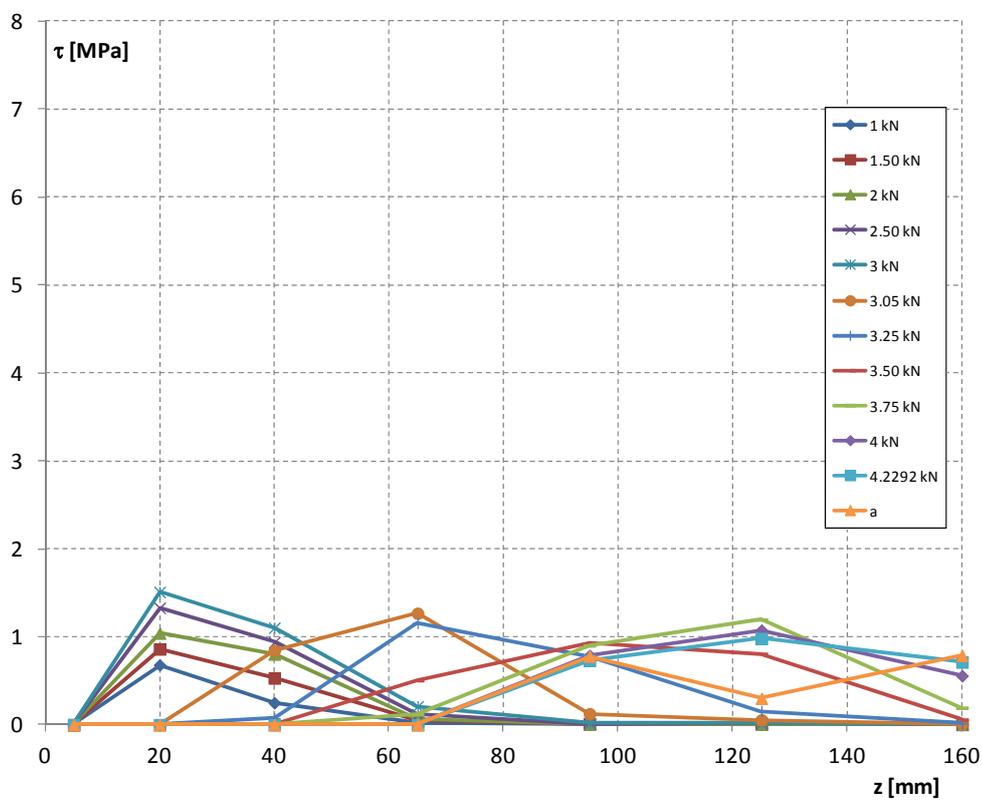


Figura 6.165 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova M3B1a).

Dal diagramma risulta evidente come le tensioni tangenziali si attestino su valori decisamente bassi.

A seguire, in *figura 6.166*, si riporta il diagramma degli scorrimenti ottenuti sempre per i livelli di carico selezionati.

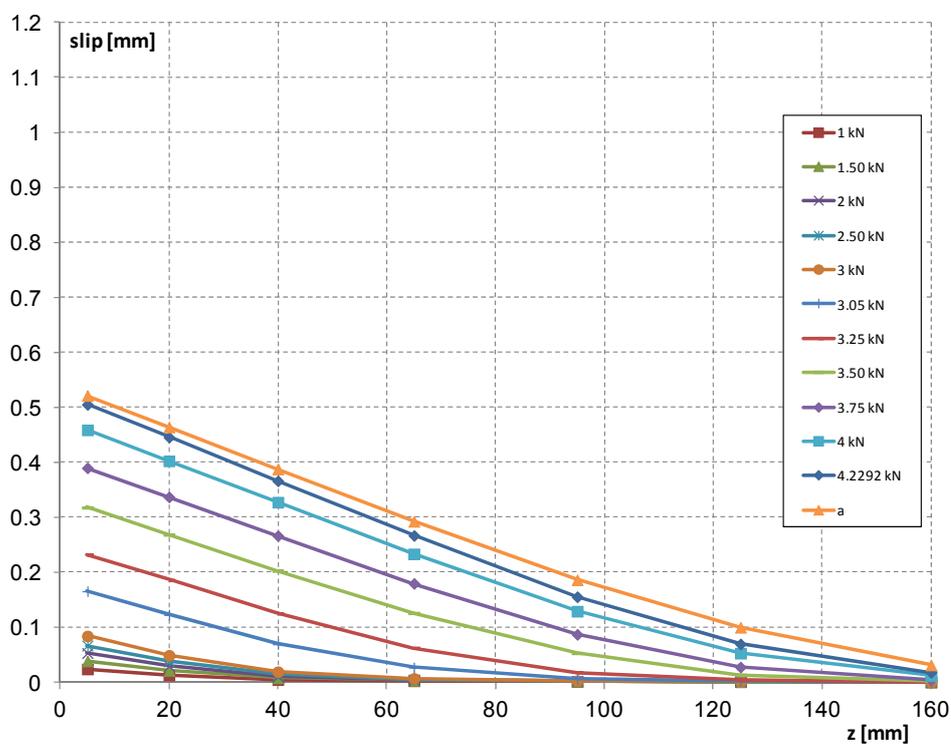


Figura 6.166 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova M3B1a).

Le immagini del campione a distacco del rinforzo avvenuto mostrano come la crisi sia avvenuta in parte all'interno dello strato di rasatura e in parte all'interfaccia malta-mattone.

La malta ancora una volta è risultata l'anello debole del sistema, in conformità a quanto già rilevato nel corso della prova B3B1a.

Le immagini mostrano inoltre che il rinforzo è stato applicato in maniera ottimale, visto che è stato possibile sfruttare per intero le caratteristiche del substrato senza avere alcuna crisi adesiva all'interfaccia tra rinforzo e rasatura.



Figura 6.167 - Campione al termine della prova M3B1a.



Figura 6.168 – Dettaglio della superficie del muretto a fine prova.

6.3.3 PROVA M3B1c

Questa prova, eseguita in data 21/07/2011, ha visto l'impiego di una strumentazione composta dalla cella di carico e da due trasduttori di spostamento. Visto l'esito soddisfacente della prova precedente (M3B1a), in questo caso non è stato applicato alcun estensimetro, ma ci si è limitati alla determinazione del grafico carico-allungamento relativo al rinforzo impiegato.

Gli strumenti sono visibili in *figura 6.169* e la loro descrizione, insieme ai canali di acquisizione utilizzati, è presentata in dettaglio nella *tabella 6.18*.



Figura 6.169 - Setup prova M3B1c.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.18 - Strumenti utilizzati durante la prova M3B1c e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza dei valori registrati dagli LVDT collegati ai canali 1 e 2, è stato possibile costruire il grafico carico-allungamento indicato nella figura seguente:

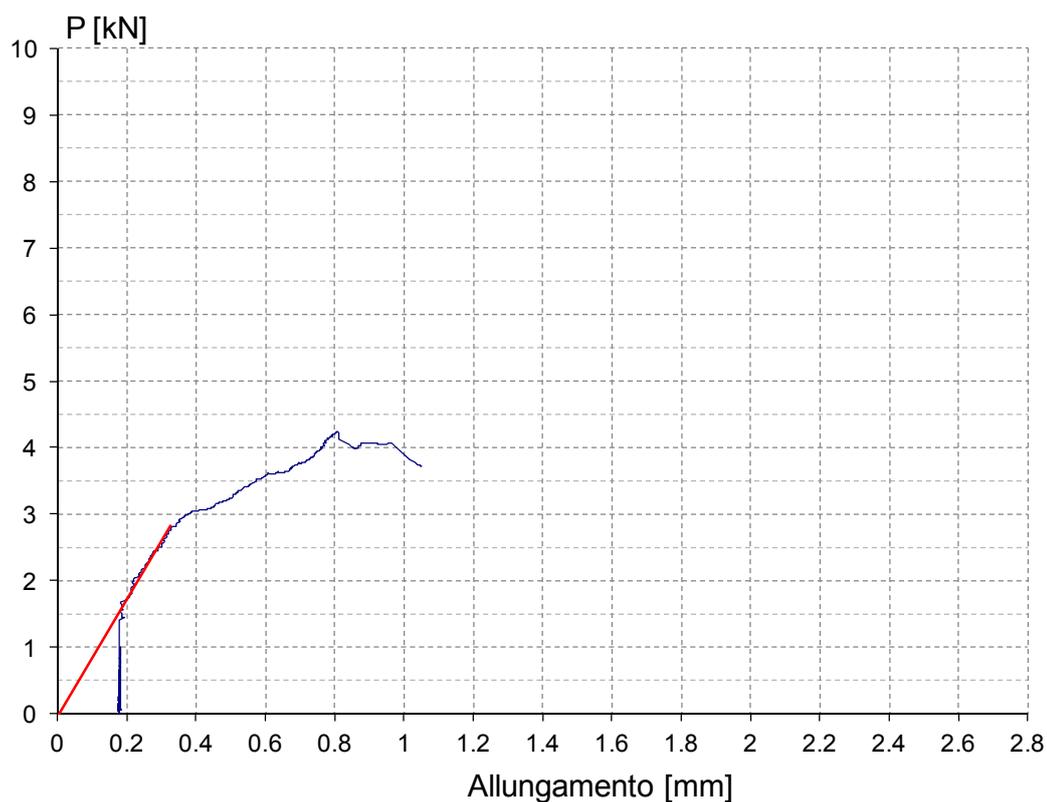


Figura 6.170 - Grafico carico-allungamento (prova M3B1c).

Le modalità di prova hanno previsto come al solito di eseguire un ciclo di carico-scarico iniziale per permettere l'assestamento del campione, prima di dare inizio alla prova vera e propria condotta in controllo di spostamento.

Il grafico sperimentale registrato ha mostrato una pendenza eccessiva nel primo tratto, con un evidente aumento di carico a fronte di spostamenti pressoché nulli.

Per questo è stato scelto di generare una linea di tendenza nel tratto immediatamente successivo al primo ed è stata effettuata una traslazione del diagramma ammettendo che sia questa la pendenza più corretta.

Questa scelta è giustificabile confrontando questo diagramma con quello relativo alla prova M3B1a: in precedenza infatti è stata registrata una pendenza più simile a quella mostrata dalla retta di colore rosso, piuttosto che un ramo così rigido.

L'andamento del diagramma è a questo punto simile a quello della prova precedente e il carico massimo registrato risulta pressoché analogo (4.231kN contro i 4.229 kN registrati in precedenza).

Si ricorda che confronti più approfonditi tra i risultati ottenuti saranno presentati più in dettaglio nel corso del capitolo successivo.

A seguire si riportano alcune immagini del campione al termine della prova (*figure 6.171 e 6.172*).

Il distacco è avvenuto correttamente attraverso asportazione di una parte consistente del substrato, lasciando intravedere una modalità di applicazione ottimale del rinforzo.

Ciò che va fatto notare è come, in questo caso, ci sia stata una vera e propria distruzione dello strato di rasatura, con diverse fessure e distacchi anche a lato della zona di incollaggio.



Figura 6.171 – Campione M3B1c al termine della prova.



Figura 6.172 – Particolare della modalità di distacco del rinforzo (prova M3B1c).

La crisi è avvenuta all'interfaccia tra rasatura e mattone, lasciando presagire che il punto debole del sistema sia costituito proprio dalla resistenza e dall'adesione della malta che non sono risultati sufficientemente elevati.

Del resto si tratta di una malta non specificatamente studiata per questi tipi di impiego e, come si vedrà in seguito nel corso delle prove eseguite con rasatura superficiale di tipo C, l'impiego di una malta con migliori caratteristiche ha consentito di aumentare decisamente il carico massimo sopportabile dal campione.

6.3.4 PROVA B4B1a

La prova in oggetto è stata svolta il 25/07/2011, utilizzando una strumentazione composta dalla cella di carico, da 9 estensimetri e da 2 LVDT.

La collocazione dei due trasduttori di spostamento per la determinazione dell'allungamento del rinforzo è stata quella classica adottata anche nelle altre prove dotate di 7 o 9 estensimetri (e già descritta al § 5.4).

L'impiego di 2 estensimetri anche sul tratto libero del rinforzo, compreso tra il bordo anteriore del campione e l'afferraggio, ha permesso di eseguire una ulteriore misura del modulo elastico, come era già avvenuto nelle prove B3A2a ed M1A1a.

Questa è anche l'ultima prova in cui è stata effettuata tale misura, quindi le successive non presenteranno più un setup a 9 estensimetri.

La strumentazione impiegata è visibile in dettaglio in *figura 6.173*, mentre nella *tabella 6.19* sono descritte in dettaglio le caratteristiche degli strumenti utilizzati, oltre ai rispettivi canali di acquisizione.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata
10	Estensimetro E8 (10 mm)	tratto libero, sopra
11	Estensimetro E9 (10 mm)	tratto libero, sotto

Tabella 6.19 - Strumenti utilizzati durante la prova B4B1a e canali di acquisizione.

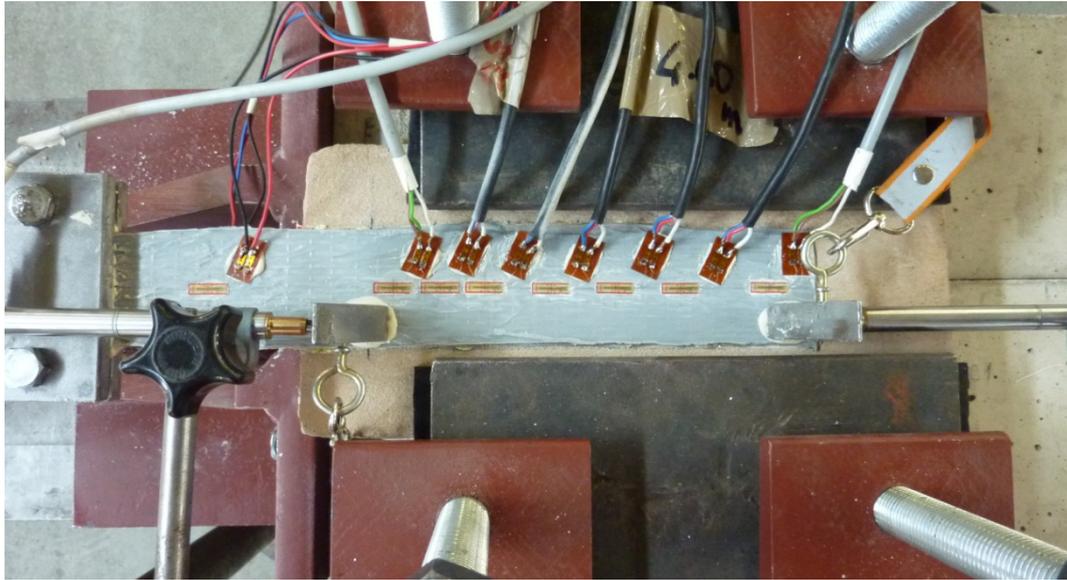


Figura 6.173 – Setup prova B4B1a.

In questa prova, allo stesso modo delle altre condotte con un setup a 7 o 9 estensimetri, si è preferito posizionare il primo LVDT come mostrato in figura per non rischiare un eventuale danneggiamento di estensimetri o terminazioni.

Utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza degli spostamenti registrati dagli LVDT collegati al canale 1 e 2, è stato possibile ricavare il grafico carico – allungamento mostrato in *figura 6.174*.

Come nel corso delle altre prove, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico fino ad un livello di 1 kN per permettere l'assestamento del campione.

Il valore di picco registrato al termine del primo tratto di crescita del carico è stato pari a 4.10 kN.

Ancora una volta (e questa è una caratteristica ricorrente nelle prove con finitura di tipo B) si tratta di un carico piuttosto basso.

Il diagramma carico - allungamento ottenuto in via alternativa computando l'allungamento non grazie alle letture degli LVDT, ma tramite integrazione delle deformazioni rilevate per ogni livello di forza, è mostrato in *figura 6.175*.

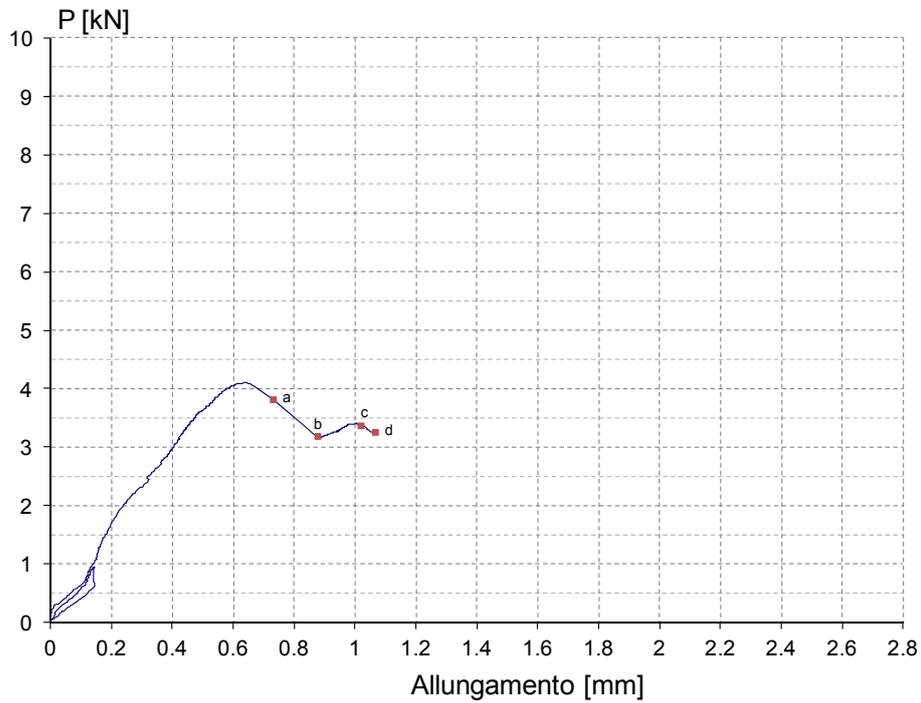


Figura 6.174 - Grafico carico-allungamento per la prova B4B1a (ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT).

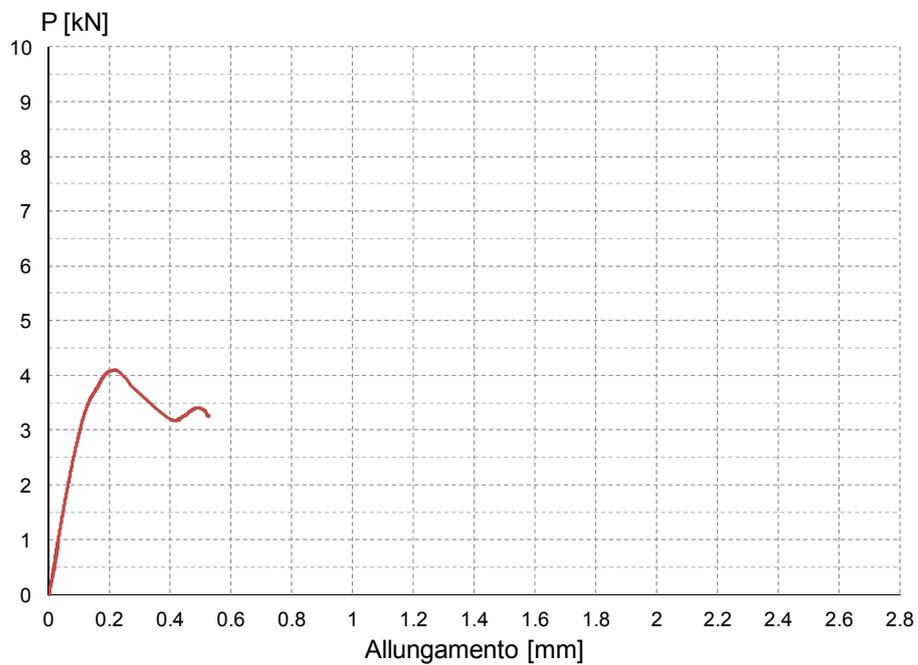


Figura 6.175 – Grafico carico-allungamento ricavato calcolando l’allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova B4B1a).

In *figura 6.176* viene riportato il grafico tensione – deformazione rilevato nel tratto libero e utilizzato per il calcolo del modulo elastico del rinforzo.

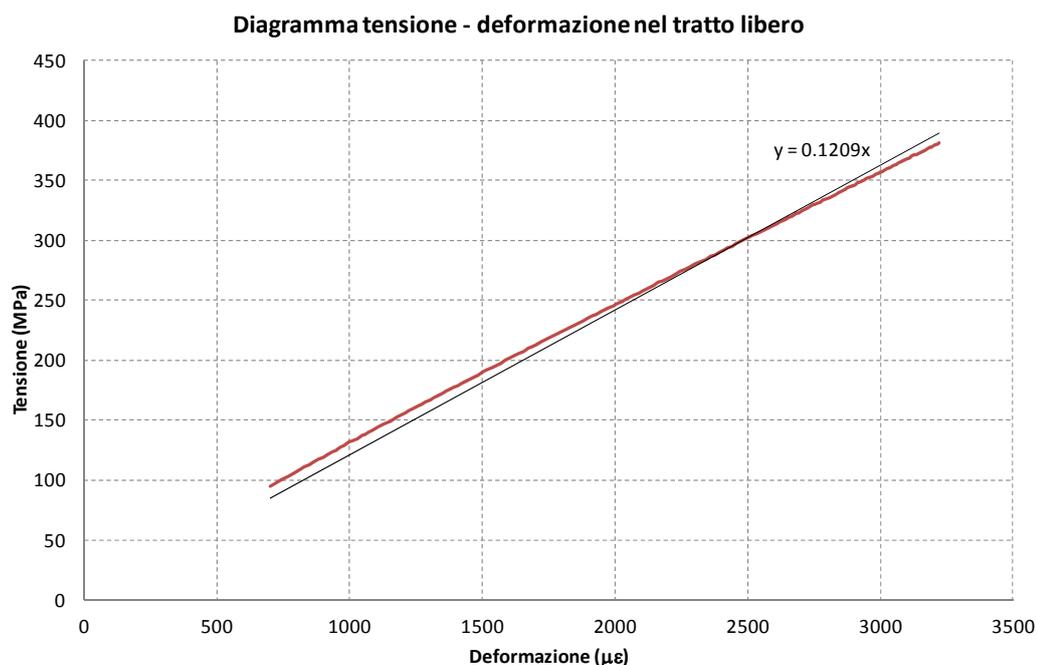


Figura 6.176 - Grafico tensione-deformazione del composito nel tratto libero (prova B4B1a).

Si ricorda che la tensione è stata calcolata semplicemente come rapporto fra carico applicato e area della sezione del rinforzo.

La deformazione rappresentata invece è data dalla media tra le deformazioni registrate dagli estensimetri E8 ed E9, in modo da avere un valore dipendente dallo sforzo assiale applicato al composito, depurando il calcolo da possibili contributi di tipo flessionale.

In figura, come consuetudine nelle misure del modulo elastico, viene rappresentato solo il tratto di grafico compreso tra il 20% e l'80% del carico massimo registrato.

Questa scelta è motivata dalla necessità di eliminare dal computo l'eventuale assestamento iniziale del provino e comunque di considerare il tratto ad andamento elastico-lineare, senza giungere troppo vicino al carico massimo, in corrispondenza del quale generalmente ci si discosta dalla linearità.

Dopo aver generato una linea di tendenza per il tratto rappresentato e aver opportunamente moltiplicato il coefficiente angolare della retta per 10^6 , è stato possibile ottenere il valore del modulo elastico cercato, pari in questo caso a 120900 MPa.

La media dei moduli registrati durante le prove B3A2a, M1A1a e B4B1a è risultata pari a 123767 MPa e pertanto si è scelto di utilizzare questo valore del modulo E nella rielaborazione dei dati delle prove sperimentali, trattandosi in tutti i casi dello stesso rinforzo.

Le deformazioni registrate dagli estensimetri applicati sul tratto incollato del rinforzo in funzione del carico applicato sono indicate in *figura 6.177*.

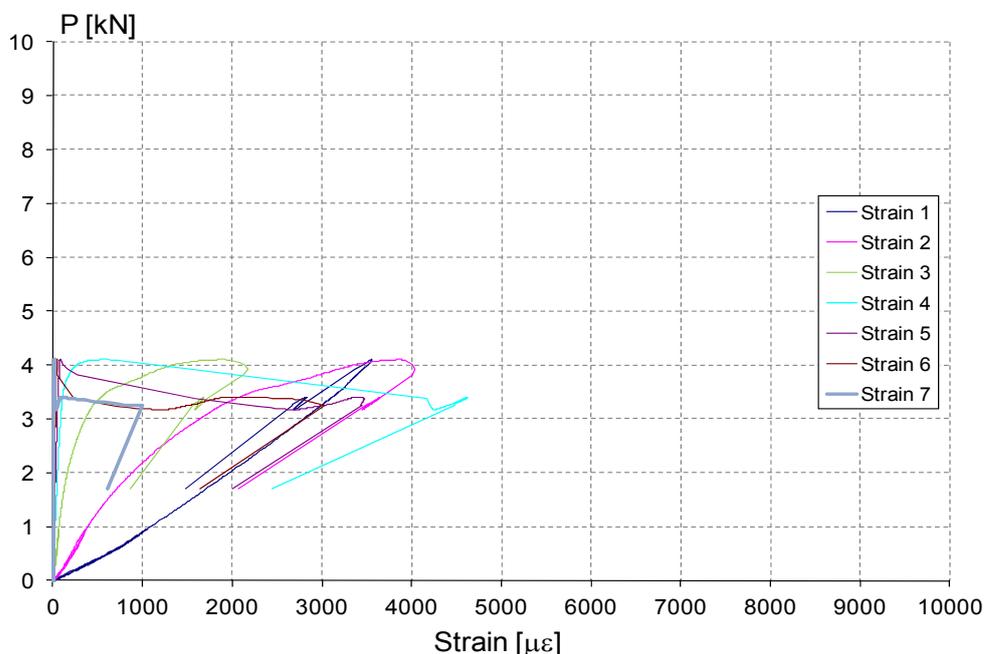


Figura 6.177 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B4B1a).

Come già rilevato nel corso delle altre prove condotte su campioni con finitura di tipo B, il modesto valore del carico massimo registrato spiega le basse deformazioni registrate.

La *figura 6.178* mostra invece le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati lungo l'asse del rinforzo, in funzione della loro posizione sul tratto incollato, per ogni livello di carico scelto.

Si tratta del diagramma originale, che riporta i valori effettivamente registrati durante la prova.

Le curve indicate come a,b,c,d sono relative ai livelli di carico registrati oltre il picco del diagramma carico-allungamento.

Il diagramma modificato (*figura 6.179*) è stato ottenuto in base alle considerazioni già espresse al § 6.2.1 in merito all'andamento delle deformazioni lungo il composito.

Utilizzando i valori delle deformazioni corretti riportati in *figura 6.179*, relative ai livelli di carico indicati, è possibile costruire il grafico che mostra l'andamento delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.180*).

Si ricorda che per eseguire il calcolo è necessario utilizzare la (6.3).

Visto il modesto valore del carico di picco registrato, come previsto, anche le tensioni tangenziali risultano piuttosto basse.

Questa è una caratteristica tipica delle prove condotte su campioni dotati di rasatura superficiale di tipo B.

Gli scorrimenti in funzione dell'ascissa z , calcolati per i diversi livelli di carico e ottenuti secondo quanto già indicato al § 6.2.1, sono rappresentati in *figura 6.181*.

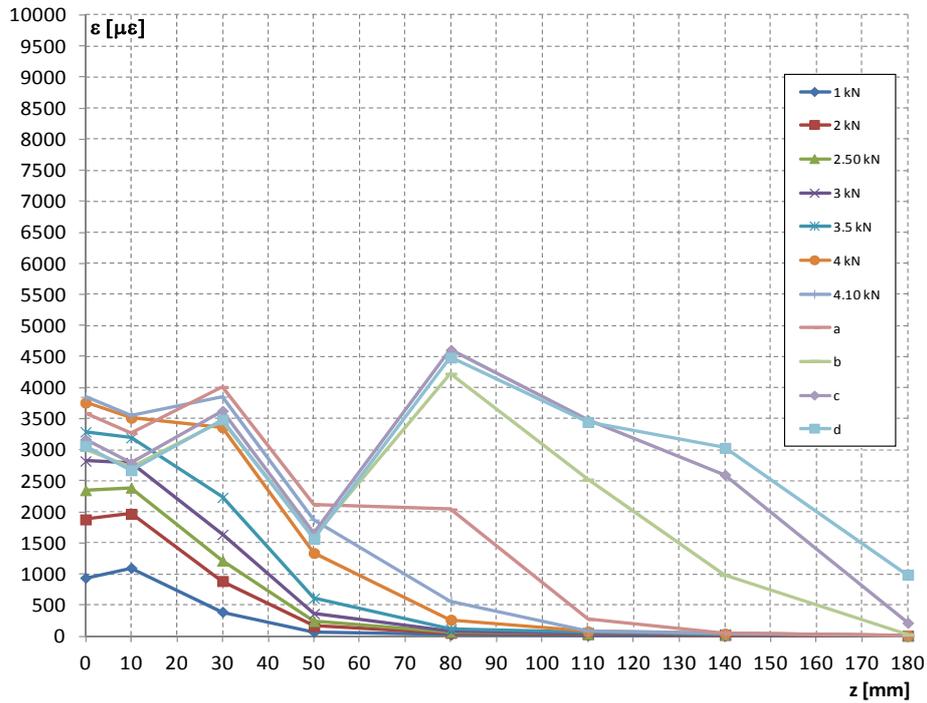


Figura 6.178 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova B4B1a (diagramma originale).

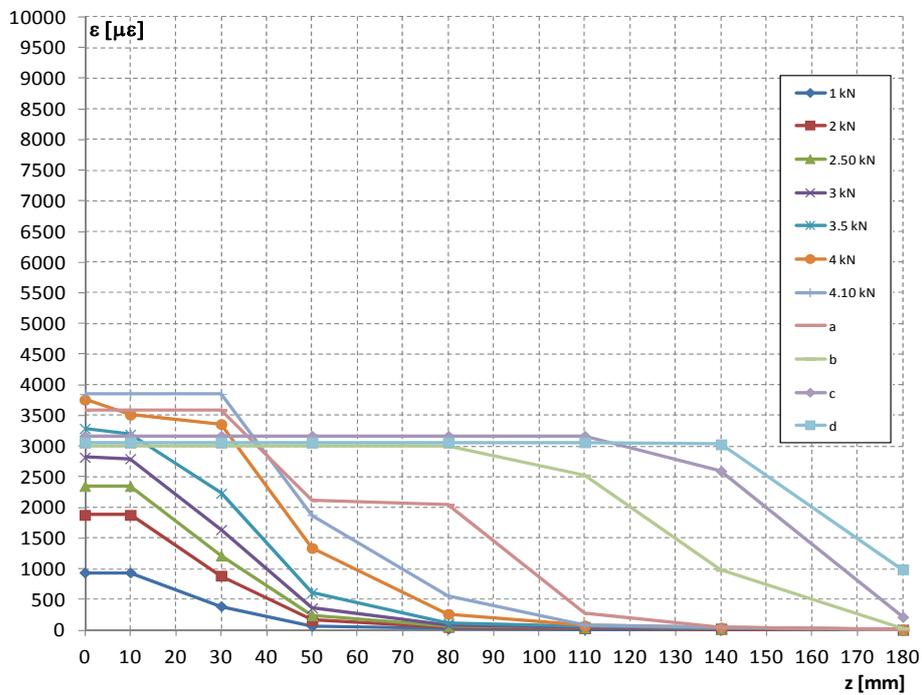


Figura 6.179 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova B4B1a (diagramma modificato).

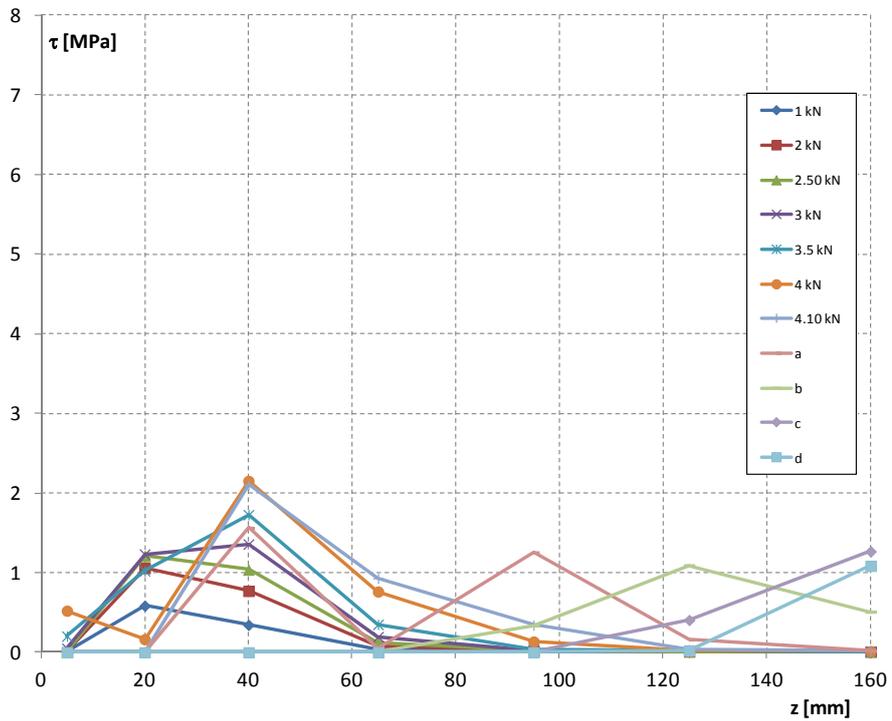


Figura 6.180 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova B4B1a).

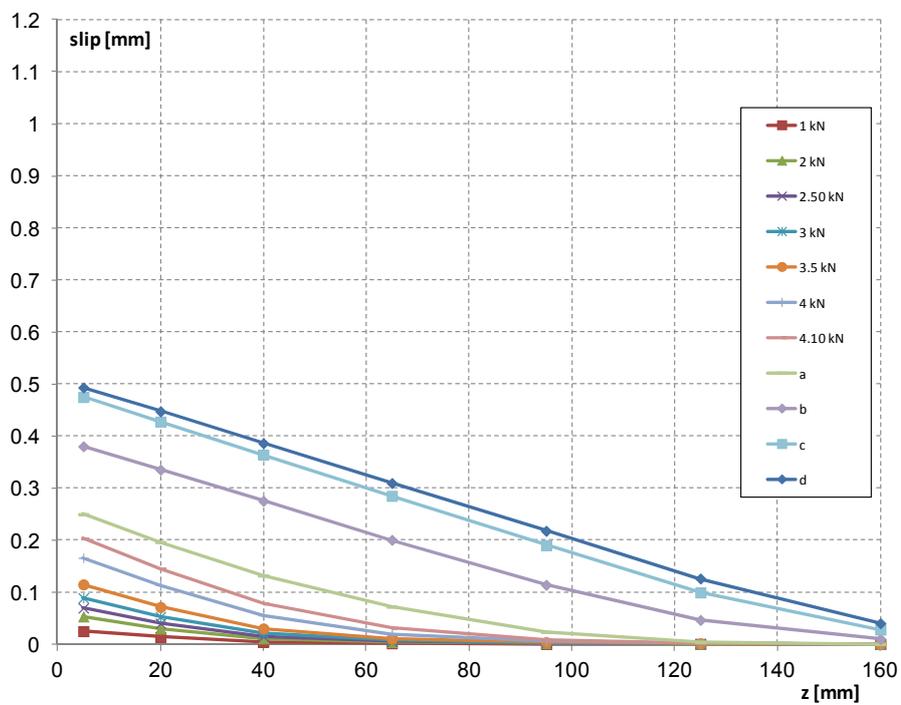


Figura 6.181 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova B4B1a).

A completamento della descrizione della prova svolta si riportano alcune immagini del campione dopo il distacco del rinforzo.



Figura 6.182 – Campione B4B1a al termine della prova.



Figura 6.183 – Dettaglio delle superfici.

Il distacco del rinforzo è avvenuto con asportazione di una parte della rasatura, evidenziando come questa sia risultata effettivamente l'elemento debole del sistema.

Le prove condotte su campioni con finitura di tipo C (ovvero utilizzando per la rasatura una malta specifica dotata di migliori caratteristiche meccaniche) mostreranno invece che è possibile anche incrementare il carico di picco applicando un sottile strato di rasatura superficiale.

6.3.5 PROVA M4B1a

La prova, condotta in data 02/08/2011, ha visto l'impiego della cella di carico, di 7 estensimetri lungo la zona incollata del composito e di 2 trasduttori di spostamento.

La strumentazione impiegata è visibile in *figura 6.184*, mentre all'interno della *tabella 6.20* sono indicati in dettaglio le caratteristiche degli strumenti utilizzati e i corrispondenti canali di acquisizione.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (6 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (6 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (6 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (6 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (6 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (6 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (6 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.20 - Strumenti utilizzati durante la prova M4B1a e canali di acquisizione.

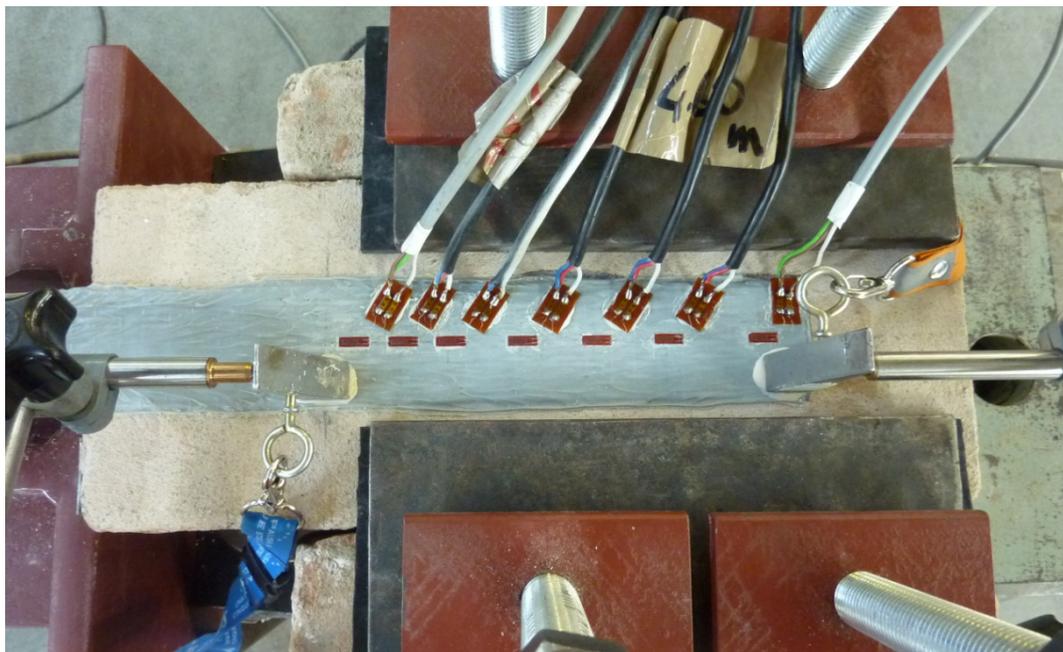


Figura 6.184 – Setup prova M4B1a.

Utilizzando i valori registrati dalla cella di carico e facendo la differenza delle letture dei due trasduttori di spostamento, è stato possibile determinare il grafico carico – allungamento riportato in *figura 6.185*.

Come nel corso delle altre prove, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico fino ad un carico di circa 1 kN per permettere l'assestamento del campione.

Terminata questa fase, il carico è cresciuto (eseguendo la prova in controllo di spostamento) fino a raggiungere un primo picco pari a 4.58 kN.

Dopo il picco si è verificato un breve tratto di softening, prima di un nuovo ramo di crescita del carico che ha portato al massimo valore registrato di 4.85 kN.

Al termine di questo tratto, si è verificato un nuovo tratto di discesa del carico, con un brevissimo ramo finale di crescita fino a giungere al completo distacco del rinforzo.

Il diagramma carico – allungamento, ottenuto combinando le letture della cella di carico con all'allungamento determinato eseguendo l'integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di forza, è indicato in *figura 6.186*.

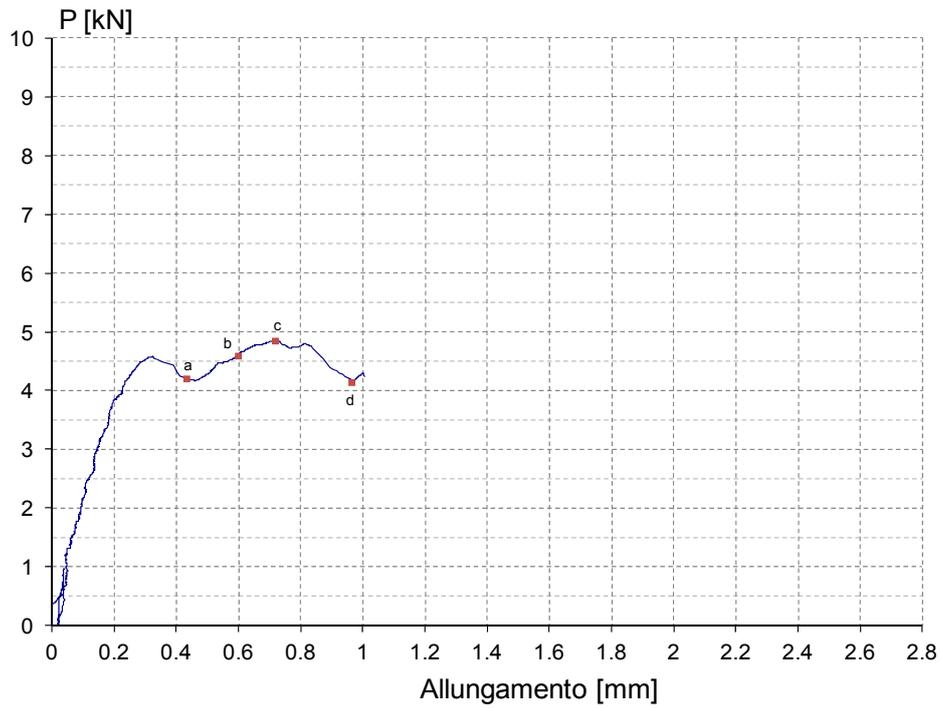


Figura 6.185 - Grafico carico-allungamento per la prova M4B1a (ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT).

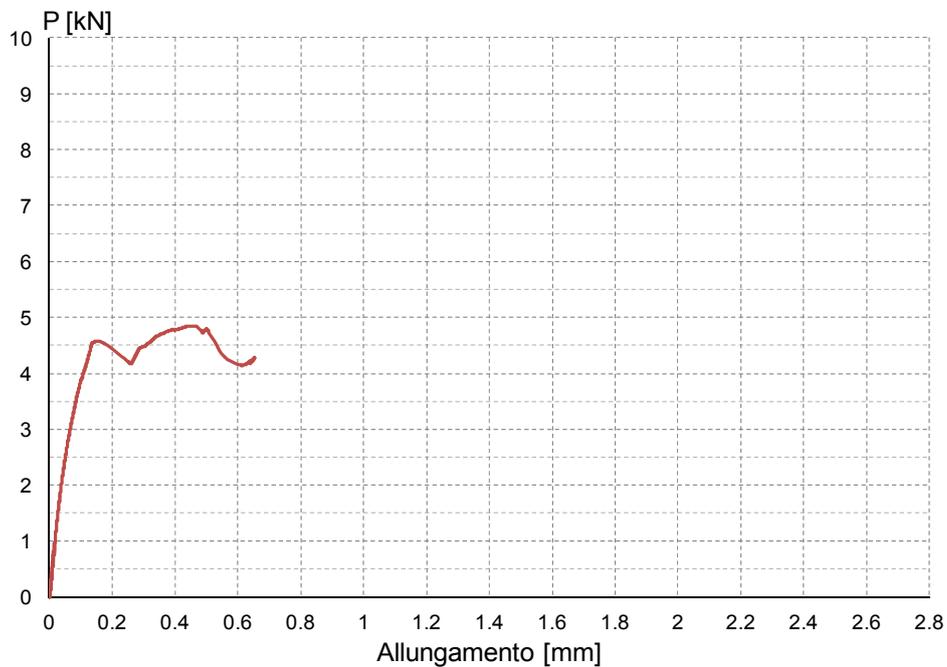


Figura 6.186 - Grafico carico-allungamento ricavato calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova M4B1a).

