

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile

D.I.S.T.A.R.T. Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio

Tesi di Laurea in
Progetti di Strutture LS

**STUDIO SPERIMENTALE SULLA DURABILITA'
DI INCOLLAGGI FRP-CALCESTRUZZO**

Tesi di Laurea di:
Filippo Cortesi

Relatore:
Chiar.mo Prof. Marco Savoia

Correlatore:
Prof. Claudio Mazzotti

Anno Accademico 2006 - 2007

Indice

INDICE	pag. 1
INTRODUZIONE	pag. 5
1. I MATERIALI COMPOSITI E IL LORO IMPIEGO NEL RINFORZO STRUTTURALE	
1.1. Gli FRP	pag. 7
1.2. Le Fibre	pag. 8
1.2.1. Fibre di vetro	pag. 8
1.2.2. Fibre di carbonio	pag. 9
1.2.3. Fibre aramidiche	pag. 9
1.2.4. Confronto	pag. 10
1.3. La matrice	pag. 11
1.3.1. Resine termoindurenti	pag. 12
1.3.2. Resine termoplastiche	pag. 12
1.4. Caratteristiche dei materiali compositi	pag. 13
1.5. Applicazione degli FRP nelle strutture civili	pag. 14
1.5.1. Preparazione del supporto	pag. 14
1.5.2. Sistemi preformati	pag. 16
1.5.3. Sistemi impregnati in situ	pag. 17
1.6. L'uso dei materiali compositi per il rinforzo strutturale	pag. 18
1.7. Modalità di crisi di elementi in c.a. rinforzati con FRP	pag. 21
2. PREPARAZIONE PROVINI E MODALITA' DI PROVA	
2.1. Introduzione	pag. 25
2.2. Confezionamento Provini	pag. 25
2.3. Condizionamento Provini	pag. 27
2.3.1. Condizionamento In Nebbia Salina	pag. 28
2.3.2. Cicli di Gelo – Disgelo	pag. 29

2.4. Strumentazione	pag. 30
2.4.1. Estensimetri	pag. 30
2.4.2. LVDT	pag. 30
2.4.3. Cella di Carico	pag. 31
2.4.4. Sistema di Acquisizione	pag. 32
2.5. Setup di Prova	pag. 33
2.5.1. Setup LVDT	pag. 34
2.5.2. Setup Estensimetri	pag. 35
2.5.3. Setup Cella di Carico	pag. 37
2.6. Esecuzione della Prova	pag. 37
3. PROVE DI LABORATORIO	
3.1. INTRODUZIONE	pag. 41
3.2. R1A	pag. 43
3.3. R1B	pag. 59
3.4. R6A	pag. 63
3.5. R6B	pag. 73
3.6. R7A	pag. 79
3.7. R7B	pag. 86
3.8. R9A	pag. 101
3.9. R9B	pag. 109
3.10. R10A	pag. 113
3.11. R10B	pag. 119
3.12. R12A	pag. 124
3.13. R12B	pag. 131
3.14. R13A	pag. 139
3.15. R13B	pag. 149
3.16. R15A	pag. 154
3.17. R15B	pag. 161
3.18. R16A	pag. 165
3.19. R16B	pag. 173
3.20. R17A	pag. 180
3.21. R17B	pag. 185
3.22. R18A	pag. 190

3.23. R18B	pag. 198
3.24. R19A	pag. 202
3.25. R19B	pag. 208
3.26. R20A	pag. 216
3.27. R20B	pag. 220
3.28. R21A	pag. 225
3.29. R21B	pag. 229
3.30. R23A	pag. 234
4. PROVE DI LABORATORIO SUPPLEMENTARI	
4.1. Valutazione della rugosità mediante profilografo laser	pag. 241
4.2. Resistenze caratteristiche del cls dei provini	pag. 248
4.2.1. Resistenza a compressione	pag. 249
4.2.2. Resistenza a trazione indiretta (prova brasiliana)	pag. 250
4.2.3. Determinazione del modulo elastico secante	pag. 252
4.2.4. Risultati	pag. 253
5. ANALISI DEI RISULTATI	
5.1. Grafici carico-spostamento	pag. 255
5.2. Grafici forza-età di maturazione	pag. 257
5.3. Grafici Tau-Slip	pag. 259
5.4. Valutazione dell'energia di frattura attraverso il CNR DT 200-2004	pag. 261
BIBLIOGRAFIA	pag. 265

Introduzione

Con la presente tesi è condotto uno studio sul legame di aderenza FRP-calcestruzzo e sul comportamento esibito dall'interfaccia in condizioni climatiche avverse simili a quelle che possiamo trovare sul nostro territorio.

Questi aspetti hanno assunto negli ultimi anni un'importanza via via crescente e ciò è dovuto all'analogo incremento che, recentemente, ha interessato l'uso dei materiali compositi in ambito civile, particolarmente nella realizzazione di interventi di riabilitazione strutturale di infrastrutture viarie.

La tecnica del rinforzo basata sull'uso dei materiali compositi offre, infatti, numerosi vantaggi rispetto alle tradizionali metodologie, come è stato dimostrato dalle numerose prove sperimentali di laboratorio e applicazioni effettuate su edifici esistenti.

Oltre ad eccellenti caratteristiche meccaniche di rigidità e resistenza, questi materiali presentano anche un'elevata resistenza alla corrosione; inoltre, i ridotti valori di peso e dimensioni consentono una facile messa in opera e la possibilità di realizzare gli interventi più delicati nei quali è necessario preservare le caratteristiche estetiche della struttura originaria, come edifici, generalmente in muratura, di interesse storico o artistico.

La maggioranza delle applicazioni effettuate riguarda le strutture in c.a. e nella presente trattazione si concentrerà l'attenzione su problematiche relative appunto al rinforzo effettuato su questo tipo di substrato.

Le strutture in c.a., durante la loro vita utile, richiedono a volte interventi atti migliorare la capacità portante di alcuni elementi strutturali o per soddisfare nuovi requisiti imposti da normative più recenti, quali, ad esempio, le normative per le costruzioni in zona sismica.

La tesi è incentrata su prove sperimentali studiate in modo da simulare il reale comportamento di queste tipologie di rinforzo in situazioni reali, quali gli ambienti caratterizzati da frequenti gelate o dalla presenza di elevata umidità e di cloruri.

Per tale scopo, sono stati preparati una serie di provini in cls rinforzati con FRP e sottoposti a cicli di gelo e disgelo o mantenuti in ambiente fortemente salino.

Al termine del trattamento sono poi state effettuate le prove di delaminazione confrontando i risultati con analoghi ottenuti da provini non condizionati

Il capitolo 1 illustra le principali caratteristiche dei materiali compositi fibrosi a matrice polimerica, comunemente indicati con la sigla FRP, inoltre, vengono descritte le due tecniche fondamentali seguite per l'esecuzione del rinforzo: i sistemi preformati (precured systems) e i sistemi impregnati in situ (wet lay-up systems).

Si passa infine alla descrizione del processo di delaminazione, che rappresenta una modalità di crisi frequente per gli elementi rinforzati.

Nel capitolo 2 vengono descritte le modalità di confezionamento e condizionamento dei provini, inoltre vengono descritte le strumentazioni utilizzate, la preparazione e le modalità di prova.

Più in particolare, vengono descritti i setup della strumentazione con le relative tarature e tutti i passaggi eseguiti durante lo svolgimento delle prove.

Il capitolo 3 racchiude tutti i dettagli, le particolarità e i risultati di ogni singola prova una per paragrafo, all'interno dei quali viene descritto il posizionamento della strumentazione, i risultati ottenuti dalla prova e le relative elaborazioni.

Alla fine di ogni paragrafo vengono mostrate le fotografie delle superfici di incollaggio dopo la delaminazione con i relativi particolari.

Nel capitolo 4 vengono descritte ulteriori prove di laboratorio necessarie per avere un quadro complessivo delle caratteristiche dei singoli provini, viene descritto uno studio sperimentale sulla rugosità delle superfici dei prismi, ma la vastità dell'argomento non ha permesso l'approfondimento del tema in questa tesi.