Le deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato sono indicate in *figura 6.187*.

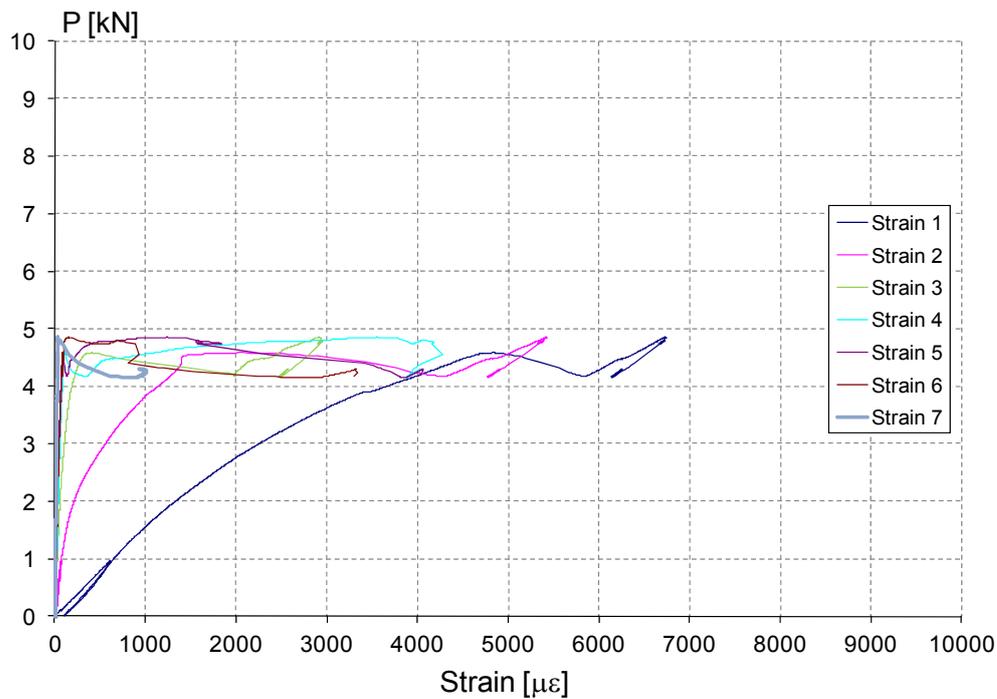


Figura 6.187 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova M4B1a).

La *figura 6.188* mostra invece le deformazioni misurate lungo l'asse del rinforzo per ogni livello di carico selezionato.

I profili illustrati, come al solito, tentano di descrivere al meglio l'evoluzione dello stato deformativo nel rinforzo durante lo svolgimento della prova.

Sfruttando le considerazioni indicate al § 6.2.1, è possibile modificare questo diagramma, relativo ai valori non corretti delle deformazioni, ottenendo quello rappresentato in *figura 6.189*.

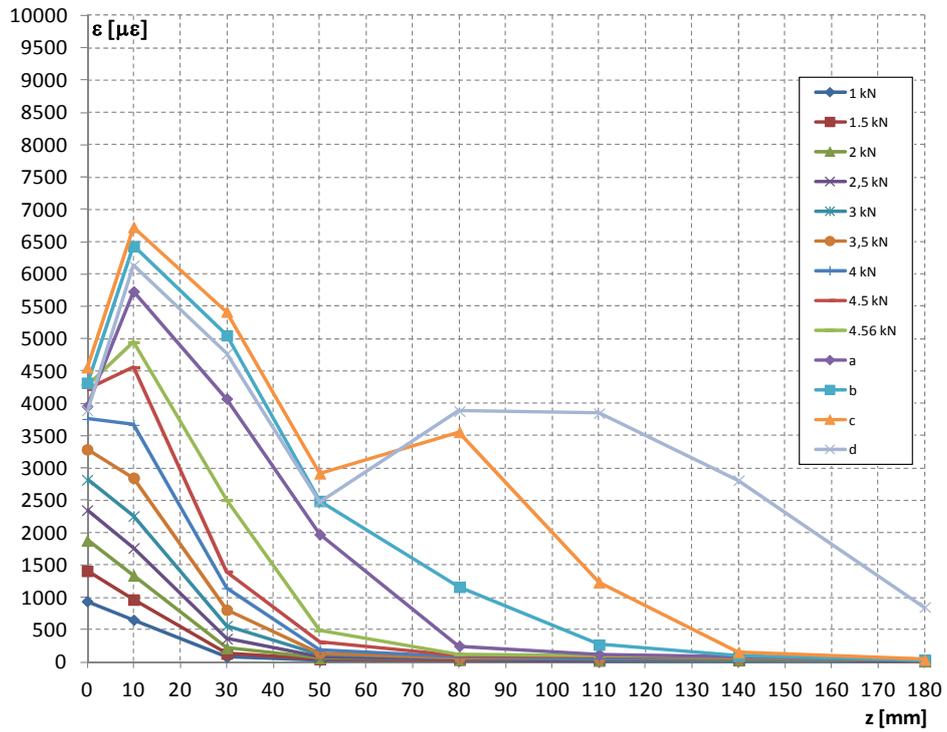


Figura 6.188 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo per la prova M4B1a (diagramma originale).

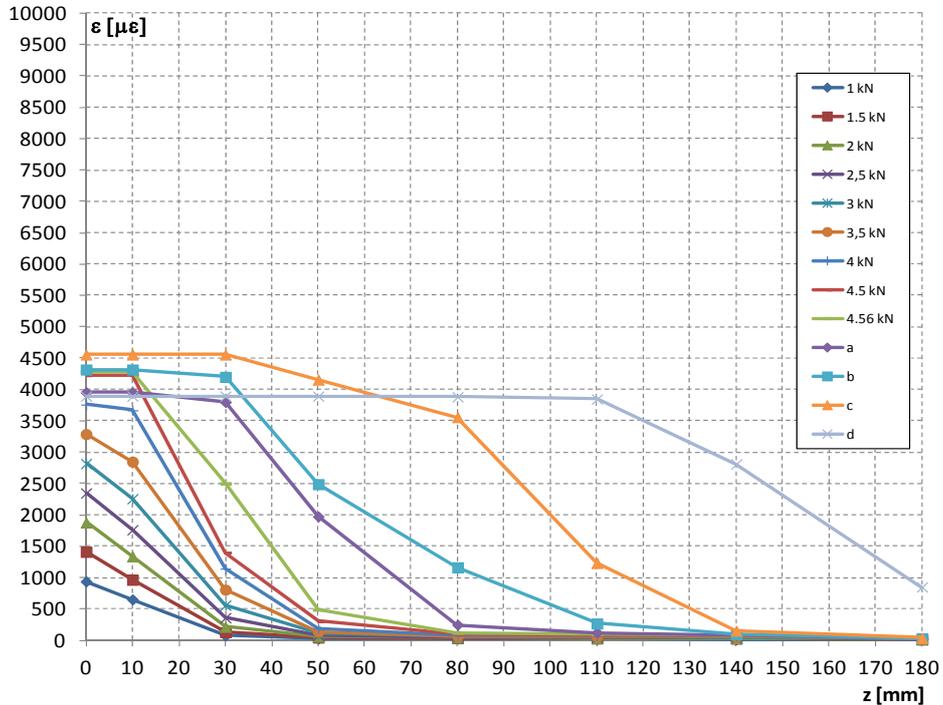


Figura 6.189 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova M4B1a (diagramma modificato).

Utilizzando i valori delle deformazioni regolarizzati e applicando la (6.3), è possibile costruire il diagramma delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.190*).

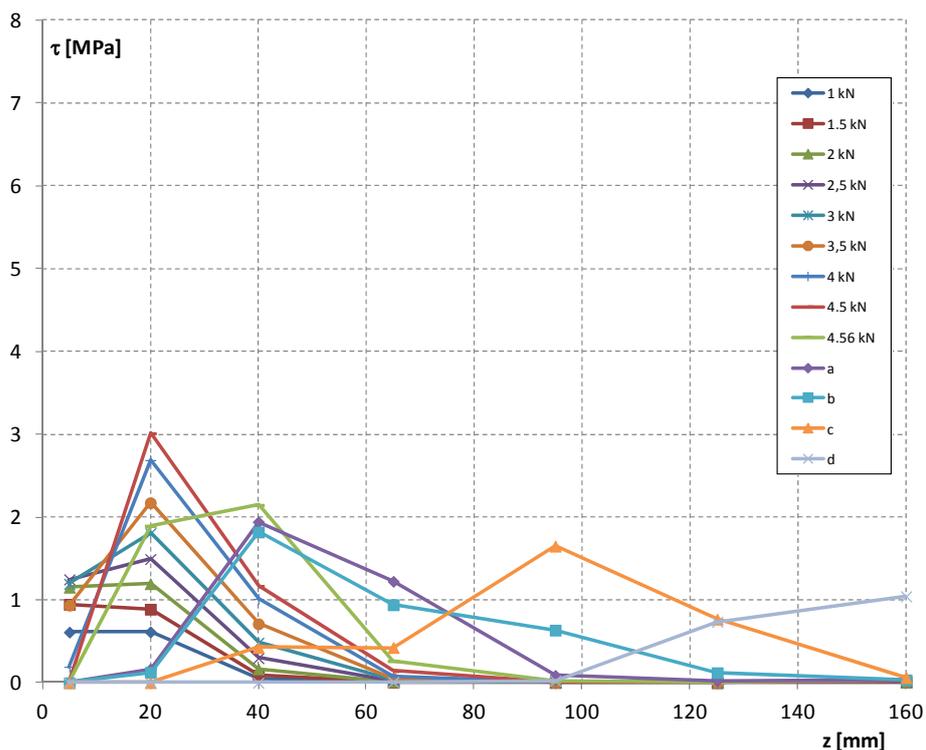


Figura 6.190 - Tensioni tangenziali lungo l’asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova M4B1a).

Le tensioni tangenziali (caratteristica tipica di questo tipo di rasatura) mostrano valori di picco tutto sommato modesti se confrontati con quelli registrati nel corso delle prove eseguite senza rasatura superficiale.

Il diagramma degli scorrimenti, ottenuti sempre per i livelli di carico selezionati, è invece indicato in *figura 6.191*.

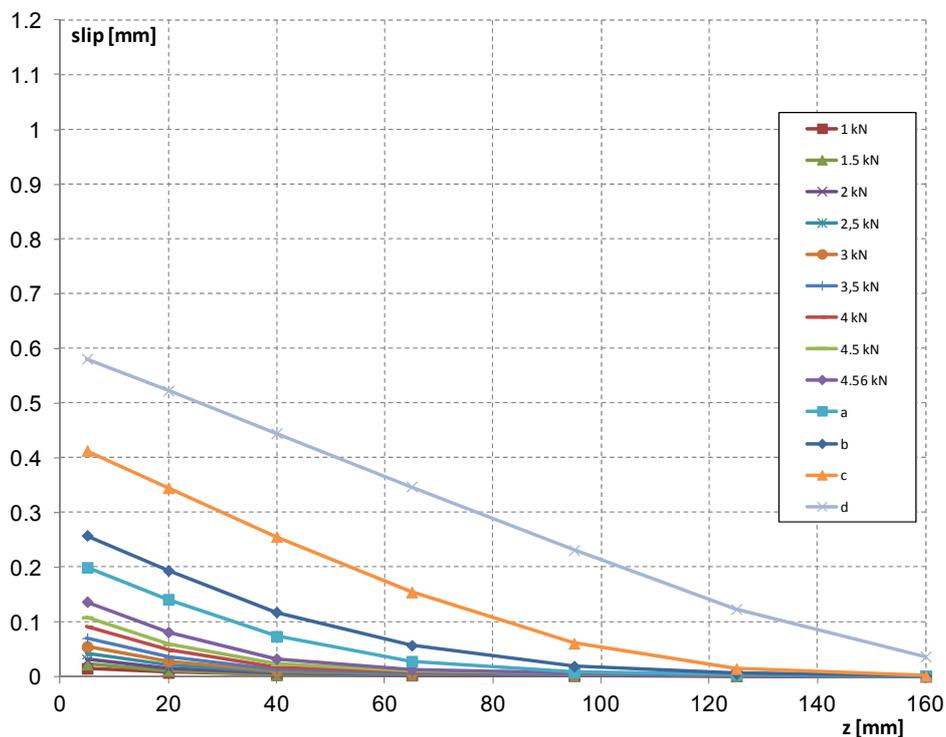


Figura 6.191 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova M4B1a).

La figura 6.192 mostra il campione a fine prova: come prevedibile, visto l'esito delle prove precedenti, il distacco del rinforzo è avvenuto con asportazione di un consistente strato di rasatura.

Il profondo segno lasciato sulla parte terminale della zona di incollaggio è indice di un forte ancoraggio del rinforzo in questa zona.

Il composito è stato in grado di sfruttare per intero le caratteristiche del substrato e si vede chiaramente come, per aumentare il carico massimo supportabile dal campione, è proprio qui che bisognerebbe agire, incrementando le caratteristiche meccaniche di quest'ultimo.

L'unico dubbio che si presenta sulla modalità di applicazione del rinforzo è relativo alla parte iniziale della zona di incollaggio: sembra infatti che in questa zona, per un brevissimo tratto, il rinforzo fosse già staccato oppure non adeguatamente incollato.

Questa ipotesi è confermata dal diagramma riportato in *figura 6.187*, dove sembra che effettivamente il primo estensimetro abbia rilevato una modalità di deformazione più simile a quella di un tratto libero piuttosto che a quella di un tratto incollato.

La pendenza della curva è infatti in linea con il valore del modulo elastico del rinforzo già misurato nel corso delle altre prove.



Figura 6.192 - Campione al termine della prova M4B1a.

6.3.6 PROVA M4B1c

La prova è stata eseguita in data 12/09/2011, impiegando una strumentazione composta solamente dalla cella di carico e da due trasduttori di spostamento.

A differenza della prova M4B1a, in questo caso non è stato applicato alcun estensimetro, ma ci si è limitati alla determinazione del grafico carico-allungamento relativo al rinforzo impiegato.

Il setup di prova è visibile in *figura 6.193* e la descrizione delle caratteristiche degli strumenti, unitamente ai canali di acquisizione utilizzati, è presentata in dettaglio nella *tabella 6.21*.

Si fa presente che, vista l'assenza degli estensimetri, la disposizione degli LVDT adottata è risultata ottimale, perché ha permesso di minimizzare le quote degli strumenti, in modo da tutelarsi nei confronti di eventuali rotazioni indesiderate degli elementi metallici di contrasto su cui appoggiano gli induttivi.



Figura 6.193 - Setup prova M4B1c.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.21 - Strumenti utilizzati durante la prova M4B1c e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza dei valori registrati dagli LVDT collegati ai canali 1 e 2, è stato possibile costruire, analogamente alle altre prove svolte, il grafico carico-allungamento del composito (figura 6.194).

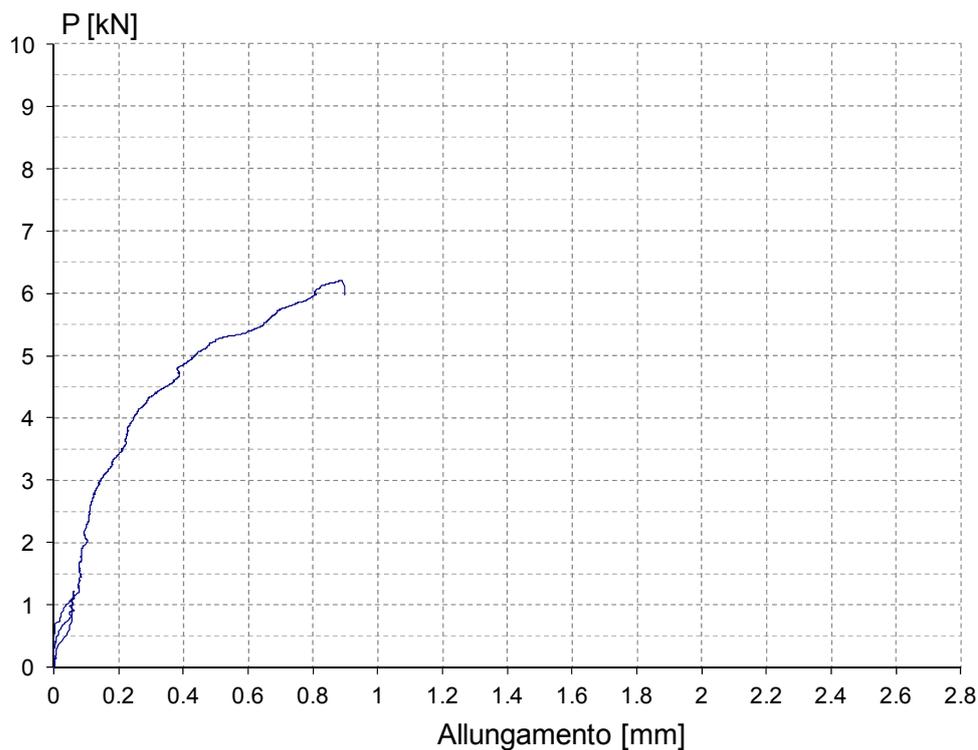


Figura 6.194 - Grafico carico-allungamento (prova M4B1c).

Le modalità di prova hanno previsto come al solito di eseguire un ciclo di carico-scarico iniziale per permettere l'assestamento del campione, prima di dare inizio alla prova vera e propria, condotta in controllo di spostamento.

Ciò che appare subito evidente dall'analisi del diagramma carico-allungamento è come in questo caso si sia ottenuto un valore di picco del carico decisamente elevato in rapporto alle altre prove condotte su campioni con rasatura superficiale di tipo B.

Il carico massimo registrato è risultato infatti pari a 6.212 kN, mentre ad esempio, nella precedente prova M4B1a condotta su un campione analogo, il picco è risultato di soli 4.85 kN.

Si tratta senza dubbio di una differenza degna di nota.

La stessa cosa non era accaduta per le prove M3B1a e M3B1c, dove il carico massimo registrato risultava pressoché analogo (rispettivamente 4.229 kN e 4.231kN).

Si ricorda che confronti più approfonditi tra i risultati ottenuti nelle prove saranno presentati in maniera estesa nel corso del capitolo successivo.

A seguire si riportano alcune immagini del campione al termine della prova.



Figura 6.195 – Campione M4B1c al termine della prova.



Figura 6.196 – Particolare della modalità di distacco del rinforzo (prova M4B1c).

Il distacco è avvenuto, come del resto nelle altre prove condotte su campioni con rasatura superficiale di tipo B, attraverso asportazione di una parte consistente del substrato, lasciando intravedere una modalità di applicazione ottimale del rinforzo.

La malta utilizzata è risultata ancora una volta l'elemento debole, anche se in questo caso il carico massimo registrato non è stato poi così basso.

6.4 PROVE DI ADERENZA SU MATTONI E MURETTI CON RASATURA TIPO C

Terminata la descrizione delle prove svolte su mattoni e muretti con finitura superficiale di tipo B, si presentano ora i risultati ottenuti in merito ai campioni con rasatura tipo C (ovvero effettuata con malta Mapei Mapefinish).

Per una accurata descrizione delle caratteristiche della malta in oggetto e per la spiegazione delle sigle utilizzate, si rimanda a quanto già espresso nel corso del capitolo 2.

6.4.1 PROVA B3C1a

La prova è stata svolta il 18/07/2011, utilizzando una strumentazione composta da 7 estensimetri (secondo la disposizione indicata al § 5.3) e 2 trasduttori di spostamento, oltre ovviamente alla cella di carico, necessaria in tutte le prove.

La collocazione degli LVDT, impiegati per la determinazione dell'allungamento del rinforzo, è stata già descritta al § 5.4.

La strumentazione impiegata è visibile in *figura 6.197*, mentre nella *tabella 6.22* sono descritti in dettaglio gli strumenti utilizzati e i canali di acquisizione.

In questa prova, come consuetudine in presenza degli estensimetri, si è preferito posizionare il primo LVDT come mostrato in figura, in modo da non rischiare di danneggiare le terminazioni degli strumenti.

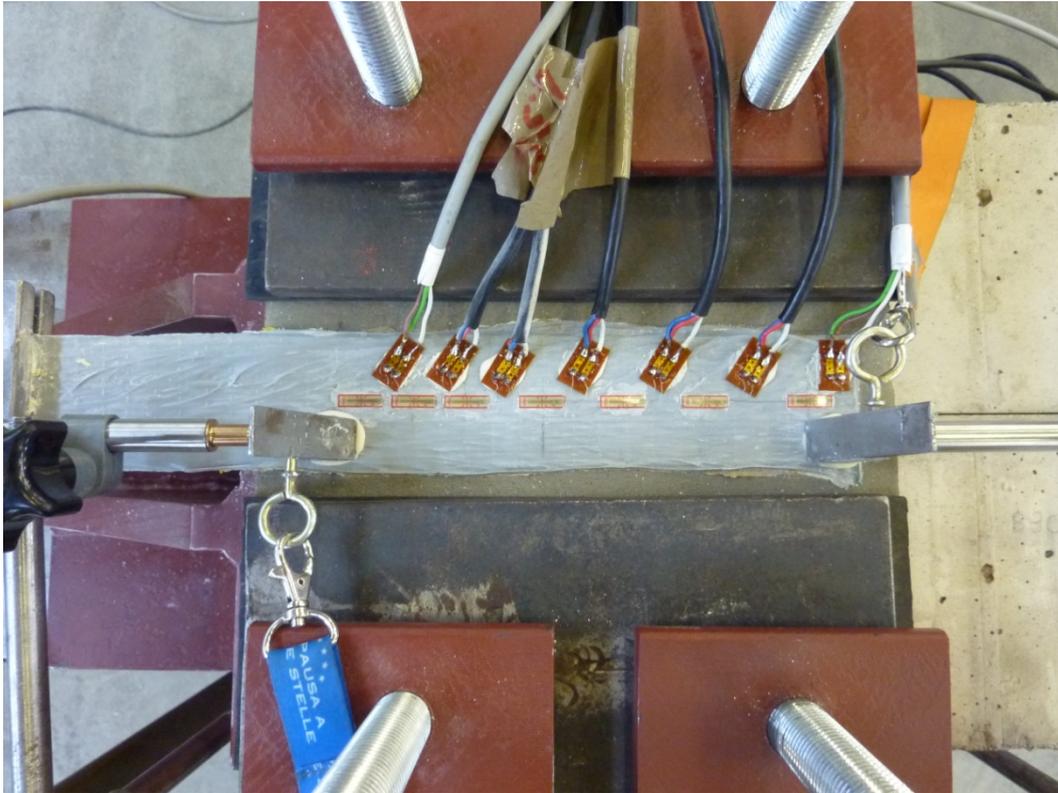


Figura 6.197 – Setup prova B3C1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (10 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (10 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (10 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (10 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (10 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (10 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (10 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.22 - Strumenti utilizzati durante la prova B3C1a e canali di acquisizione.

Utilizzando le letture della cella di carico e correlandole alla differenza dei valori registrati dagli LVDT collegati al canale 1 e 2, è stato possibile costruire il grafico carico – allungamento riportato in *figura 6.198*.

Come in tutte le altre prove, è stato eseguito un primo ciclo di carico-scarico fino ad un livello di 1 kN per permettere l'assestamento del campione.

Terminato il ciclo, il carico è cresciuto fino a raggiungere un primo picco pari a 8.3 kN, valore molto prossimo al carico massimo registrato nel corso della prova di 8.378 kN.

Appare subito evidente come i valori in gioco risultino sensibilmente elevati, ben diversi rispetto ai carichi registrati nei campioni con rasatura di tipo B e maggiori anche dei provini non rasati.

Pertanto si evidenzia subito un effetto molto positivo di questo tipo di rasatura sul carico massimo sopportabile dal rinforzo, effetto che sarà riscontrato anche nel corso delle prove che verranno descritte in seguito.

Con l'impiego di questo tipo di rasatura si uniscono quindi i vantaggi dati dal livellamento delle asperità superficiali (che possono generare effetti locali e causare spesso la nascita di tensioni di peeling rilevanti) con gli effetti positivi dati dagli elevati valori di resistenza del substrato.

I punti segnalati in figura, come consuetudine, sono rappresentativi dei livelli di carico scelti dopo il picco per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di debonding.

Si fa presente che un'altra modalità per ottenere il diagramma carico - allungamento è quella di correlare le letture della cella di carico all'allungamento determinato non grazie agli LVDT, ma tramite integrazione delle deformazioni registrate in corrispondenza di ogni livello di forza (*figura 6.199*).

Il calcolo dell'allungamento in questo caso va eseguito utilizzando la relazione (6.1).

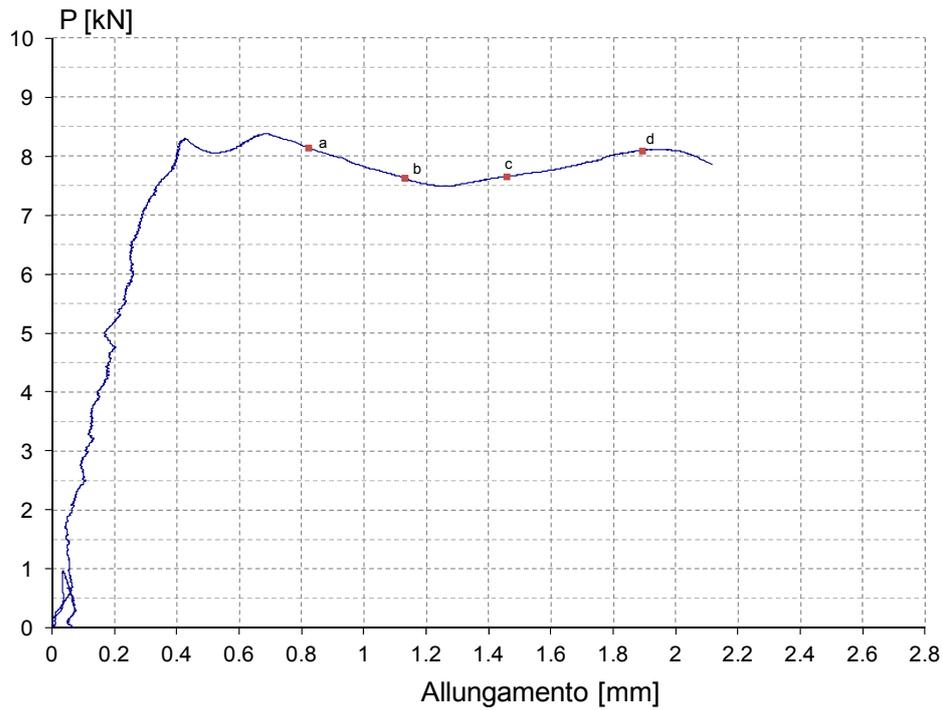


Figura 6.198 - Grafico carico-allungamento per la prova B3C1a (ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT).

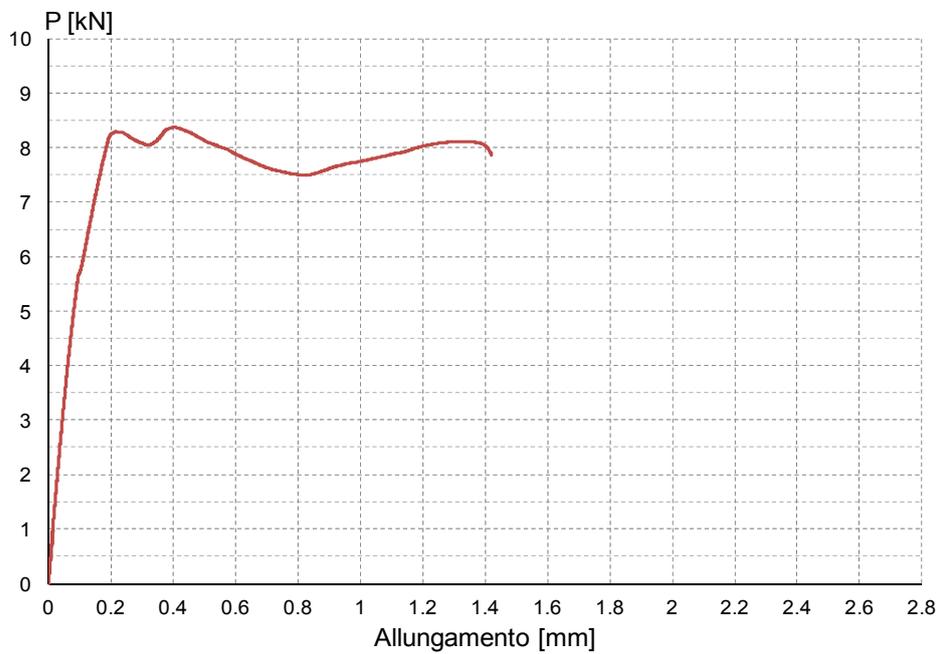


Figura 6.199 - Grafico carico-allungamento ricavato calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova B3C1a).

Le deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato sono rappresentate in *figura 6.200*.

Visto che la scala del diagramma è stata mantenuta costante per la rappresentazione dei risultati di tutte le prove, ciò che appare subito evidente è come si siano manifestate deformazioni assolutamente rilevanti, conseguenza dell'elevato carico sopportato dal campione.

La *figura 6.201* mostra il profilo originale delle deformazioni misurate dagli estensimetri applicati lungo l'asse del rinforzo, per ogni livello di carico indicato.

Le curve indicate con le lettere minuscole a, b, c, d sono quelle ottenute in corrispondenza di livelli di carico che si sono presentati dopo il picco del diagramma carico – allungamento.

Sfruttando le considerazioni già espresse al § 6.2.1, è possibile modificare questo diagramma, relativo ai valori effettivamente registrati durante le prove, ottenendo il diagramma corretto rappresentato in *figura 6.202*.

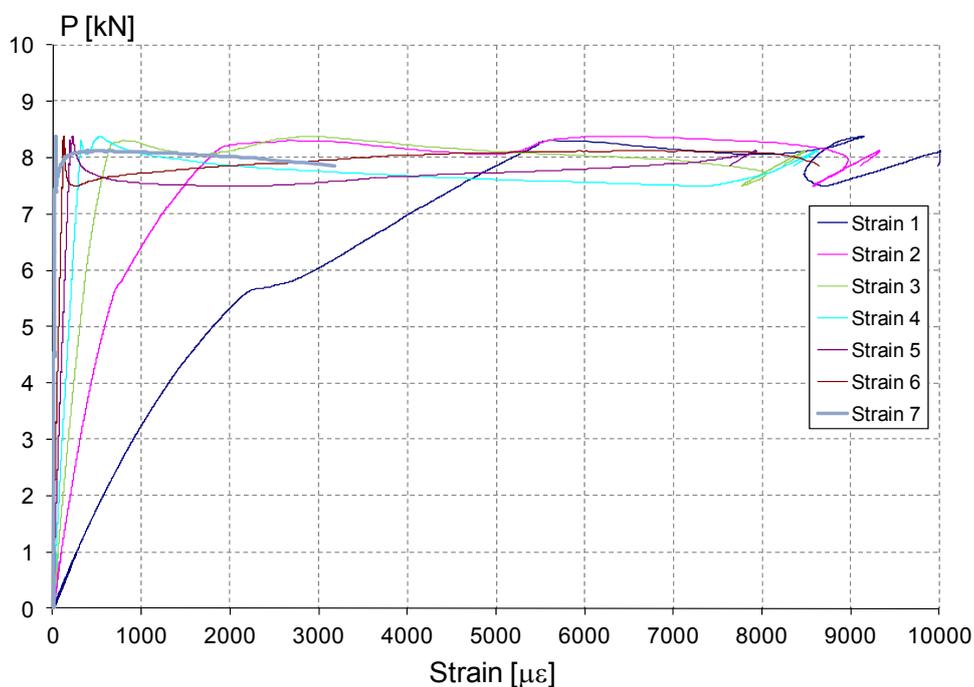


Figura 6.200 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B3C1a).

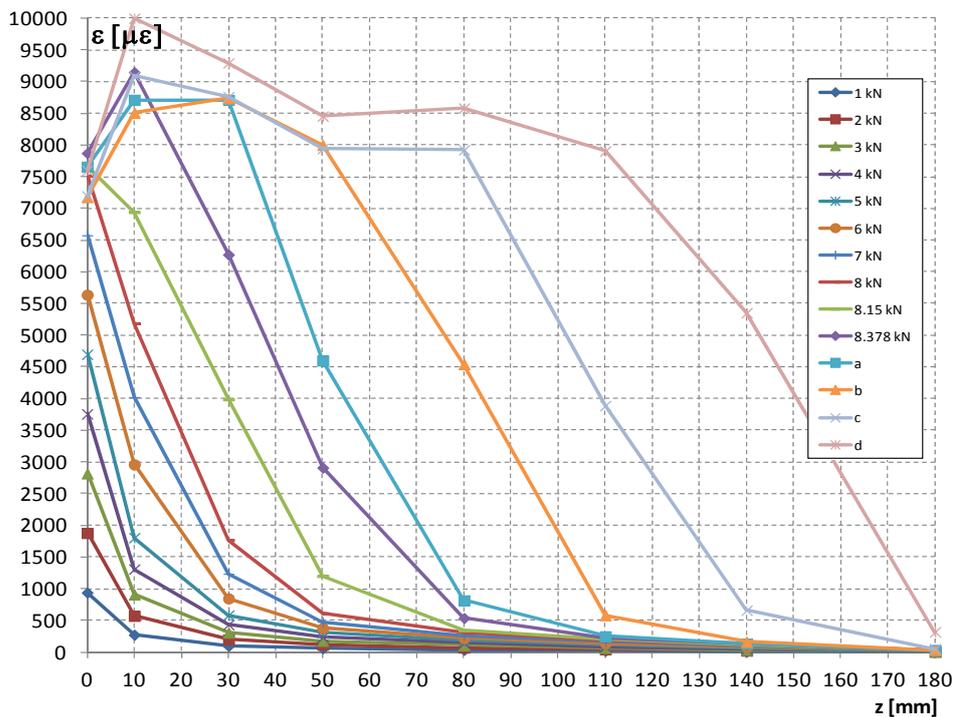


Figura 6.201 – Prova B3C1a: deformazioni lungo l’asse del rinforzo (diagramma originale).

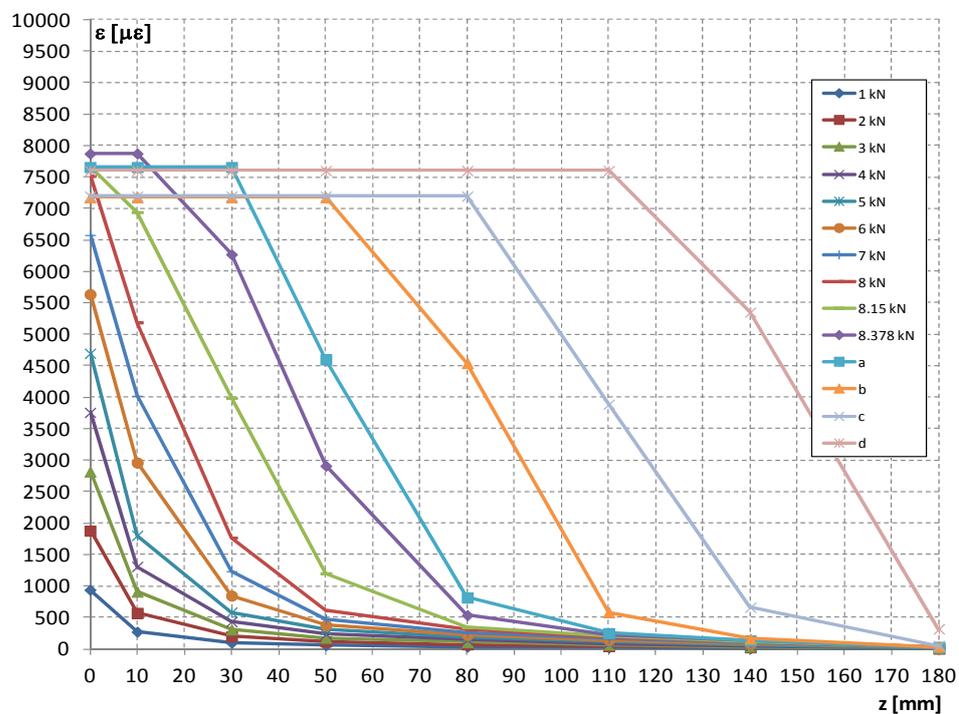


Figura 6.202 - Deformazioni lungo l’asse del rinforzo rilevate durante la prova B3C1a (diagramma modificato).

Come già visto nel corso delle prove condotte su campioni con rasatura superficiale di tipo B, risulta subito evidente come il diagramma originale sia dotato di una maggiore regolarità rispetto a quelli ottenuti nelle prove su mattoni e muretti non rasati.

Oltre alla maggiore regolarità (e quindi alle minori correzioni necessarie per giungere al diagramma modificato delle deformazioni), un'altra caratteristica evidenziata è quella di trovarsi in presenza di deformazioni molto più elevate di quelle registrate per la rasatura di tipo B.

Come già accennato, ciò è una conseguenza dell'elevato carico raggiunto.

Si precisa che, come consuetudine, il calcolo delle quantità che verranno definite in seguito, va effettuato considerando i valori delle deformazioni dopo la regolarizzazione e non quelli registrati direttamente attraverso gli estensimetri.

Utilizzando le deformazioni indicate in *figura 6.202*, relative ai livelli di carico indicati, è possibile pertanto costruire il grafico che mostra l'andamento delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.203*).

Il calcolo può essere eseguito applicando la formula (6.3).

Gli scorrimenti in funzione dell'ascissa z , calcolati per i diversi livelli di carico e ottenuti secondo quanto già indicato al § 6.2.1, sono rappresentati invece in *figura 6.204*.

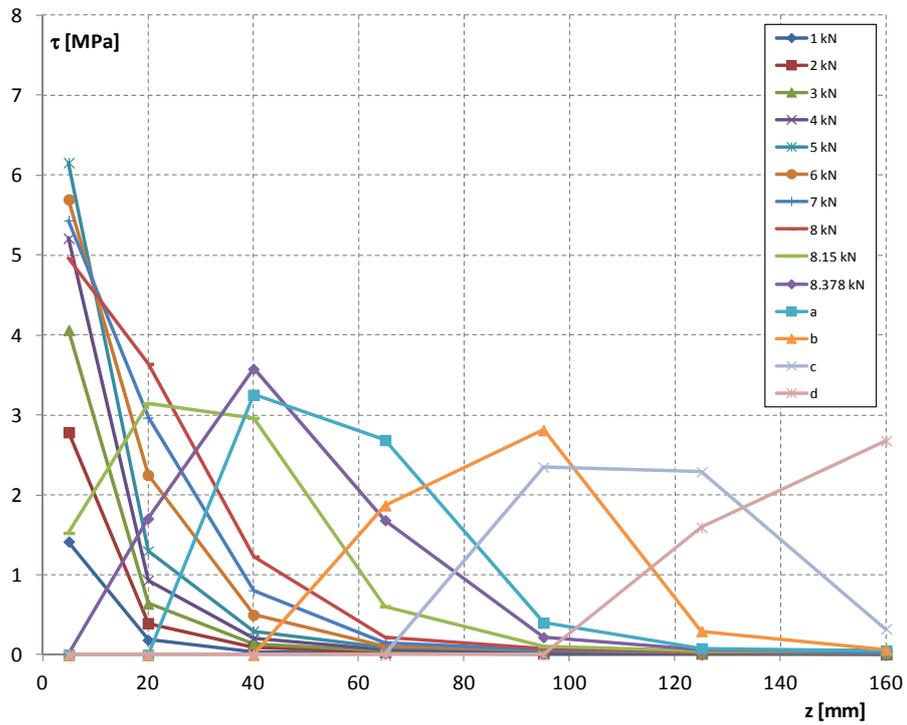


Figura 6.203 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova B3C1a).

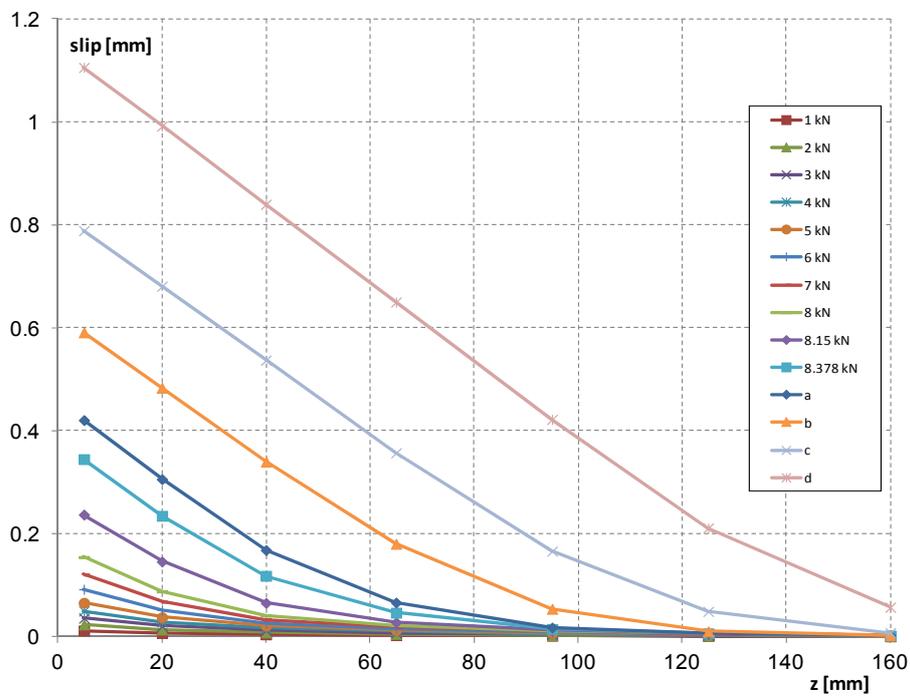


Figura 6.204 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova B3C1a).

Si riportano ora alcune immagini del campione al termine della prova.



Figura 6.205 - Campione al termine della prova B3C1a.



Figura 6.206 – Superfici dopo aspirazione dei detriti.



Figura 6.207 – Dettaglio della superficie del mattone.

La modalità di distacco evidenzia sicuramente la corretta applicazione del rinforzo e mette in luce l'asportazione di porzioni di mattone soprattutto sulla parte terminale della zona di incollaggio.

La malta quindi, oltre ad avere un effetto benefico per quanto riguarda la regolarizzazione della superficie, ha mostrato elevate caratteristiche meccaniche che hanno sicuramente contribuito ad innalzare il carico massimo sopportabile dal campione.

6.4.2 PROVA M3C1a

La prova in oggetto è stata eseguita il 28/07/2011, impiegando una strumentazione composta dalla cella di carico, da 7 estensimetri (applicati lungo la zona incollata del composito) e da 2 trasduttori di spostamento.