Inoltre vengono descritte le prove di laboratorio necessarie per conoscere le caratteristiche del calcestruzzo dei provini, in quanto è stato scoperto che influiscono in maniera sostanziale sui risultati delle prove di delaminazione.

Il capitolo conclusivo riassume tutti i risultati ottenuti precedentemente, confrontandoli in modo tale da raggiungere gli obiettivi per cui la tesi è stata sviluppata.

Capitolo 1

I MATERIALI COMPOSITI E IL LORO IMPIEGO NEL RINFORZO STRUTTURALE

1.1 Gli FRP

I materiali compositi a matrice polimerica comunemente chiamati FRP (acronimo di Fiber Reinforced Polymers) sono stati utilizzati per interventi di rinforzo strutturale a partire dagli anni '90; vengono definiti compositi per il fatto che sono costituiti da due elementi, la matrice e le fibre annegate all'interno della prima.

Nel materiale composito, le fibre hanno un compito puramente resistente, mentre la matrice serve per proteggere e mantenere unite le prime, il risultato è un materiale che combina elevati valori di rigidità e resistenza con eccellenti caratteristiche di leggerezza e durabilità.

Queste caratteristiche permettono un'ampia gamma di interventi di rinforzo per la loro varietà di geometrie e caratteristiche meccaniche.

Una prima distinzione può essere fatta in base al numero di strati adottati: i compositi ad un solo strato vengono chiamati lamine mentre più lamine sovrapposte costituiscono un laminato. Si precisa sin da ora che la presente trattazione fa riferimento a materiali compositi in cui le fibre all'interno della matrice sono continue e allineate (quindi non corte e disposte in modo casuale): di conseguenza è possibile individuare immediatamente le direzioni privilegiate di resistenza del composito in quanto queste coincidono con le direzioni di allineamento delle fibre. Nel caso poi le fibre siano disposte tutte parallelamente tra loro si parla di compositi unidirezionali, caratterizzati da proprietà meccaniche spiccatamente anisotrope. È proprio l'anisotropia, insieme alla natura di materiali eterogenei, è forse la caratteristica peculiare dei compositi in quanto offre la possibilità di progettarli in funzione delle esigenze strutturali.

1.2 Le fibre

Le fibre sono gli elementi che determinano le proprietà meccaniche e la resistenza del composito. Il loro elevato rapporto tra lunghezza e diametro permette un cospicuo trasferimento delle sollecitazioni con la matrice.

Sottoposte a trazione esibiscono un comportamento elastico lineare fino a rottura, caratterizzato da elevati valori di resistenza e modulo elastico, quest'ultimo confrontabile con quello dell'acciaio.

Come già anticipato, le caratteristiche meccaniche del composito dipendono dalla giacitura delle fibre all'interno della matrice.

Le fibre più utilizzate per la produzione di materiali compositi sono quelle di vetro, di carbonio ed aramidiche, in base alla composizione delle fibre possiamo classificare gli FRP in:

- GFRP nel caso siano utilizzate fibre di vetro
- CFRP nel caso siano utilizzate fibre di carbonio
- AFRP nel caso siano utilizzate fibre aramidiche

1.2.1 Fibre di vetro

Le fibre di vetro si suddividono a loro volta, a secondo del tipo, in:

- Fibre di vetro tipo E, per impieghi generali e particolari richiedenti proprietà elettriche; contengono una grande quantità di acido borico, allumina e circa 55% di silice e hanno una resistenza bassa alle sostanze alcaline.
- Fibre di vetro tipo C, per strati superficiali di strutture particolarmente sollecitate chimicamente; contengono circa il 65% di silice.
- Fibre di vetro tipo D, per impieghi dove sono richieste elevate proprietà dielettriche; contengono circa il 75% di silice.
- Fibre di vetro tipo R (S), per impieghi richiedenti elevate resistenze meccaniche.

Benché siano più resistenti e più rigide rispetto alle precedenti non offrono una grande resistenza agli alcali per cui, per preservarle dall'azione erodente dei cementi alcalini, vi si aggiunge dello zirconio, il contenuto di silice è di circa il 60%.

I principali vantaggi derivanti dall'uso di questo tipo di fibre sono il loro basso costo, un'elevata resistenza a trazione, agli impatti e agli agenti chimici, le fibre di vetro hanno un modulo di elasticità normale inferiore rispetto alle fibre di carbonio e aramidiche ed esibiscono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione.

Presentano, inoltre, una modesta resistenza allo scorrimento viscoso e alla fatica.

1.2.2 Fibre di Carbonio

Sono le fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per l'alto modulo di elasticità e l'elevata resistenza, esibiscono un comportamento a rottura fragile con un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se i carichi di rottura sono elevati.

A confronto con quelle di vetro ad aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di creep e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione di resistenza a lungo termine.

Nella pratica comune il termine "fibre di carbonio" si alterna a quello di "fibre di grafite": il primo indica fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l'80 e il 95%, mentre il secondo indica fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99%.

Le fibre di carbonio vengono classificate in due categorie a seconda del valore della resistenza e del modulo elastico:

- fibre ad alto modulo $\sigma = 1750 \text{ MPa}$ $E = 420000 \text{ MPa}$
- fibre ad alta resistenza $\sigma = 2500 \text{ MPa}$ $E = 250000 \text{ MPa}$

1.2.3 Fibre Aramidiche

Le fibre aramidiche sono fibre di natura organica, costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata.

Tali fibre, introdotte per la prima volta nel 1971 col nome commerciale di Kevlar[®], si distinguono per l'elevata tenacità e resistenza alle operazioni di manipolazione. Si

sottolinea innanzitutto che il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio.

Caratteristiche peculiari di questo tipo di fibre sono la modalità di rottura a trazione, che avviene con sfibratura di microfibrille, consentendo quindi una grande dissipazione di energia di frattura, e l'elevata resistenza all'impatto che rende tali fibre adatte ad usi balistici (elmetti, giubbotti antiproiettile, auto blindate).

Le fibre aramidiche possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita di resistenza a trazione fino al 50%, possono inoltre essere sensibili all'umidità.

Il comportamento viscoso (creep) è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura è molto più elevata.

Anche la resistenza a fatica è più elevata di quella delle fibre di vetro.

1.2.4 Confronto

Dopo avere descritto brevemente le varie tipologie di fibre in commercio per il rinforzo strutturale, viene ora proposto un quadro riassuntivo che consente un rapido confronto tra le proprietà meccaniche esibite dalle stesse.

	Modulo di elasticità normale E	Resistenza σ_r	Deformazione a rottura ε_r	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	$[\sigma_r]$	$[g/cm^3]$
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 1.1 Caratteristiche delle fibre

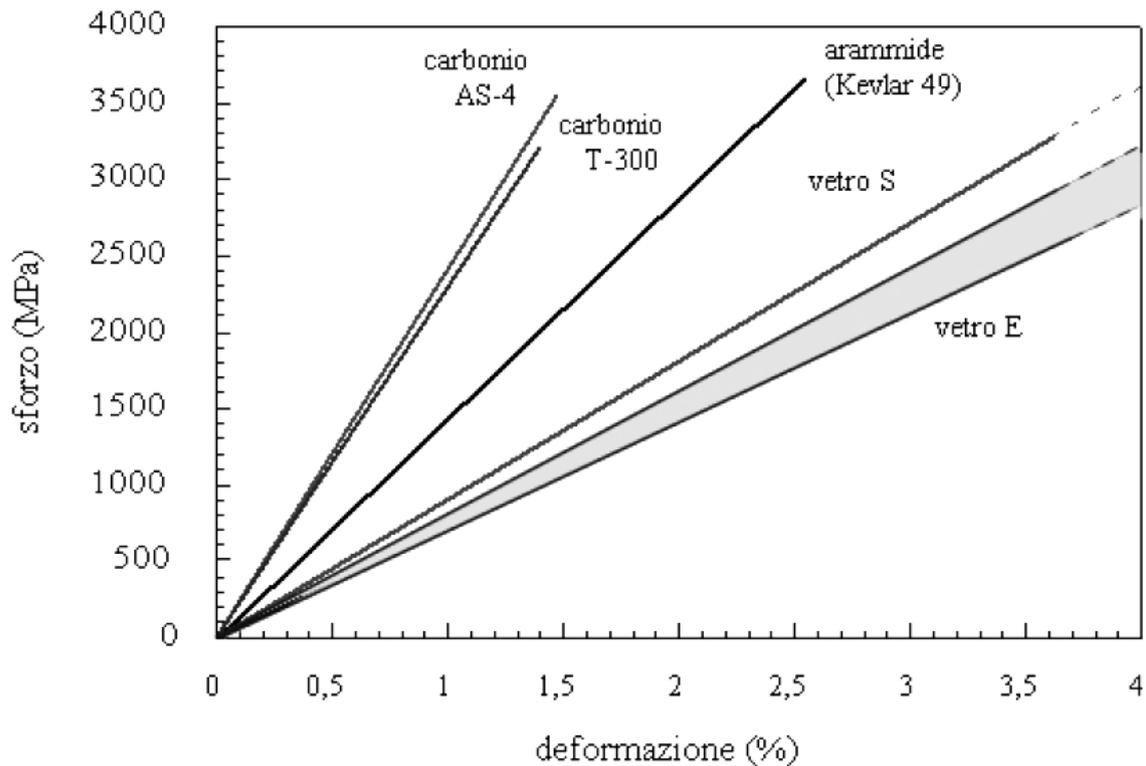


Figura 1.1 Grafico sforzo-deformazione dei vari tipi di fibre

1.3 La matrice

Come già accennato in precedenza il ruolo della matrice è duplice: da un lato, infatti, essa protegge le fibre da eventuali attacchi fisici e chimici provenienti dall'ambiente esterno e dall'altro garantisce il trasferimento del carico applicato alle fibre e la collaborazione tra le fibre stesse.

Inoltre, pur essendo molto resistenti, le fibre possono essere fragili mentre la matrice può assorbire energia deformandosi sottoposta a sollecitazione, fornendo così al composito maggiore tenacità.

Le matrici polimeriche possono essere distinte in:

- resine termoindurenti
- resine termoplastiche

La scelta fra i due suddetti tipi di resina è spesso condizionata da considerazioni di carattere economico.

1.3.1 Resine termoindurenti

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione di compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti, tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente.

Per miscelazione con un opportuno reagente polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso, poiché la reazione può essere accelerata agendo sulla temperatura, le suddette resine sono dette appunto termoindurenti.

Tali resine sono caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre, da ottime proprietà adesive, dalla possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente e da una buona resistenza agli agenti chimici.

I principali svantaggi sono rappresentati dal campo delle temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa (si possono avere problemi con temperature superiori a 60 °C), dalla modesta tenacità a frattura (comportamento di tipo fragile) e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura da rinforzare. Le resine termoindurenti si dividono a loro volta in:

- poliesteri
- vinilesteri
- resine epossidiche
- resine fenoliche

Quelle più utilizzate nei compositi fibrorinforzati per uso civile sono le resine epossidiche grazie a caratteristiche di buona versatilità, elevate proprietà meccaniche, ottima resistenza alla corrosione e semplicità del processo di trattamento. Le resine epossidiche presentano inoltre una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre esibiscono ottime proprietà adesive.

1.3.2 Resine termoplastiche

Lo sviluppo di compositi con matrice a base di resine termoplastiche è stato negli ultimi anni incentivato dai limiti intrinseci delle resine termoindurenti tra cui principalmente la

modesta tenacità a frattura e le temperature di esercizio piuttosto basse, tali resine sono caratterizzate dalla capacità di fluire una volta riscaldate ad una temperatura sufficientemente elevata, superiore, cioè, alla T_g (temperatura di transizione vetrosa) nel caso di materiali amorfi e superiore alla T_m (temperatura di fusione) nel caso di materiali semicristallini.

E' possibile quindi realizzare una formatura a caldo: la forma dei componenti può, cioè, essere modificata a piacere, riscaldando semplicemente il materiale ad un'opportuna temperatura.

Al momento il loro impiego in ambito civile è piuttosto limitato ma sono allo studio potenziali applicazioni di rilevante importanza, come, ad esempio, barre di rinforzo per conglomerato cementizio.

Rispetto alle resine termoindurenti quelle termoplastiche sono mediamente più tenaci e, in alcuni casi, presentano temperature di esercizio più elevate, presentano inoltre una maggiore resistenza nei confronti degli agenti aggressivi ambientali.

1.4 Caratteristiche dei materiali compositi

Le proprietà dei materiali FRP dipendono dal tipo di fibra e dalla resina utilizzata, la funzione delle fibre è quella di assorbire il carico, mentre quella della resina lo ripartisce fra loro.

Considerando le percentuali in volume di questi due componenti è possibile valutare globalmente le proprietà meccaniche del composito, solitamente la percentuale in volume di fibre è del 50-70% nei nastri e del 25-35% nei fogli.

Per determinare il modulo elastico e la resistenza del composito a trazione (in direzione delle fibre) si procede nel seguente modo:

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$f_c = f_f \cdot V_f + f_m \cdot V_m$$

dove il pedice "c" sta ad indicare il composito, il pedice "f" le fibre e "m" la matrice.

Le proprietà delle lamine sono fornite direttamente dai produttori, mentre nel caso di utilizzo di tessuti impregnati e applicati in sito lo spessore e larghezza sono incerti.

Un criterio fondamentale nella progettazione dei compositi è quello di orientare le fibre nella direzione della sollecitazione al fine di utilizzarne totalmente la capacità resistente. In tal caso, essendo la rigidità e la resistenza a trazione di queste molto superiori a quelle della matrice, le proprietà del materiale composito saranno determinate unicamente dalle loro caratteristiche meccaniche e geometriche.

1.5 Applicazione degli FRP nelle strutture civili

I sistemi di FRP utilizzati per il rinforzo esterno di strutture civili possono essere classificati in due tipologie fondamentali in base ai materiali e alla tecnica di applicazione adottati:

- Sistemi preformati (precured systems) costituiti da lamine piatte (piattine) realizzate in stabilimento mediante pultrusione e incollate con un opportuno adesivo all'elemento strutturale da rinforzare.
- Sistemi impregnati in situ (wet lay-up systems) costituiti da tessuti secchi che vengono impregnati in situ con resina, la quale funge anche da adesivo con il substrato interessato (es. calcestruzzo, muratura,...).

È importante studiare ogni singolo intervento in quanto la scelta e la corretta applicazione del rinforzo garantiscono la migliore compatibilità chimico-fisica e meccanica tra fibre e matrice e tra composito e la struttura da rinforzare.

1.5.1 Preparazione del supporto

Come già anticipato, il funzionamento ottimale di un rinforzo strutturale di materiale composito è subordinato in primo luogo ad una adeguata preparazione del supporto, ossia della superficie sulla quale verrà applicato il rinforzo.

La prima fase consiste così in una valutazione delle condizioni del substrato, al fine di accertare l'idoneità del medesimo ad essere esternamente rinforzato e in particolare la possibilità di trasferimento delle tensioni tra elemento da rinforzare ed elemento di rinforzo mediante un'efficace aderenza all'interfaccia resina-substrato.

Tale aspetto è di fondamentale importanza nelle applicazioni “per aderenza”, come i rinforzi a flessione e a taglio, mentre è meno importante nelle applicazioni “per contatto”, come nel caso di cerchiatura di colonne pressoinflesse.

È necessaria, inoltre, una attenta valutazione dei quadri fessurativi e della eventuale riduzione dell’area delle armature metalliche a causa di fenomeni corrosivi.