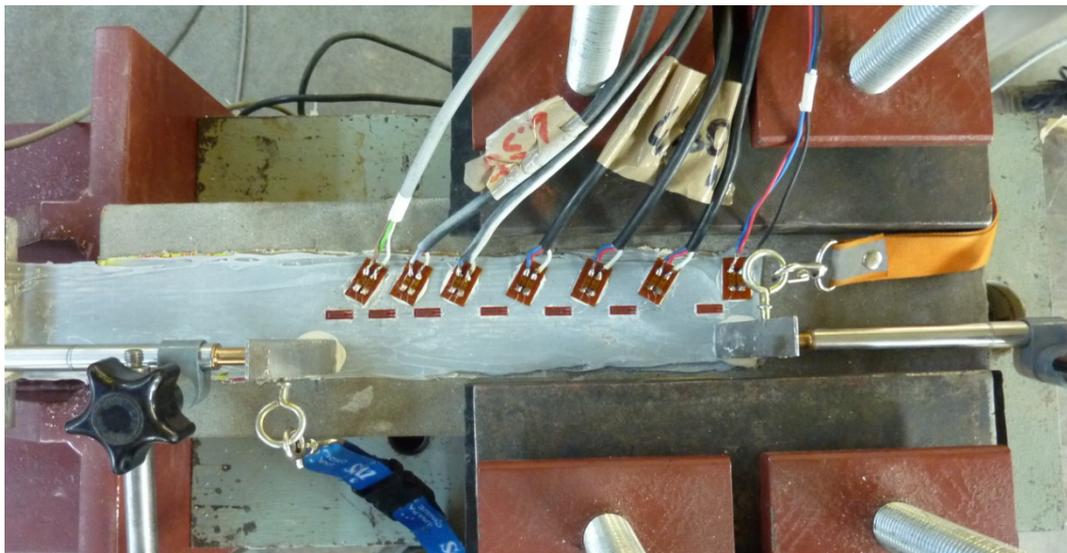


Figura 6.208 – Setup prova M3C1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (6 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (6 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (6 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (6 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (6 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (6 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (6 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.23 - Strumenti utilizzati durante la prova M3C1a e canali di acquisizione.

L'impiego delle letture ottenute tramite la cella di carico, combinate con i valori registrati dai due LVDT, ha permesso di determinare il grafico carico – allungamento riportato in *figura 6.209*.

L'allungamento è stato calcolato come differenza degli spostamenti rilevati dai trasduttori collegati ai canali 1 e 2.

Terminato il ciclo di carico-scarico iniziale condotto fino ad un livello di 1 kN, il carico è cresciuto in maniera estremamente lineare fino a toccare un valore massimo di 7.765 kN.

Il tratto successivo di softening ha visto crescere l'allungamento in maniera significativa ed è stato seguito da un andamento finale del diagramma più variegato, dove l'allungamento è addirittura più che raddoppiato rispetto al valore registrato in precedenza.

Contrariamente alla tendenza di crescita del carico passando dai mattoni ai muretti registrata in molte prove, qui, rispetto alla prova B3C1a, il carico è significativamente diminuito.

Si tratta di un fenomeno che ha coinvolto i campioni di muratura costruiti con mattoni di tipo B3, ma che non è stato confermato dalle altre tipologie.

Riguardo al diagramma, si fa notare che, a parte i punti segnalati che indicano i livelli di carico scelti per la valutazione dello stato deformativo e tensionale del provino dopo il picco, è stata tracciata una linea di tendenza che indica la pendenza del grafico nel primo tratto.

Basandosi su questa pendenza, è stata operata una traslazione del diagramma, in modo da depurare i risultati dal disturbo registrato nel primo breve tratto di assestamento.

Il diagramma carico – allungamento, ottenuto combinando le letture della cella di carico con all'allungamento determinato tramite integrazione delle deformazioni per tutti i livelli di forza registrata, è riportato in *figura 6.210*.

Il calcolo dell'allungamento in questo caso va eseguito applicando la (6.1).

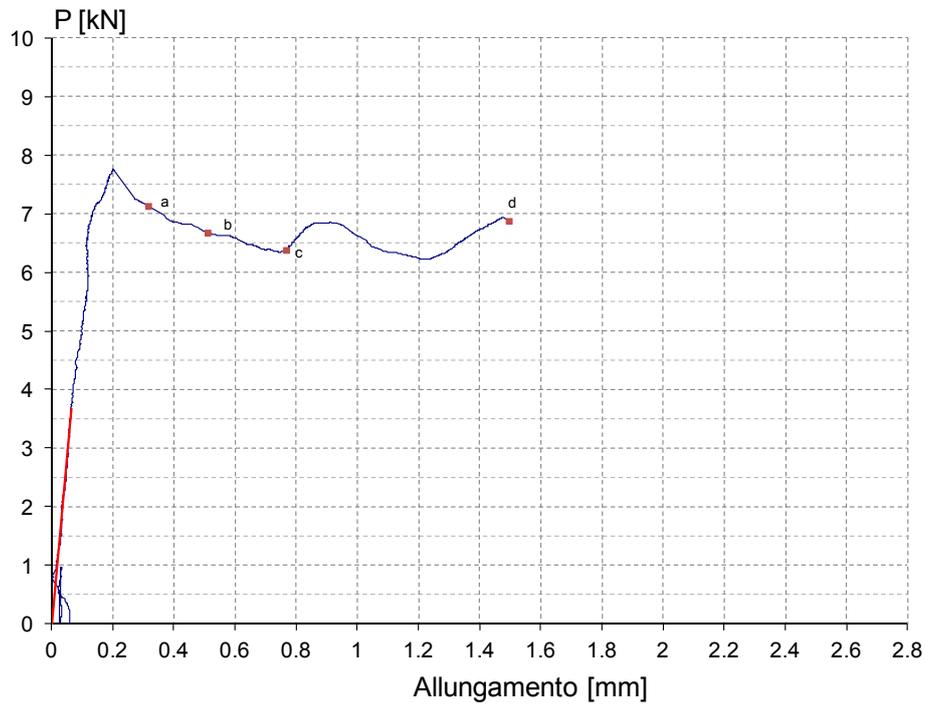


Figura 6.209 – Prova M3C1a: grafico carico-allungamento ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT.

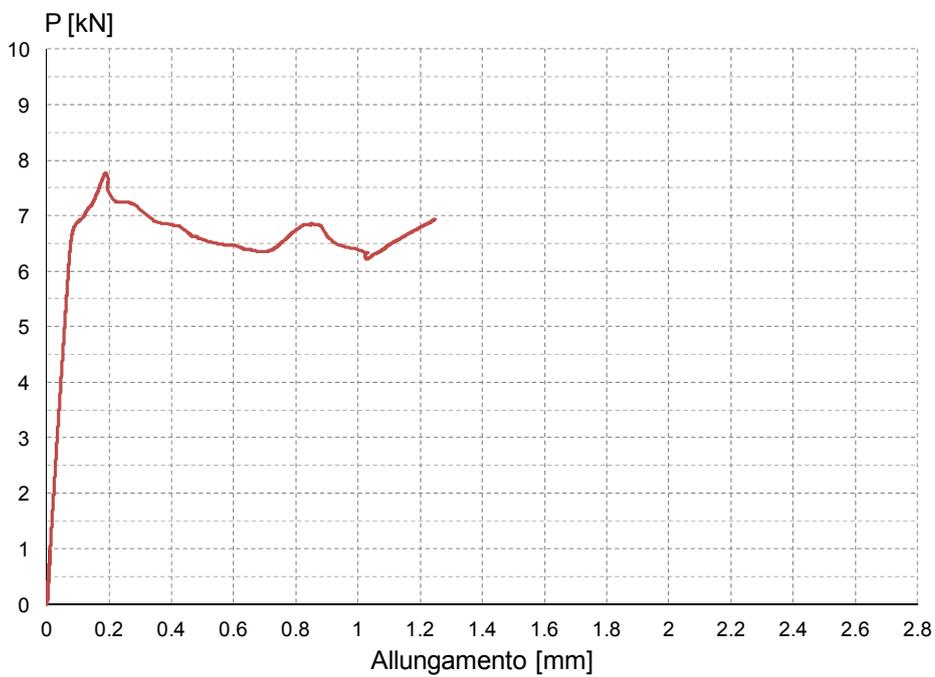


Figura 6.210 - Grafico carico-allungamento ricavato calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova M3C1a).

Le deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato sono riportate in *figura 6.211*, dove è possibile apprezzare un livello deformativo mediamente elevato.

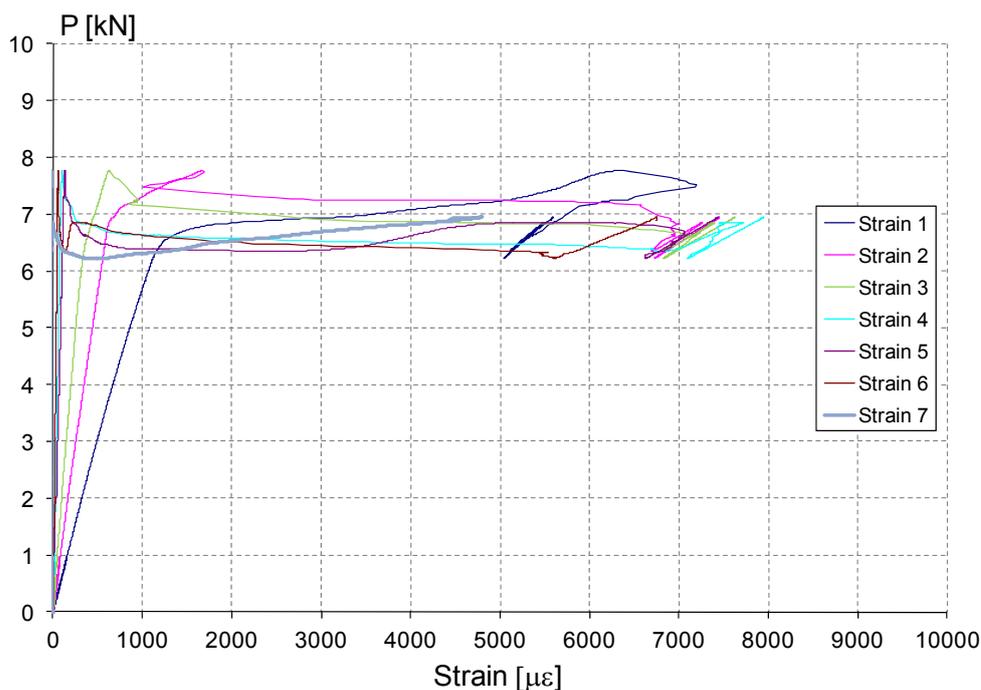


Figura 6.211 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova M3C1a).

La *figura 6.212* mostra invece l'andamento delle deformazioni misurate lungo l'asse del rinforzo per ogni livello di carico selezionato.

I profili illustrati, come al solito, sono stati ricavati fissando dei livelli di carico, indicati in figura, con lo scopo di tentare di descrivere al meglio l'evoluzione dello stato deformativo nel rinforzo durante lo svolgimento della prova.

Il diagramma così ottenuto è quello relativo alle deformazioni effettivamente registrate durante la prova, mentre il diagramma corretto è riportato immediatamente dopo, in *figura 6.213*.

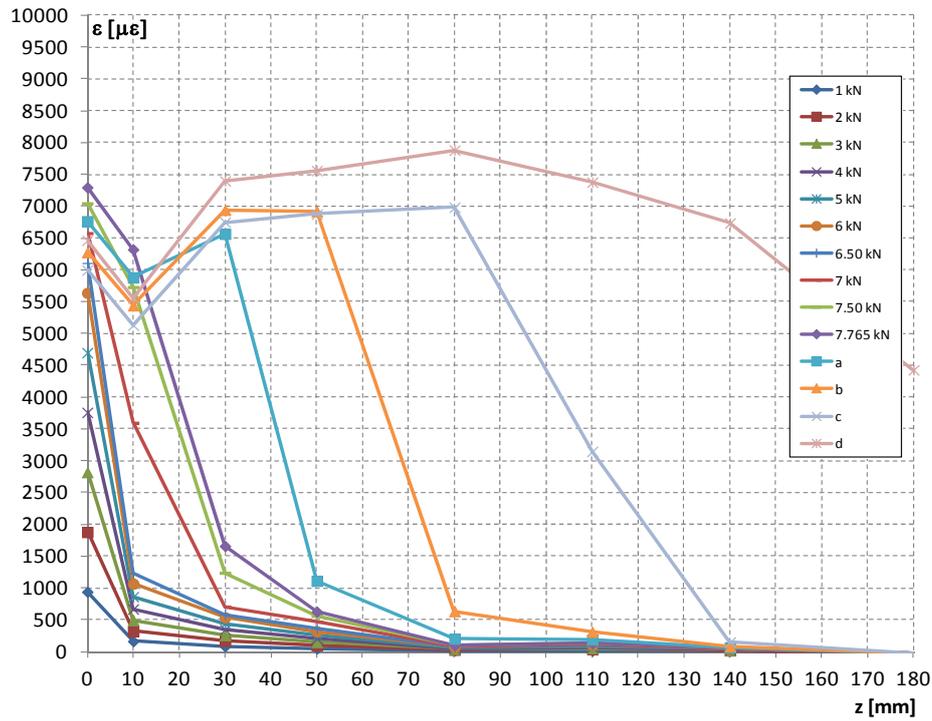


Figura 6.212 - Prova M3C1a: deformazioni lungo l'asse del rinforzo (diagramma originale).

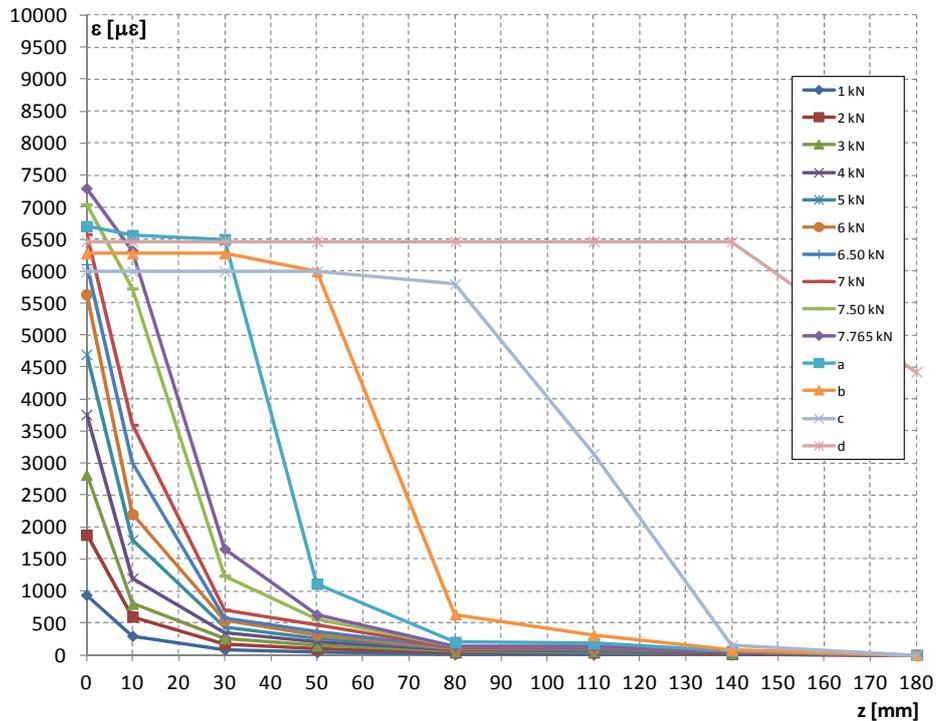


Figura 6.213 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova M3C1a (diagramma modificato).

Utilizzando le deformazioni rappresentate in *figura 6.213*, relative ai livelli di carico indicati e utilizzando la (6.3), è possibile ricavare l'andamento delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.214*).

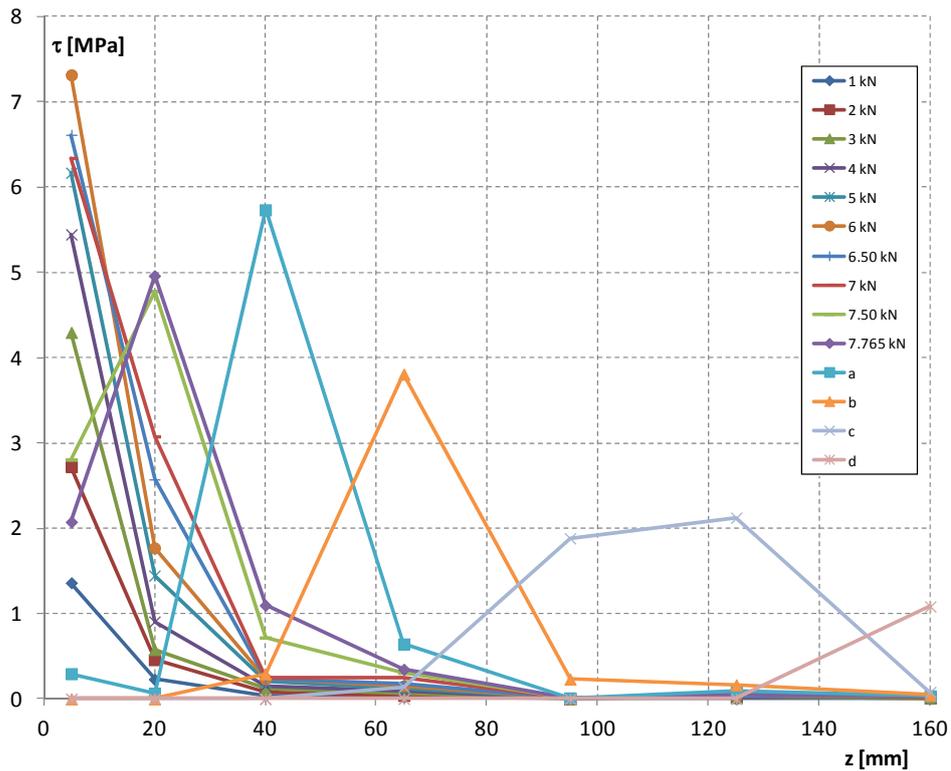


Figura 6.214 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova M3C1a).

Il diagramma mostra picchi tensionali decisamente elevati, motivati dal comportamento piuttosto resistente del substrato.

La *figura 6.215* presenta infine una panoramica degli scorrimenti ottenuti per i livelli di carico fissati.

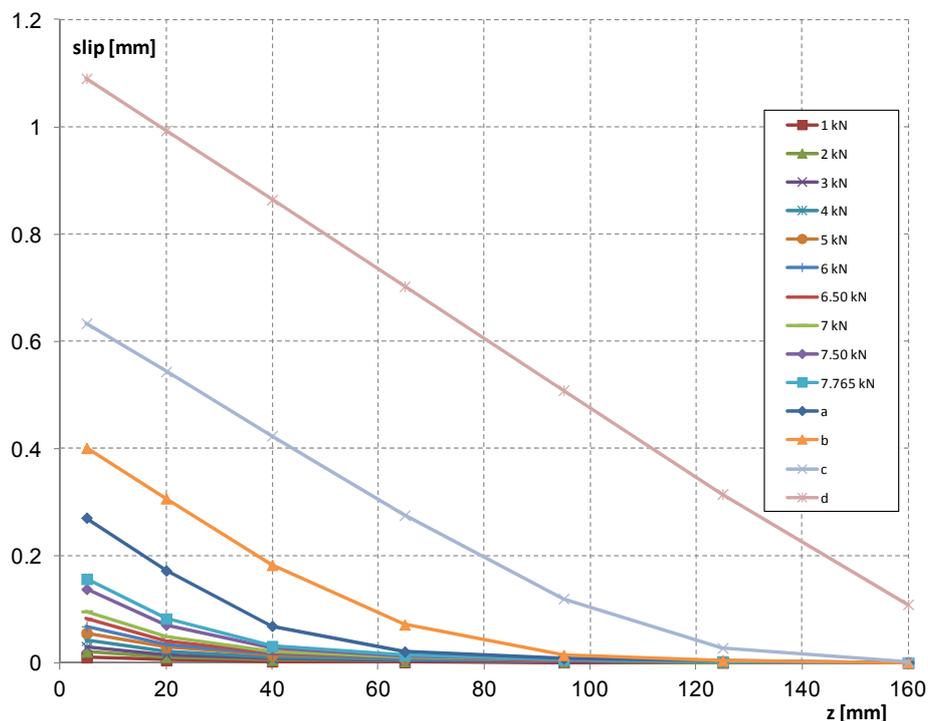


Figura 6.215 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova M3C1a).

Le immagini del campione a distacco del rinforzo avvenuto mostrano come la crisi sia avvenuta secondo una modalità diversa rispetto a quelle registrate in precedenza.

Tralasciando infatti l'asportazione di una porzione di mattone nella parte finale della zona di incollaggio (già vista al termine della prova precedente), qui si notano tracce di crisi locali adesive o miste, che si alternano in molti settori del composito.

La modalità di applicazione del rinforzo potrebbe non essere stata quella ottimale, oppure la superficie della rasatura, dotata di una porosità estremamente ridotta, potrebbe aver pregiudicato la penetrazione ottimale della resina epossidica, determinando questa nuova modalità di distacco, che non rientra tra quelle preferibili.

Si fa presente che questa problematica si è presentata anche in molte altre prove condotte su campioni con rasatura di tipo C.

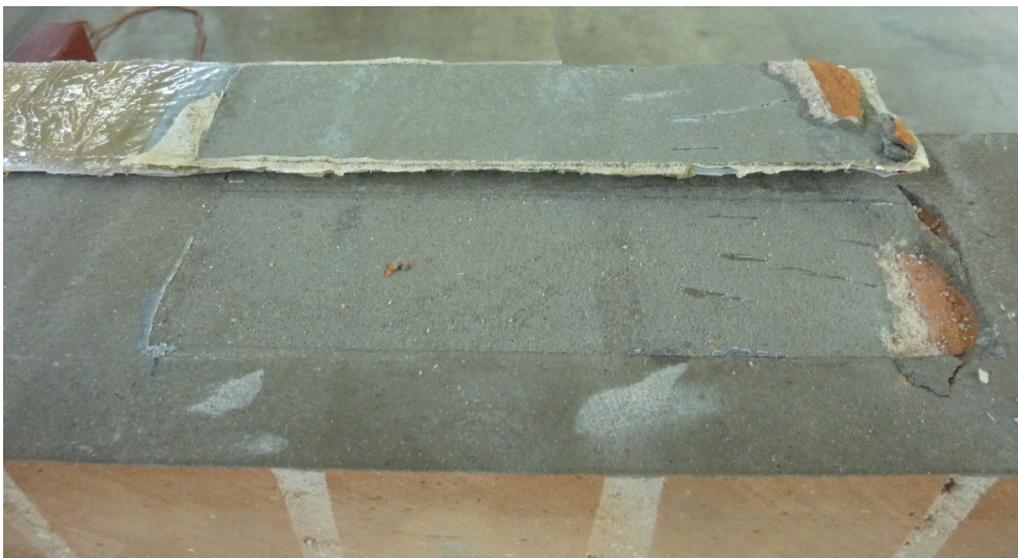


Figura 6.216 - Campione al termine della prova M3C1a.



Figura 6.217 – Dettaglio delle superfici a fine prova.

6.4.3 PROVA M3C1c

La prova è stata eseguita il giorno 08/09/2011 impiegando una strumentazione composta unicamente dalla cella di carico e da due trasduttori di spostamento.

Gli strumenti utilizzati sono visibili in *figura 6.218* e la loro descrizione è presentata in dettaglio nella tabella successiva.

La disposizione degli LVDT adottata è quella ottimale per le prove condotte in assenza di estensimetri: questa configurazione permette infatti di minimizzare i disturbi sulle misure di spostamento che possono derivare da rotazioni indesiderate delle basi di misura.

Questo avviene perché, non essendoci l'ingombro dell'asse di tiro, è possibile collocare gli induttivi molto in basso, in modo che questi risentano il meno possibile di eventuali movimenti rotatori (rispetto alla verticale) delle basi metalliche di contrasto.



Figura 6.218 - Setup prova M3C1c.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.24 - Strumenti utilizzati durante la prova M3C1c e canali di acquisizione.

L'impiego della strumentazione indicata consente di determinare il grafico carico-allungamento riportato in *figura 6.219*.

Il diagramma può essere costruito utilizzando le letture della cella di carico e calcolando l'allungamento come differenza dei valori registrati dagli LVDT collegati ai canali 1 e 2.

La linea di tendenza tracciata mostra la pendenza iniziale del diagramma più probabile, al posto dell'andamento eccessivamente rigido registrato.

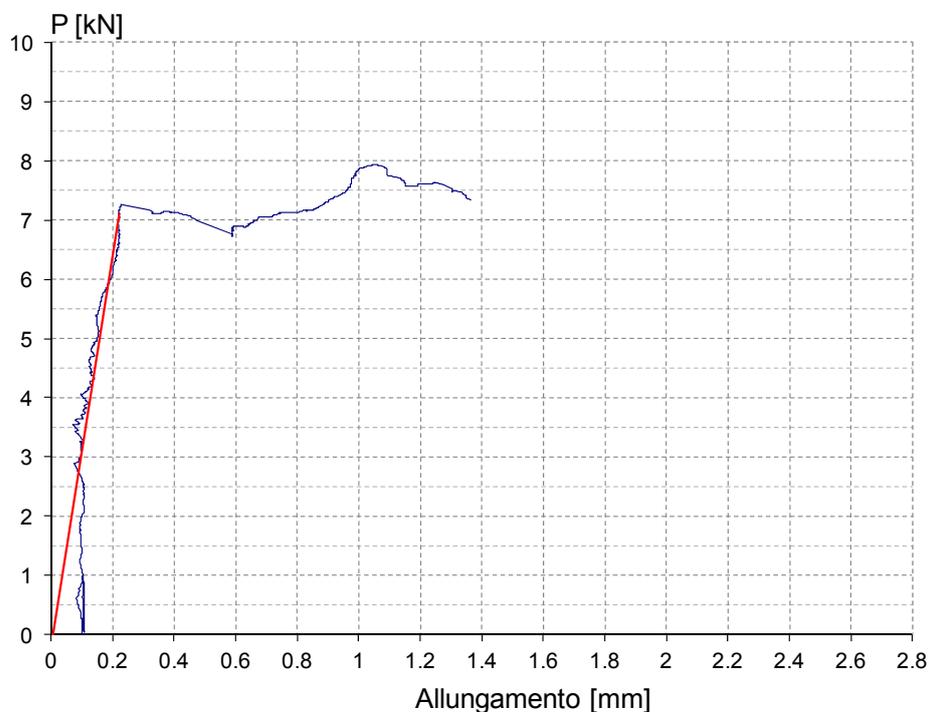


Figura 6.219 - Grafico carico-allungamento (prova M3C1c).

È stato previsto come al solito di eseguire un ciclo di carico-scarico iniziale per permettere l'assestamento del campione, prima di dare inizio alla prova vera e propria condotta in controllo di spostamento.

Ciò che appare subito evidente dall'analisi del diagramma carico-allungamento è come in questo caso si sia ottenuto un valore di picco del carico piuttosto elevato.

Il carico massimo rilevato, pari a 7.941 kN, risulta comunque in linea con il valore di 7.765 kN trovato nel corso della prova precedente M3C1a, anche se è stato registrato in un tratto diverso del diagramma.

Si ricorda che confronti più approfonditi tra i risultati ottenuti nelle prove saranno presentati in maniera estesa nel corso del capitolo successivo.

A completamento della descrizione della prova si riportano alcune immagini del campione a distacco del rinforzo avvenuto.



Figura 6.220 – Campione al termine della prova M3C1c.



Figura 6.221 – Particolare della modalità di distacco del rinforzo (prova M3C1c).

Il distacco è avvenuto evidenziando solo una lieve asportazione del substrato lungo la zona di incollaggio, tranne nella parte posteriore dove si è staccata anche una parte del mattone sottostante.

Questa modalità mette in luce un forte ancoraggio del rinforzo nella parte terminale, ma se si analizza il distacco nella sua globalità si è presentata una crisi mista all'interfaccia, con estese zone in cui c'è stata praticamente una pura crisi adesiva.

Si tratta di una delle modalità di distacco che andrebbe evitata, perché determinata da una non perfetta applicazione del rinforzo oppure dall'incapacità della resina epossidica di penetrare adeguatamente all'interno del substrato.

La porosità minima della superficie della rasatura può sicuramente aver giocato un ruolo importante a tal proposito, ma non si possono escludere a priori anche eventuali incompatibilità della resina con la malta utilizzata.

Va comunque rilevato che, a fronte di una modalità di distacco del rinforzo sconsigliata, il carico massimo registrato è risultato comunque piuttosto elevato.

6.4.4 PROVA B4C1a

La prova è stata condotta in data 26/07/2011, utilizzando una strumentazione composta dalla cella di carico, da 7 estensimetri (secondo la disposizione indicata al § 5.3) e da 2 trasduttori di spostamento.

La collocazione degli LVDT, utilizzati per la determinazione dell'allungamento del rinforzo, è già stata descritta al § 5.4.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (6 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (6 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (6 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (6 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (6 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (6 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (6 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.25 - Strumenti utilizzati durante la prova B4C1a e canali di acquisizione.

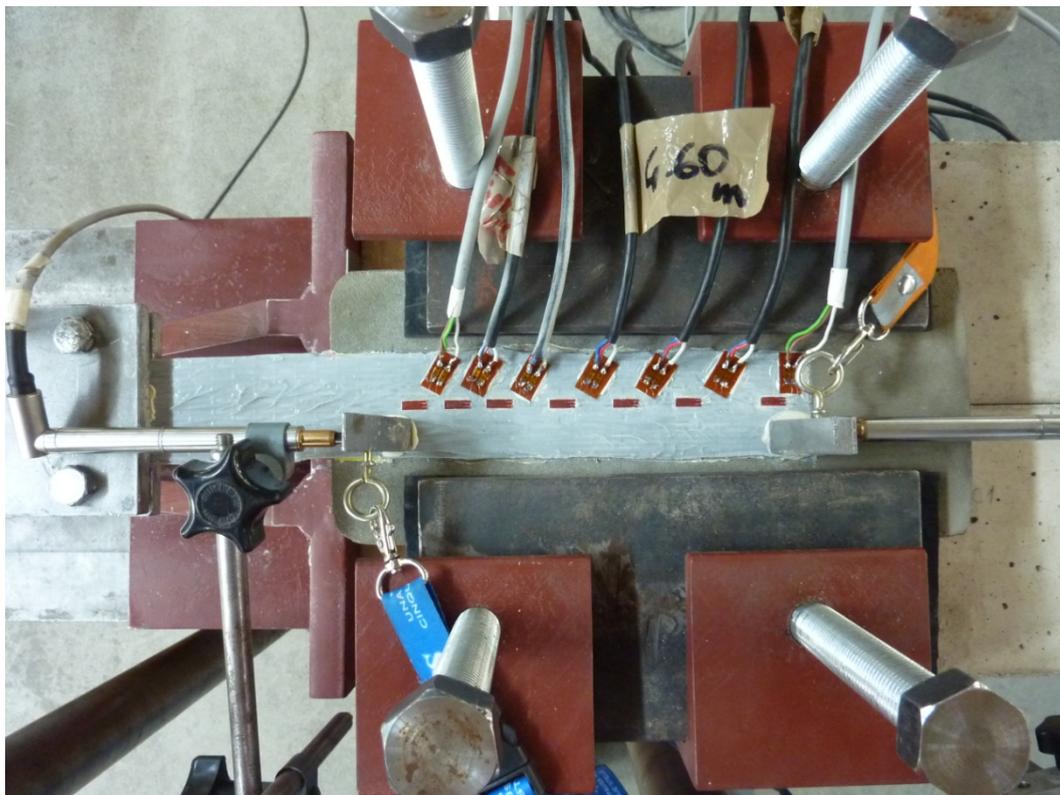


Figura 6.222 – Setup prova B4C1a.

La collocazione del primo induttivo è stata portata a termine come mostrato in *figura 6.222*: questa modalità, impiegata anche nelle altre prove strumentate con estensimetri, serve per non rischiare di danneggiare le terminazioni degli strumenti.

Utilizzando le letture della cella di carico e facendo la differenza dei valori registrati dai trasduttori di spostamento, è stato possibile ottenere il grafico carico-allungamento riportato in *figura 6.223*.

Analogamente alle altre prove, il diagramma è stato ottenuto svolgendo la prova in controllo di spostamento ed eseguendo un ciclo iniziale di carico-scarico fino ad un livello di circa 1 kN per consentire l'assestamento del campione.

Il massimo carico registrato durante la prova è stato pari a 8.037 kN e ciò conferma l'effetto positivo dell'applicazione della rasatura di tipo C.

Il carico risulta sensibilmente elevato, non solo in rapporto ai campioni con rasatura di tipo B, ma anche confrontandolo con i mattoni di tipo B4 privi di rasatura.

L'impiego di questo tipo di malta consente un adeguato livellamento dei difetti superficiali (riducendo le tensioni di peeling che potrebbero verificarsi) e consente un efficace ancoraggio al mattone sottostante, grazie alle buone caratteristiche di adesione mostrate.

I punti indicati nel diagramma rappresentano i livelli di carico selezionati per poi eseguire le elaborazioni successive, che prevedono di ricavare l'andamento delle deformazioni lungo l'asse del composito, il grafico delle tensioni tangenziali e gli scorrimenti.

Si fa presente che una modalità alternativa per ottenere il diagramma carico - allungamento è quella di correlare le letture della cella di carico all'allungamento determinato integrando le deformazioni registrate per ogni livello di forza (*figura 6.224*).

Il calcolo dell'allungamento, per questa secondo metodo, può essere eseguito agevolmente applicando la (6.1) in corrispondenza di tutti gli intervalli di acquisizione (ciascuno dei quali è caratterizzato da uno specifico valore del carico registrato).

Dopo il diagramma carico-allungamento, viene presentato il diagramma che mostra le deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione della forza applicata (*figura 6.225*).

L'entità delle deformazioni è coerente con l'elevato carico di picco registrato.

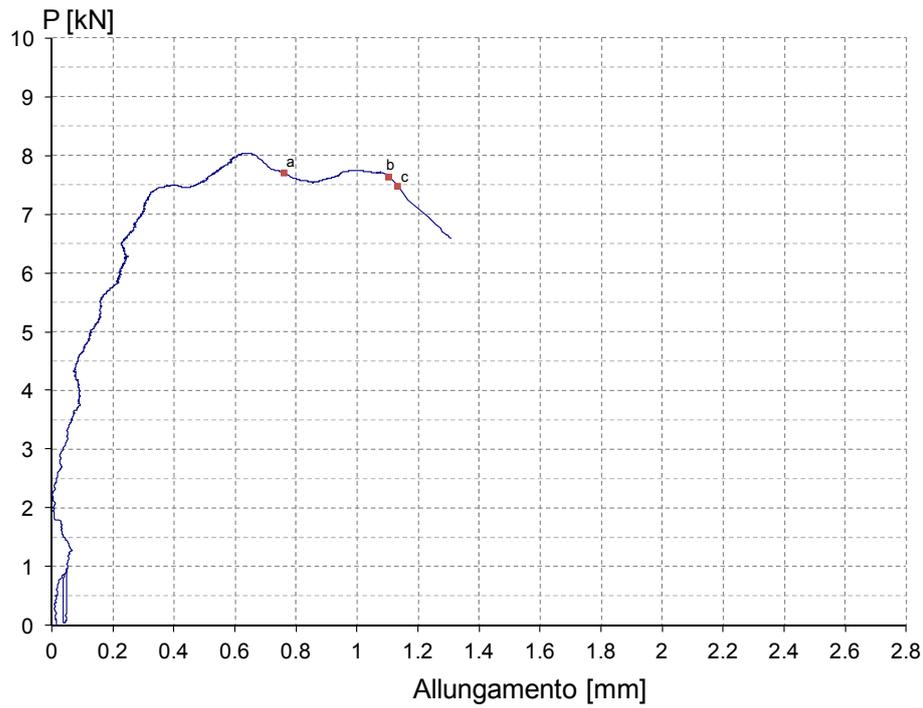


Figura 6.223 - Grafico carico-allungamento per la prova B4C1a (ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT)

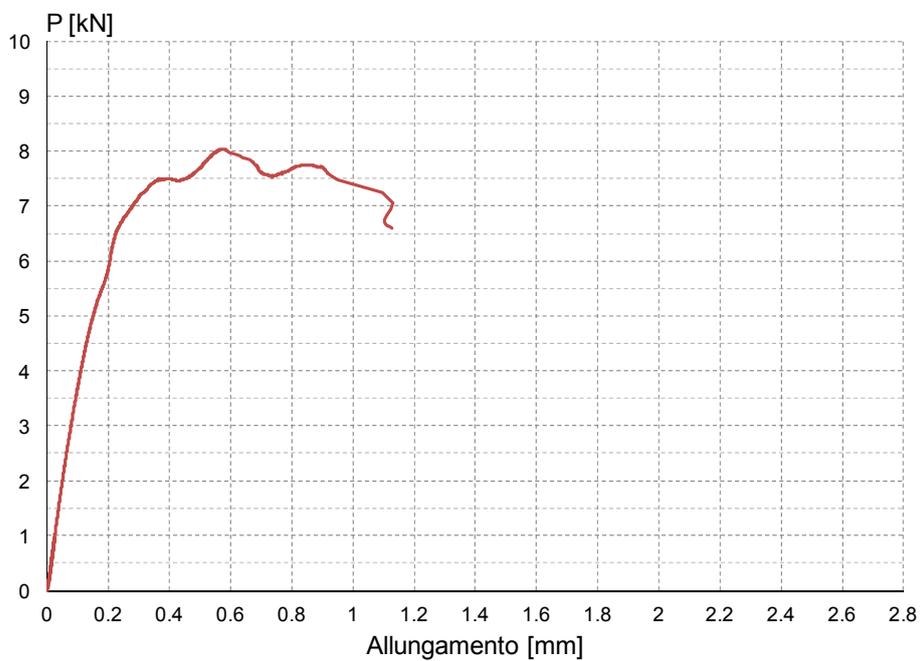


Figura 6.224 - Grafico carico-allungamento ricavato calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova B4C1a).

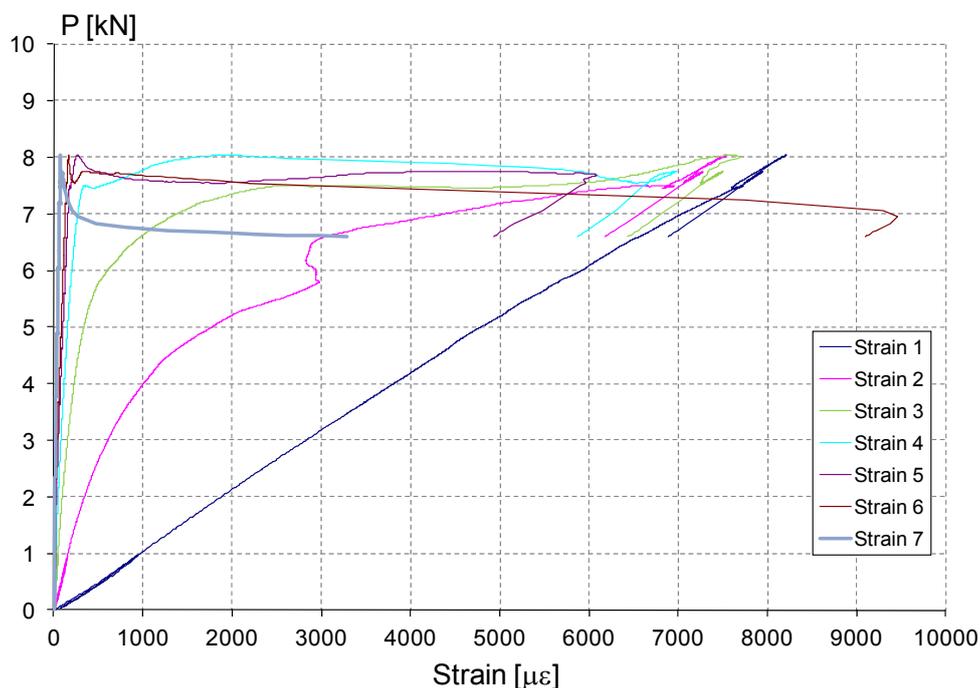


Figura 6.225 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova B4C1a).

In *figura 6.226* viene mostrato l'andamento delle deformazioni lungo l'asse del composito per ogni livello di carico selezionato, ricordando che le curve indicate con le lettere minuscole a, b, c sono quelle ottenute in corrispondenza di livelli di carico che si sono presentati oltre il picco del diagramma carico – allungamento.

Va ricordato che si tratta del diagramma non modificato, che riporta i valori delle deformazioni senza alcuna correzione rispetto a quelli effettivamente registrati.

Il diagramma corretto viene invece presentato immediatamente dopo quello originale, in *figura 6.227*.

Una caratteristica che risulta subito evidente è come il diagramma originale sia già dotato di una sufficiente regolarità rispetto a quelli ottenuti nelle prove su mattoni e muretti non rasati: ciò ha consentito di apportare solo minime correzioni.

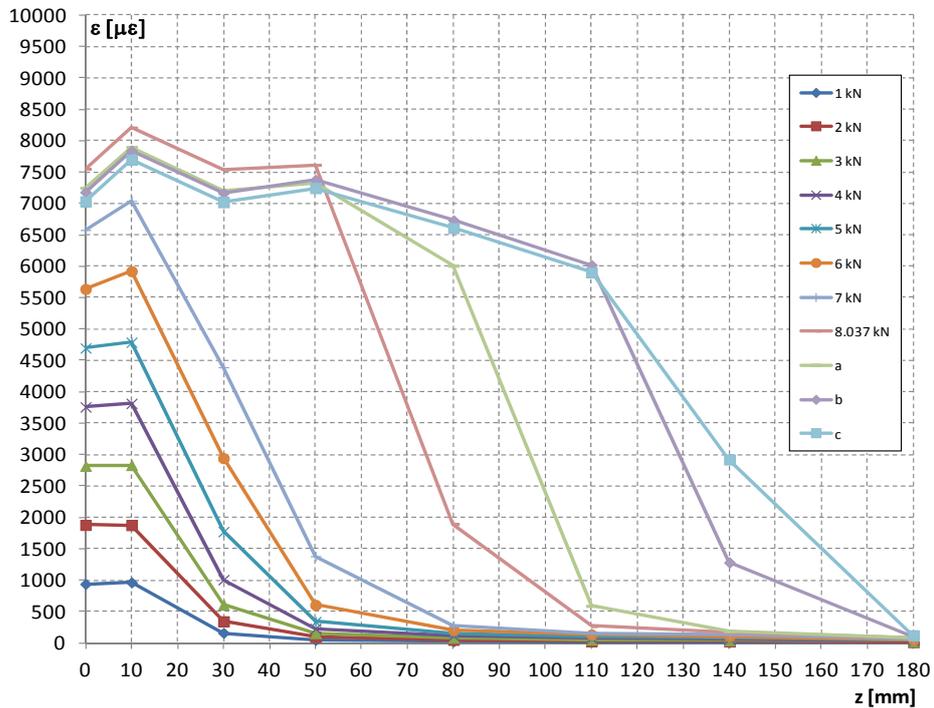


Figura 6.226 – Prova B4C1a: deformazioni lungo l’asse del rinforzo (diagramma originale).

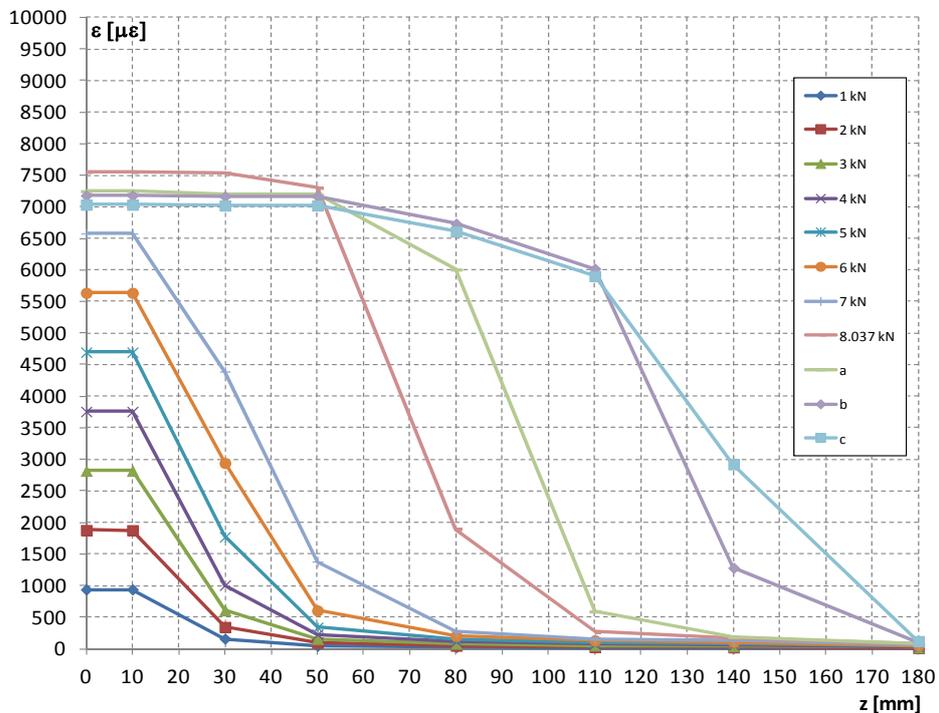


Figura 6.227 - Deformazioni lungo l’asse del rinforzo rilevate durante la prova B4C1a (diagramma modificato).