In generale si può affermare che il risultato dell’intervento è in primo luogo legato alla qualità e alle caratteristiche meccaniche del supporto stesso: un’applicazione su un calcestruzzo di classe Rck150 darà sicuramente risultati più scadenti rispetto a quelli ottenibili dalla stessa applicazione su un calcestruzzo di classe Rck300.

Solo nel caso di cerchiatura di pilastri a sezione circolare la qualità del supporto non è vincolante in quanto il materiale viene confinato dal rinforzo stesso che gli impedisce movimenti nelle direzioni trasversali.

La preparazione del supporto viene eseguita in modo diverso in base al tipo di rinforzo da applicare, nel caso di applicazione per “contatto” è sufficiente eliminare zone ammalorate e, nel caso in cui ci fossero zone sporgenti che potrebbero danneggiare il rinforzo, si può procedere con una lisciatura con malta.

Al contrario, nelle applicazioni per “aderenza” la superficie deve essere trattata in modo da assicurare una perfetta adesione del materiale composito.

In particolare bisogna fare attenzione a eventuali porzioni di materiale degradato, che vanno rimosse e sostituite con malta; eventuali fessure e vuoti di dimensioni rilevanti vanno opportunamente riempite con resina epossidica.

Inizialmente deve essere asportato il cls ammalorato mediante spazzolatura o sabbiatura e sostituito con malta o resine, inoltre bisogna verificare che sulla superficie di applicazione del rinforzo non siano presenti polveri, grassi, o altre sostanze che possono pregiudicare l’adesione.

La superficie sulla quale andrà applicato il composito viene sottoposta ad adeguati trattamenti al fine di creare una microrugosità che aumenta la superficie d’aggrappo e asportare la parte più superficiale e meccanicamente scadente costituita da lattime di cemento (malta di cemento priva di inerti).

Il meccanismo di adesione consiste principalmente nell’aggrappaggio meccanico (mechanical interlocking) dell’adesivo con la superficie dell’aderendo, ossia del substrato, oltre che nella formazione di legami chimici tra le molecole polimeriche e quelle del substrato stesso.

I metodi più utilizzati per la preparazione delle superfici sono i seguenti:

- Spazzolatura
- Smerigliatura
- Bocciardatura
- Sabbiatura
- Idrodemolizione

Dopo aver preparato il supporto, se necessario, può essere steso uno strato di “primer”, ovvero una resina epossidica bicomponente molto fluida per migliorare le proprietà meccaniche del supporto e migliorare l’aderenza degli strati successivi.

1.5.2 Sistemi preformati

La pultrusione è una tecnologia utilizzata per la produzione di una grande varietà di elementi in materiale composito.

Essa si basa su un processo continuo di produzione in cui le fibre sono prelevate da un gruppo di rocchetti e convogliate, attraverso rastrelliere che ne uniformano la posizione, verso un bagno di resina dove avviene l’impregnazione.

Il fascio di fibre impregnate entra quindi in uno stampo riscaldato nel quale il materiale si consolida sotto pressione.

All’uscita dallo stampo la matrice si è solidificata e il composito può essere tagliato da una sega circolare nella lunghezza desiderata.

Le lamine pultruse offrono un’elevata garanzia di uniformità del materiale e di perfetta disposizione delle fibre all’interno dell’elemento, si trovano commercializzate sotto forma di nastri di vari spessori e larghezze, mentre spetta all’utente la scelta della lunghezza.

Tali nastri laminati sono rigidi perché già polimerizzati, e per tal motivo possono essere applicati su superfici piane o comunque con una curvatura inferiore ai 3 metri. Esistono comunque anche in forme sagomate utili per il rivestimento di spigoli o nodi. Si applicano direttamente sul supporto per mezzo di adesivi epossidici, esercitando una pressione uniforme con appositi rulli.

1.5.3 Sistemi impregnati in situ

I diversi tipi di tessuto ottenibili da ciascun tipo di fibra possono essere confezionati in nastri (di diverse larghezze) o in drappi di grande dimensione, in funzione della modalità con cui le fibre vengono accoppiate si hanno:

- tessuti unidirezionali
- tessuti bidirezionali
- tessuti quadriassiali

La scelta del tipo di tessuto da impiegare dipende dalla struttura da risanare e dal tipo di sollecitazioni a cui è sottoposta: tessuti unidirezionali si applicano a strutture sottoposte a trazione assiale o a flessione semplice mentre elementi sottoposti a sforzi di taglio, torsione o sollecitazioni con orientamento multiplo e complesso, vengono più efficacemente rinforzati con compositi biassiali o quadriassiali.

I tessuti monoassiali trovano impiego in tutti i casi in cui è noto a priori l'andamento delle isostatiche di trazione, ossia delle linee di involuppo delle tensioni principali di trazione. In questi casi i tessuti vengono posti in opera disponendo le fibre dell'ordito nella direzione del massimo sforzo di trazione.

Nei casi in cui non è nota a priori la direzione delle sollecitazioni massime di trazione, oppure quando questa può variare lungo l'elemento da rinforzare o in funzione dei carichi esterni applicati, oppure quando nello stato tensionale della struttura da rinforzare esistono due direzioni principali di trazione, si potrà comunque procedere al rinforzo utilizzando tessuti di tipo monoassiale, avendo, però, l'accortezza di disporre più strati di tessuto orientati secondo le diverse direzioni.

I tessuti per il rinforzo strutturale vengono comunemente distribuiti in rotoli allo stato "secco", ossia non impregnati con resina, oltre a questi sono disponibili anche sistemi preimpregnati costituiti da fogli di fibre unidirezionali o multidirezionali o da tessuti precedentemente impregnati con resina parzialmente polimerizzata. Possono essere incollati al substrato da rinforzare con o senza l'uso di resine aggiuntive.

La prima operazione consiste nel preparare la resina di impregnazione, di solito vengono usate resine epossidiche bicomponenti, che richiedono un'operazione di miscelazione tra il componente A, il prepolimero e il componente B, l'indurente.

Dopo la preparazione, la resina va disposta in modo uniforme sulla superficie del calcestruzzo, quando viene applicato il rinforzo essa deve avere una viscosità sufficientemente bassa in modo che le fibre ne siano completamente impregnate prima dell'indurimento.

Sullo strato di resina si posiziona il rinforzo in FRP, curando l'allineamento delle fibre e, mediante rullatura, si provoca la penetrazione della resina tra le fibre, eliminando l'aria intrappolata.

Successivamente si applica un altro strato di resina e si rulla ulteriormente, per completare l'impregnazione e fare in modo che le fibre siano ben protette dalla resina, è possibile a questo punto applicare nuovi strati di tessuto per calibrare così la rigidità del rinforzo.

1.6 L'uso dei materiali compositi per il rinforzo strutturale

L'applicazione dei materiali compositi nell'ingegneria civile è rivolta soprattutto al recupero strutturale, questo avviene essenzialmente mediante due tecniche distinte:

- il placcaggio
- il confinamento

Oltre a queste due tipologie di intervento di rinforzo su strutture già esistenti, i materiali compositi possono essere utilizzati anche nella realizzazione di nuove costruzioni.

Una possibile loro applicazione è quella dei calcestruzzi fibrorinforzati: fibre della lunghezza di 2-3 cm vengono aggiunte nell'impasto del calcestruzzo in fase di lavorazione; in questo modo è possibile aumentare la sua resistenza a trazione, si riesce a contrastare l'apertura di fessure e incrementare così tenacità e duttilità.

Un'altra possibile applicazione dei materiali compositi in interventi di realizzazione è l'utilizzo di profilati pultrusi come elementi strutturali, i vantaggi di questo tipo di applicazione sono la leggerezza e l'elevata resistenza ad ambienti aggressivi, dove i materiali tradizionali, quali cemento armato e profilati metallici subirebbero forte corrosione.

Ritornando sulle tecniche di consolidamento strutturale analizziamo la tecnica del placcaggio: essa consiste nell'applicazione del rinforzo nella zona tesa di una struttura inflessa, con questo intervento si ottiene un aumento della capacità portante della struttura e si riescono a limitare gli stati fessurativi e delle deformazioni delle travi.