Una particolarità di questa prova è costituita dal tratto orizzontale presente tra le letture dei primi due estensimetri già per bassi livelli di carico.

Questo particolare lascia presagire che in realtà il rinforzo non risulti correttamente incollato nella parte iniziale, ma anzi sia praticamente libero.

Questa ipotesi è confermata dal diagramma delle deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (*figura 6.225*), che mostra come il primo estensimetro si deformi seguendo un ramo perfettamente elastico lineare, seguendo una pendenza pari al modulo elastico del composito.

Le immagini del distacco del rinforzo a fine prova confermeranno questa tesi.

Utilizzando le deformazioni regolarizzate indicate in *figura 6.227*, relative ai livelli di carico indicati, è possibile costruire il diagramma delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.228*).

Il calcolo può essere eseguito applicando la relazione (6.3).

Gli scorrimenti in funzione dell'ascissa z , calcolati per i diversi livelli di carico e ottenuti secondo quanto già indicato al § 6.2.1, sono rappresentati invece in *figura 6.229*.

Si riportano infine alcune immagini del campione al termine della prova (*figure 6.230 e 6.231*), che confermano la mancata adesione del rinforzo all'inizio della zona di incollaggio e mostrano come si sia verificata una modalità di distacco anomala.

La crisi di interfaccia è sembrata mista, con zone estese dove questa è risultata praticamente adesiva.

Oltre a questa problematica, si è verificata anche una rottura del composito all'interno della zona incollata, con la parte anteriore che si è compiutamente staccata e la restante che invece è rimasta incollata al substrato.

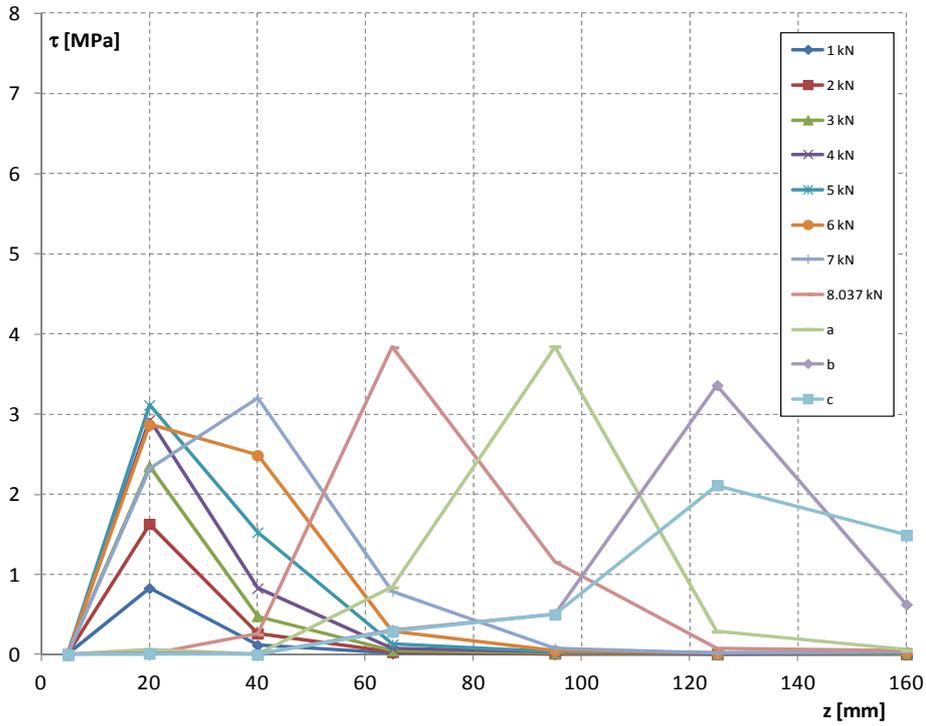


Figura 6.228 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova B4C1a).

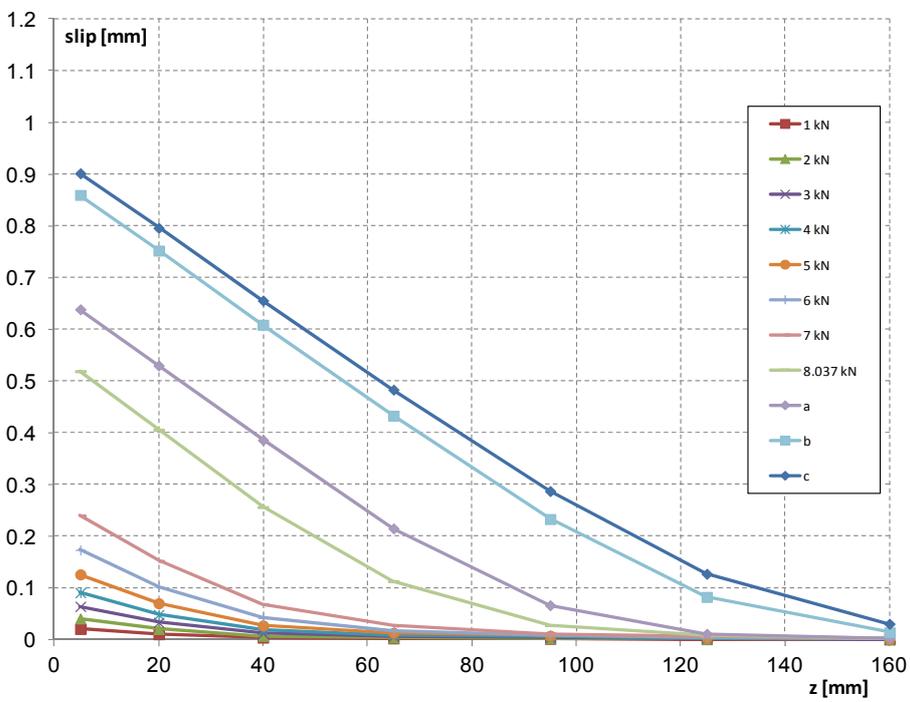


Figura 6.229 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova B4C1a).



Figura 6.230 – Rottura del composito all'interno della zona di incollaggio.



Figura 6.231 - Campione al termine della prova B4C1a.

6.4.5 PROVA M4C1c

La prova, svolta in data 01/09/2011, è stata preparata impiegando una strumentazione composta dalla cella di carico, da 7 estensimetri (applicati lungo la zona incollata del composito) e da 2 trasduttori di spostamento, secondo le modalità descritte ai §§ 5.3 e 5.4.

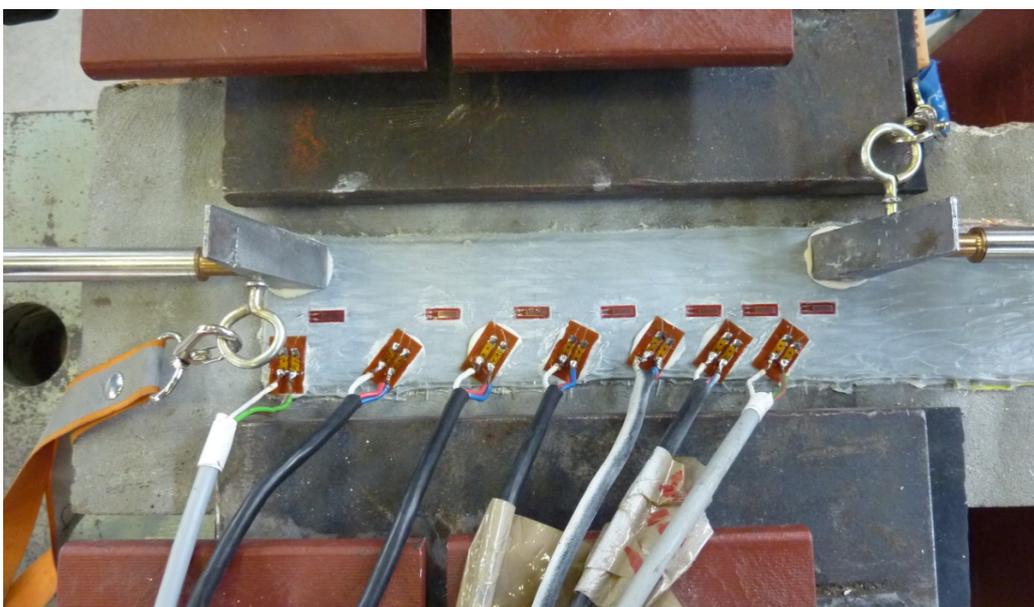


Figura 6.232 – Setup prova M4C1c.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)
3	Estensimetro E1 (6 mm)	lungo zona incollata
4	Estensimetro E2 (6 mm)	lungo zona incollata
5	Estensimetro E3 (6 mm)	lungo zona incollata
6	Estensimetro E4 (6 mm)	lungo zona incollata
7	Estensimetro E5 (6 mm)	lungo zona incollata
8	Estensimetro E6 (6 mm)	lungo zona incollata
9	Estensimetro E7 (6 mm)	lungo zona incollata

Tabella 6.26 - Strumenti utilizzati durante la prova M4C1c e canali di acquisizione.

Combinando i valori registrati dalla cella di carico con la differenza delle letture effettuate dai due trasduttori di spostamento collegati ai canali 1 e 2, è stato determinato il grafico carico – allungamento riportato in *figura 6.233*.

Dopo aver effettuato il solito ciclo di carico – scarico iniziale, secondo le modalità già illustrate nel corso delle altre prove, il carico è cresciuto piuttosto linearmente fino ad un livello di circa 7 kN, dopo il quale si è verificata una certa perdita di rigidità, seguita da un gradino che ha condotto al picco di 8.871 kN.

Il tratto successivo del diagramma è costituito da un ramo di softening anch'esso piuttosto lineare, con un ultimo ramo di crescita del carico terminato in corrispondenza del completo distacco del rinforzo.

Il valore di picco del carico che è stato registrato è in assoluto molto elevato e ciò sembra confermare l'efficacia di questa tipologia di rasatura, nonostante alcuni problemi per quanto riguarda la modalità di distacco del composito che, come per la prova B4C1a, si sono presentati anche in questo caso.

Questa problematica verrà illustrata in dettaglio al termine della descrizione della prova.

Tornando al diagramma carico – allungamento, si fa notare che, come nelle altre prove strumentate con estensimetri, sono stati segnalati i punti che indicano i livelli di carico scelti per la valutazione dello stato deformativo e tensionale del provino dopo il valore di picco che è stato registrato.

La *figura 6.234* mostra invece lo stesso diagramma carico – allungamento ricavato però con una modalità alternativa: le letture della cella di carico sono state abbinate infatti all'allungamento determinato tramite integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico.

Il calcolo dell'allungamento in questo caso va eseguito utilizzando la (6.1).

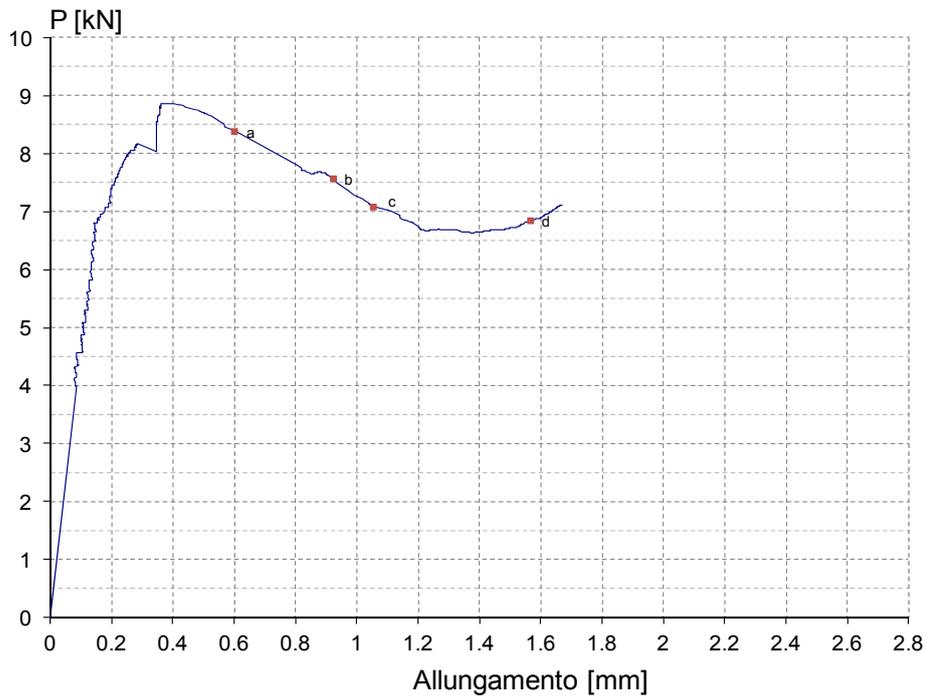


Figura 6.233 - Grafico carico-allungamento per la prova M4C1c (ottenuto facendo riferimento agli spostamenti registrati dagli LVDT).

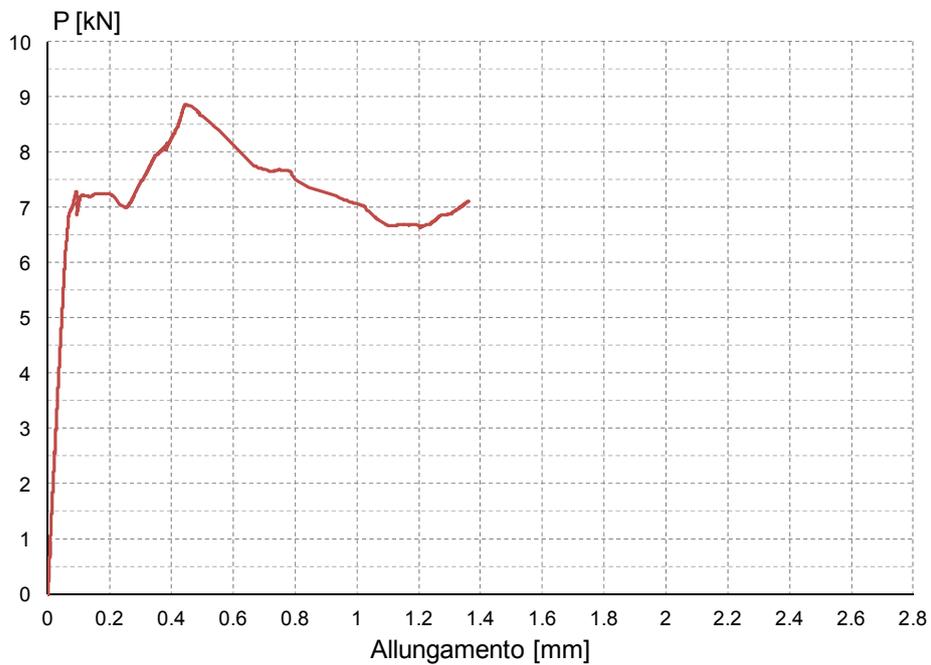


Figura 6.234 - Grafico carico-allungamento ricavato calcolando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (prova M4C1c).

Dopo i diagrammi appena presentati, si può passare ad osservare le deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (*figura 6.235*), dove è possibile apprezzare un livello deformativo piuttosto elevato, in linea con l'entità della forza massima registrata.

Si fa notare come si è giunti persino in prossimità del fondo scala degli strumenti, pari a 10000 $\mu\epsilon$.

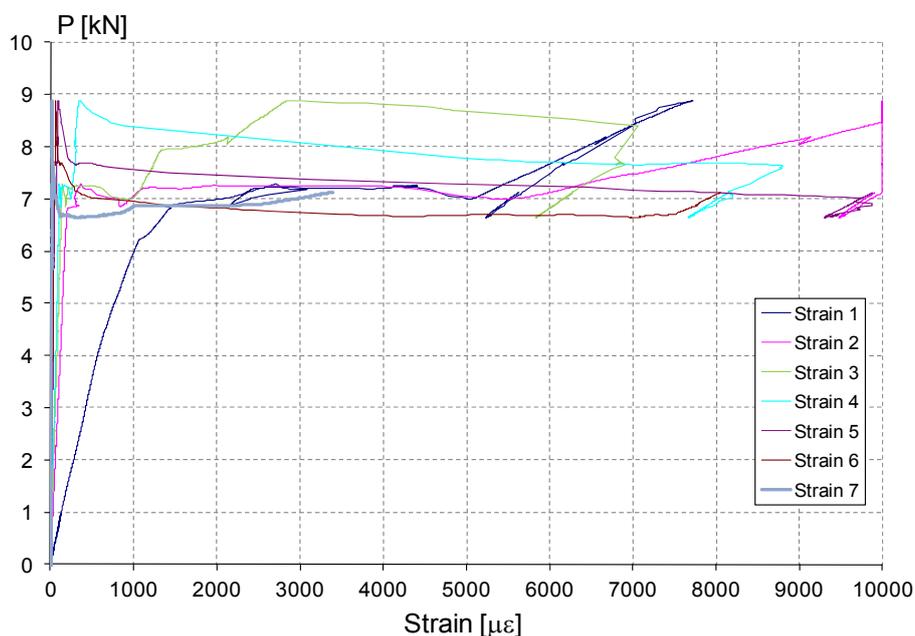


Figura 6.235 - Deformazioni registrate dagli estensimetri in funzione del carico applicato (prova M4C1c).

La *figura 6.236* mostra invece le deformazioni misurate lungo l'asse del rinforzo per ogni livello di carico selezionato.

I profili illustrati, come al solito, sono stati determinati fissando i livelli di carico indicati in figura, tentando di offrire un quadro completo dell'evoluzione dello stato deformativo nel rinforzo durante lo svolgimento della prova.

Il diagramma così ottenuto è quello relativo alle deformazioni effettivamente registrate durante la prova (non corrette), mentre il diagramma regolarizzato è riportato di seguito, in *figura 6.237*.

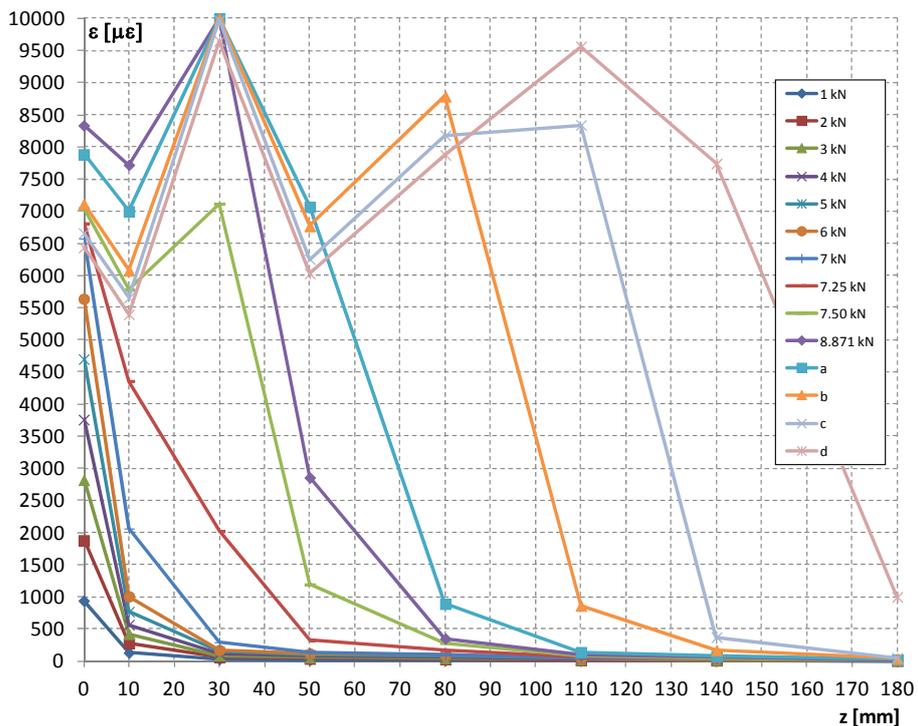


Figura 6.236 - Prova M4C1c: deformazioni lungo l'asse del rinforzo (diagramma originale).

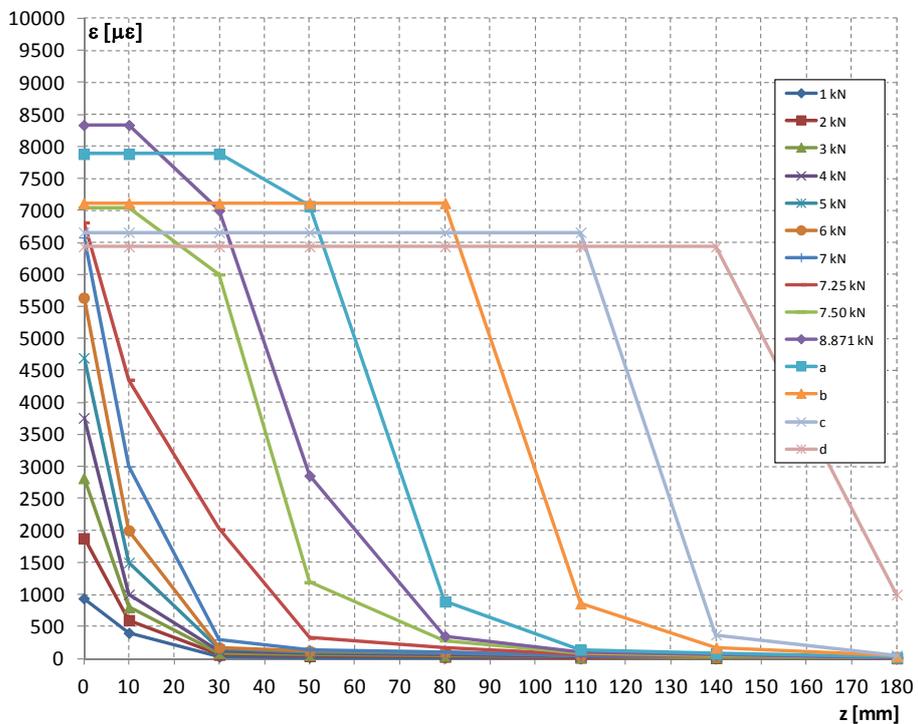


Figura 6.237 - Deformazioni lungo l'asse del rinforzo registrate durante la prova M4C1c (diagramma regolarizzato).

Utilizzando le deformazioni rappresentate in *figura 6.237*, relative ai livelli di carico selezionati e utilizzando la (6.3), è possibile costruire il diagramma che mostra l'andamento delle tensioni tangenziali lungo la zona incollata del rinforzo (*figura 6.238*).

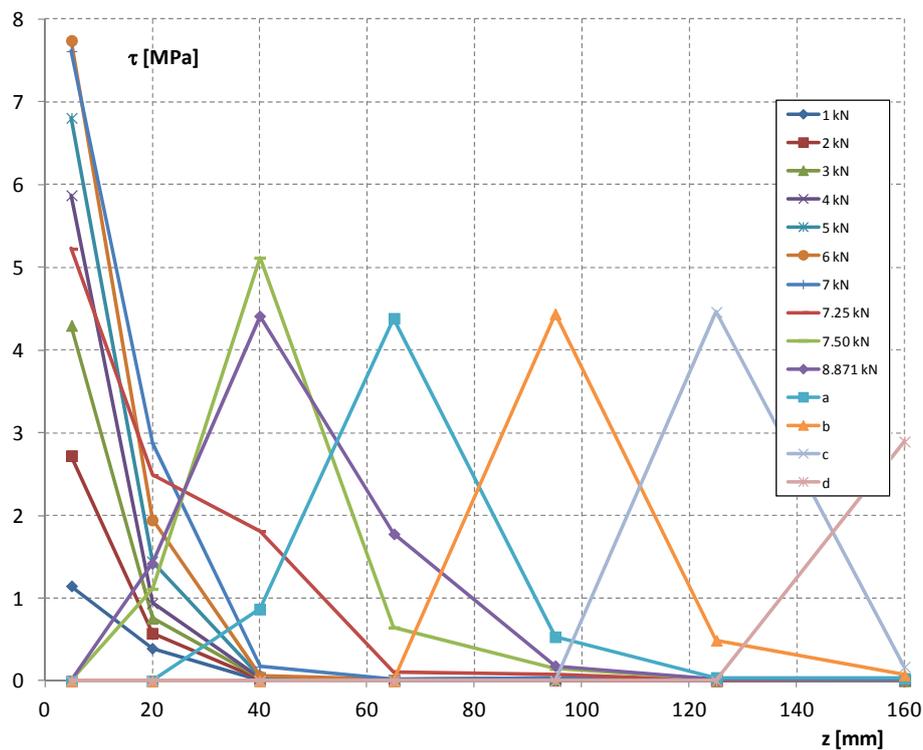


Figura 6.238 - Tensioni tangenziali lungo l'asse del composito riferite ai livelli di carico indicati (prova M4C1c).

Il diagramma mostra picchi tensionali estremamente elevati, soprattutto nelle curve relative ai livelli di carico che precedono la massima forza registrata, motivati fisicamente dal comportamento piuttosto resistente del substrato e analiticamente dall'elevata pendenza delle deformazioni nel primo tratto del diagramma di *figura 6.237*.

La figura 6.239 mostra una panoramica degli scorrimenti ottenuti per i livelli di carico fissati.

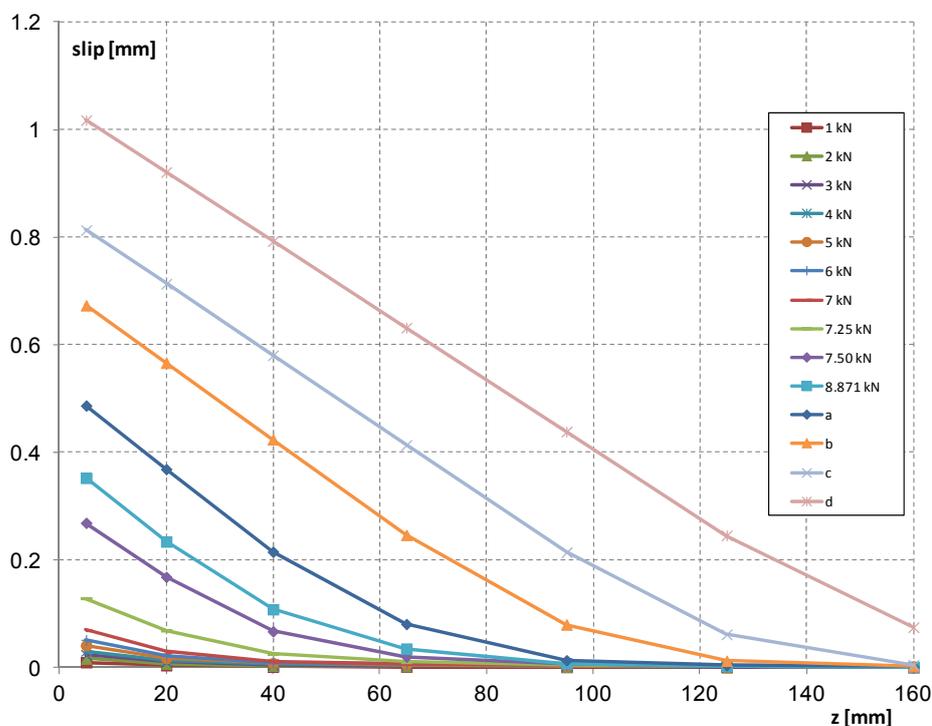


Figura 6.239 - Scorrimenti per i diversi livelli di carico in funzione dell'ascissa z (prova M4C1c).

Si riportano infine alcune immagini del campione al termine della prova, dopo che è avvenuto il completo distacco del rinforzo (figure 6.240 e 6.241).

Nonostante l'elevato valore del carico che il campione è riuscito a portare prima del distacco del rinforzo, va fatto notare come la crisi non sia assolutamente quella ideale: invece di registrare l'asportazione di parte del substrato, infatti, la crisi è risultata mista, con zone diffuse dove si è in presenza di una crisi pressoché adesiva all'interfaccia tra rinforzo e substrato.

Questa modalità di crisi si è purtroppo verificata in molte circostanze in presenza di provini con rasatura di tipo C e le spiegazioni plausibili sono le solite: potrebbe essere stata la modalità di applicazione del rinforzo a non risultare ottimale, oppure la superficie della rasatura, dotata di una porosità estremamente ridotta,

potrebbe aver pregiudicato la penetrazione ottimale della resina epossidica, determinando questa modalità di distacco.

Una ulteriore ipotesi, che non si può scartare a priori, è quella della mancanza di compatibilità tra rasatura e collante epossidico impiegato.

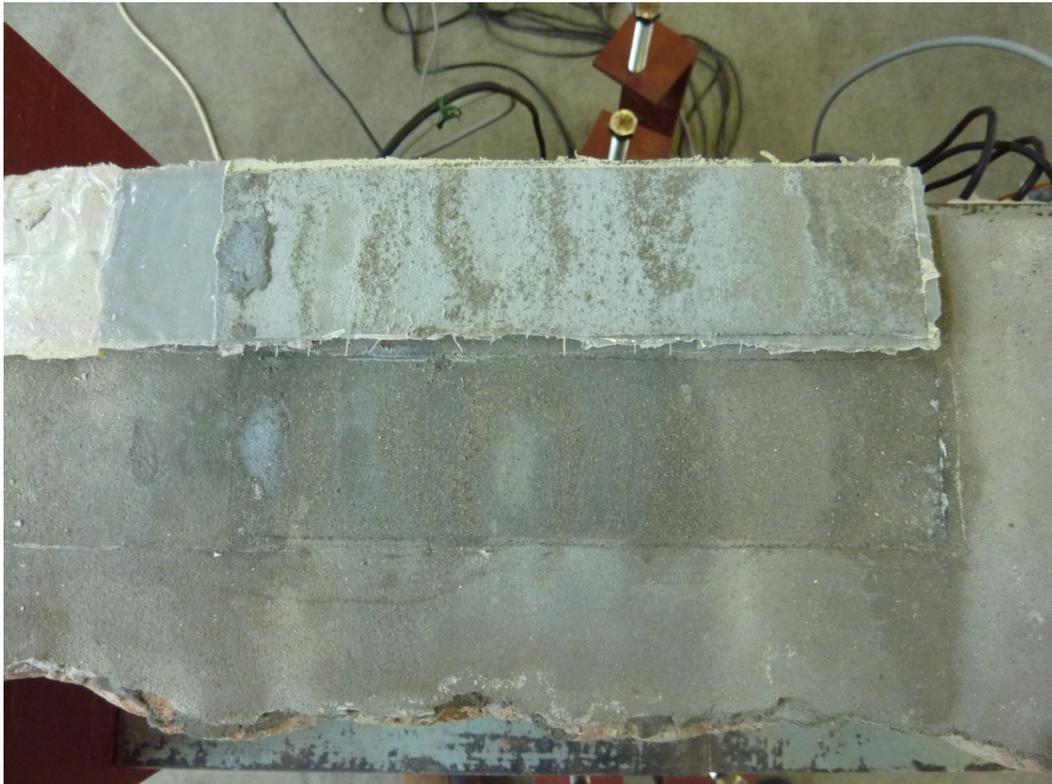


Figura 6.240 - Campione al termine della prova M4C1c.



Figura 6.241 – Dettaglio delle superfici a distacco ultimato (prova M4C1c).

6.4.6 PROVA M4C1a

Questa prova è stata eseguita in data 09/09/2011, impiegando una strumentazione composta unicamente dalla cella di carico e da due trasduttori di spostamento.

Gli strumenti utilizzati sono visibili in *figura 6.242*, mentre la descrizione più dettagliata degli stessi, insieme all'indicazione dei canali di acquisizione utilizzati, è presentata nella *tabella 6.27*.

La disposizione degli LVDT adottata è quella ottimale per le prove condotte in assenza di estensimetri: collocando il primo induttivo in modo che possa eseguire

la lettura dal retro, infatti, così come quello posteriore, è possibile sistemarlo decisamente più in basso, evitando l'ingombro dell'asse di tiro.

Quest'ultimo, infatti, imponendo un'altezza minima più elevata, a causa dello spessore delle piastre di afferraggio, rischia di condizionare maggiormente la misura, che potrebbe risentire di eventuali rotazioni degli elementi di contrasto metallici.



Figura 6.242 - Setup prova M4C1a.

Canale	Strumento	Collocazione
0	Cella di carico	-
1	LVDT HBM WA / 10 mm	inizio incollaggio rinforzo (davanti)
2	LVDT HBM WA / 20 mm	fine incollaggio (parte posteriore)

Tabella 6.27 - Strumenti utilizzati durante la prova M4C1a e canali di acquisizione.

L'impiego della strumentazione indicata consente di determinare il grafico carico-allungamento riportato in *figura 6.243*.

Il diagramma può essere costruito semplicemente utilizzando le letture della cella di carico e calcolando l'allungamento come differenza tra i valori registrati dagli LVDT collegati ai canali 1 e 2.

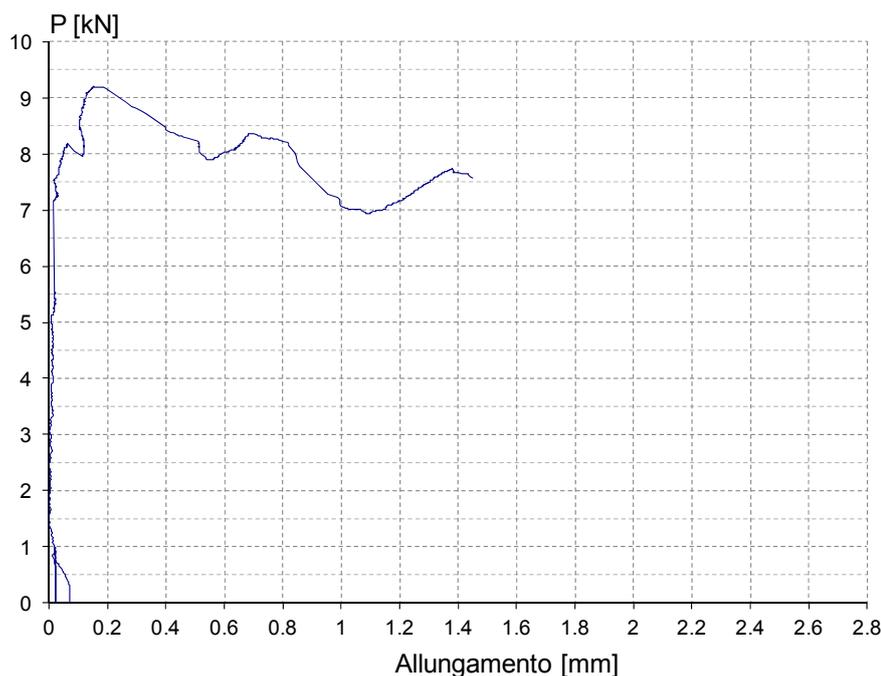


Figura 6.243 - Grafico carico-allungamento (prova M4C1a).

Come criterio impiegato in tutte le prove, è stato condotto un ciclo di carico-scarico iniziale (fino al livello di 1 kN) per permettere l'assestamento del campione, prima di condurre la prova vera e propria in controllo di spostamento.

È da notare come il provino abbia manifestato un comportamento estremamente rigido nel ramo iniziale, lasciando questa pendenza solo in prossimità del picco, pari a ben 9.201 kN.

Confrontando la pendenza iniziale con quella registrata nel corso della prova precedente (M4C1a), si vede come sia presente una apprezzabile differenza.

Tra le due pendenze, rilevate nelle prove M4C1a e M4C1c, appare sicuramente più verosimile la prima.

La parte di diagramma dopo il picco appare piuttosto variegata, con rami di softening che si alternano a breve riprese di carico.

Per quanto riguarda il massimo valore del carico registrato, la prova conferma ancora una volta l'ottimo comportamento della rasatura di tipo C, che riesce a fare una buona differenza rispetto al campione non rasato.

Ciò che anche in questa prova non convince è tuttavia la modalità di distacco del rinforzo, che risulta evidente nelle figure riportate in seguito.

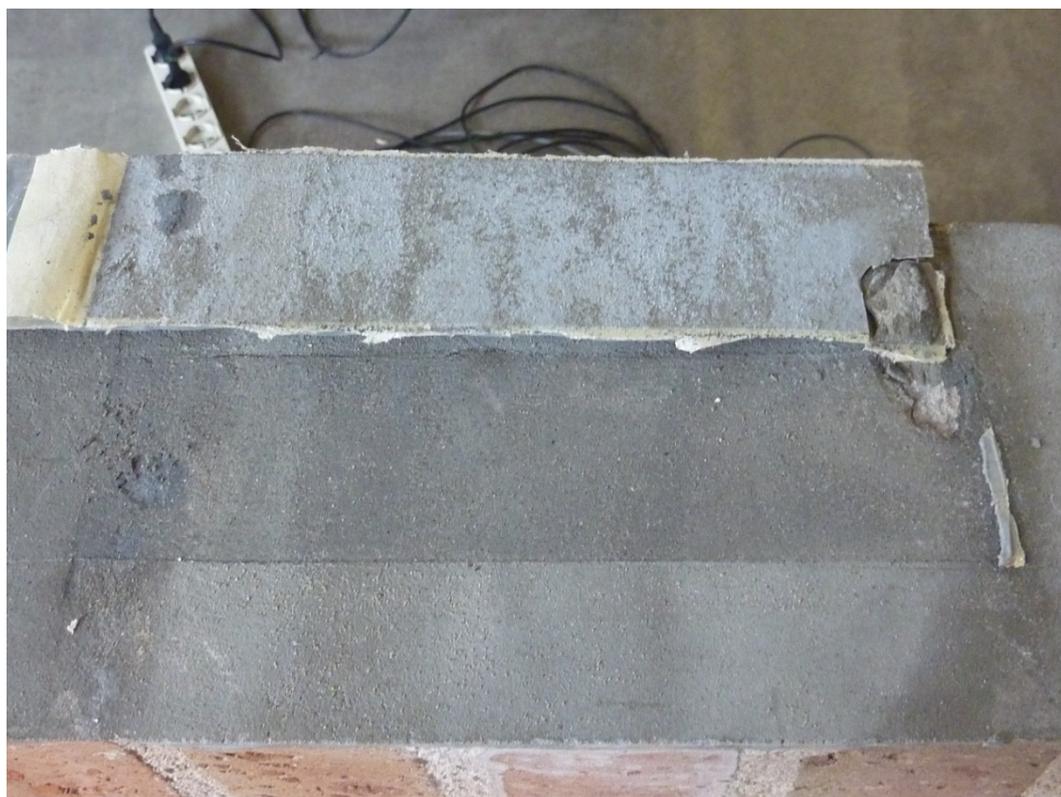


Figura 6.244 – Campione al termine della prova M4C1a.



Figura 6.245 – Particolare della modalità di distacco del rinforzo (prova M4C1a).

Si tratta ancora una volta di una modalità di crisi mista, così come evidenziato nel corso della prova precedente.

Il distacco è avvenuto evidenziando solo una lieve asportazione del substrato lungo la zona di incollaggio, tranne nella parte posteriore dove su un lato si è staccata una porzione più evidente.

Questa modalità mette in luce un buon ancoraggio del rinforzo nella parte terminale, ma il distacco nella sua globalità non convince e l'esito risulta ben lontano da quello consigliabile.

Ciò che occorre rilevare è che, a fronte di una crisi mista non ideale, il carico massimo registrato è risultato comunque molto elevato, anzi il più elevato fra tutti quelli rilevati nel corso delle prove.

Con questa descrizione termina la discussione degli esiti ottenuti singolarmente nel corso di ogni prova e si lascia spazio al prossimo capitolo, che presenterà un confronto dei risultati sotto diversi punti di vista, oltre alla calibrazione di opportune leggi tensione tangenziale – scorrimento per le prove strumentate con estensimetri.

CAPITOLO 7

CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI E CONSIDERAZIONI

7.1 DESCRIZIONE DEI CONFRONTI SVILUPPATI

Nel corso del presente capitolo verranno presentati diversi confronti fra i risultati ottenuti nel corso delle prove di aderenza.

Si inizierà (al § 7.2) con la presentazione di diversi istogrammi che mostrano le forze massime registrate durante le prove a confronto in relazione alle diverse tipologie di mattone e di rasatura.

In seguito, al § 7.3, saranno confrontati i diagrammi forza – allungamento ottenuti nel corso di prove analoghe, visto che sono state previste due ripetizioni per ogni tipologia di substrato, con l'unica eccezione costituita dai mattoni rasati.

Il paragrafo 7.4 presenterà invece il confronto tra le curve carico – allungamento ottenute rispettivamente calcolando l'allungamento grazie all'impiego dei trasduttori di spostamento oppure integrando le deformazioni registrate dagli estensimetri per ogni livello di carico. Il confronto sarà sviluppato per ogni prova strumentata con estensimetri.

Si proseguirà eseguendo diversi confronti tra i diagrammi carico – allungamento al variare della tipologia di mattone o della finitura superficiale, rappresentando delle curve medie in riferimento alle prove ripetute della stessa tipologia (esempio B1A1a e B1A2a) per rendere il confronto più significativo e maggiormente comprensibile. Questo confronto sarà presentato nell'ambito del § 7.5.

Infine, al paragrafo 7.6, verrà condotta, per ogni prova strumentata con estensimetri, la calibrazione di una legge adeguata a rappresentare il legame tensione tangenziale – scorrimento che si è sviluppato e si concluderà mostrando confronti anche tra queste calibrazioni.

7.2 CONFRONTO TRA LE FORZE MASSIME REGISTRATE NEL CORSO DELLE PROVE DI ADERENZA

Come già anticipato, nel corso di questo paragrafo vengono mostrati diversi istogrammi che mettono in relazione i carichi massimi rilevati nel corso delle prove, indicando anche la media nel caso di prove ripetute su campioni della stessa tipologia.

Si inizia con la *figura 7.1*, che mostra una panoramica dei risultati ottenuti su mattoni e muretti non rasati.

Ciò che appare evidente è la bassa dispersione dei risultati registrata in molti casi nella ripetizione delle prove su campioni analoghi, con qualche eccezione, rappresentata ad esempio dalle prove B2A e B4A.

Riguardo alle prove condotte su mattoni di recupero, però, va tenuto ben presente che gli stessi potrebbero provenire da diverse fonti e quindi potrebbero essere effettivamente mattoni dotati di caratteristiche diverse.

Diversi risultati in questo ambito sono quindi accettabili e facilmente giustificabili.

Un altro particolare che appare subito evidente è la tendenza del carico massimo a crescere quando si passa da prove su mattoni a prove su muretti dello stesso tipo.

L'unica eccezione è rappresentata dai mattoni di tipo 3, dove accade l'esatto opposto.

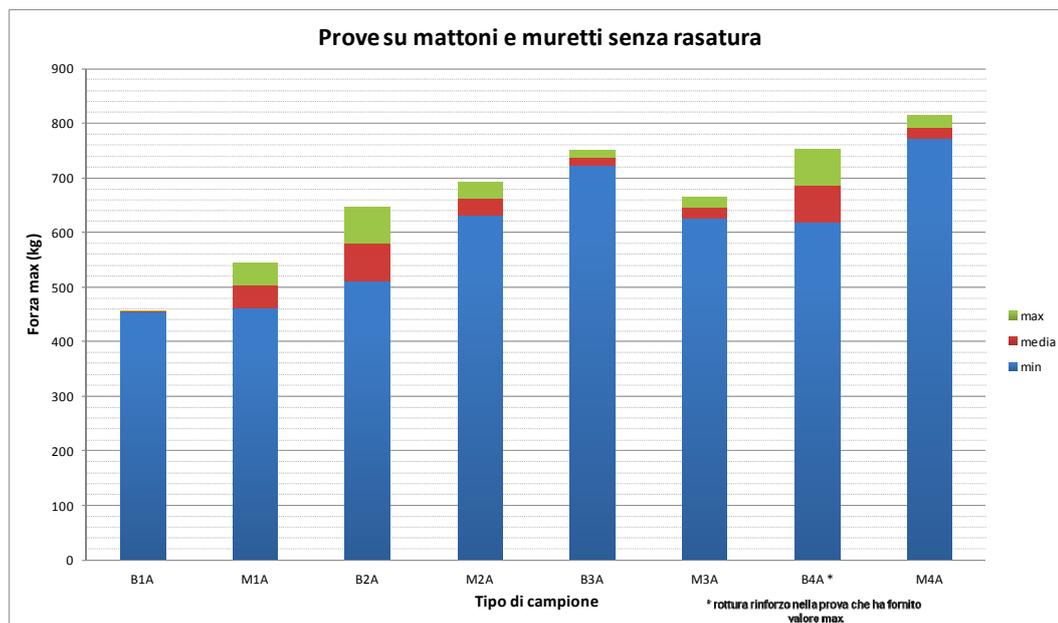


Figura 7.1 – Confronto tra le forze massime registrate nelle prove di aderenza condotte su mattoni e muretti senza rasatura.

La *figura 7.2*, riportata di seguito, mostra lo stesso confronto condotto però su mattoni e muretti rasati delle tipologie 3 e 4, in riferimento sia alla rasatura di tipo B (malta Tassullo T30V), che a quella di tipo C (malta Mapei Mapefinish).

Va rilevato a questo proposito che è stata condotta una sola prova sui mattoni rasati, quindi in questo caso non è possibile mediare i risultati, ma viene indicato l'unico valore ottenuto.

Il carico aumenta in maniera apprezzabile quando si passa dai mattoni tipo 4 ai corrispondenti muretti, per entrambe le tipologie di rasatura.

Il mattone tipo 3 mostra invece un comportamento diverso a seconda della malta utilizzata per la rasatura: nel caso di impiego di malta tipo B il carico cresce passando dal mattone al muretto, mentre per la malta tipo C avviene esattamente il contrario.

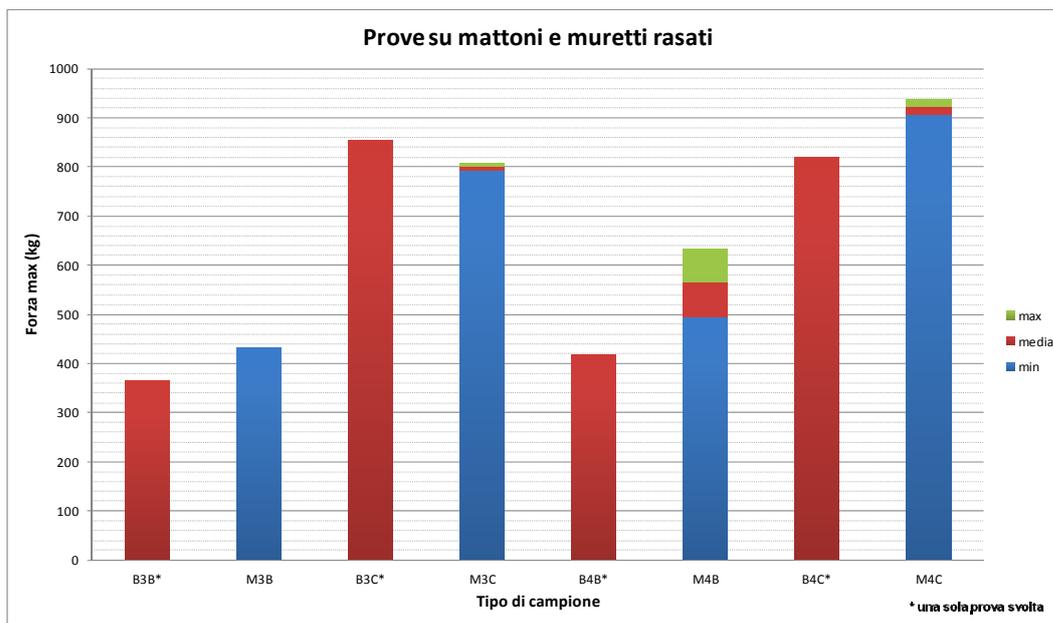


Figura 7.2 – Confronto tra i carichi massimi registrati nelle prove svolte su mattoni e muretti di tipo 3 e 4, con rasatura B o C.

La *figura 7.3* mostra invece i risultati sotto un altro punto di vista e in particolare esamina l'effetto della rasatura sui mattoni tipo 3 e 4.

Qui la tendenza è assolutamente chiara: mentre la rasatura tipo C comporta un aumento del carico massimo sopportabile dal campione rispetto al provino non rasato, quella di tipo B ottiene invece un effetto poco raccomandabile, causando un netto peggioramento della situazione.

La stessa cosa avviene nei muretti, dove il trend viene assolutamente confermato.

La situazione risulta piuttosto chiara se si fa riferimento alla *figura 7.4*.

Si fa notare anche l'ottima ripetibilità delle prove, con valori piuttosto simili tra loro, con l'unica eccezione costituita dalle prove M4B.

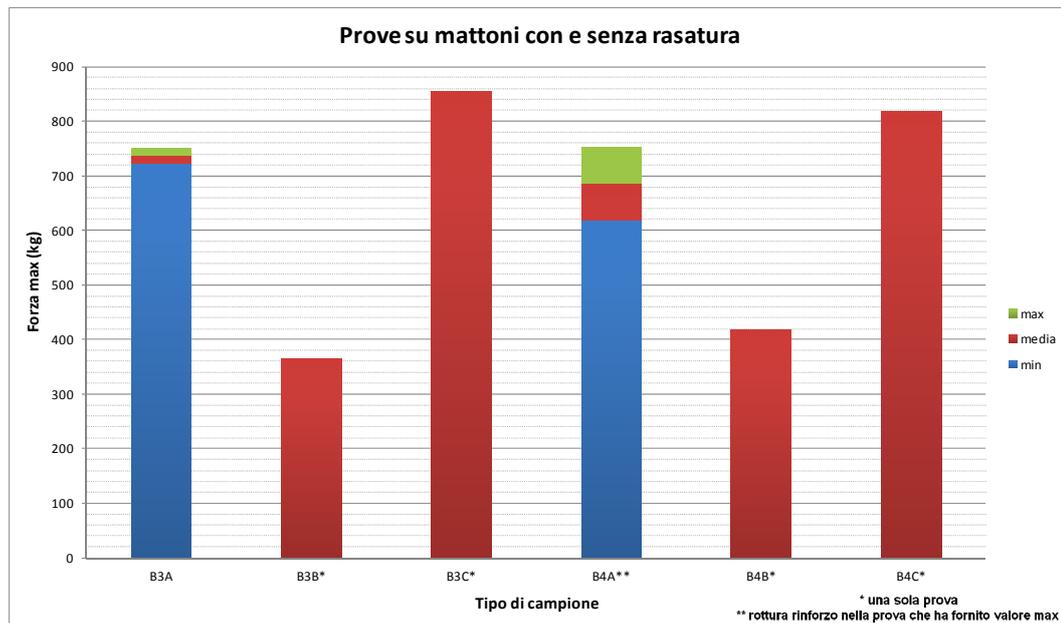


Figura 7.3 – Forze massime registrate nelle prove su mattoni tipo 3 e 4 con e senza rasatura.

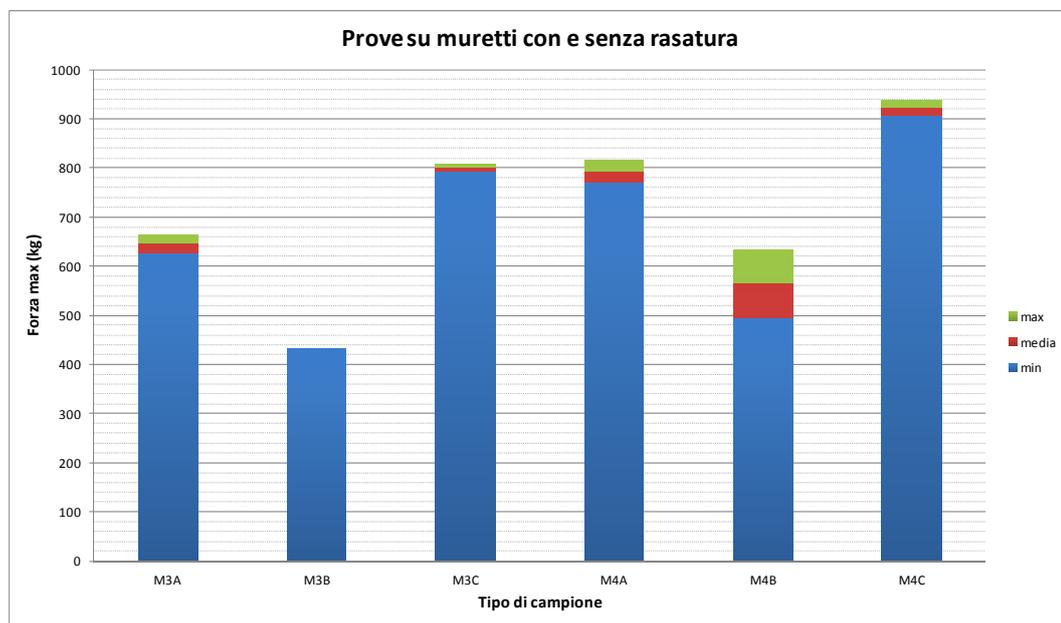


Figura 7.4 – Forze massime registrate nelle prove su muretti delle tipologie 3 e 4 con e senza l'applicazione di una preventiva rasatura superficiale.

Le *figure 7.5 e 7.6* mettono insieme i risultati ottenuti rispettivamente per i campioni di tipo 3 e 4 in un unico grafico.

Valgono le considerazioni già espresse in precedenza: per quanto riguarda i campioni di tipo 3 si assiste sempre ad una diminuzione del carico massimo registrato passando dalle prove sui mattoni a quelle sui muretti, con l'unica eccezione rappresentata dalla coppia B3B – M3B.

Per quanto riguarda i campioni che utilizzano mattoni di recupero (ovvero di tipo 4) si assiste sempre ad una crescita del carico passando dai mattoni ai muretti.

In entrambi i casi la rasatura di tipo C mostra un effetto benefico, mentre la rasatura di tipo B risulta controproducente.

Si precisa che su mattoni rasati di entrambe le tipologie è stata condotta una unica prova, di cui viene indicato il risultato ottenuto.

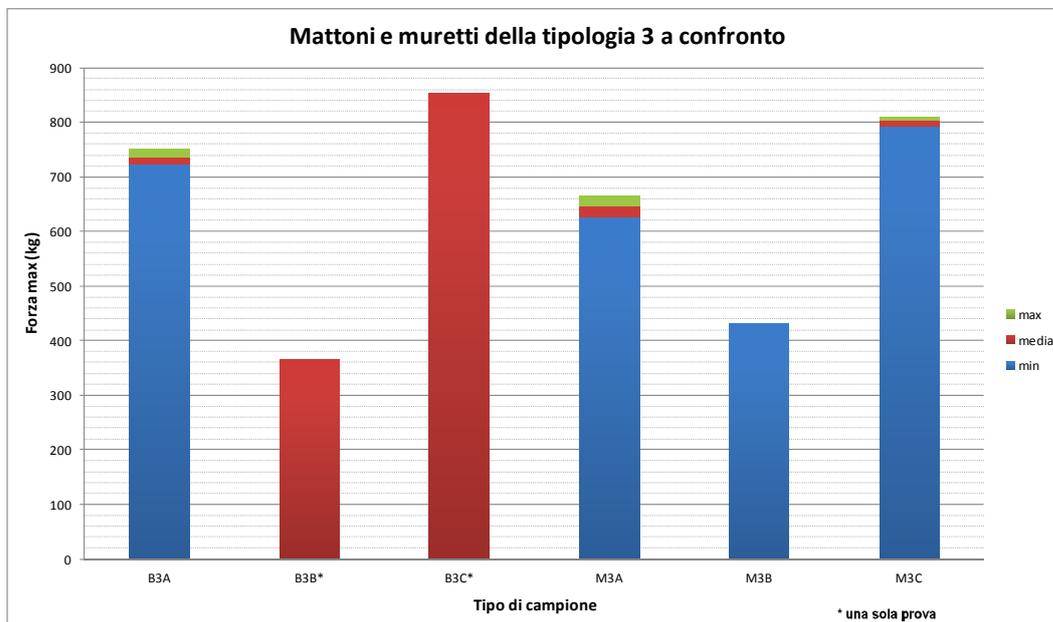


Figura 7.5 – Forze massime registrate nelle prove su mattoni e muretti di tipo 3 a confronto.

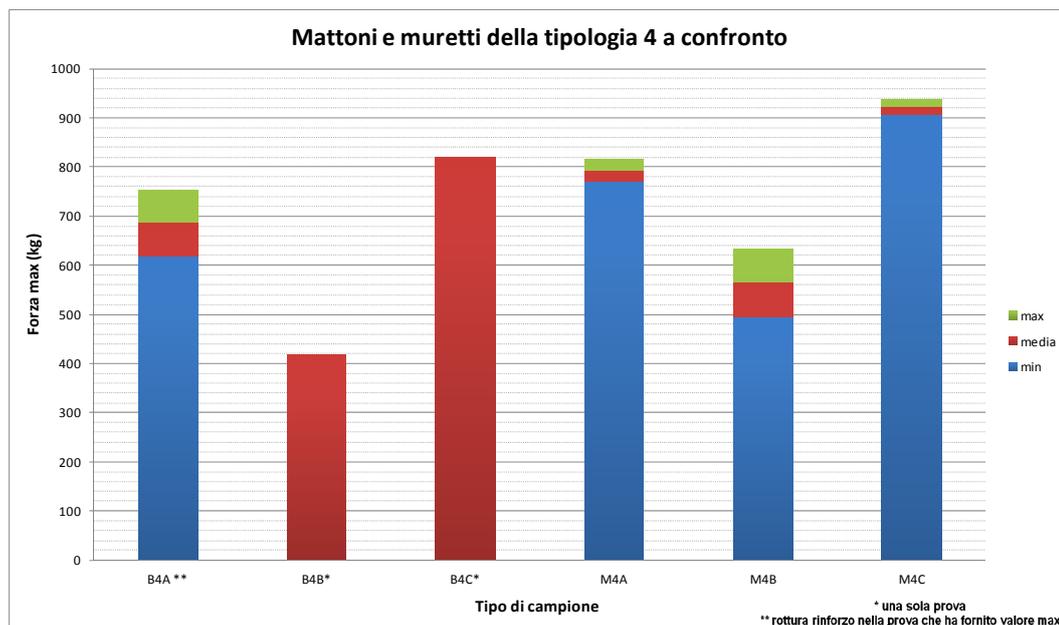


Figura 7.6 – Forze massime registrate nelle prove su mattoni e muretti di tipo 4 a confronto.

7.3 CONFRONTO DEI GRAFICI CARICO-ALLUNGAMENTO OTTENUTI PER PROVE ANALOGHE

In questo breve paragrafo vengono messi a confronto i diagrammi carico - allungamento ottenuti durante lo svolgimento di prove di aderenza sulla stessa tipologia di campione.

L'allungamento riportato in ascissa è sempre quello determinato a partire dalla differenza degli spostamenti registrati dai due LVDT durante le prove.

Verranno così mostrati in un unico grafico le curve relative alla prove B1A1a e B1A2a, in un altro grafico gli andamenti ottenuti per i campioni M1A1a e M1A1c e così via.

Si fa presente che per quanto riguarda i mattoni rasati è stata eseguita una sola prova, il cui diagramma viene riportato per completezza, senza tuttavia che sia possibile alcun confronto incrociato.

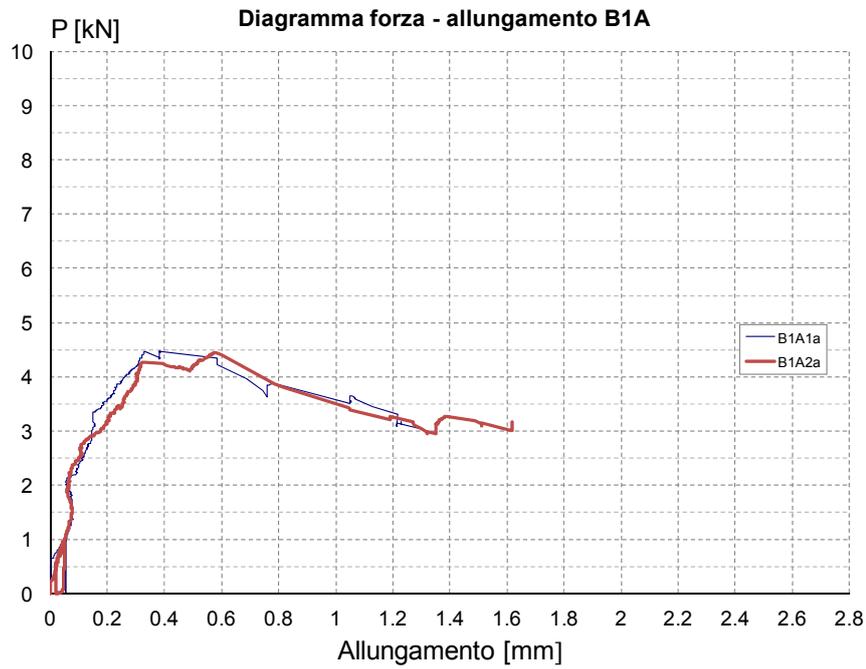


Figura 7.7 – Confronto dei diagrammi forza-allungamento ottenuti per i campioni B1A1a e B1A2a.

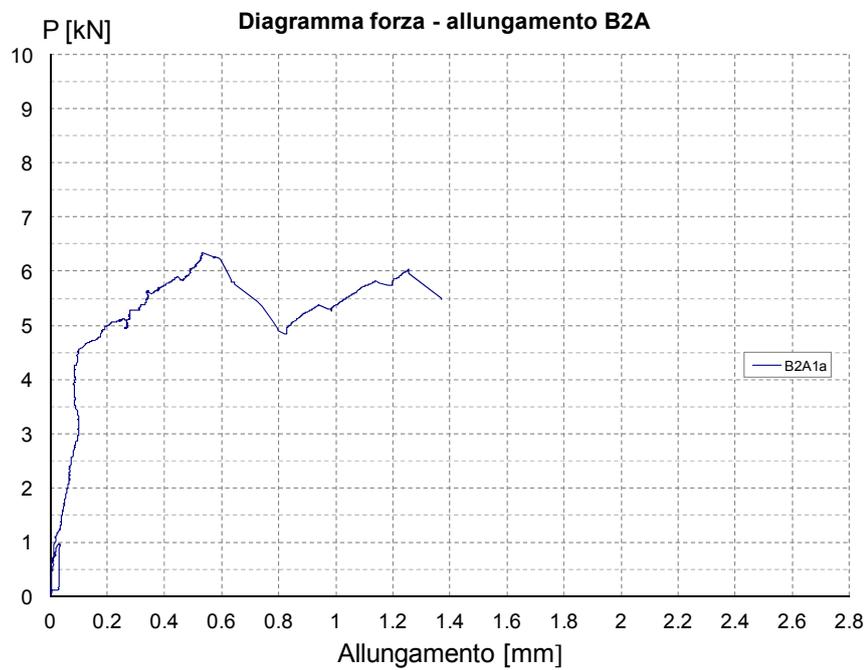


Figura 7.8 – Diagramma forza-allungamento ottenuto per il campione B2A1a.

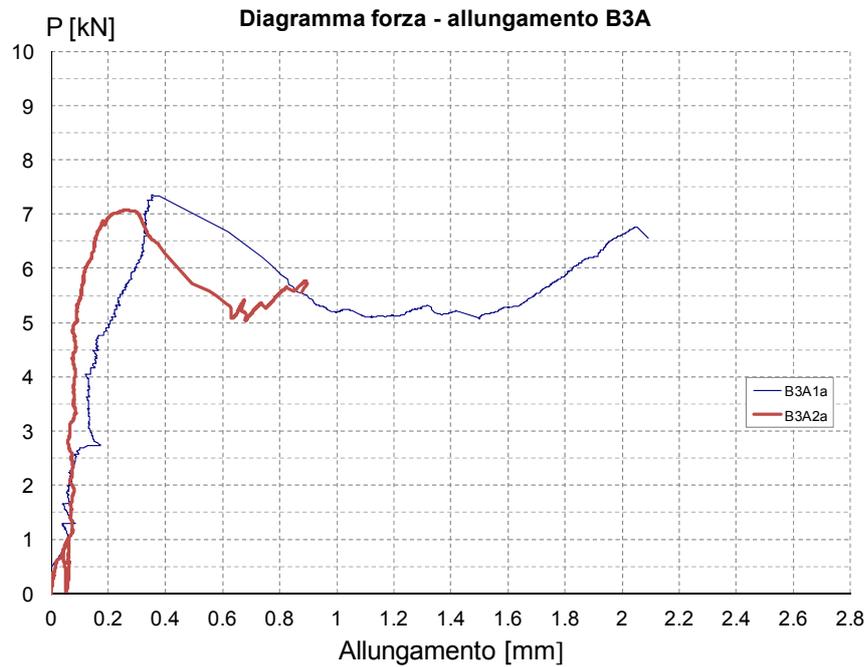


Figura 7.9 – Confronto dei diagrammi forza-allungamento ottenuti per i campioni B3A1a e B3A2a.

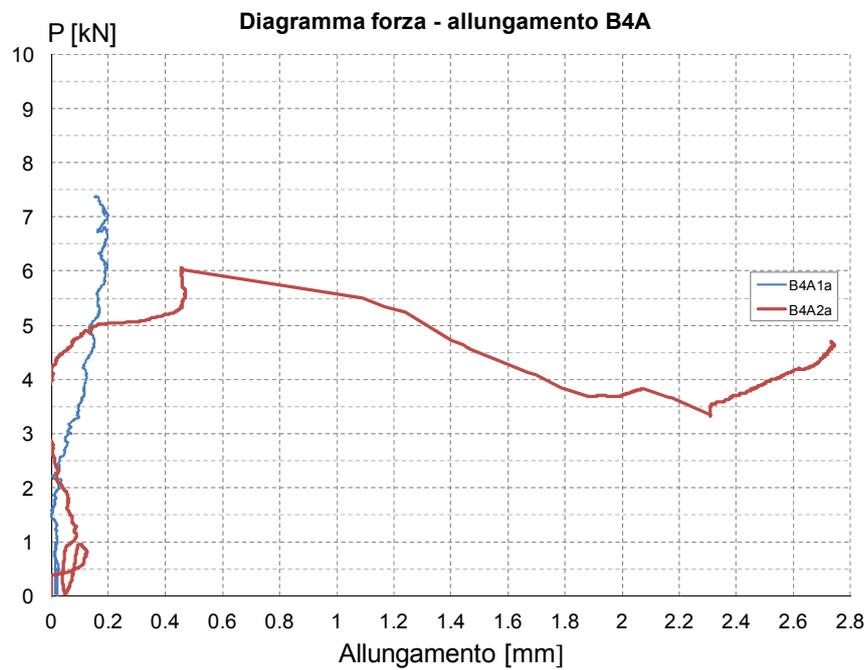


Figura 7.10 – Confronto dei diagrammi forza-allungamento ottenuti per i campioni B4A1a e B4A2a. Si fa presente che nel corso della prova B4A1a si è verificata la rottura del rinforzo prima che avvenisse il completo distacco dello stesso.

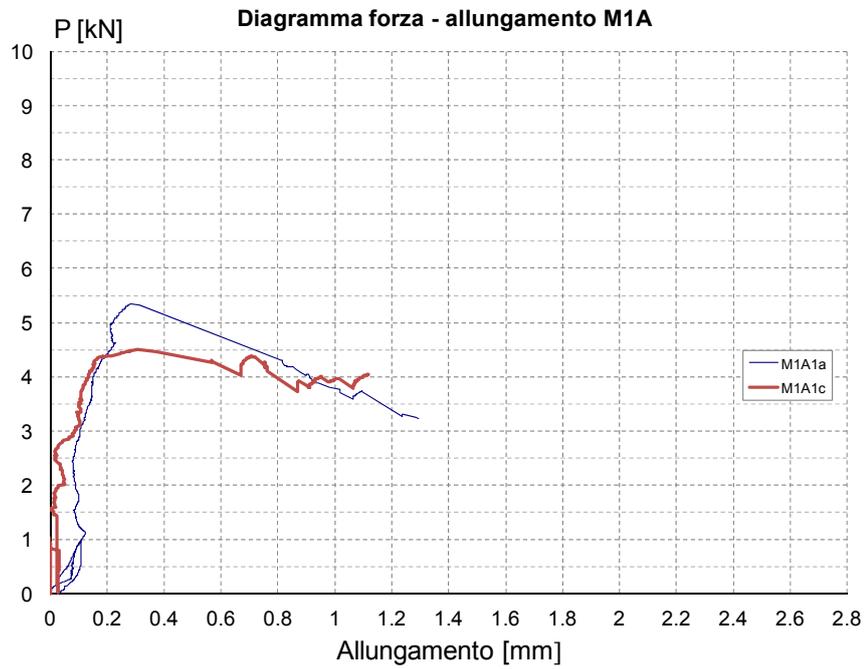


Figura 7.11 – Confronto dei diagrammi forza-allungamento ottenuti per i campioni M1A1a e M1A1c.

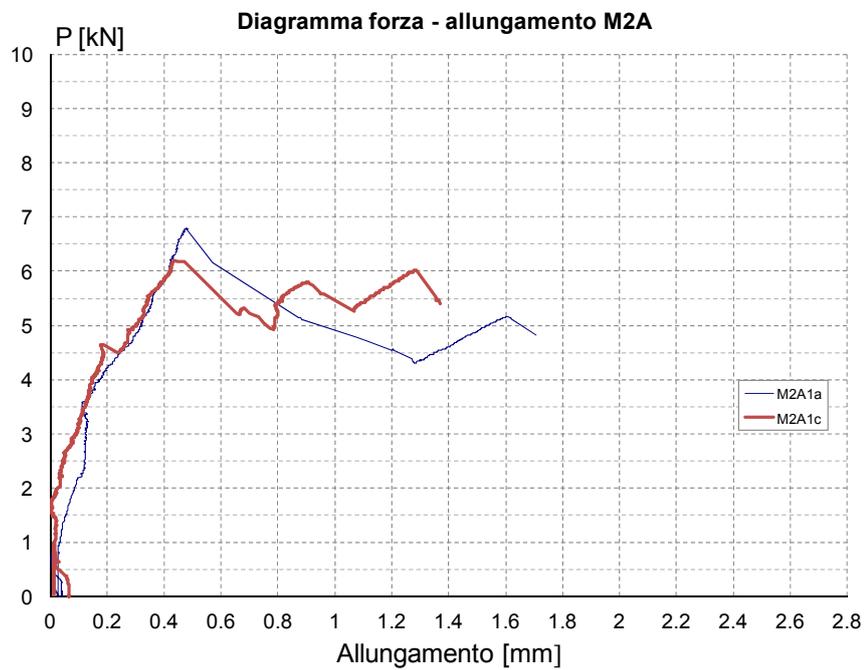


Figura 7.12 – Confronto dei diagrammi forza-allungamento relativi ai campioni M2A1a e M2A1c.

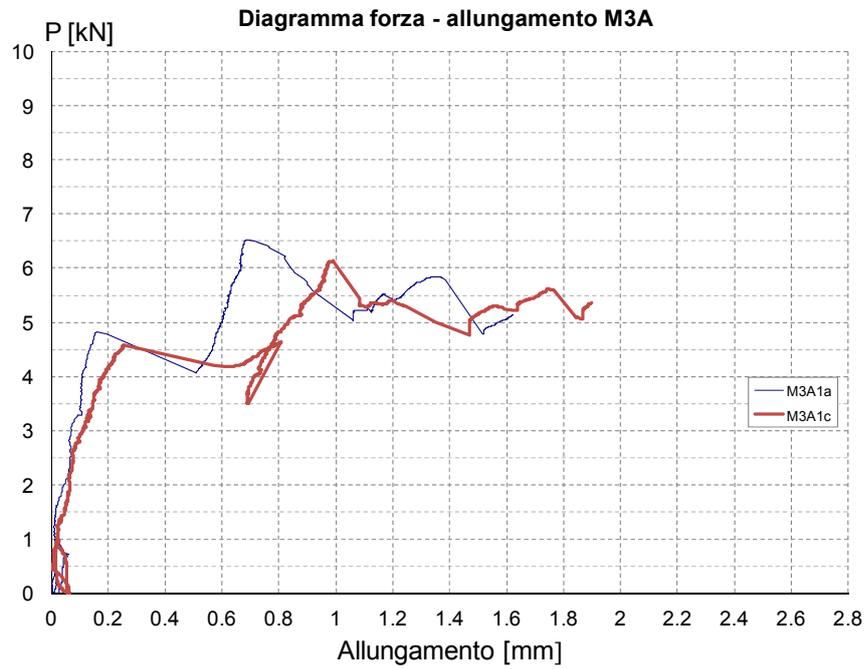


Figura 7.13 – Confronto dei diagrammi forza-allungamento ottenuti per i campioni M3A1a e M3A1c.

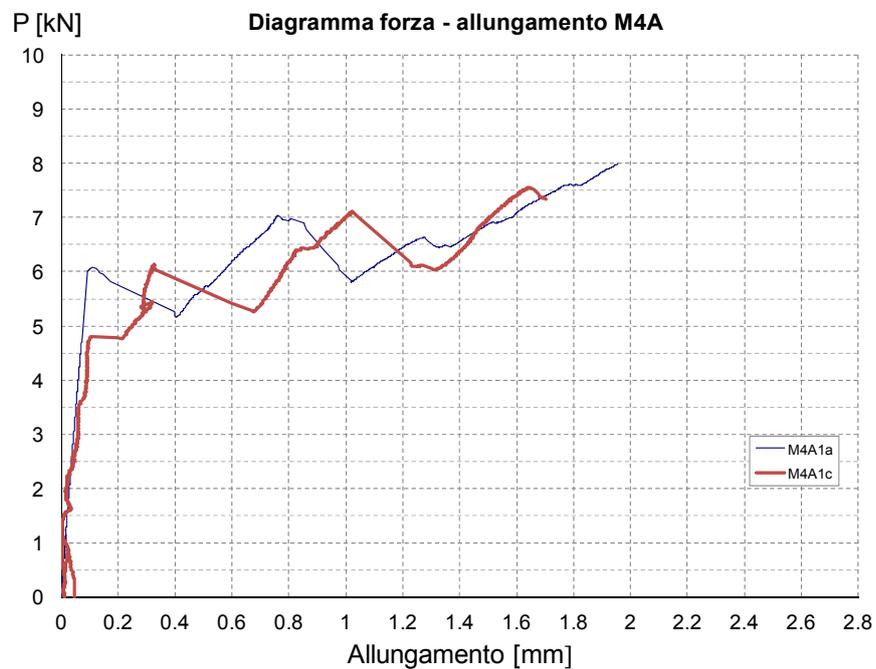


Figura 7.14 – Confronto dei diagrammi forza-allungamento relativi ai campioni M4A1a e M4A1c.

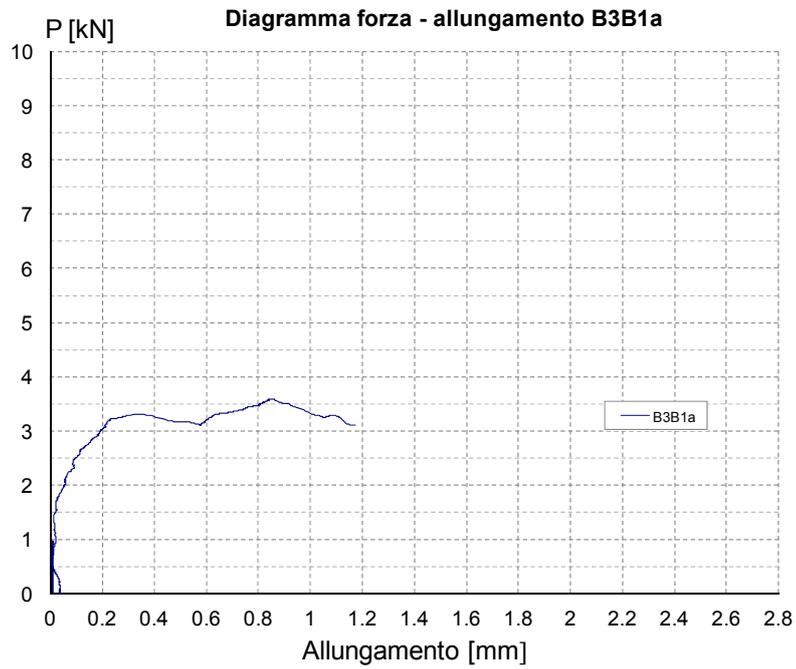


Figura 7.15 – Diagramma forza-allungamento ottenuto nel corso della prova B3B1a.

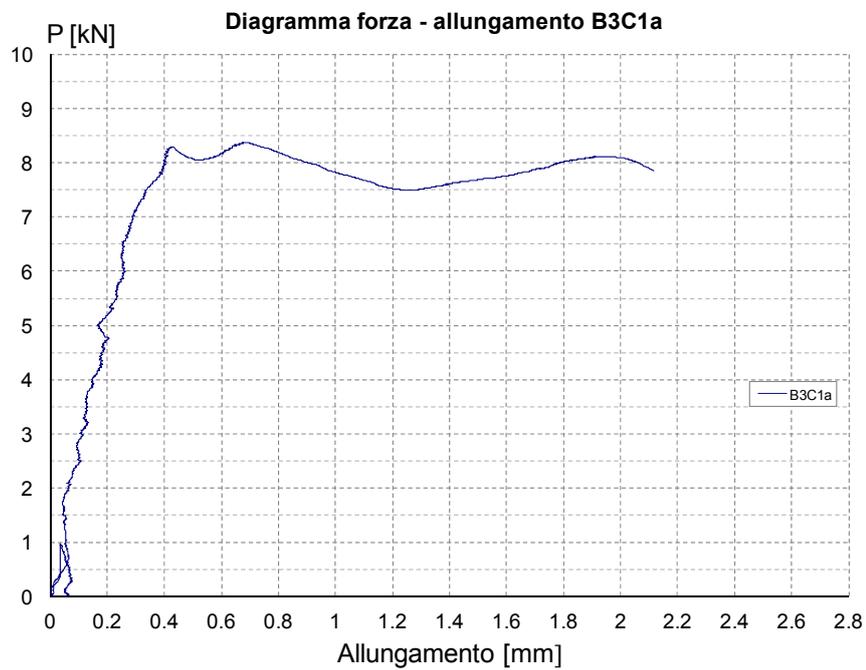


Figura 7.16 – Diagramma forza-allungamento ottenuto durante la prova B3C1a.

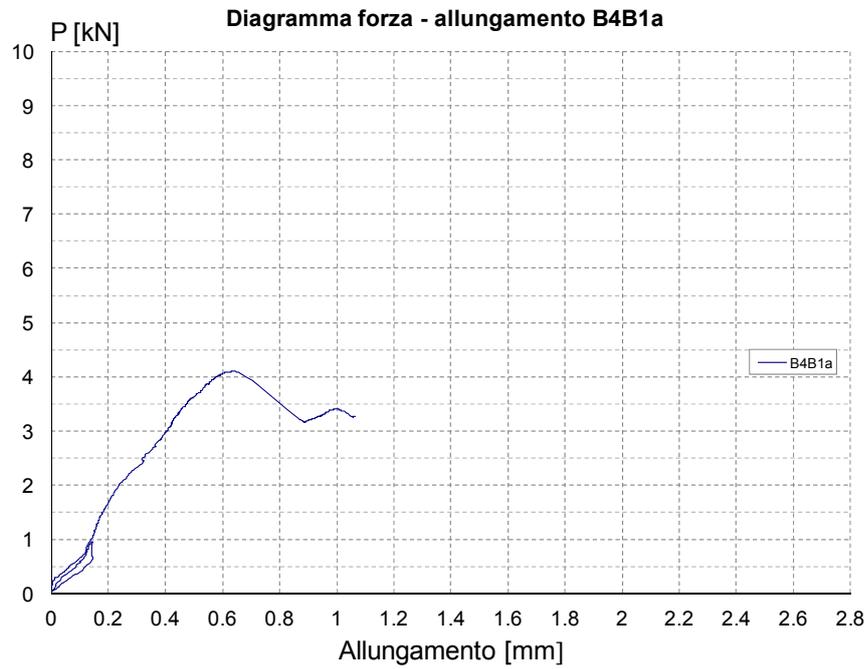


Figura 7.17 – Diagramma forza-allungamento ottenuto nel corso della prova B4B1a.

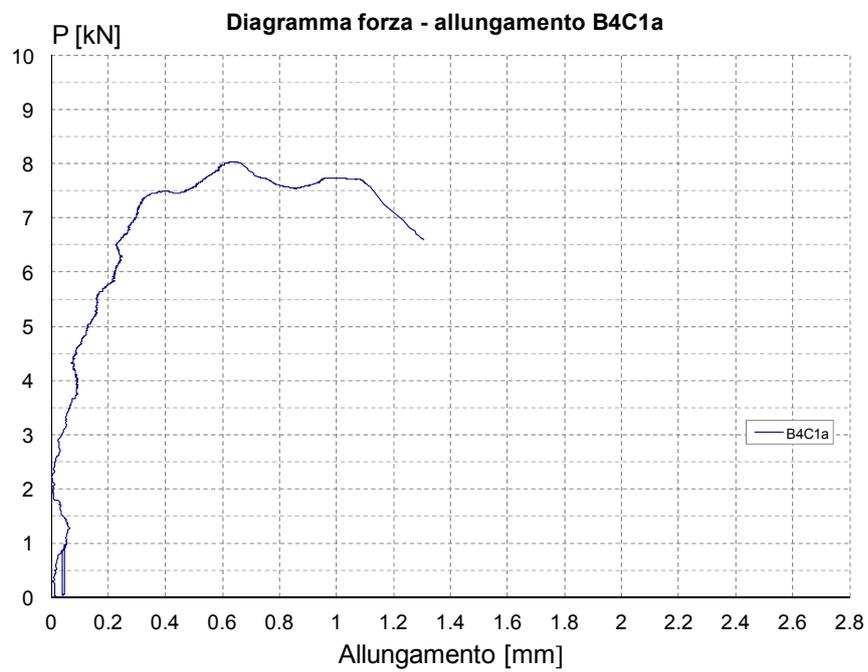


Figura 7.18 – Diagramma forza-allungamento ottenuto nel corso della prova B4C1a.

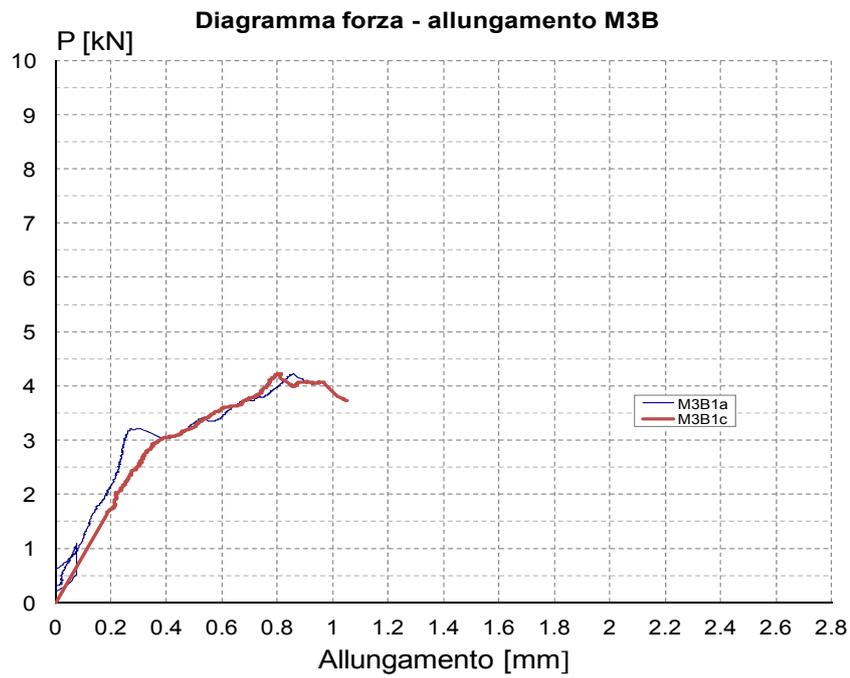


Figura 7.19 – Confronto dei diagrammi forza-allungamento relativi ai campioni M3B1a e M3B1c.

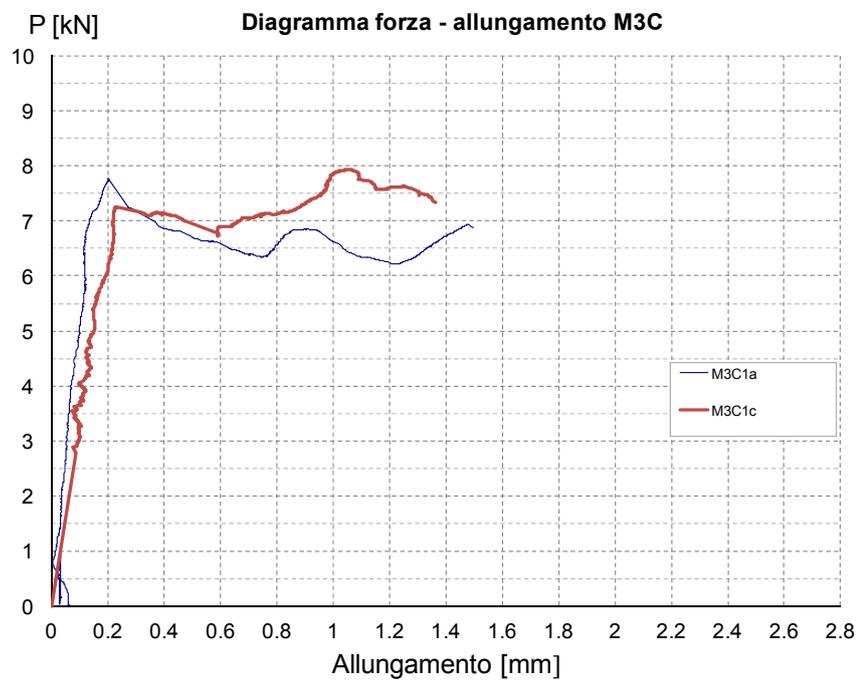


Figura 7.20– Confronto dei diagrammi forza-allungamento ottenuti nelle prove M3C1a e M3C1c.

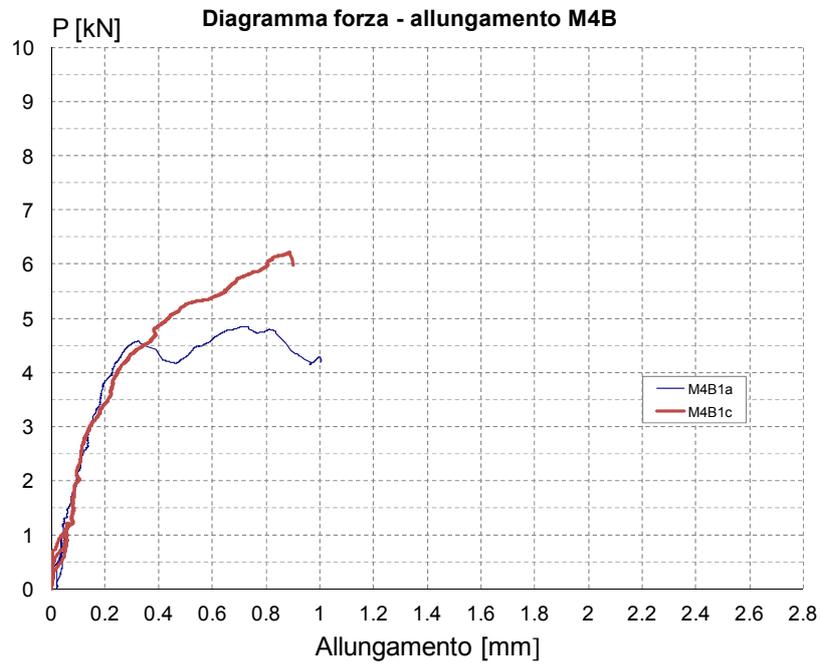


Figura 7.21 – Diagrammi forza-allungamento relativi alle prove M4B1a e M4B1c a confronto.