Il confinamento (wrapping) invece consiste nella fasciatura di elementi compressi (pilastri) al fine di conferire a tali elementi maggiore capacità portante, duttilità e resistenza alle azioni sismiche.

La tecnologia di rinforzo basata su compositi, permette di ottenere in breve tempo un notevole miglioramento prestazionale della struttura interessata, senza interruzioni nell'utilizzo dell'edificio e riescono a garantire a lungo termine la protezione.

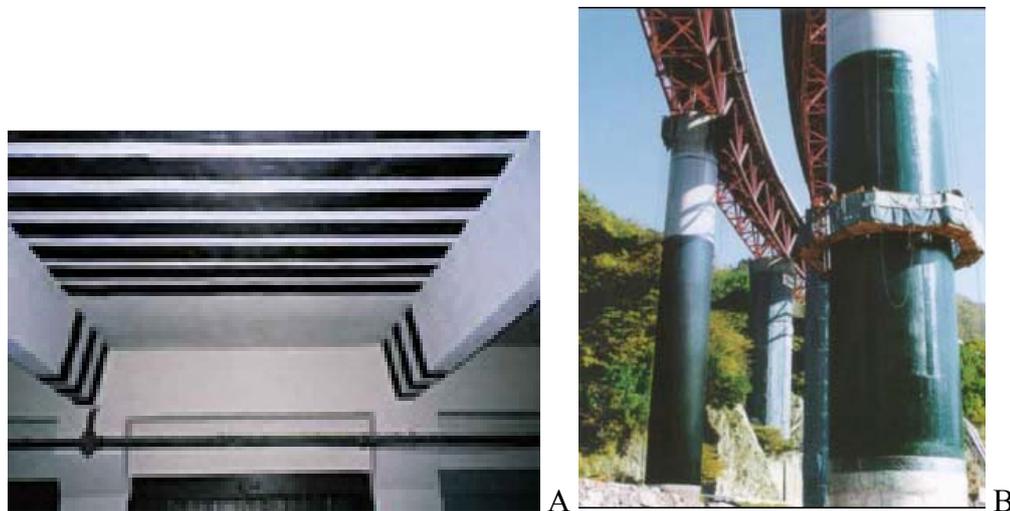


Figura 1.2 A)Intervento di placcaggio eseguito su travi di un solaio
B) Intervento di adeguamento sismico sulle pile di un ponte in Giappone

Negli edifici in cemento armato possono essere applicati nel consolidamento di travi e di solette soggette a flessione e taglio, nonché di pilastri soggetti a pressoflessione, sono idonei inoltre al recupero di condotte, tubi, serbatoi, vasche pali e altri manufatti in c.a.

Nelle strutture in cemento armato precompresso possono sopperire alla perdita di parte del tiro dei trefoli o alla rottura di alcuni di essi, e nei ponti o altre strutture soggette a traffico veicolare migliorano notevolmente la resistenza a fatica.

Nelle strutture in muratura sono in grado di risanare archi, volte e cupole, colonne e possono essere impiegati per realizzare una efficace legatura di edifici lesionati; trovano utilità infine nel recupero dei solai in legno per renderli più rigidi ed aumentarne la capacità portante.



Figura 1.3 A) Intervento su una volta in muratura
B) Intervento di precompressione esterna con FRP

l'utilizzo di FRP ha permesso di risolvere in maniera brillante le problematiche relative ad interventi di:

- risanamento di strutture degradate
- risanamento di strutture danneggiate
- adeguamento strutturale
- adeguamento sismico
- rapida messa in sicurezza di edifici in situazioni di emergenza.

Dal punto di vista del loro comportamento sotto sforzo, va detto che i materiali compositi utilizzati solitamente nell'ingegneria civile sono anisotropi e quindi le caratteristiche meccaniche dipendono dall'angolo tra la direzione delle tensioni di trazione e l'asse delle fibre.

Per sforzi ortogonali alla tessitura delle fibre, la resistenza e la rigidezza del materiale sono notevolmente ridotte (coincidenti con quella della resina); viceversa per sforzi lungo la direzione delle fibre hanno valori massimi, questa caratteristica non costituisce un inconveniente, ma va attentamente valutata in fase progettuale, laddove si dovrà pensare il rinforzo perché sia in grado di esplicare la propria resistenza nelle direzioni che servono al ripristino della struttura.

In funzione del caso specifico e delle tensioni che il composito dovrà assorbire, il progettista dovrà anche scegliere se impiegare tessuti unidirezionali o pluridirezionali, ovvero con fibre tessute in una sola direzione o in più direzioni.

1.7 Modalità di crisi di elementi in c.a. rinforzati con FRP

Le modalità di crisi di un elemento in c.a. rinforzato esternamente con FRP possono essere di due tipi:

- La sezione arriva a rottura con il composito ancora applicato e la crisi sopraggiunge o per schiacciamento del calcestruzzo in zona compressa o per rottura a trazione del rinforzo in FRP.
- La crisi della sezione si verifica prima di raggiungere la resistenza ultima dei materiali che la compongono e avviene in seguito ad un distacco prematuro della lamina di composito dalla sezione .

La seconda modalità di crisi, comunemente indicata con il termine di delaminazione, rappresenta un tipo di crisi tipico della tecnica del rinforzo, che si verifica in maniera estremamente fragile senza segni premonitori che possano indurre a prevederla e prevenirla.

L'aderenza (bond) consente il trasferimento della forza tra calcestruzzo e lamina in FRP; il fallimento dell'adesione tra i due materiali (bond failure) può avvenire in diversi modi e a seconda del componente (calcestruzzo, adesivo, lamina) o dell'interfaccia interessata dalla rottura possiamo distinguere:

1. Delaminazione nel calcestruzzo vicino la superficie, oppure lungo uno strato indebolito, come per esempio lungo la linea delle armature.

In questo caso il composito si stacca dal supporto insieme ad uno strato di calcestruzzo più o meno grande: se la superficie di calcestruzzo non è stata trattata correttamente, il distacco di calcestruzzo è molto superficiale (pochi millimetri); viceversa un'applicazione eseguita a regola d'arte comporta il distacco di uno strato di calcestruzzo consistente.

2. Delaminazione nell'adesivo (crisi coesiva)

Anche se le tensioni tangenziali e normali sono maggiori nell'adesivo rispetto a quelle nel calcestruzzo, solitamente è quest'ultimo a rompersi, poiché le sue caratteristiche resistenti sono notevolmente inferiori a quelle della resina epossidica. Questo tipo di rottura può quindi innescarsi solo se la resistenza dell'adesivo risulta inferiore a quella del calcestruzzo, circostanza che si può verificare o ad alte temperature o nel caso venga impiegato un calcestruzzo ad alta resistenza.

3. Delaminazione dell'interfaccia calcestruzzo-adesivo o adesivo-FRP (crisi di adesione)

Questo tipo di cedimento dell'ancoraggio si verifica quando la superficie del calcestruzzo non è stata preparata adeguatamente durante il processo di applicazione della lamina.

4. Delaminazione all'interno della lamina FRP

La rottura interlaminare nell'elemento composito di rinforzo si verifica anch'essa molto raramente e dipende dalla crisi del legame di aderenza tra fibre e matrice all'interno del composito.

Questo meccanismo si innesca quando la massima tensione tangenziale raggiunge la resistenza a taglio e rappresenta perciò un evento piuttosto raro dal momento che la resistenza a taglio della resina è mediamente almeno 7-8 volte superiore alla resistenza offerta dal calcestruzzo.

La crisi per taglio della lamina, che avviene soprattutto nelle travi costituite da calcestruzzo ad alta resistenza, rappresenta quindi un tipo di rottura secondario.

In una trave rinforzata a flessione, l'FRP viene incollato nell'intradosso teso della trave, di solito la lamina non viene incollata fino al bordo sia per l'ingombro delle strutture portanti verticali (pilastri, pareti), sia per questioni di risparmio di materiale.