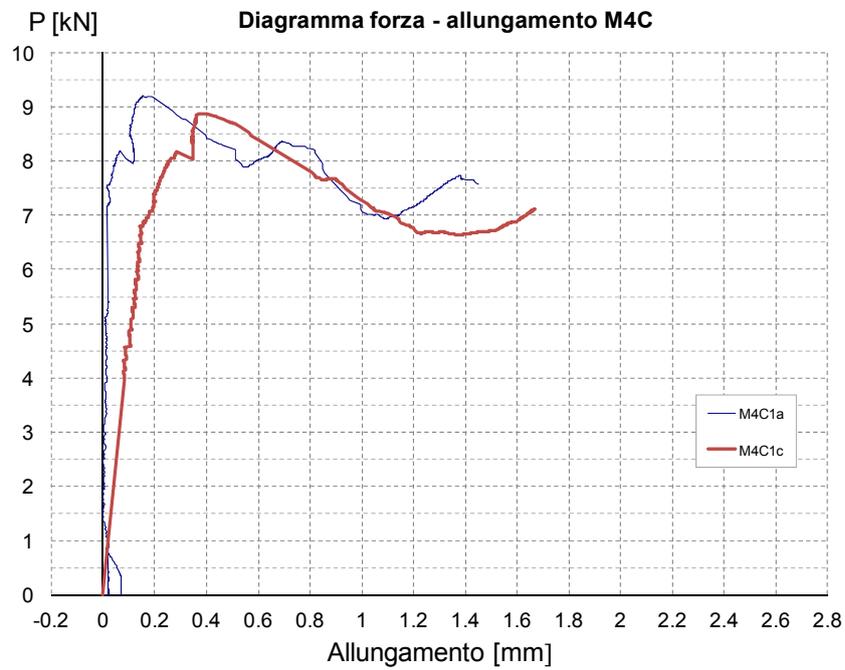


Figura 7.22 – Confronto dei grafici forza-allungamento relativi alle prove M4C1a e M4C1c .

I diagrammi mostrano per lo più un andamento simile tra prove analoghe, confermando in generale la ripetibilità delle prove stesse.

Si fa presente inoltre che i mattoni di tipo B4 sono mattoni di recupero non necessariamente provenienti dalla stessa fonte e dotati delle stesse caratteristiche, quindi in tal caso risulti più dispersi sarebbero comunque comprensibili.

Nel caso del confronto tra le prove M4C1a e M4C1c, va detto che si intravede una differenza piuttosto marcata tra le pendenze delle due curve.

A tal proposito, si ritiene sicuramente più attendibile l'andamento iniziale rilevato nel corso della seconda prova.

7.4 DIAGRAMMI CARICO-ALLUNGAMENTO OTTENUTI CON DUE DIVERSI METODI A CONFRONTO

Lo scopo di questa sezione è proporre un confronto tra i grafici carico-allungamento delle diverse prove ottenuti seguendo due diverse metodologie.

Il primo metodo prevede di determinare l'allungamento del composito semplicemente eseguendo la differenza tra le letture dei due trasduttori di spostamento collocati rispettivamente all'inizio della zona di incollaggio e al termine della stessa.

La seconda modalità utilizzata è invece quella di ricavare l'allungamento necessario per la costruzione del diagramma a partire dall'integrazione delle deformazioni rilevate dagli estensimetri lungo l'asse ad ogni intervallo temporale (e quindi per tutti i livelli di carico), utilizzando la (6.1).

Si preannuncia che i risultati ottenuti sono contrastanti: in molte prove i due metodi mostrano una buona corrispondenza, ma in alcune è possibile notare una differenza sensibile.

Questa differenza è probabilmente da imputare a rotazioni indesiderate degli elementi metallici di contrasto su cui poggiano i trasduttori di spostamento,

determinate anche dalla scarsa regolarità superficiale del rinforzo, che presentava in molti casi avvallamenti non del tutto eliminabili, pena il danneggiamento della fibra di vetro.

Non si può escludere tuttavia che eventuali inflessioni locali del rinforzo possano aver determinato letture in eccesso o in difetto delle deformazioni lungo l'asse del rinforzo, rispetto al caso ideale di puro sforzo assiale, determinando quindi una differenza nei risultati.

Fenomeni di inflessione locale sono peraltro piuttosto evidenti in diversi casi osservando l'andamento delle deformazioni prima della regolarizzazione.

Tutti questi aspetti possono spiegare le diversità registrate in alcuni confronti.

Ciò che tuttavia va rilevato è che in generale, a meno di un effetto scala lungo l'asse delle ascisse, l'andamento globale del diagramma viene comunque confermato.

Si riportano di seguito i confronti eseguiti, dove viene indicata con l'etichetta "LVDT" la curva ottenuta secondo il primo metodo, mentre viene segnalato con l'etichetta "Estensimetri" l'andamento ottenuto computando l'allungamento mediante integrazione delle deformazioni ad ogni passo di carico.

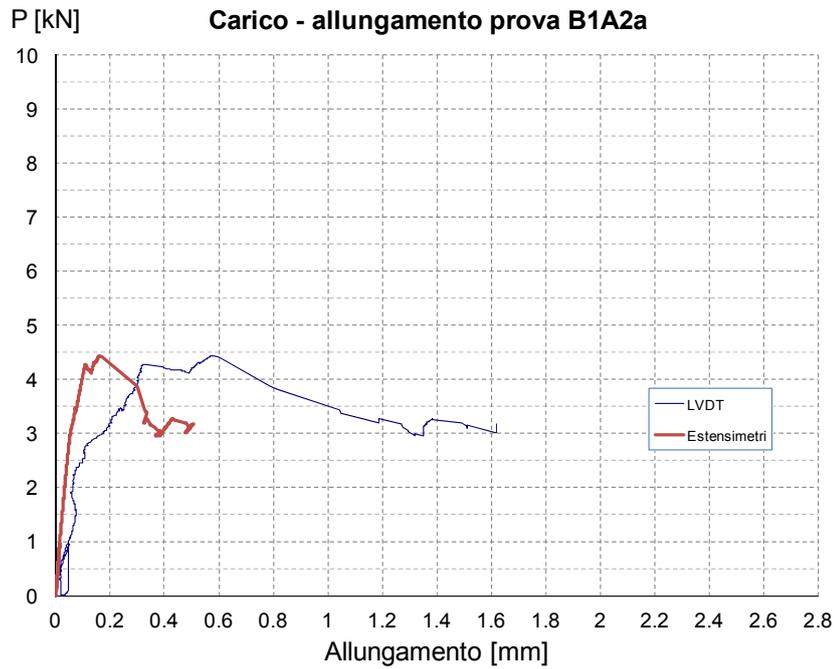


Figura 7.23 – Confronto dei grafici forza-allungamento ricavati seguendo i due diversi metodi (prova B1A2a).

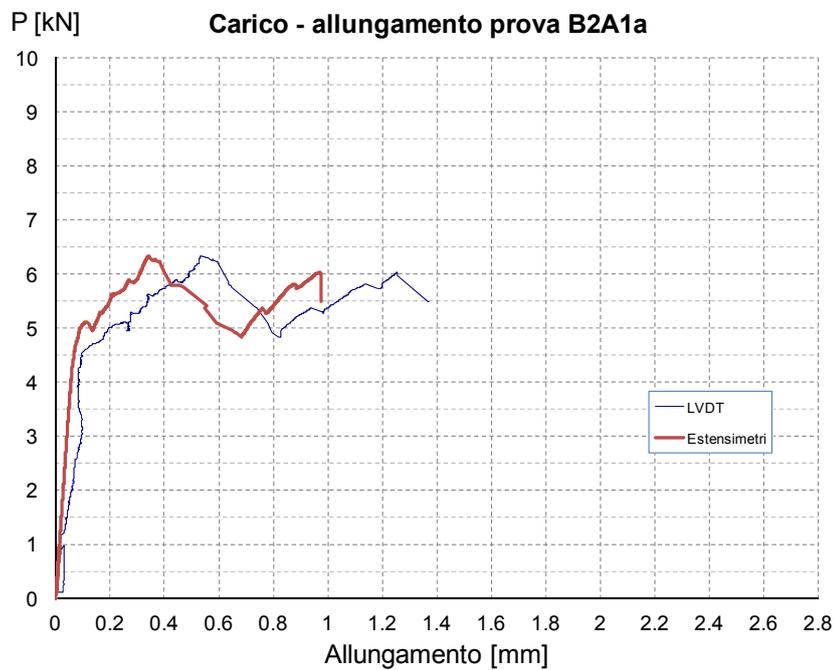


Figura 7.24 – Confronto dei grafici forza-allungamento ricavati secondo le due diverse modalità (prova B2A1a).

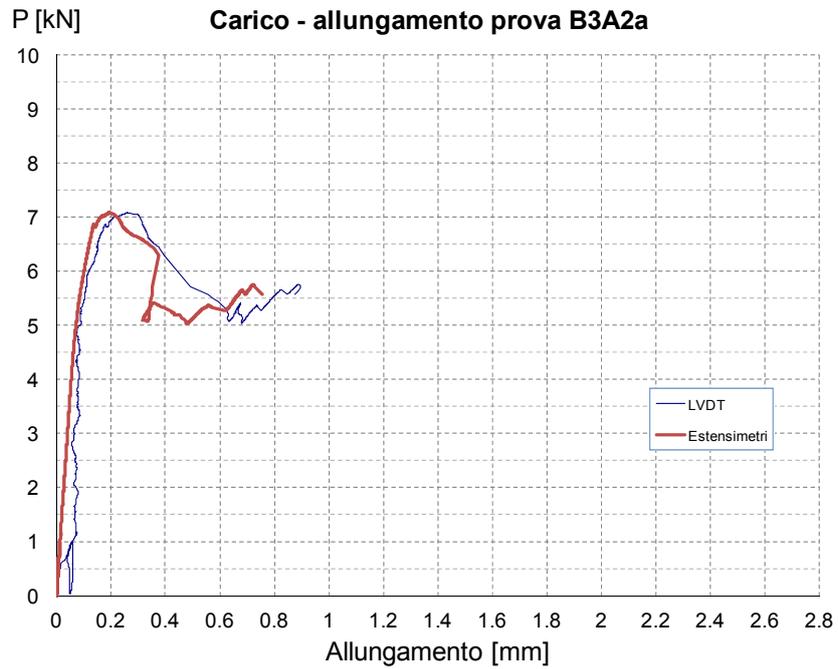


Figura 7.25 – Confronto dei grafici forza-allungamento ricavati secondo i due metodi per la prova B3A2a.

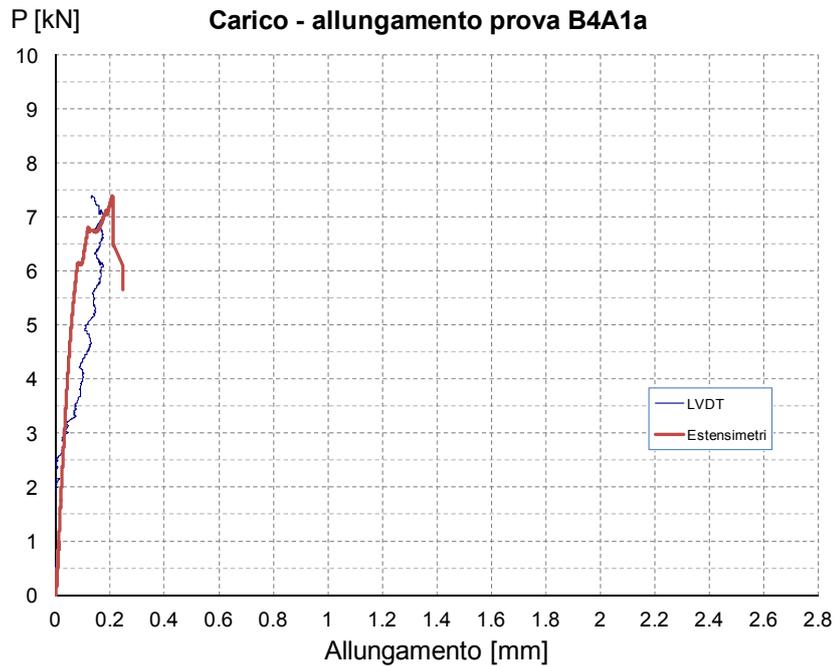


Figura 7.26 – Confronto dei grafici forza-allungamento determinati secondo le due diverse metodologie per la prova B4A1a.

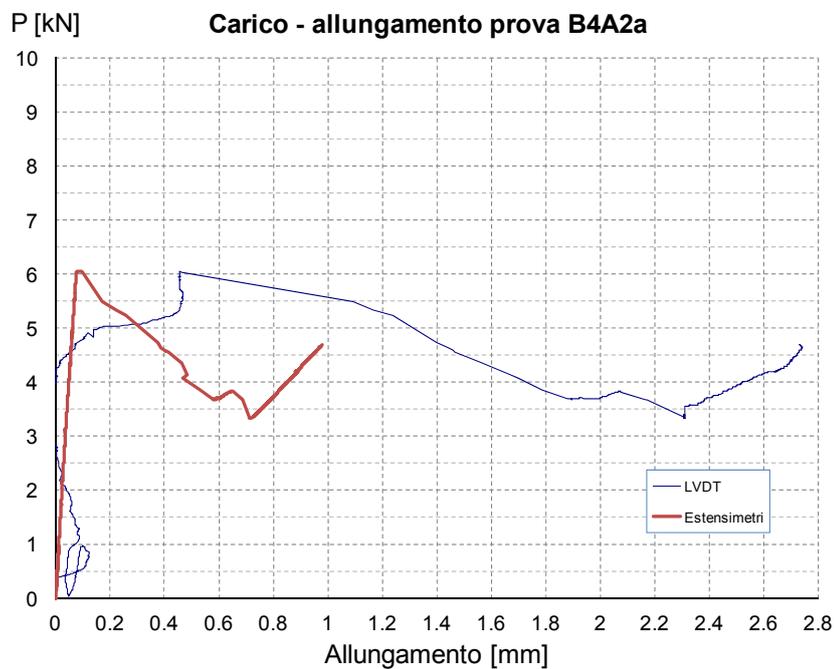


Figura 7.27 – Confronto dei grafici forza-allungamento determinati secondo le due diverse metodologie per la prova B4A2a.

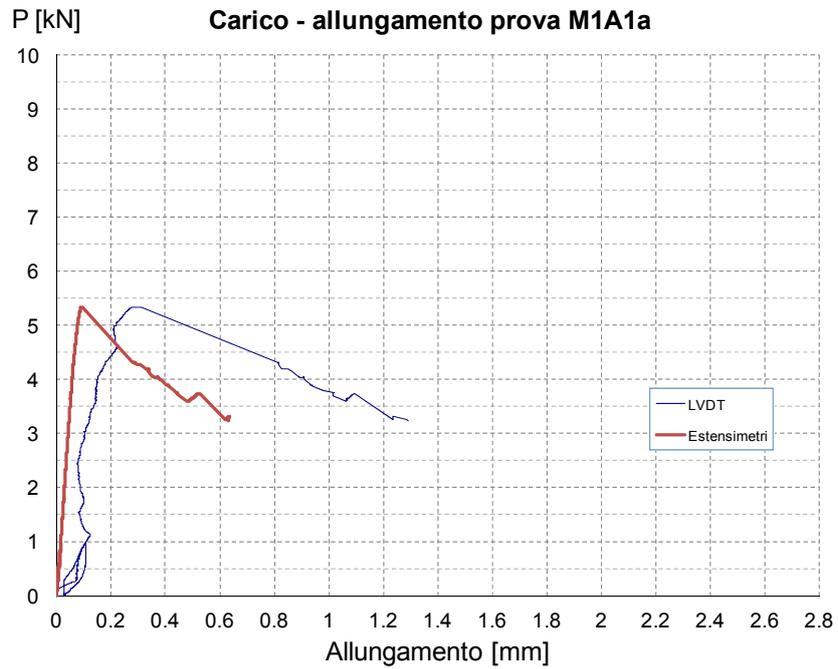


Figura 7.28 – Grafici forza-allungamento determinati secondo i due metodi a confronto per la prova M1A1a.

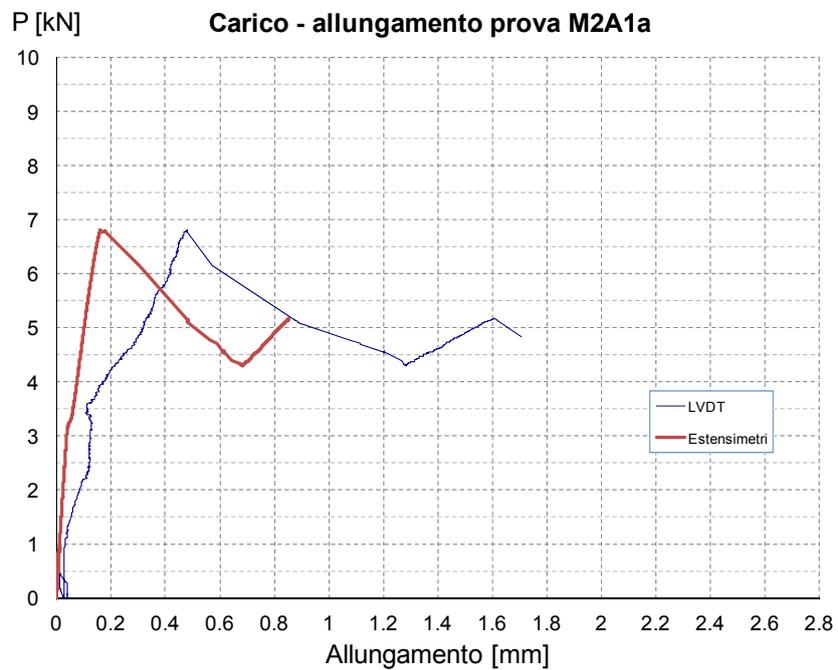


Figura 7.29– Confronto tra le due diverse modalità di calcolo dell’allungamento (prova M2A1a).

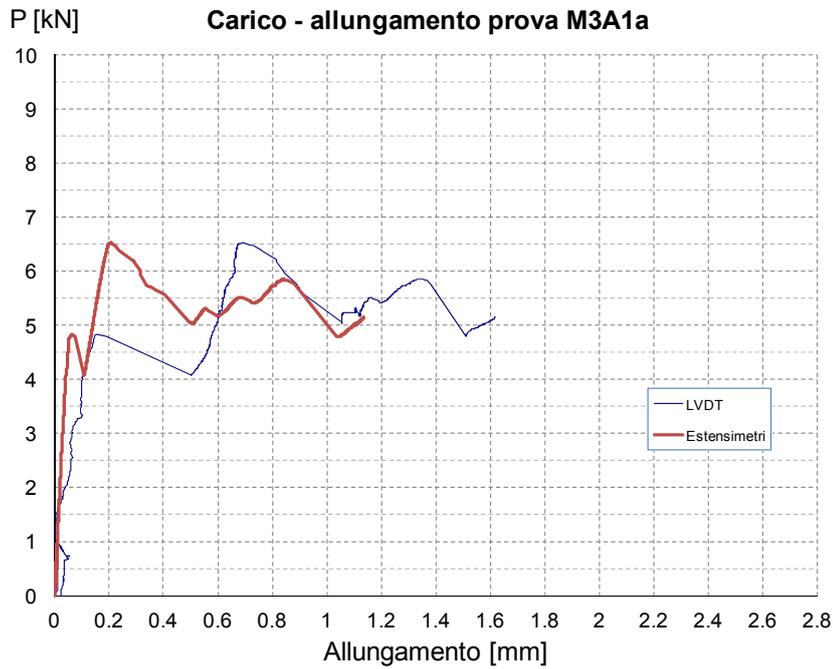


Figura 7.30 – Diagrammi a confronto per la prova M3A1a.

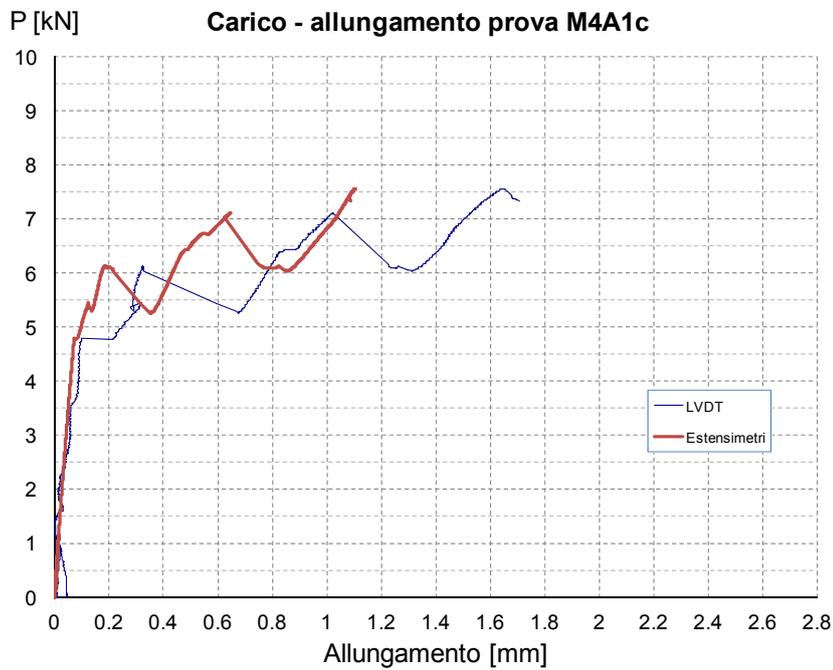


Figura 7.31 – Confronto tra le due diverse modalità di calcolo dell'allungamento (prova M4A1c).

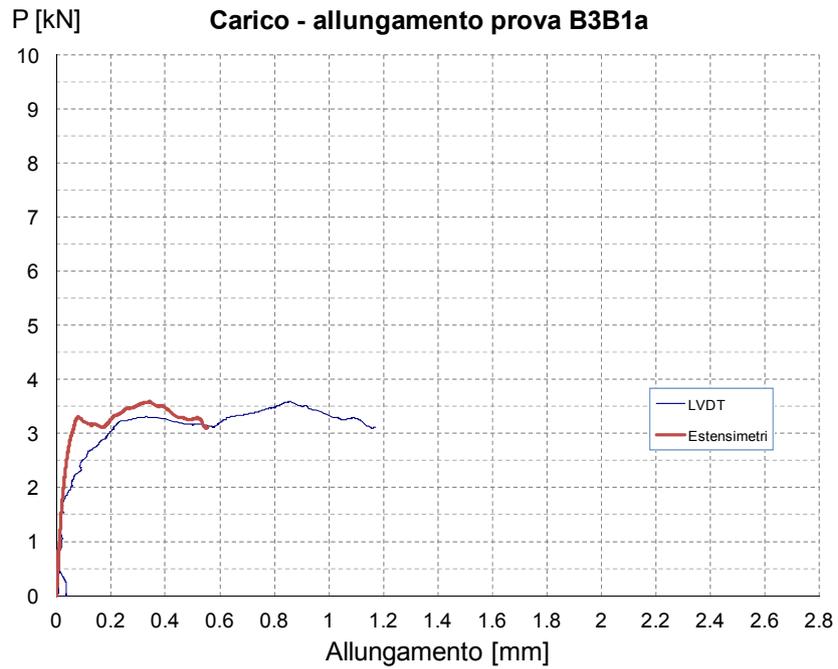


Figura 7.32 – Grafici forza-allungamento determinati secondo i due metodi a confronto per la prova B3B1a.

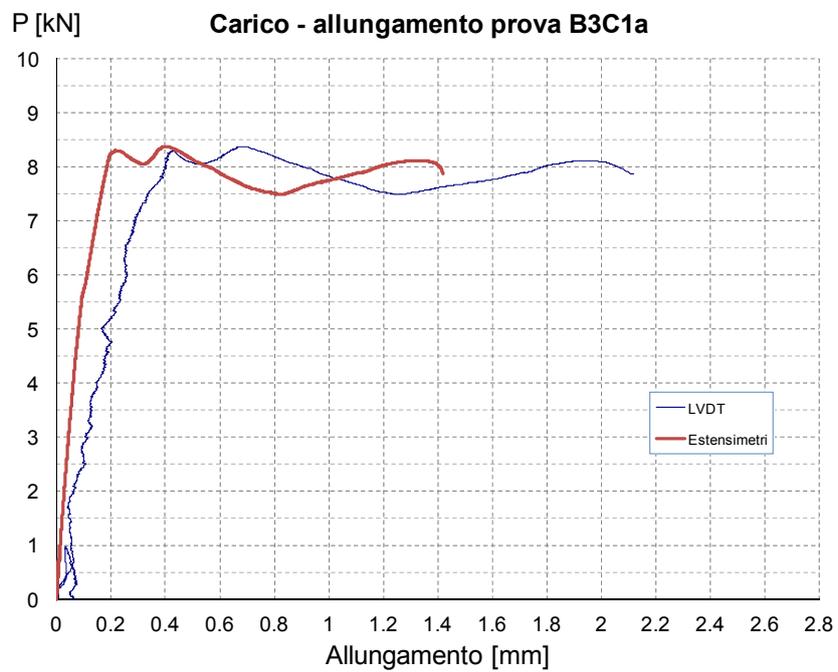


Figura 7.33 – Confronto tra le due diverse modalità di calcolo dell'allungamento (prova B3C1a).

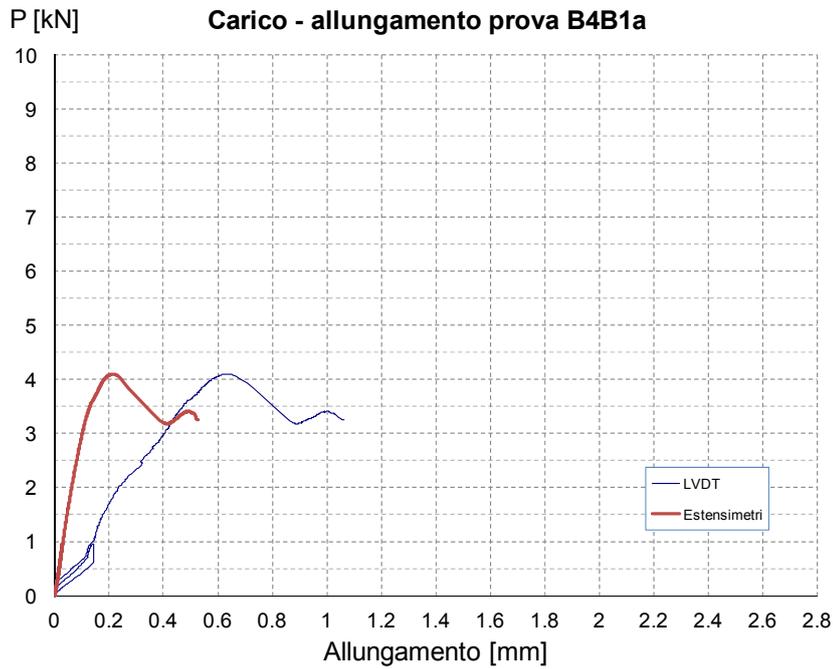


Figura 7.34 – Confronto tra i due diversi metodi (prova B4B1a).

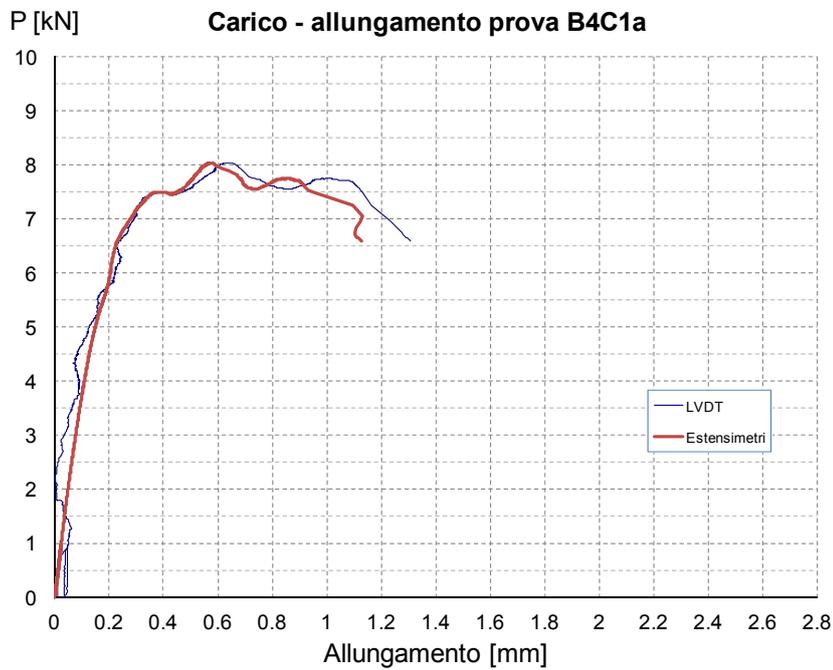


Figura 7.35 – Grafici forza-allungamento determinati secondo i due metodi a confronto per la prova B4C1a.

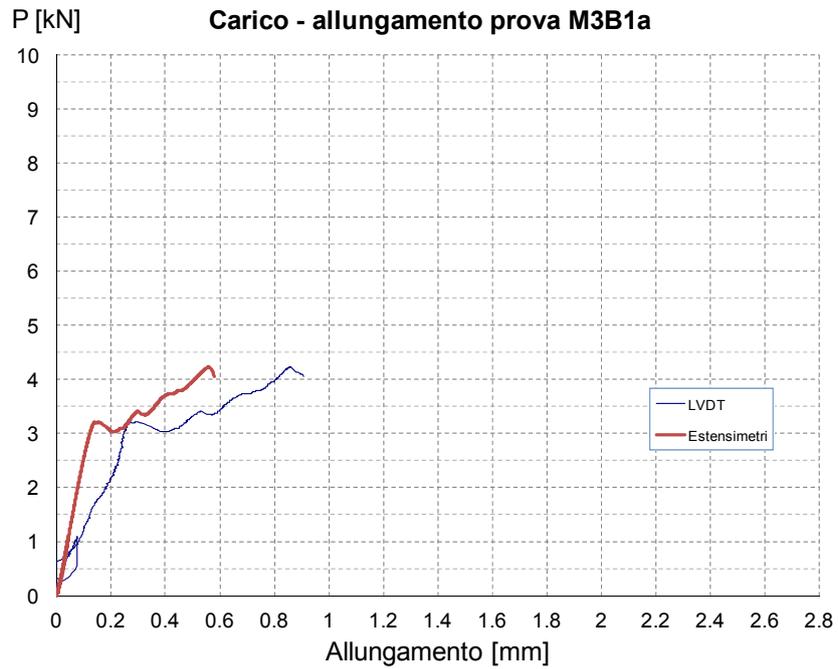


Figura 7.36 – Confronto tra le due diverse modalità di calcolo dell’allungamento (prova M3B1a).

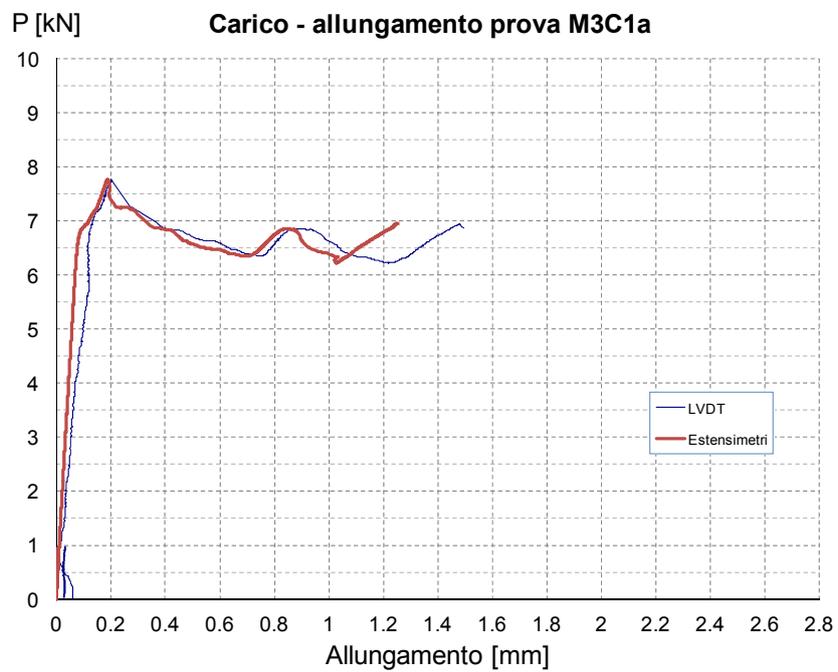


Figura 7.37 – Confronto tra i due diversi metodi in riferimento alla prova M3C1a.

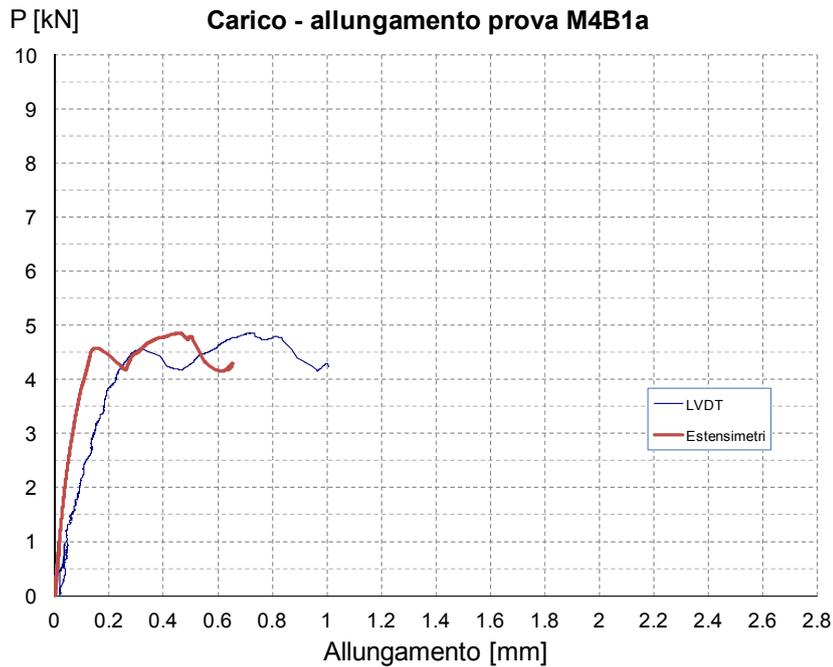


Figura 7.38– Grafici forza-allungamento determinati secondo i due metodi a confronto per la prova M4B1a.

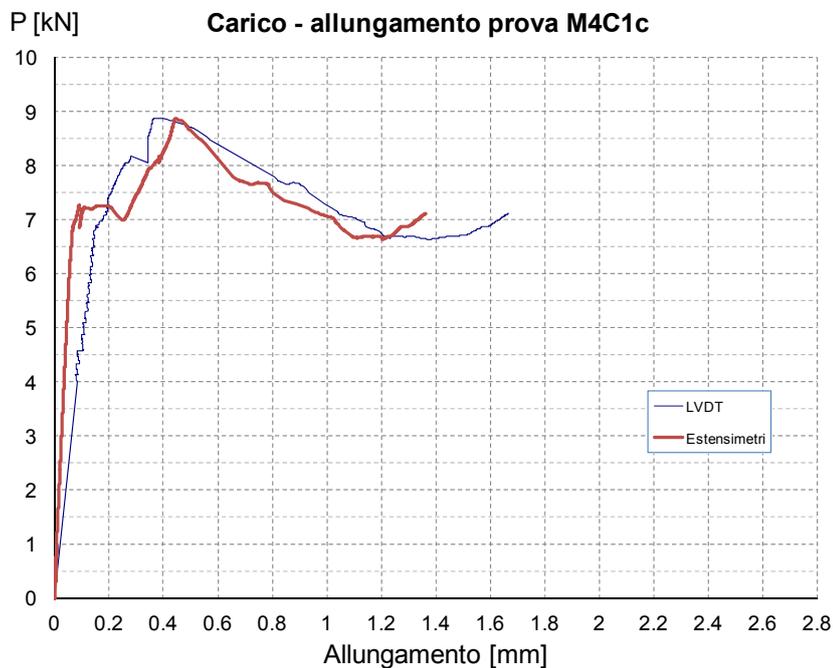


Figura 7.39 – Confronto dei grafici forza-allungamento ricavati secondo i due metodi per la prova M4C1c.

7.5 CONFRONTO GENERALE DEI DIAGRAMMI CARICO – ALLUNGAMENTO IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CAMPIONE E DELLA FINITURA SUPERFICIALE

Nel corso di questo paragrafo si presentano diversi confronti tra i diagrammi carico–allungamento al variare della tipologia di mattone e della finitura superficiale.

Nel caso di prove ripetute, al posto delle singole curve vengono rappresentate le curve medie che mostrano appunto l’andamento medio rilevato nel corso delle due prove svolte.

Il confronto viene proposto sia per i diagrammi carico-allungamento ottenuti utilizzando le letture dei trasduttori di spostamento, sia per gli stessi diagrammi determinati calcolando l’allungamento tramite integrazione delle deformazioni per ogni livello di carico.

I risultati corrispondenti vengono rappresentati su due pagine affiancate, in modo da garantire una migliore leggibilità ed un confronto più agevole.

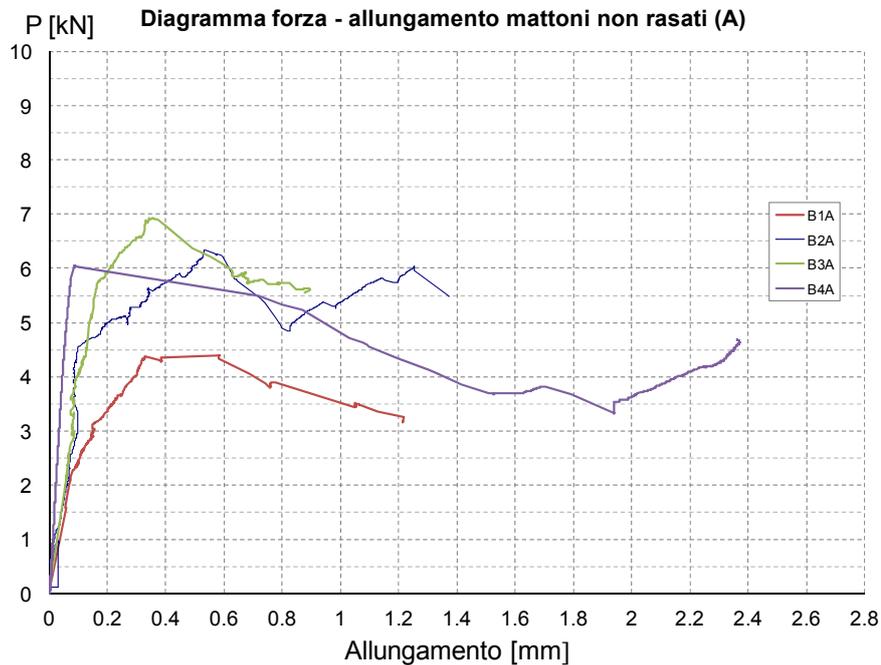


Figura 7.40 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento ottenuti grazie ai trasduttori di spostamento (mattoni non rasati).

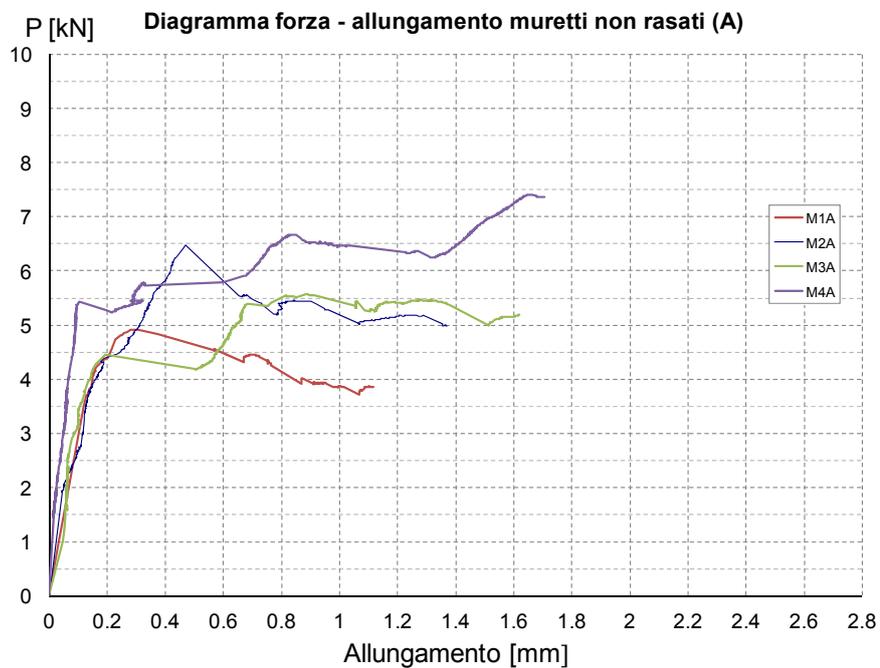


Figura 7.41 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento ricavati grazie all'impiego degli LVDT (muretti non rasati).

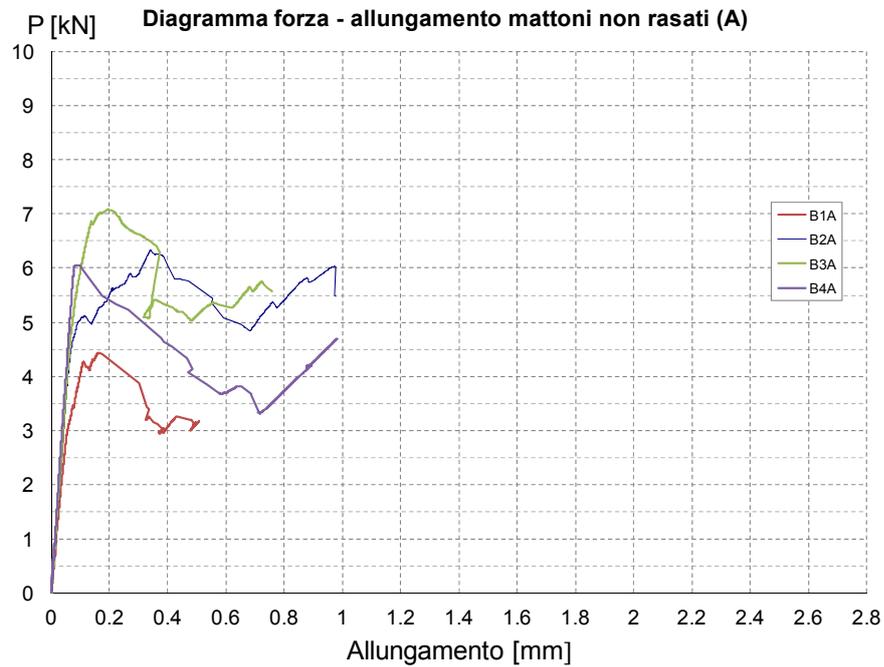


Figura 7.42 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento ottenuti calcolando l’allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (mattoni non rasati).

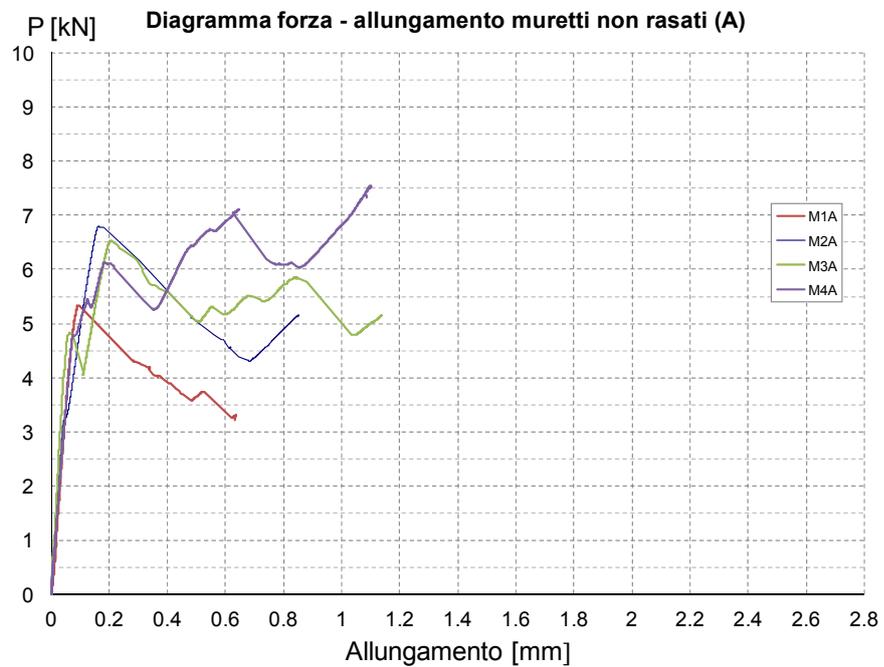


Figura 7.43 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento ottenuti calcolando l’allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (muretti non rasati).

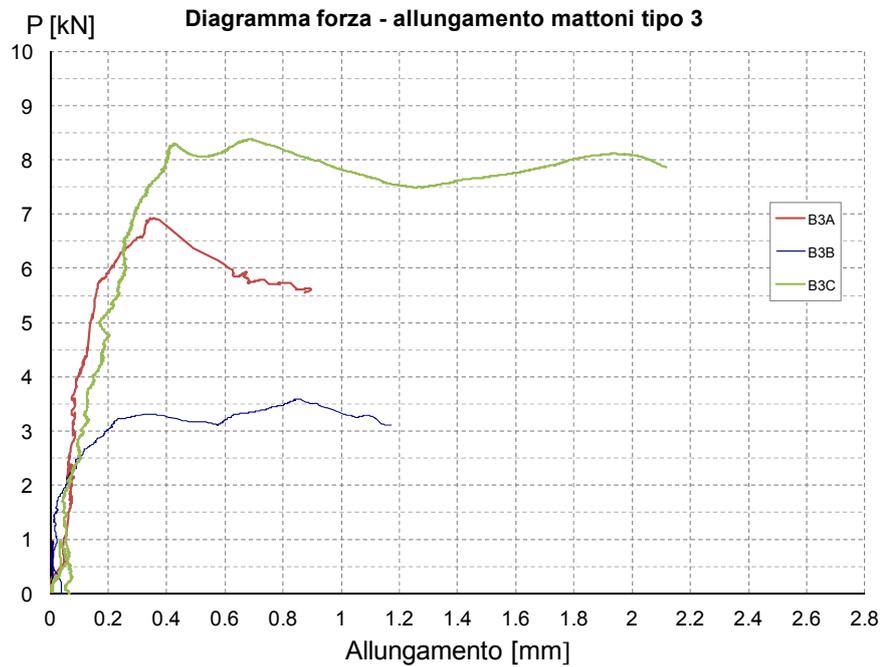


Figura 7.44 – Diagrammi carico-allungamento ottenuti per i mattoni tipo 3 grazie all’utilizzo dei trasduttori di spostamento.

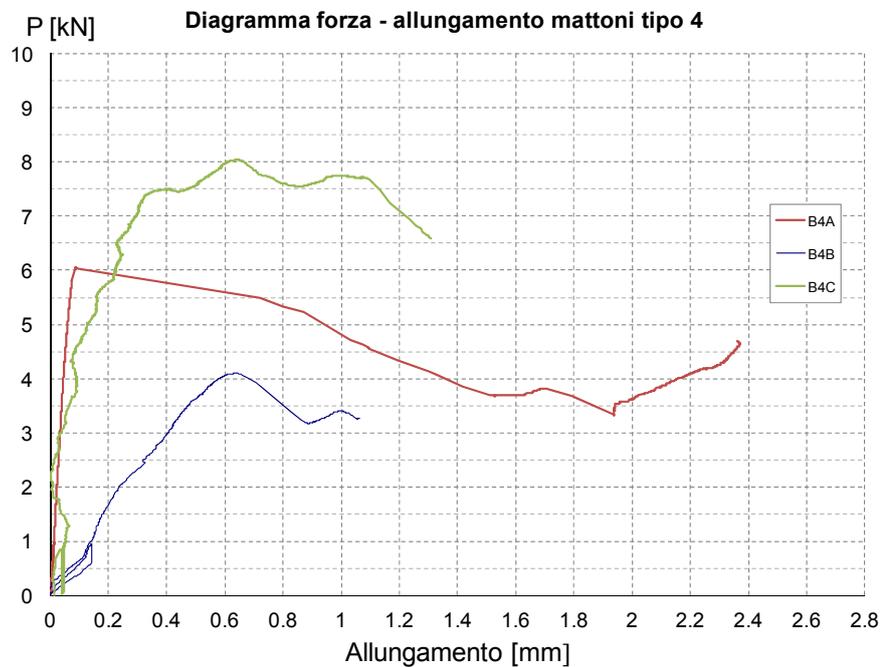


Figura 7.45 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento per i mattoni tipo 4 (ricavati grazie all’impiego degli LVDT).

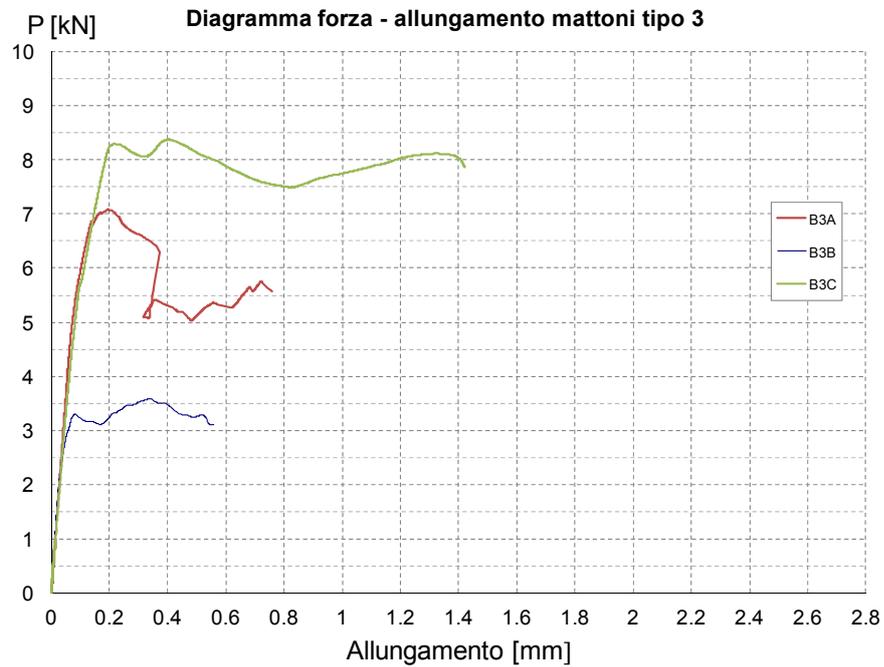


Figura 7.46 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento ottenuti calcolando l’allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (mattoni tipo 3).

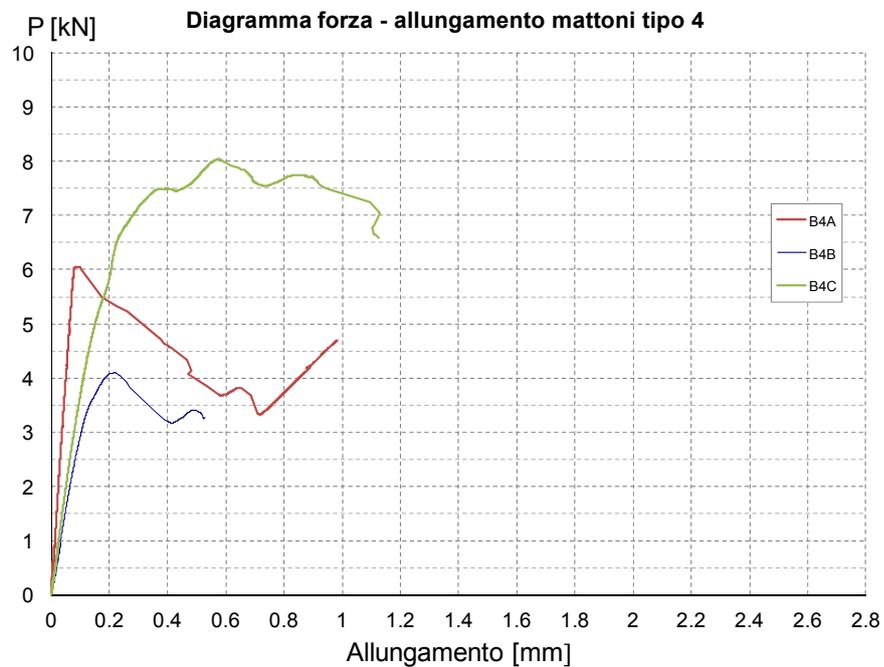


Figura 7.47– Confronto dei diagrammi carico-allungamento ottenuti calcolando l’allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (mattoni tipo 4).

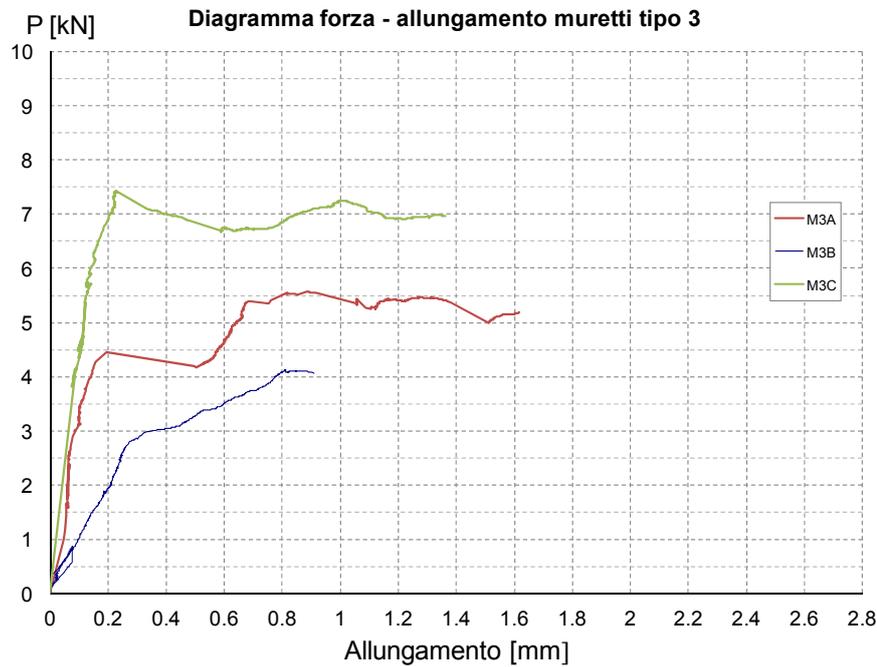


Figura 7.48 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento per i muretti tipo 3 (ricavati grazie all’impiego degli LVDT).

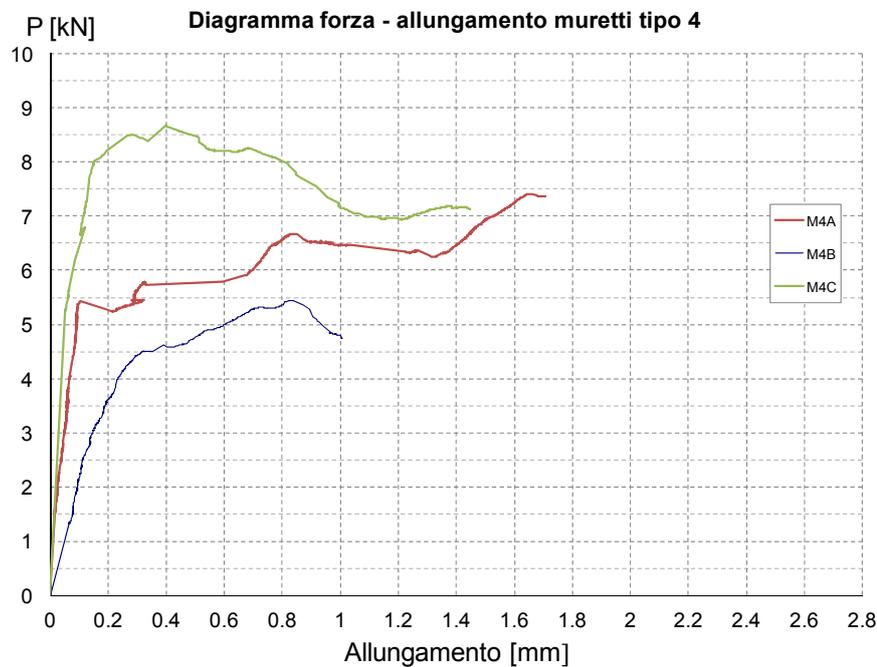


Figura 7.49 – Diagrammi carico-allungamento ottenuti per i mattoni tipo 4 grazie all’utilizzo dei trasduttori di spostamento.

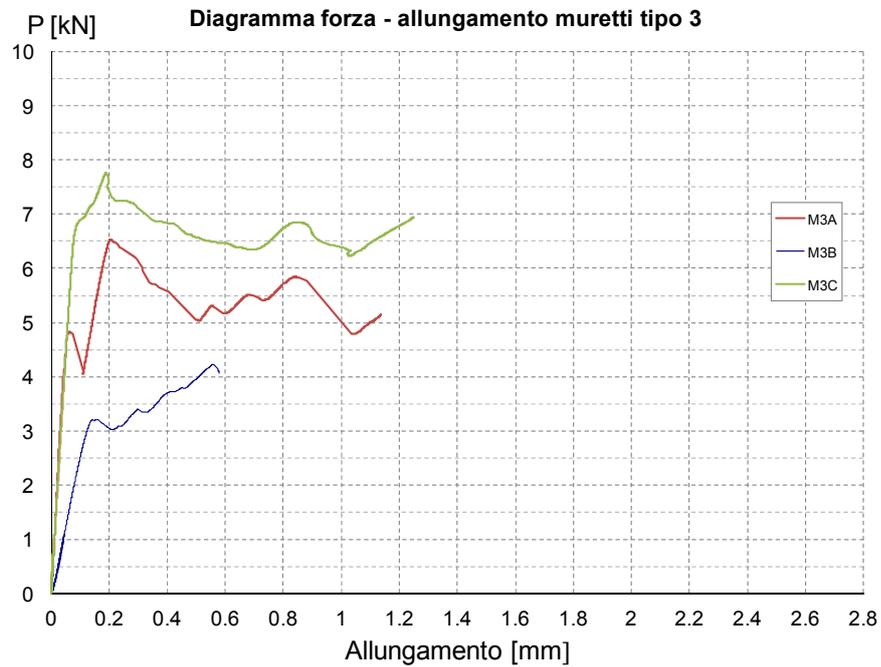


Figura 7.50 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento ottenuti calcolando l’allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (muretti tipo 3).

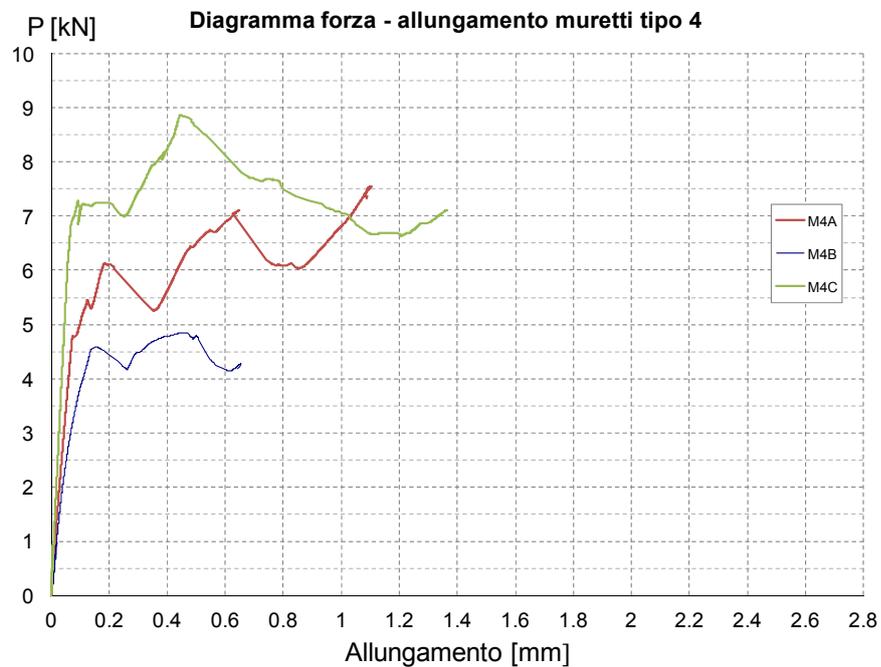


Figura 7.51 – Confronto dei diagrammi carico-allungamento ottenuti calcolando l’allungamento mediante integrazione delle deformazioni registrate per ogni livello di carico (muretti tipo 4).

7.6 CALIBRAZIONE DI OPPORTUNE LEGGI TENSIONE TANGENZIALE – SCORRIMENTO PER LE PROVE SVOLTE E CONFRONTI

Nel corso di questo paragrafo, verrà condotta, per ogni prova strumentata con estensimetri, la calibrazione di una legge adeguata a rappresentare il legame tensione tangenziale – scorrimento che si è sviluppato.

Per tutte le prove in cui sono stati applicati estensimetri, nel corso del capitolo precedente sono stati ricavati i diagrammi delle deformazioni, delle tensioni tangenziali e gli scorrimenti lungo l'asse del rinforzo.

Collocando in un unico diagramma gli scorrimenti (in ascissa) e le tensioni tangenziali (in ordinata) si ottiene una nuvola di punti come quella rappresentata nella figura seguente (relativa alla prova B1A2a):

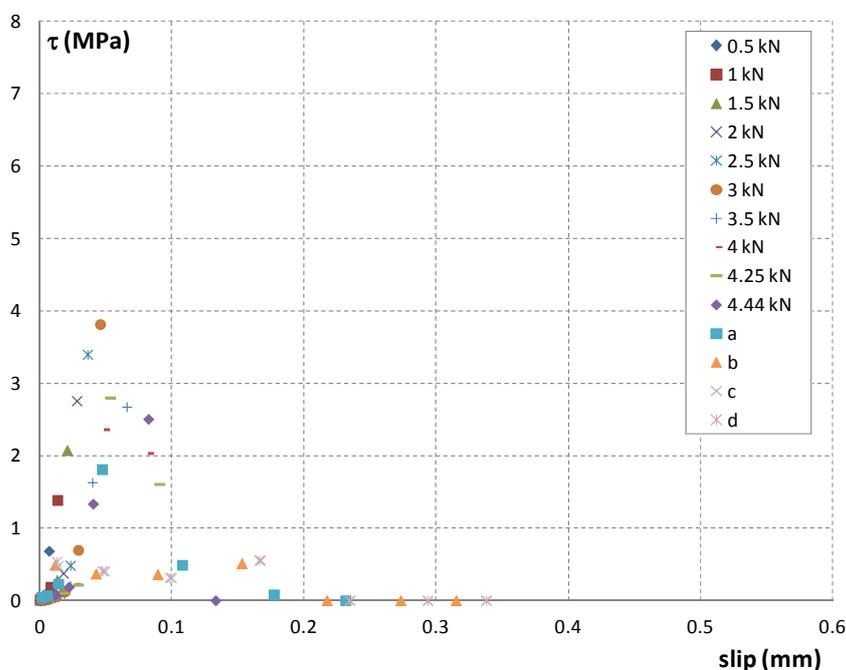


Figura 7.52 – Legame τ - s per la prova B1A2a.

La disposizione dei punti lascia intravedere un andamento tipico, con una rapida crescita fino al picco seguita da un ramo decrescente a pendenza molto meno accentuata, in cui si verifica un forte aumento degli scorrimenti registrati.

Partendo dai dati sperimentali è possibile calibrare una legge non lineare che risulti in grado di descrivere compiutamente il comportamento appena rilevato.

A tale scopo, è necessario utilizzare una relazione tra tensione tangenziale e scorrimento che presenti alcune caratteristiche peculiari:

- deve essere presente un tratto iniziale dal comportamento elastico per bassi valori dello scorrimento
- la curva deve presentare un ramo di crescita seguito da un valore massimo (picco)
- oltre il picco la relazione deve presentare un ramo di softening procedendo verso valori maggiori dello scorrimento registrato, così come è possibile intravedere dai punti riportati in *figura 7.52*.

La legge adottata per descrivere al meglio questo andamento è quella proposta da Popovics et al. (1973) per descrivere il legame costitutivo del calcestruzzo ed è riportata qui di seguito:

$$\tau(s_p) = \tau_{\max} \cdot \frac{s_p}{s} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s_p}{s}\right)^n} \quad (7.1)$$

in cui:

τ_{\max} rappresenta il valore massimo della tensione di interfaccia

\bar{s} indica il valore di scorrimento corrispondente alla tensione tangenziale τ_{\max}

n è un parametro che definisce il ramo di softening.

Le coppie di valori tensione tangenziale – scorrimento rilevate sperimentalmente servono per la calibrazione dei parametri τ_{\max} , \bar{s} e n appena definiti che sono presenti all'interno della (7.1).

Si tratta quindi di definire i parametri della curva in modo tale che questa approssimi al meglio l'andamento dei dati sperimentali.

Per effettuare la calibrazione viene utilizzato un procedimento di minimizzazione degli scarti fra i valori sperimentali riportati in *figura 7.52* e quelli definiti dalla relazione (7.1).

Durante tale processo viene utilizzato come vincolo il valore Γ_f dell'energia di frattura del legame d'interfaccia, che si può ricavare a partire dalla relazione seguente:

$$F_{\max} = b_f \cdot \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_f} \quad (7.2)$$

in cui:

E_f è il modulo elastico effettivo (calcolato sperimentalmente) del rinforzo nella direzione della forza applicata;

t_f e b_f sono rispettivamente lo spessore e la larghezza del rinforzo

ricordando che la massima intensità della forza trasmissibile ad un rinforzo di lunghezza infinita è in generale esprimibile come:

$$F_{\max} = b_f \int_0^{\infty} \tau_b(x) dx \quad (7.3)$$

dove τ_b è la tensione tangenziale di aderenza all'interfaccia tra rinforzo e substrato.

Nel caso delle prove svolte F_{\max} rappresenta il valore massimo della forza registrato dalla cella di carico.

La procedura di calibrazione è stata condotta operativamente grazie all'ausilio di un codice scritto in ambiente Matlab, che ottenendo in input i valori di t_f (pari per il rinforzo utilizzato a 0.172 mm), b_f (fissato a 50 mm) e F_{max} (variabile da prova a prova), oltre ovviamente alle coppie di valori tensione tangenziale – scorrimento, restituisce come output i tre parametri caratteristici della relazione (7.1) e il grafico della legge di interfaccia.

La procedura di calibrazione della legge tensione tangenziale – scorrimento è stata condotta per tutte le prove strumentate con estensimetri e i risultati vengono presentati nel corso delle pagine successive.

Al termine della presentazione dei risultati ottenuti, verranno riportati anche confronti tra le calibrazioni effettuate su mattoni e muretti della stessa tipologia.

La legge $\tau - s$ ricavata per la prova B4A2a merita un breve commento: come si può vedere dalla *figura 7.56*, infatti, sono stati utilizzati molti punti durante la procedura di calibrazione.

Ciò è dovuto al fatto che l'impiego delle coppie $\tau - s$ relative ai livelli di carico selezionati e impiegati durante la prova per l'elaborazione dei diagrammi di tensione tangenziale e scorrimento avrebbero condotto in questo caso a dei risultati piuttosto discutibili.

Come criterio, allora, si è scelto di utilizzare tutti i punti ricavabili da diverse coppie di estensimetri, relativi a tutti i livelli di carico.

Sono stati impiegati a tale scopo tutti i dati ricavabili da due coppie di estensimetri verso la parte iniziale del rinforzo (0-1 e 1-2) e da due coppie verso la sezione terminale (5-6 e 6-7).

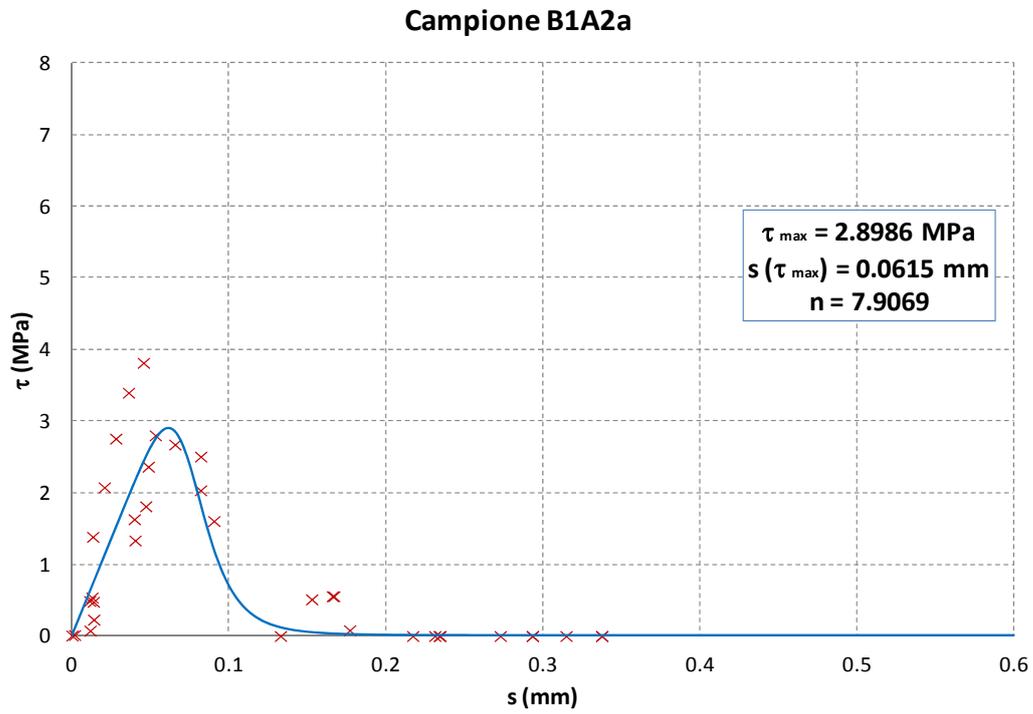


Figura 7.53 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova B1A2a.

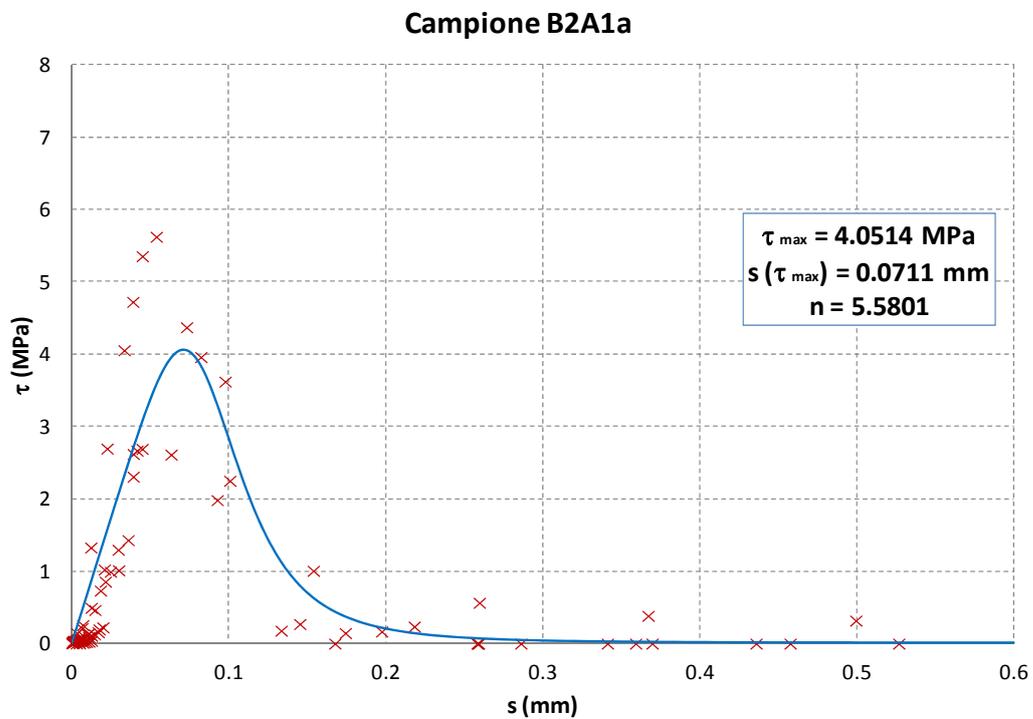


Figura 7.54 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova B2A1a.

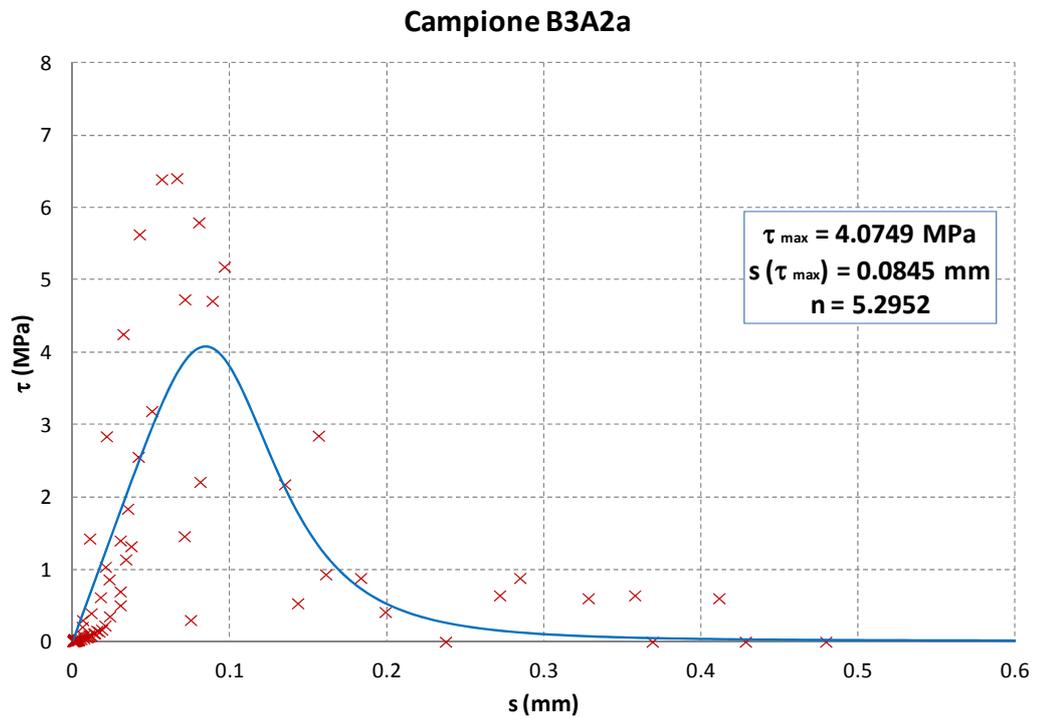


Figura 7.55 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova B3A2a.

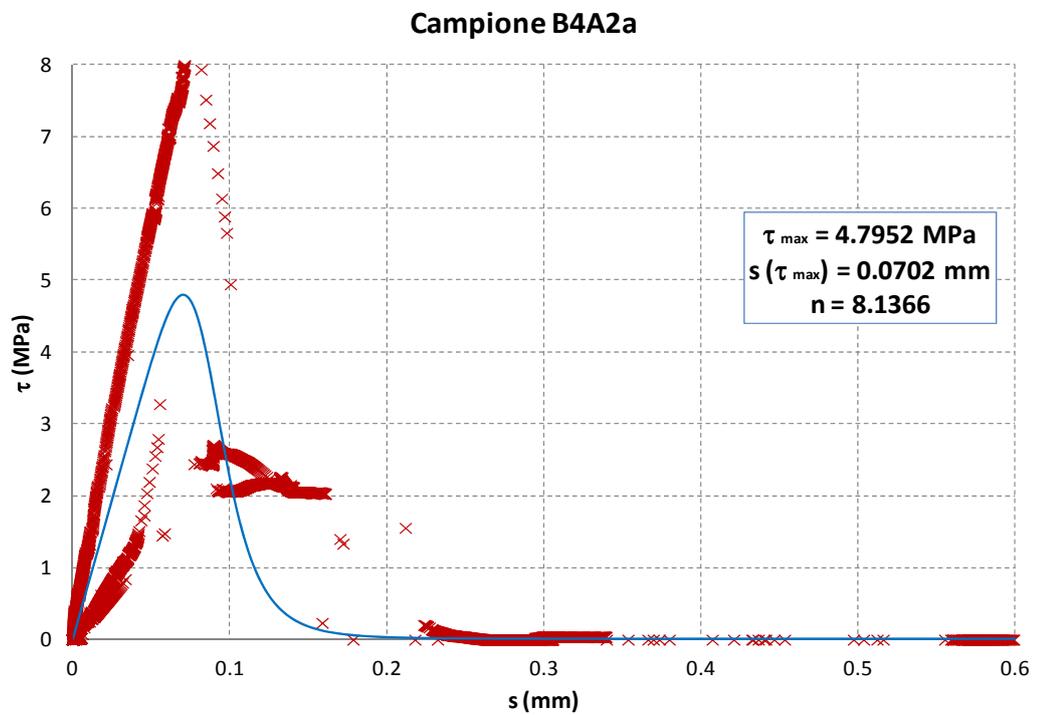


Figura 7.56 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova B4A2a.

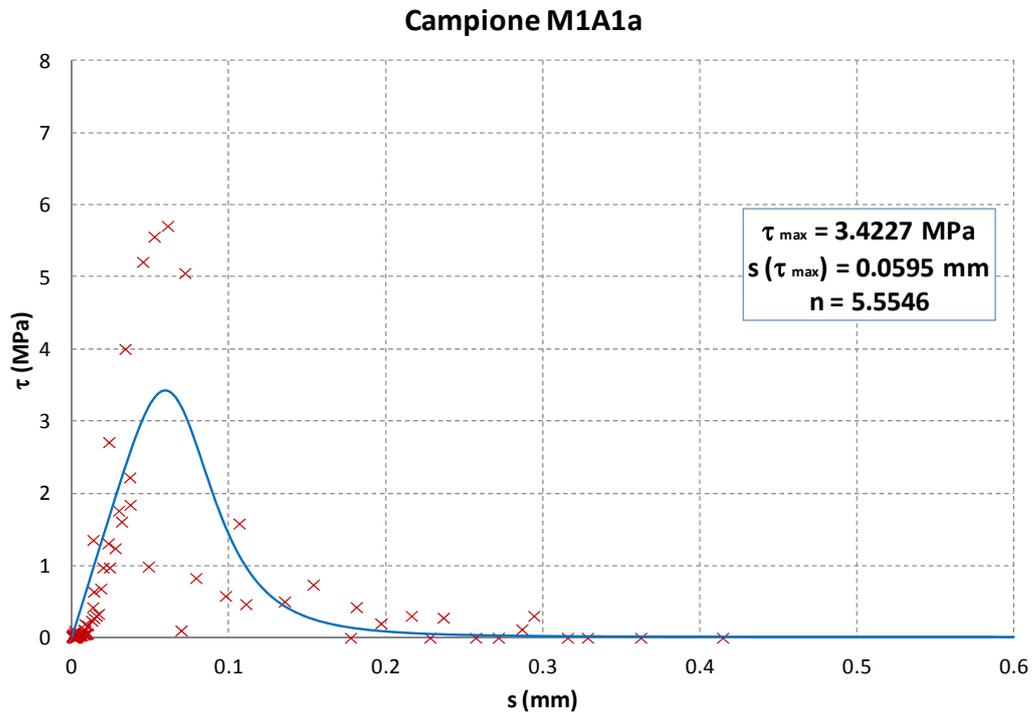


Figura 7.57 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova M1A1a.

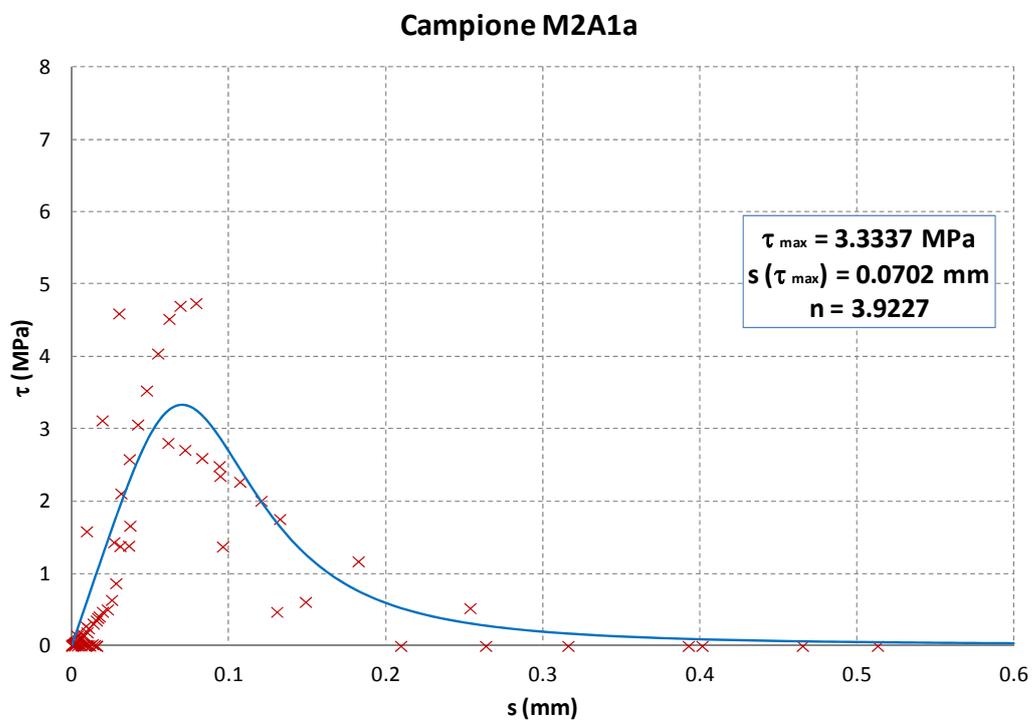


Figura 7.58 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova M2A1a.

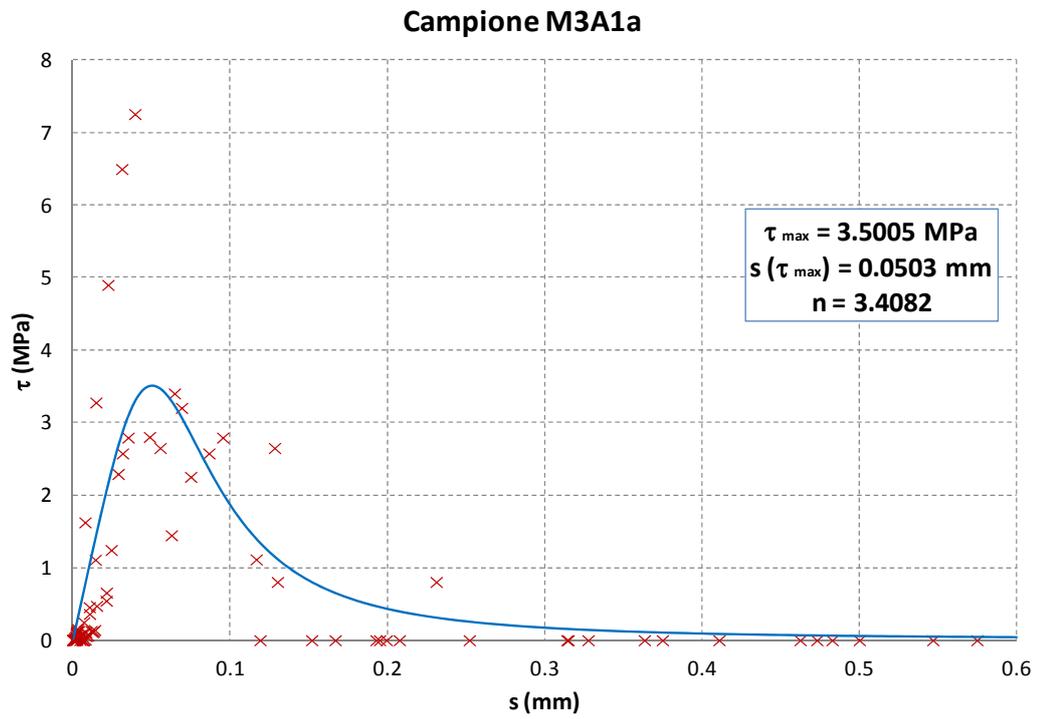


Figura 7.59 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova M3A1a.

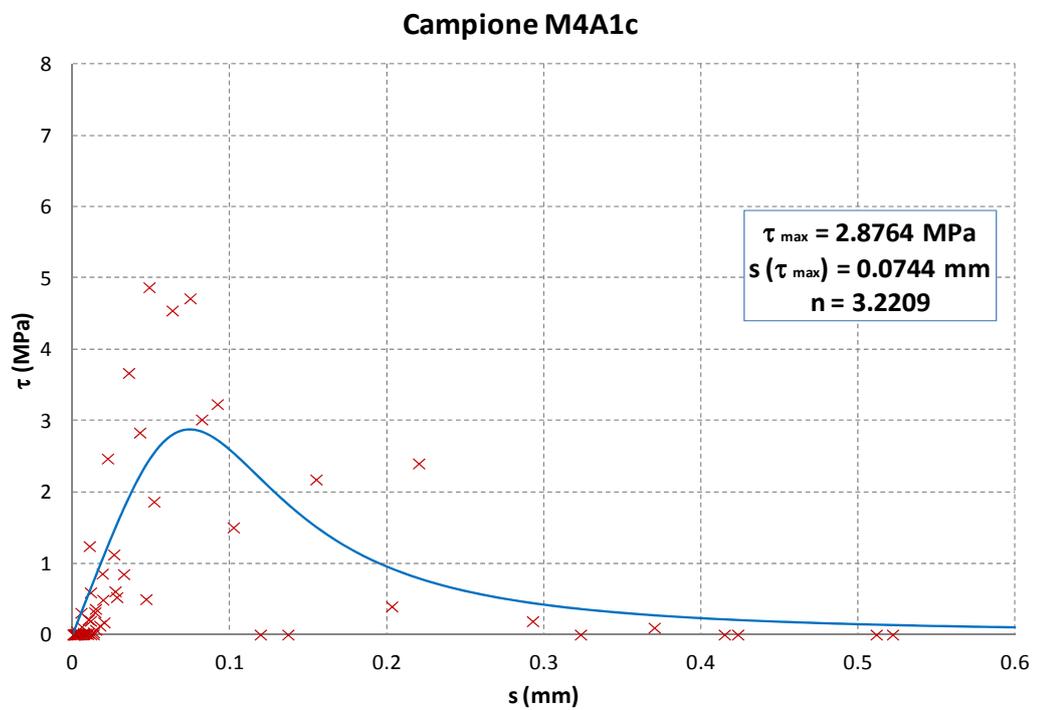


Figura 7.60 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova M4A1c.