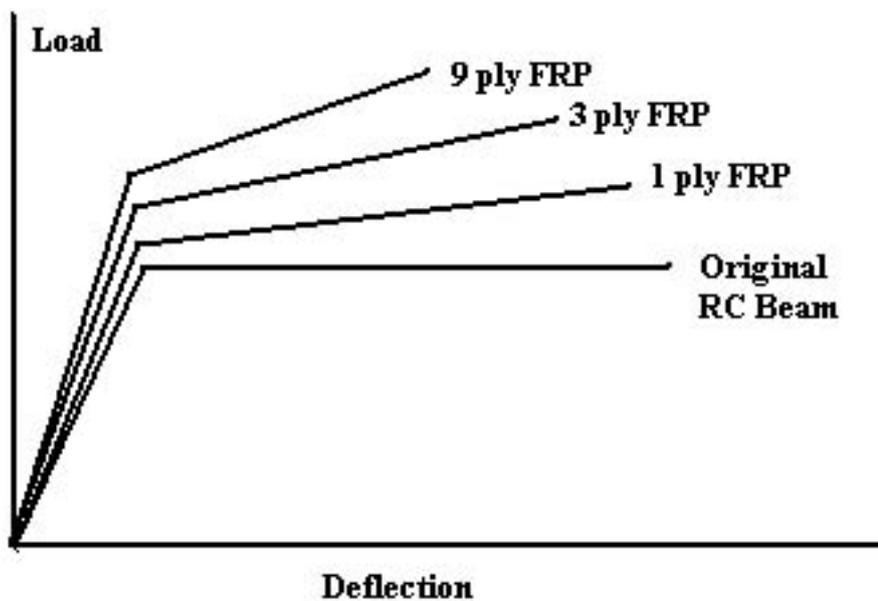


Figura 1.4 Grafico forza spostamento per una trave rinforzata a flessione

Il grafico in figura 1.4 mette a confronto il comportamento di una trave in cemento armato sollecitata a flessione, con travi analoghe placcate all'intradosso con lamine di FRP di spessore crescente; possiamo notare come il carico ultimo sopportato aumenta notevolmente all'aumentare dello spessore della lamina, sino a che non si ha la crisi per rottura del calcestruzzo compresso. Allo stesso tempo la deformazione ultima diminuisce molto rispetto a quella della trave di riferimento non rinforzata; la crisi diviene meno duttile e spesso non adatta per interventi di adeguamento antisismico.

Riferendoci a una classificazione secondo Gao (2003) possiamo individuare diverse modalità di rottura per una trave di c.a. rinforzata con FRP:

- rottura della sezione più sollecitata a momento flettente; in particolare questa si verifica per la crisi del calcestruzzo, in compressione, oppure per rottura della lamina di FRP per trazione;
- rottura per taglio della trave; questa avviene nelle zone più sollecitate da questo sforzo, cioè vicino agli appoggi;
- crisi per delaminazione; questa può avvenire in varie zone della trave ed essere generata da vari fattori.

Volendo classificare le varie cause che portano alla delaminazione e alla rottura prematura del rinforzo, possiamo distinguere cinque fondamentali modalità di crisi:

1. Peeling-off superficiale causato da fessure per flessione nel calcestruzzo; tali fessure inizialmente sono verticali possono divenire sempre più inclinate sino a che si propagano orizzontalmente, causando in questo modo il distacco della lamina in una zona distante da quella dell'ancoraggio.
2. Peeling-off superficiale indotto da fessure da taglio nel calcestruzzo. Questo tipo di rottura avviene solo su elementi scarsamente armati a taglio per l'apertura di fessure inclinate rispetto all'asse della trave.
3. Delaminazione nella zona iniziale dell'ancoraggio causata dal propagarsi di una frattura nel calcestruzzo lungo uno strato indebolito, quale può essere la linea dell'armatura (concrete cover separation).
4. Debonding sullo strato d'interfaccia tra calcestruzzo e lamina causato da una rottura dell'adesivo.
5. Peeling-off causato da irregolarità della superficie del calcestruzzo. Queste possono provocare perdite di aderenza localizzate, che propagandosi, possono condurre ad una completa delaminazione del sistema di rinforzo.

Alcuni autori, quali Oehlers, Morgan e Iansze, hanno individuato un'altra modalità di rottura, chiamata rip-off del calcestruzzo, tipica soprattutto delle travi nelle quali il placcaggio viene interrotto ad una certa distanza dagli appoggi. In questo caso si ha l'apertura di una fessura verticale all'estremità della lamina che tende a propagarsi inclinata all'interno della sezione di calcestruzzo (vedi la parte a sinistra della figura 1.5). L'eventuale presenza di staffe nella trave impedisce lo sviluppo verticale della fessura e ne determina una diffusione orizzontale nello spessore compreso tra lamina ed armatura provocando così la delaminazione (vedi parte destra della figura 1.5).

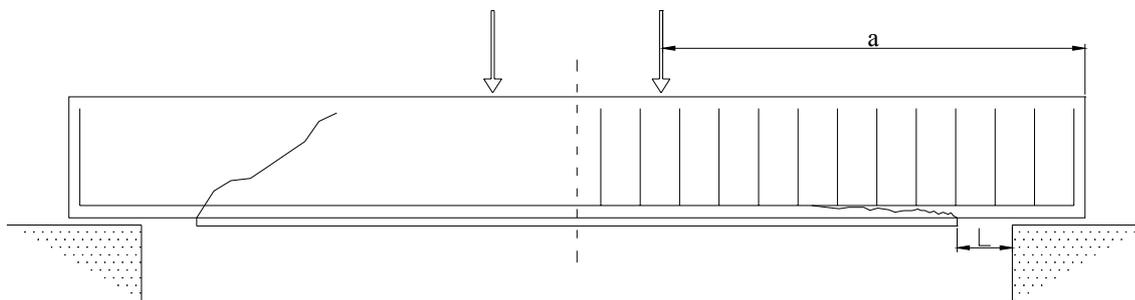


Figura 1.5 Distacco della lamina dovuto alla perdita di aderenza secondo Oehlers, Morgan e Iansze

Il progetto del rinforzo a flessione di una trave deve essere eseguito verificando le sezioni nelle zone maggiormente sollecitate a momento flettente e a taglio, curando inoltre i dettagli di incollaggio ed ancoraggio per evitare fenomeni di delaminazione che impediscano il completo sviluppo della capacità resistenti dell'elemento rinforzato. Si esegue poi la verifica dell'ancoraggio della placca alla sua estremità individuando la minima lunghezza di ancoraggio e della sua massima forza trasmissibile. Per migliorare il comportamento dell'ancoraggio è possibile prevedere dei sistemi di miglioramento come l'inserimento di fasce di FRP disposte trasversalmente ad U.

L'incremento di resistenza ottenibile è determinato soprattutto dalle caratteristiche dell'elemento su cui si interviene, in particolar modo dalla qualità dei materiali e dalla quantità di armatura in acciaio presente. Infatti tale intervento è particolarmente efficace su travi poco armate, mentre l'incremento di resistenza può essere trascurabile per travi con forte armatura, la cui crisi era imputabile alla rottura del calcestruzzo in zona compressa anche prima del rinforzo.

Capitolo 2

PREPARAZIONE PROVINI E MODALITA' DI PROVA

2.1 Introduzione

In questo capitolo sarà descritto tutto il processo di confezionamento e condizionamento che hanno subito i provini, inoltre sarà descritta tutta la preparazione e l'attrezzatura utilizzata per l'esecuzione delle prove in laboratorio.

2.2 Confezionamento Provini

Lunedì 08/05/2006 sono stati confezionati 28 provini prismatici di dimensione 60x20x15cm circa con un calcestruzzo di classe Rck 350.

Giovedì 06/07/2006 si è provveduto a rinforzare i prismi in calcestruzzo, ne sono stati rinforzati 21 secondo il seguente schema:

PLACCA			
N° prismi	Nome Rinforzo	sezione	E trazione
10	Sika UH514	50 mm x 1.4 mm	400000 N/mm ²
4	Sika S812	80 mm x 1.2 mm	165000 N/mm ²

TESSUTO			
7	MapeWrap C UNI-AX 300/10	300 g/m ² -100 mm	230000 N/mm ²

Tabella 2.1 Caratteristiche FRP

In tutti i casi è stato impiegato il primer prima del rinforzo (Figura 2.1) e l'adesivo scelto è stato il Sikadur 30, tutti i prismi sono stati rinforzati su entrambe le facce di lunghezza 20 cm.



Figura 2.1 Applicazione del primer

Sono stati placcati 14 prismi con lamina pultruse in fibre di carbonio preimpregnata con resina epossidica (Figura 2.2).



Figura 2.2 Esempio di un prisma rinforzato con lamina Sika UH514 (in alto) e con lamina Sika S812 (in basso).

Dei rimanenti 14 prismi, ne sono stati rinforzati con tessuto solamente 7 (anziché 8) perché per il rinforzo con tessuto del singolo prisma si è reso in realtà necessario impiegarne 2 (uno per il rinforzo e l'altro di supporto). La documentazione fotografica illustra con maggior chiarezza il lavoro effettuato (Figura 2.3).



Figura 2.3 Rinforzo dei prismi con tessuto.

Nella settimana 10-14/07/06, è stato terminato il processo di curing, nella figura 2.4 si può vedere il lavoro completato.



Figura 2.4 Visione d'insieme del lavoro svolto.

Nei provini con i tessuti, l'eccesso di resina laterale rischierebbe di falsare i risultati della prova in quanto, aumentando la superficie di incollaggio dell'FRP, incrementa la resistenza al debonding del provino.

Per evitare questo inconveniente si è praticata ai lati del tessuto impregnato un'incisione superficiale con la smerigliatrice, questa operazione è stata eseguita dopo il condizionamento.

I provini con le lamine non hanno necessitato di questa operazione.

2.3 Condizionamento Provini

Viene di seguito discusso il piano per il condizionamento dei prismi in calcestruzzo in camera climatica, camera di nebbia salina e camera di gelività, eseguito presso il Politecnico di Milano. È necessario premettere che sono stati considerati più parametri di diversa natura:

- Disponibilità delle camere (non superiore ai due mesi)
- Caratteristiche delle camere (dimensioni interne, campi di temperatura e umidità)
- Caratteristiche dei materiali costituenti il sistema da condizionare, (è particolare rilevanza la Tg dell'adesivo).

Ove possibile si è fatto riferimento alla formula di Arrhenius che, in soluzione acquosa, permette di accelerare il condizionamento del provino aumentando la temperatura della camera. Sono state inoltre considerate analoghe esperienze riportate in letteratura.

I prismi sono stati condizionati secondo le seguenti modalità:

CONDIZIONAMENTO		
Tipo di condizionamento	Caratteristiche prova	Camera
Nebbia salina	Concentrazione: 5% NaCl - 95% H ₂ O Temperatura: 50°C Durata: < 1000 h	WEISS 1000 Angelantoni climatic system (Temperatura max: 70°C, Dimensioni 1000×1000×1200 mm)
Gelo-disgelo	Temperatura: -18°C - +4°C Cicli: alterni ogni 2/3 ore Durata: < 1000 h (ASTM C666)	TY 760 APG Angelantoni climatic system (Temperatura -40°C - +60°C, Dimensioni 1200×800×800 mm)

Tabella 2.2 Caratteristiche di Condizionamento

Sebbene si cerchi di aumentare la temperatura delle celle climatiche al fine di accelerare il condizionamento, è decisamente sconsigliato il superamento della temperatura di transizione vetrosa dell'adesivo Sikadur 30 (la cui T_g è pari a 62.5°C, secondo le schede tecniche). A questo proposito, Bank et al. [2003] suggerisce di adottare temperature non superiori all'80% del T_g, ovvero pari a 50°C. Tuttavia, esperienze sperimentali riportate in letteratura [Matta, 2002], riportano una T_g dell'adesivo Sikadur 30 di circa 90°C.

2.3.1 Condizionamento in Nebbia Salina

Sulla base della normativa ASTM B 117, il condizionamento in nebbia salina avviene in una soluzione avente concentrazione 5% NaCl - 95% H₂O e pH compreso tra 6.5 e 7.2. In base all'equazione di Arrhenius, aumentando la temperatura della camera climatica in

soluzione acquosa è possibile accelerare il condizionamento del provino; anche in questo caso possiamo applicare una temperatura di 50°C.

Le esperienze riportate in letteratura sono soprattutto di natura qualitativa e mirano a determinare le migliori prestazioni in termini di durabilità di diversi tipi di compositi, specialmente barre in FRP (Micelli e Nanni [2003], Dejke [2001]).



Figura 2.5 Camera climatica per il condizionamento in nebbia salina

2.3.2 Cicli di Gelo – Disgelo

I provini sono stati sottoposti a cicli di gelo-disgelo secondo le modalità indicate dalla normativa ASTM C666 ed in particolare secondo le condizioni indicate in tabella 2.2. Anche in letteratura sono sempre state seguite le indicazioni ASTM (Bank et al. [2003], Micelli e Nanni [2003]).



Figura 2.6 Camera climatica per i cicli di gelo-disgelo

2.4 Strumentazione

2.4.1 Estensimetri

Gli estensimetri utilizzati nelle prove di laboratorio, si basano sull'effetto *piezoresistivo* del materiale conduttore utilizzato, ossia sulla variazione di resistenza che il materiale stesso subisce quando si deforma.

Gli estensimetri che sono stati utilizzati per queste prove sono di tipo monoassiale, le dimensioni dipendevano dal tipo di rinforzo su cui si eseguiva la prova:

nel caso di lamine sono stati utilizzati estensimetri con un Gauge Length di 6 mm e sono stati incollati con un adesivo bicomponente liquido.

Nel caso dei tessuti sono stati utilizzati estensimetri con un Gauge Length di 10 mm, mentre per l'incollaggio, è stato utilizzato l'adesivo bicomponente "X 60"

Il collegamento all'amplificatore è stato eseguito a quarto di ponte.

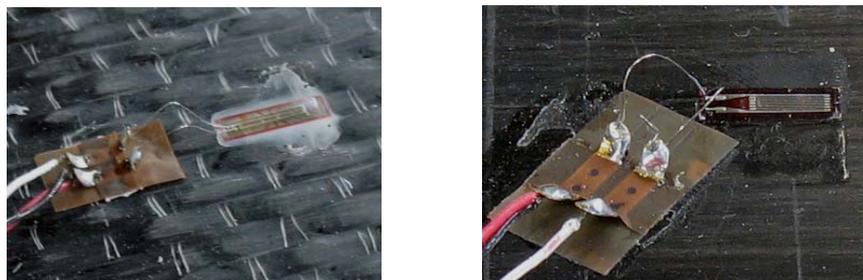


Figura 2.7 Estensimetri su Tessuto e su Lamina

2.4.2 LVDT

L'LVDT (Linear Variable Differential Transformer) è un dispositivo in grado di misurare lo spostamento di un punto prestabilito.

Il fenomeno che sfrutta è l'induzione elettromagnetica e di fatto esso non è nient'altro che un trasformatore a nucleo mobile e, come tale, è in grado di manipolare solamente grandezze elettriche alternate.

L'LVDT viene collegato rigidamente ad un supporto esterno che ne garantisce il corretto posizionamento mentre la sonda dello strumento è posta a contatto con un elemento metallico a L o triangolare fissato con della colla (adesivo bicomponente "X 60") al provino in corrispondenza del punto del quale si vuole misurare lo spostamento.

Lo spostamento della sonda viene trasformato in una variazione di potenziale elettrico che può essere rilevata dal sistema d'acquisizione.