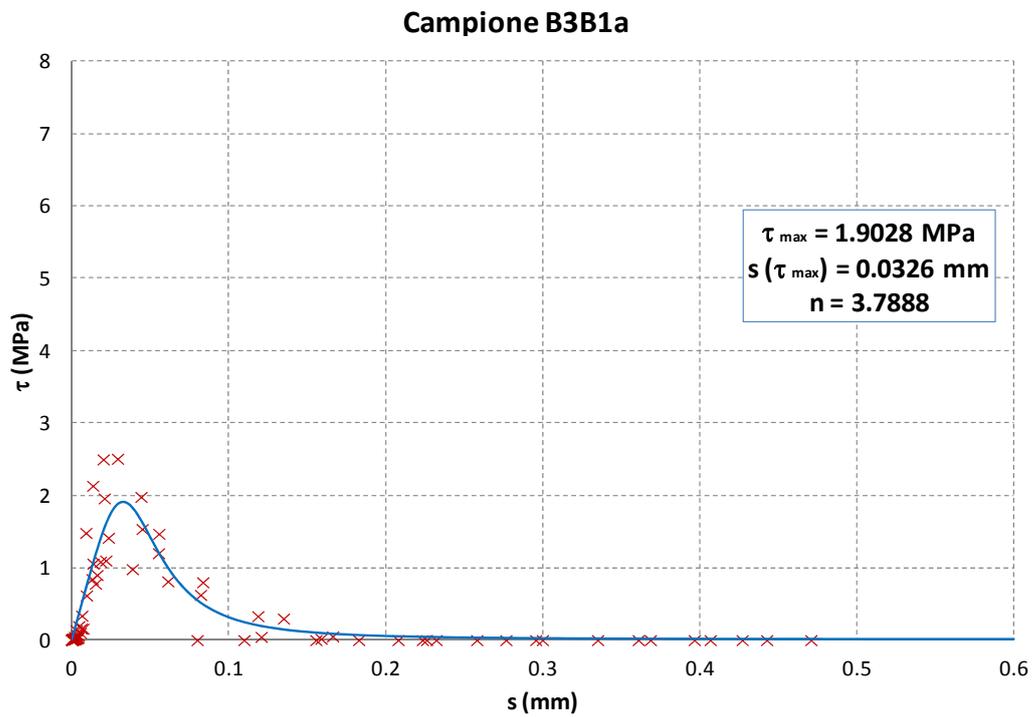


Figura 7.61 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova B3B1a.

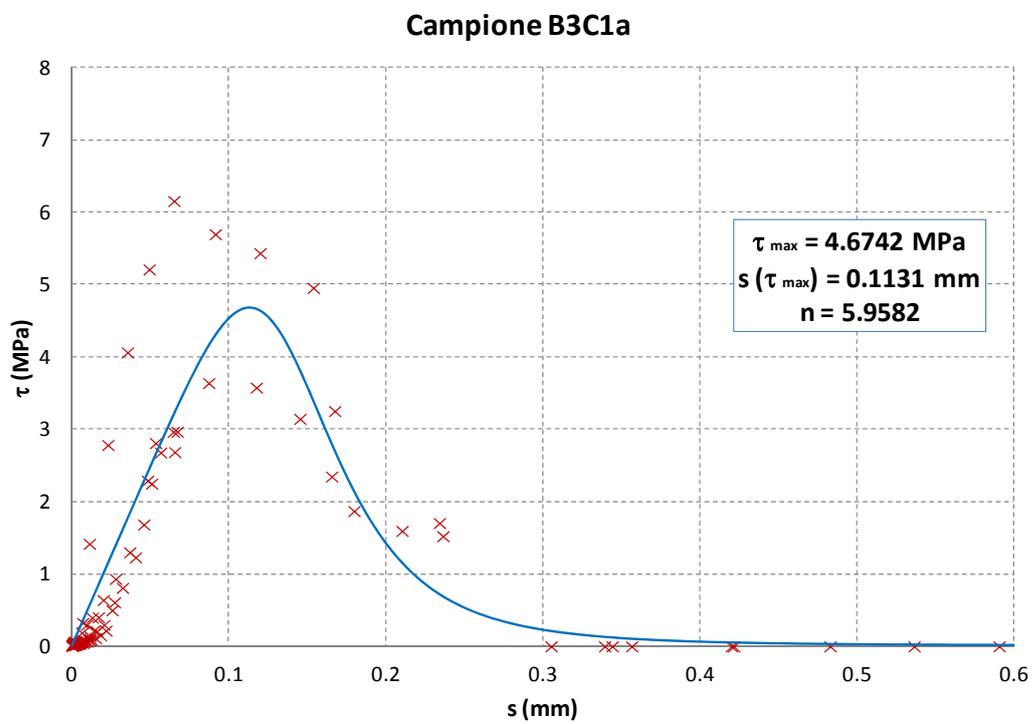


Figura 7.62 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova B3C1a.

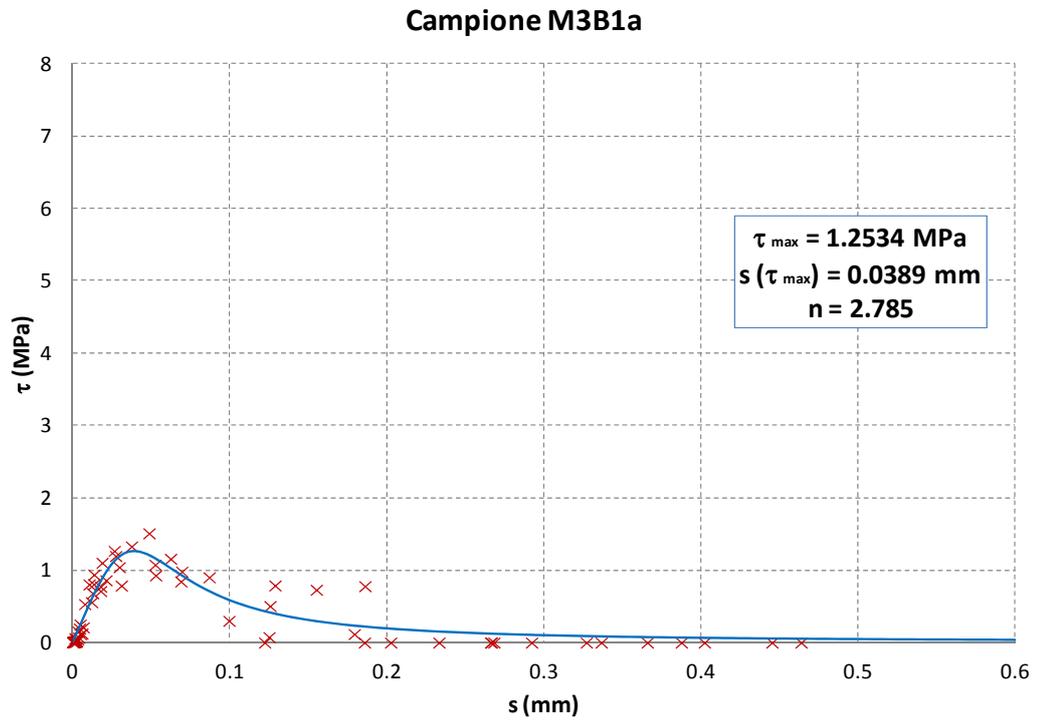


Figura 7.63 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova M3B1a.

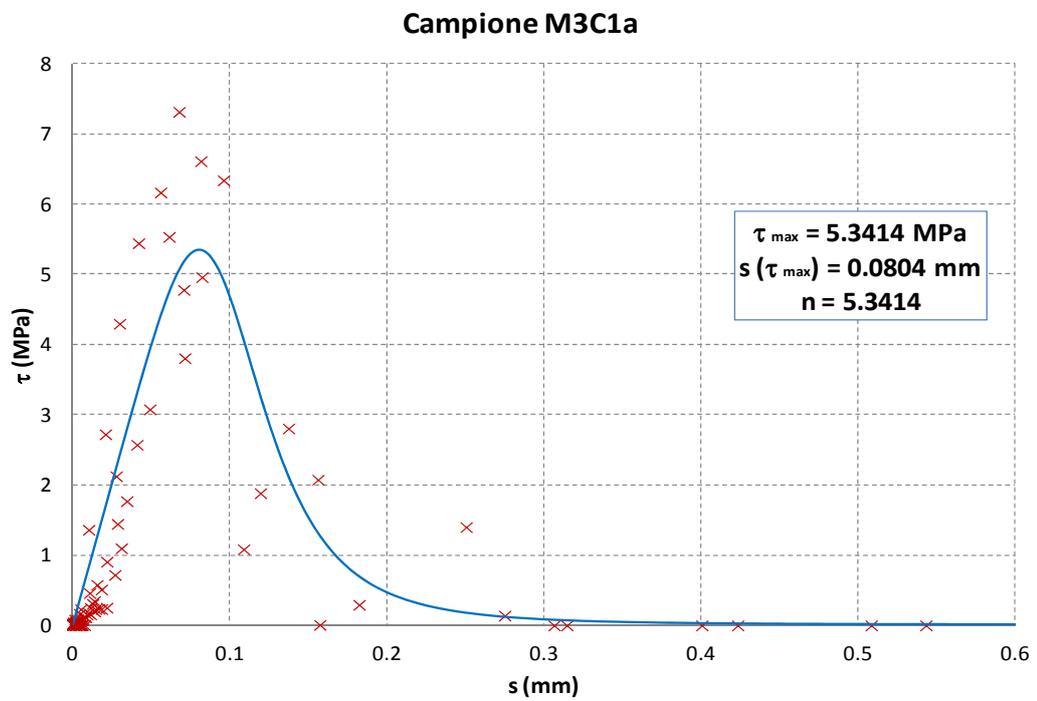


Figura 7.64 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova M3C1a.

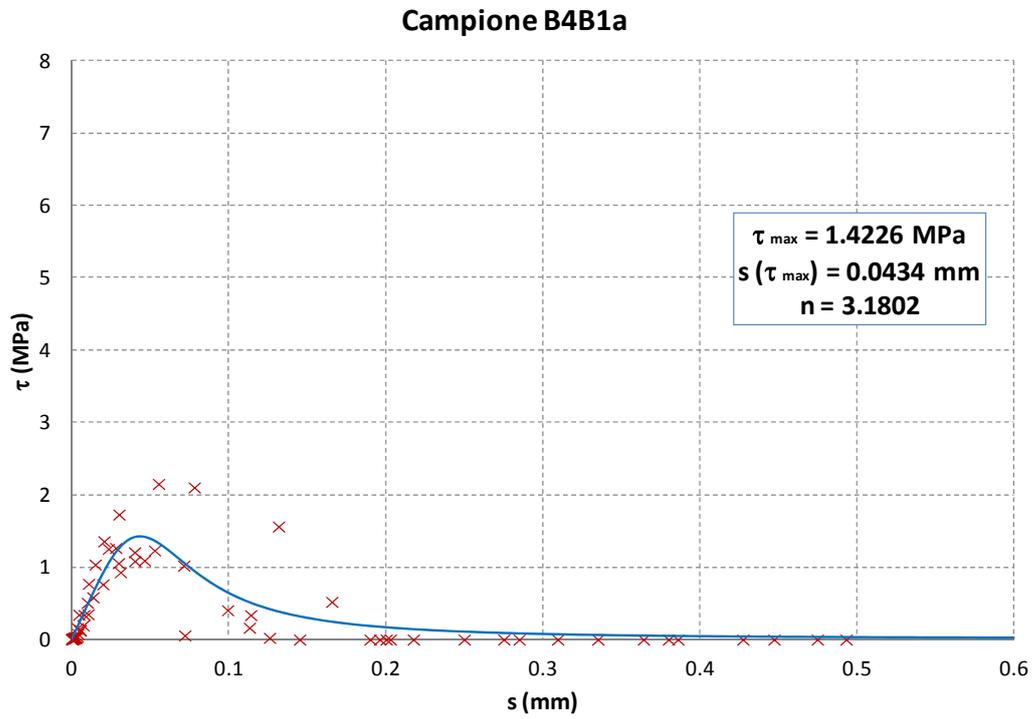


Figura 7.65 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova B4B1a.

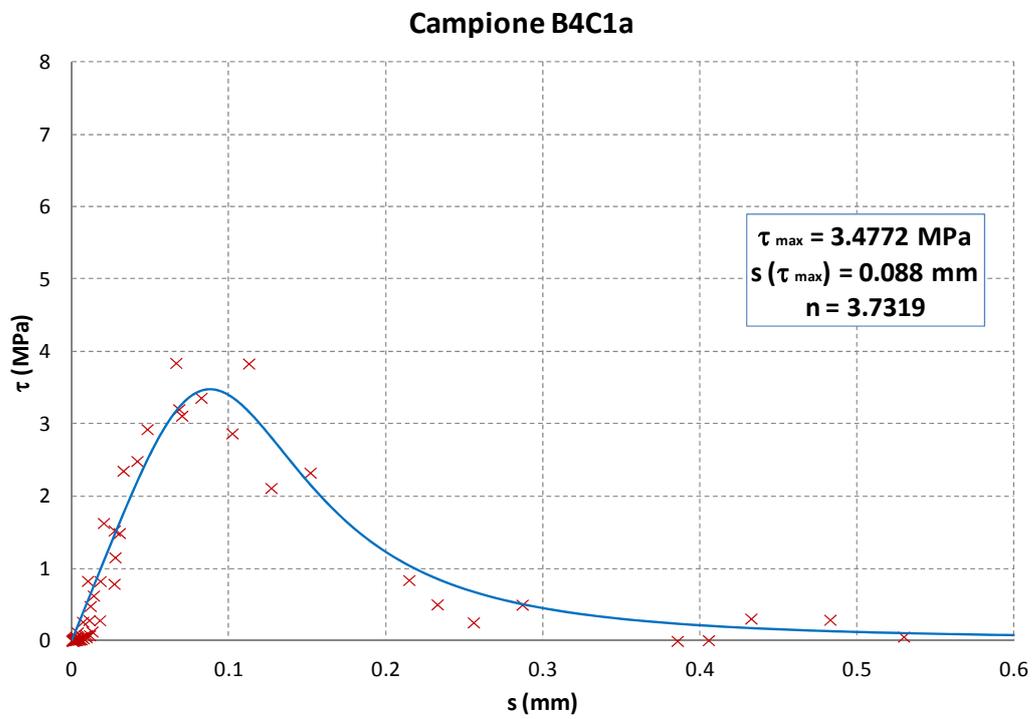


Figura 7.66 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova B4C1a.

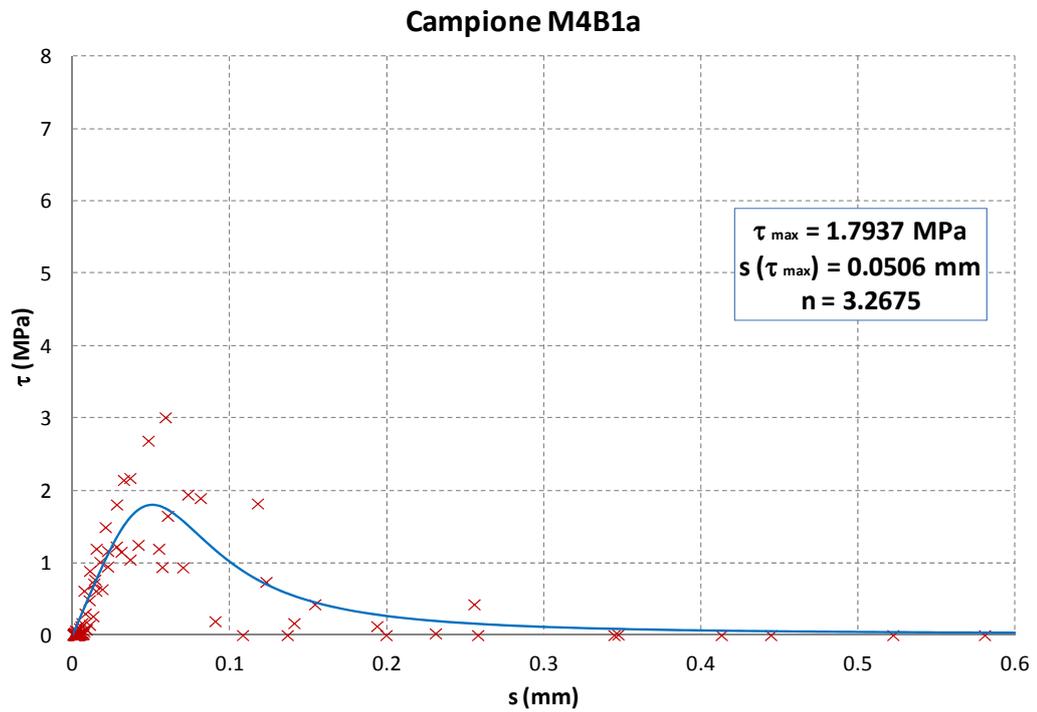


Figura 7.67 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova M4B1a.

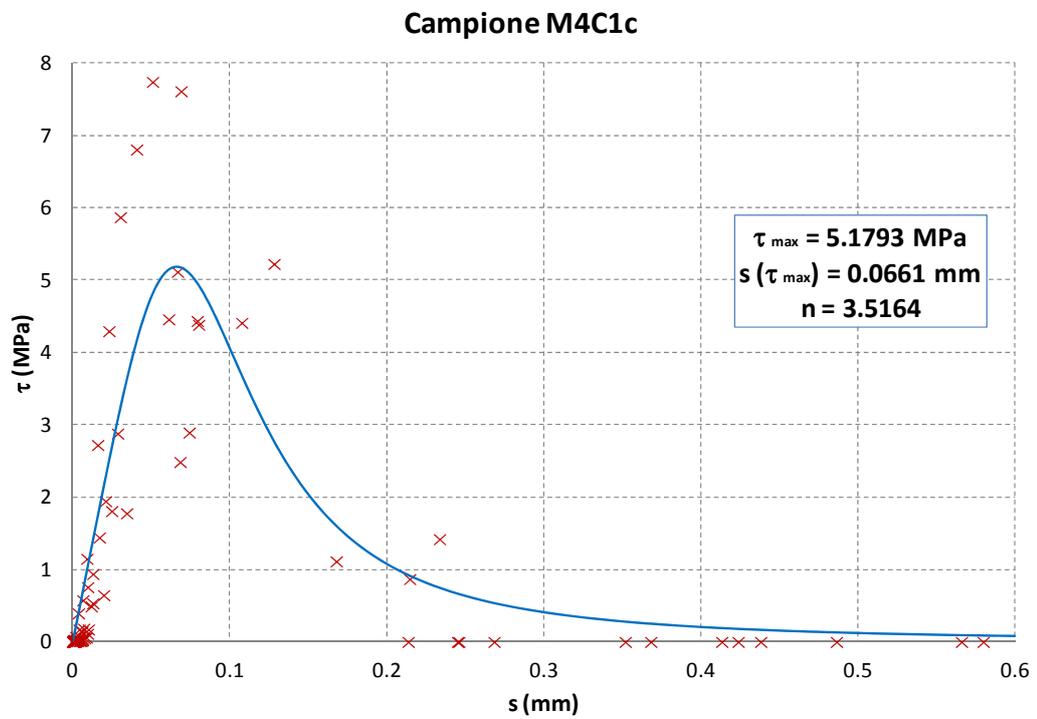


Figura 7.68 – Calibrazione di una legge $\tau - s$ per la prova M4C1c.

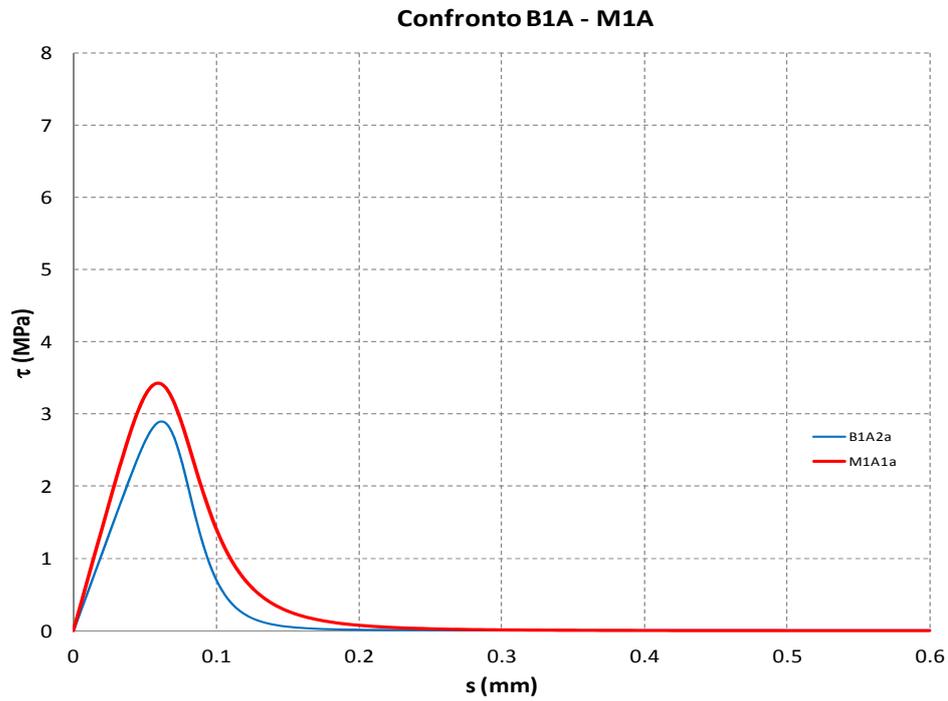


Figura 7.69 – Confronto delle calibrazioni eseguite per le prove B1A2a e M1A1a.

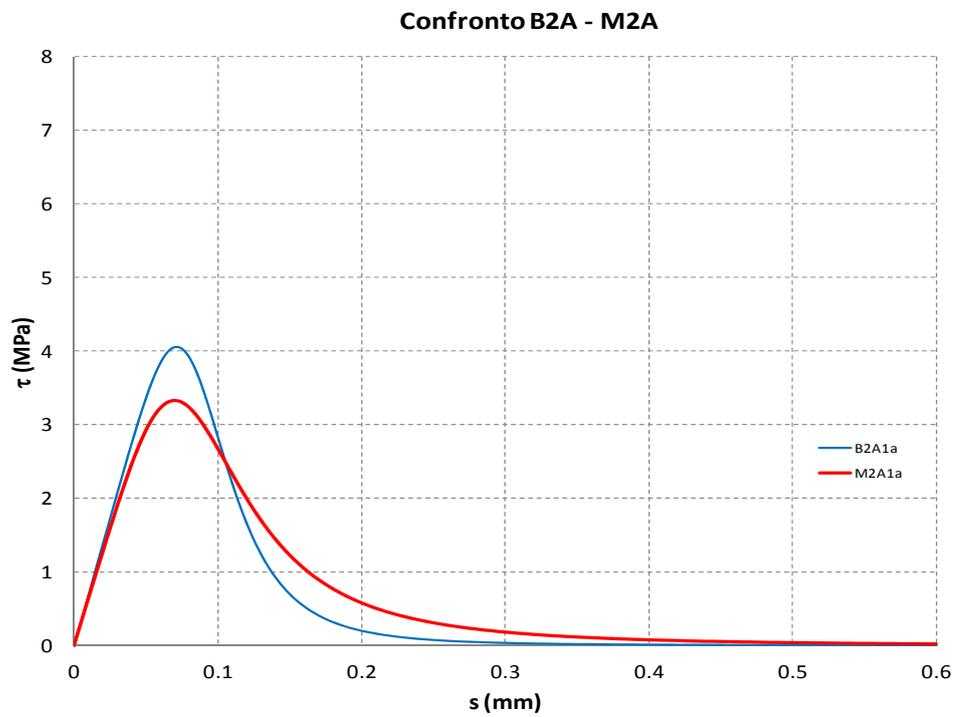


Figura 7.70 – Confronto delle calibrazioni condotte per le prove B2A1a e M2A1a.

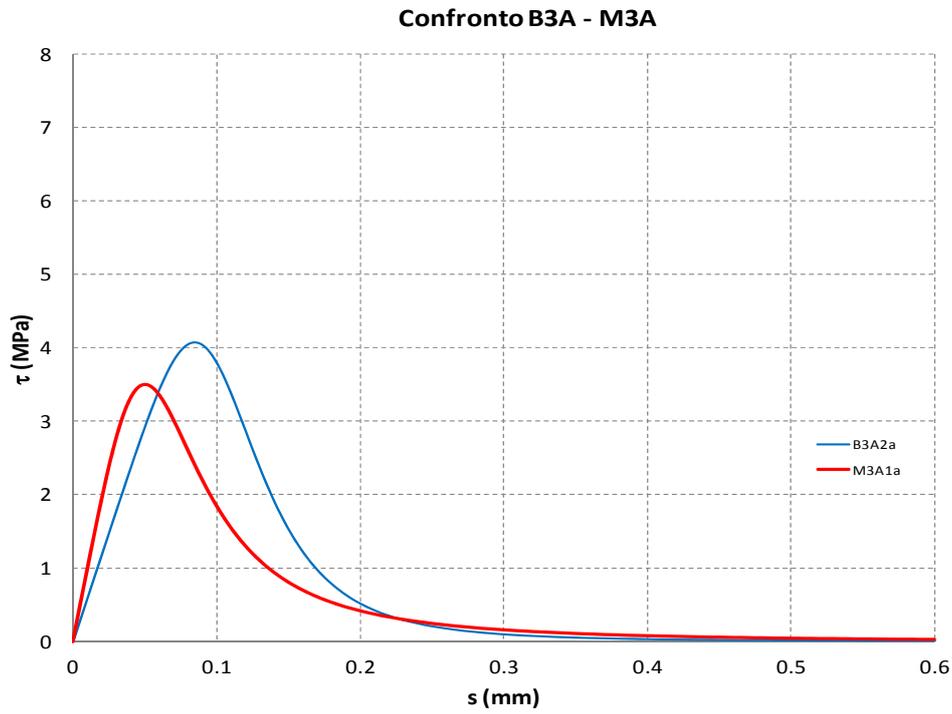


Figura 7.71 – Confronto delle calibrazioni condotte per le prove B3A2a e M3A1a.

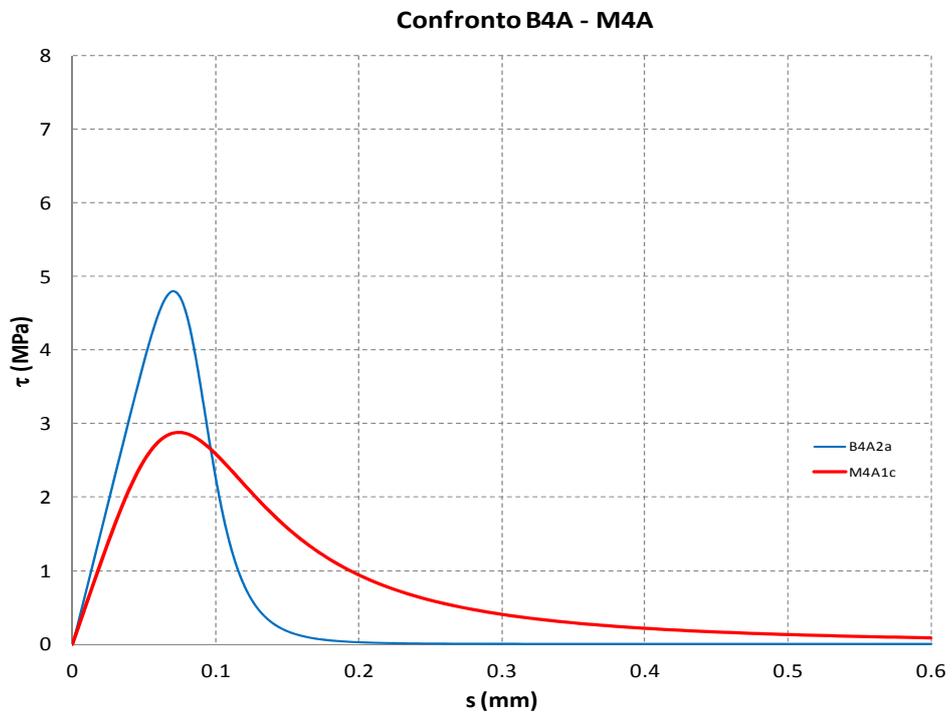


Figura 7.72 – Confronto delle calibrazioni condotte per le prove B4A2a e M4A1c.

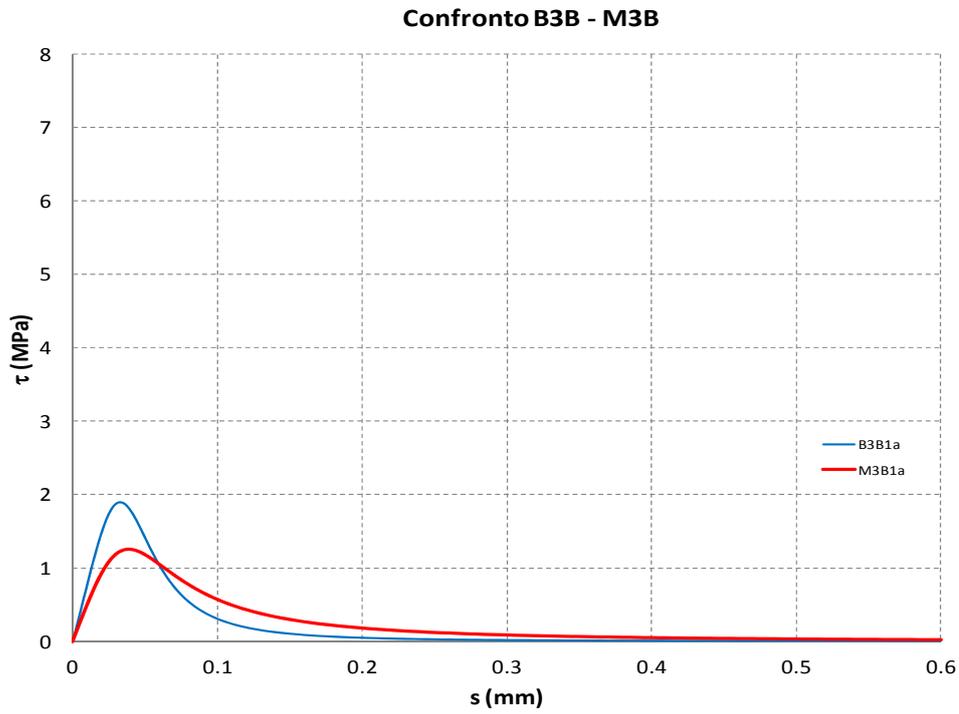


Figura 7.73 – Confronto delle calibrazioni condotte per le prove B3B1a e M3B1a.

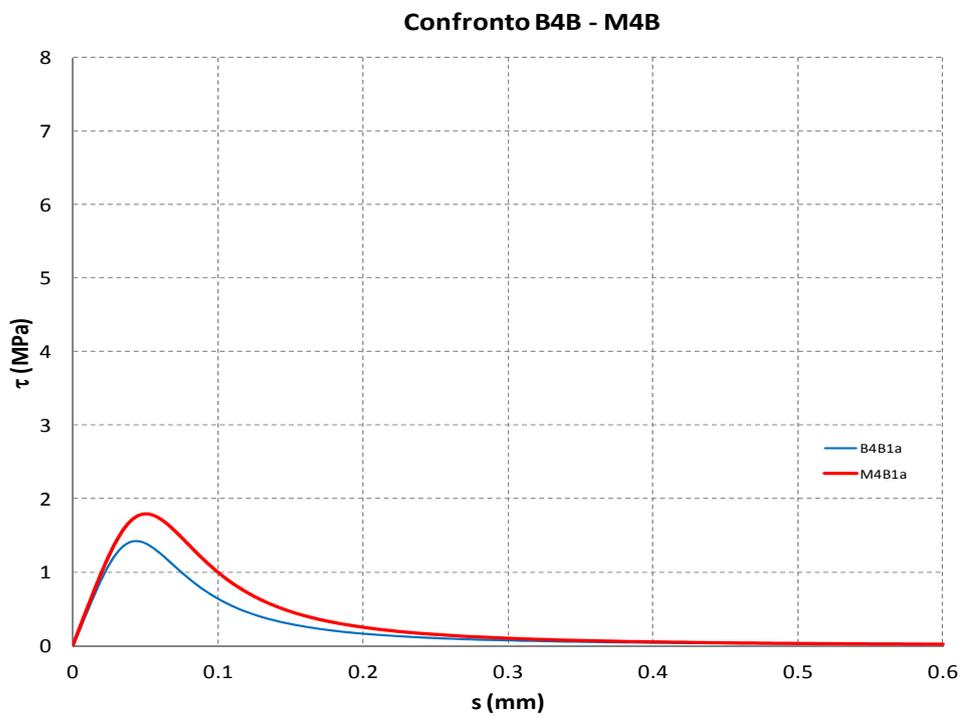


Figura 7.74 – Confronto delle calibrazioni eseguite per le prove B4B1a e M4B1a.

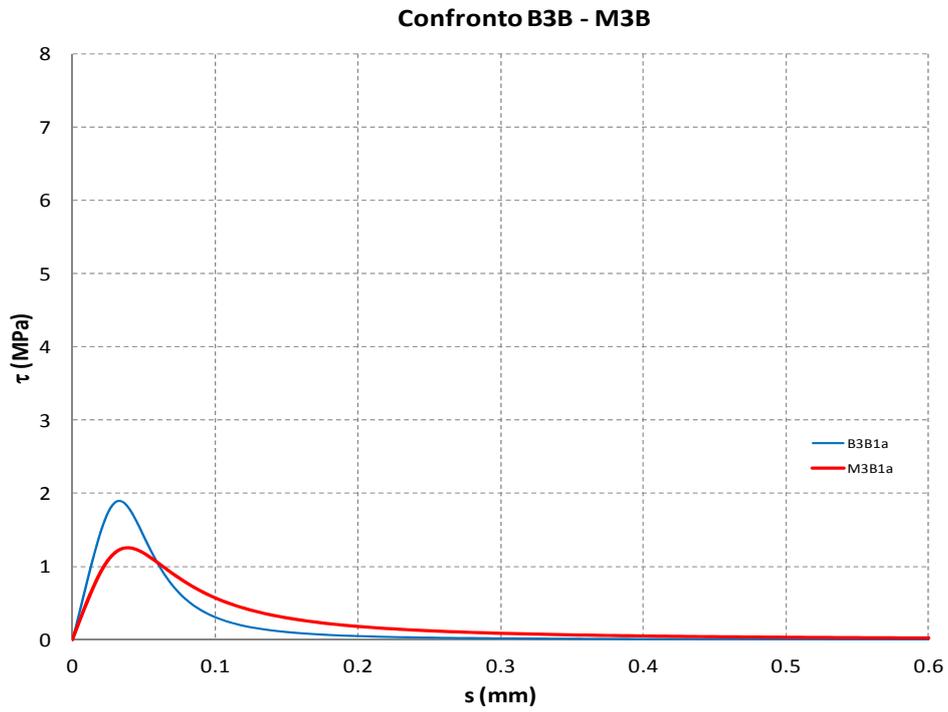


Figura 7.75 – Confronto delle calibrazioni eseguite per le prove B3B1a e M3B1a.

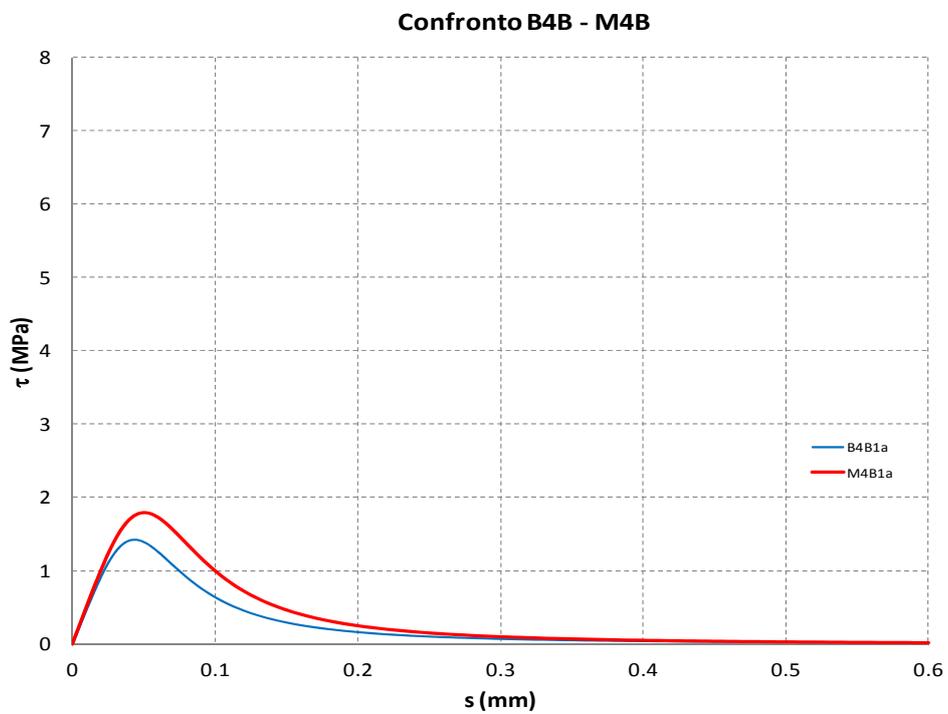


Figura 7.76 – Confronto delle calibrazioni condotte per le prove B4B1a e M4B1a.

CONCLUSIONI

In questo breve paragrafo si riportano le considerazioni finali che si possono trarre dall'esito delle prove svolte.

Innanzitutto, va rilevato come la diversa tipologia di mattone influenzi in modo determinante i risultati, con i mattoni dotati di migliori caratteristiche meccaniche che effettivamente riescono a far registrare picchi di carico superiori.

Nel passaggio dai mattoni ai muretti, inoltre, vista la presenza dei letti di malta, ci si poteva attendere un peggioramento dei risultati rispetto ai test condotti su mattoni singoli.

Ciò effettivamente è avvenuto in alcuni casi (come ad esempio per i mattoni di tipo 3), ma in generale la tendenza è quella di un miglioramento del carico massimo registrato.

La motivazione di questo comportamento è già stata analizzata nel corso del capitolo 6, parlando dei risultati ottenuti nelle prove: la formazione di rilievi in corrispondenza dei letti di malta, infatti, porta all'instaurarsi di un meccanismo di ingranamento su scala macroscopica, che tende a impedire lo scorrimento del composito.

L'applicazione di una preventiva rasatura superficiale, eseguita sia sui mattoni che sui muretti, ha portato ad esiti contrastanti: se infatti si fa riferimento alla rasatura di tipo B, a parte l'effetto di regolarizzazione della superficie, si è ottenuto un netto peggioramento dei carichi massimi registrati, mentre nel caso della rasatura di tipo C l'effetto è stato ampiamente positivo.

A tal proposito, si ricorda che il trattamento superficiale di tipo C ha però originato modalità di distacco anomale, con crisi miste all'interfaccia.

Tra le motivazioni di questo comportamento si può pensare ad un problema nell'applicazione del rinforzo, ad una porosità troppo ridotta della superficie che

non ha permesso alla resina di sviluppare un sufficiente ancoraggio, oppure ad incompatibilità tra rasatura e collante epossidico utilizzato.

Questa tematica merita ulteriori approfondimenti.

Dal punto di vista dei risultati ottenuti, tuttavia, va rilevato che, anche se la modalità di distacco del rinforzo non rientra tra quelle consigliabili, il carico massimo registrato ha comunque subito un apprezzabile miglioramento rispetto al caso dei campioni non rasati.

La stessa cosa non è avvenuta purtroppo con la rasatura di tipo B.

Si conclude con una breve considerazione: visto l'impiego sempre più frequente dei compositi nell'ottica del rinforzo strutturale, lo studio del meccanismo dell'aderenza dovrebbe assumere un ruolo sempre più importante e andrebbero condotte estese campagne sperimentali al riguardo.

Quando si procede all'impiego degli FRP, infatti, andrebbe sempre tenuto ben presente che non è facile riuscire a sfruttare al massimo le caratteristiche del composito, in quanto il fenomeno del debonding risulta nettamente più frequente rispetto alla rottura del composito.

Queste considerazioni sono confermate anche dall'esito delle prove svolte, che hanno visto la rottura del rinforzo in un solo caso e giustificano l'importanza di studi approfonditi sulla tematica dell'aderenza tra FRP e substrato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aiello M. A., Sciolti M. S. (2006). “Bond analysis of masonry structures strengthened with CFRP sheets.” *Construction and Building Materials*, 20, 90-100.
- [2] Basilio I. (2007). “Strengthening of arched masonry structures with composites materials.” Ph. D. thesis, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- [3] Camli U. S., Binici B. (2007). “Strenght of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry.” *Construction and Building Materials*, 21 (2007), 1431-1446.
- [4] Capozucca R. (2009). “Experimental FRP/SRP - historic masonry delamination.” *Composite Structures*, 92 (2010), 891-903.
- [5] Casareto M., Oliveri A., Romelli A. (2002). “Strengthening of Masonry: Opportunities and Challenges in the Use of Composites.” M. S. thesis, University of Genoa and University of Missouri-Rolla, Genoa and Rolla, Mo.
- [6] CNR DT 200/2004. “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.”
- [7] Cosenza E., Manfredi G., Occhiuzzi A., Pecce M. R. (2000). “Toward the investigation of the interface behavior between tuff masonry and FRP fabrics.” *Mechanics of masonry structures strengthened with FRP materials*, Libreria Cortina, Padova, Italy.
- [8] De Lorenzis L., Zavarise G. (2008). “Modeling of mixed-mode debonding in the peel test applied to superficial reinforcements.” *International Journal of Solids and Structures*, 45, 5419-5436.
- [9] De Lorenzis L., Zavarise G. (2009). “Interfacial stress analysis and prediction of debonding for a thin plate bonded to a curved substrate.” *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 44 (4), 358-370.

- [10] Fedele R., Milani G. (2010). "A numerical insight into the response of masonry reinforced by FRP strips. The case of perfect adhesion." *Composite Structures*, 92, 2345-2357.
- [11] Grande E., Imbimbo M., Sacco E. (2008). "FRP-strengthening of masonry structures: Effect of debonding phenomenon." *Proc., VI Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Construction*, Taylor and Francis, London, 1017-1023.
- [12] Grande E., Imbimbo M., Sacco E. (2010). "Bond behaviour of CFRP laminates glued on clay bricks: Experimental and numerical study." *Composites: Part B*, 42 (2011), 330-340.
- [13] Mazzotti C., Savoia M., Ferracuti B. (2009). "A new single-shear setup for stable debonding of FRP-concrete joints." *Construction and Building Materials*, 23, 1529-1537.
- [14] Monaldini O. (2009). "Indagine sperimentale sull'aderenza calcestruzzo – FRP: capacità resistenti e meccanismi di sviluppo." Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Università di Bologna.
- [15] Oliveira D. V., Basilio I., Lourenço P. B. (2011). "Experimental Bond Behavior of FRP Sheets Glued on Brick Masonry." *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No. 1, 32-41.
- [16] Scipioni D. (2010). "Problema della perdita di aderenza tra muratura ed F.R.P." Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Università di Bologna.
- [17] Shrive N. G. (2006). "The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of masonry." *Construction and Building Materials*, 20, 269-277.
- [18] UNI EN 772-1 (2002). "Metodi di prova per elementi di muratura. Determinazione della resistenza a compressione."
- [19] UNI EN 772-16 (2002). "Metodi di prova per elementi di muratura. Determinazione delle dimensioni."

Siti Internet:

[W1] HBM (www.hbm.com/it)

[W2] IBL S.p.A. (www.iblspa.it)

[W3] Mapei S.p.A. (www.mapei.it)

[W4] RDB S.p.A. (www.rdb.it)

[W5] Sika Italia S.p.A. (<http://ita.sika.com>)

[W6] Tassullo Materiali S.p.A. (www.tassullo.it)