In queste prove sono stati utilizzati gli LVDT contraddistinti dalle seguenti sigle:

- WA 10.1 da 10 mm
- WA 1 da 20 mm
- WA 2 da 20 mm
- WA 20.9 da 20 mm



Figura 2.8 LVDT WA 10.1 e WA 20.9 Installati

2.4.3 Cella di Carico

La cella di carico è uno strumento in grado di misurare la forza di compressione che grava su un generico corpo, essa ha un comportamento di tipo resistivo infatti presenta al suo interno degli estensimetri collegati in modo tale da formare un ponte di Wheatstone intero.

In questo tipo di prove è stata utilizzata una cella di carico da 5 ton.

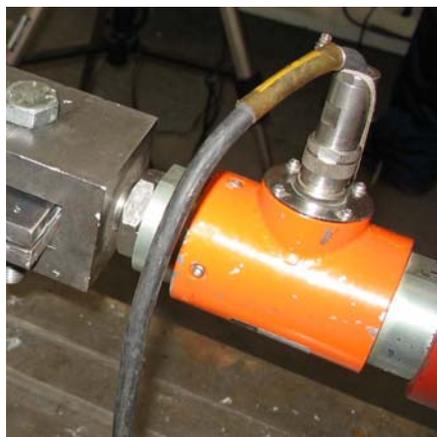


Figura 2.9 Cella di Carico

2.4.4 Sistema di Acquisizione

L'acquisizione dei risultati è avvenuta collegando tutti gli strumenti ad un sistema gestito attraverso un software (LabView) che ha permesso di acquisire dati ad intervalli di tempo ravvicinati, nella figura 2.8 si mostrano i vari componenti del sistema di acquisizione.

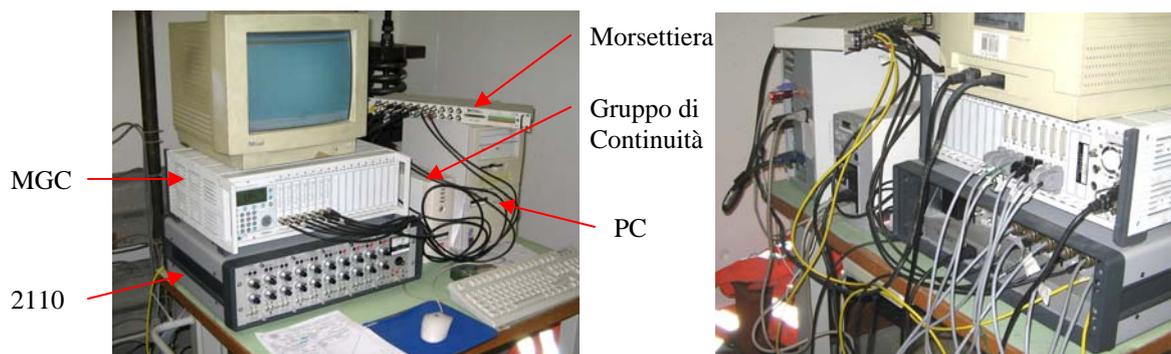


Figura 2.10 Sistema di acquisizione, vista anteriore e posteriore

2110: è un sistema d'amplificazione al quale possono essere connessi solo quegli strumenti che hanno un funzionamento di tipo resistivo (estensimetri, celle di carico). Nella parte posteriore vengono inseriti i connettori posti all'estremità dei cavi di collegamento degli strumenti (massimo 10 connettori) e al di sotto di ciascuno di essi si diparte un cavo d'uscita che va ad inserirsi nella morsettiera. Prima dell'inizio di ogni prova è necessario definire, per ciascun strumento, il *voltaggio* (alimentazione), regolare il *Gain* ruotando la manopola nera posta più in basso (attraverso il Gain si definisce il grado d'amplificazione del segnale d'uscita) e *bilanciare il ponte di Wheatstone* ruotando la manopola nera posta più in alto (il ponte è bilanciato quando entrambi i led posti sopra alla manopola sono spenti). Si procede poi inserendo le costanti di taratura di ciascuno strumento all'interno del software.

MGC: è un sistema d'amplificazione al quale possono essere connessi sia gli strumenti che hanno un funzionamento di tipo resistivo (estensimetri, celle di carico) che quelli con funzionamento induttivo (LVDT). Nella parte posteriore vengono inseriti i connettori posti all'estremità dei cavi di collegamento degli strumenti (massimo 7 connettori) e anteriormente a ciascuno di essi si diparte un cavo d'uscita che va ad inserirsi nella

morsettiera. Le regolazioni sono analoghe a quelle descritte per la 2100 però il tutto è digitalizzato (non sono presenti manopole di regolazione).

MORSETTIERA: essa da una parte raccoglie tutti i cavi che fuoriescono dalla 2100 e dall' MGC e dall'altra si collega, mediante un unico cavo, al case del computer. Per chiarire le idee, la sua funzione è banale e analoga a quella di una "presa elettrica multipla" utilizzata quando ad un'unica "presa a muro" si devono collegare più apparecchi elettrici. Nel caso in esame non sarebbe pensabile che ogni cavo d'uscita dalla 2100 e dall'MGC, visto il loro numero elevato, fosse direttamente collegato al case e proprio per ovviare a ciò si utilizza la morsettiera.

GRUPPO DI CONTINUITÀ: esso ha la funzione di garantire la continuazione dell'acquisizione dei dati anche nel caso di salti o mancanze temporanee di corrente.

2.5 Setup di Prova

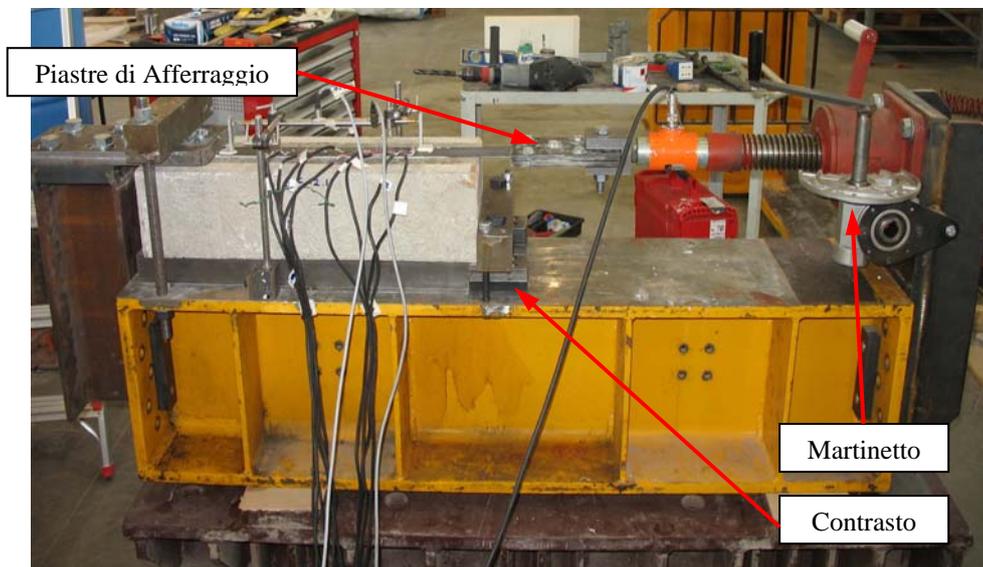


Figura 2.11 Setup di Prova

Ognuno dei provini è stato posizionato su un telaio utilizzato come banco di supporto per la prova, il carico viene applicato mediante delle piastre di afferraggio fissate con bulloni che collegano l'estremità libera della placca ad un martinetto ad azionamento manuale.

Eventuali spostamenti orizzontali del provino di calcestruzzo nella direzione del carico vengono impediti da un elemento metallico di contrasto solidale al telaio, posto sul lato anteriore del provino.

Nella zona posteriore del provino viene invece applicato un particolare sistema di ancoraggio che ne impedisce qualsiasi movimento verticale. Allo stesso supporto metallico viene fissata la lamina nella parte terminale dell'ancoraggio: il fissaggio della lamina avviene mediante l'applicazione di un tassello nel caso di provini con lamine da 50 e due tasselli nel caso di provini con tessuti.

Per garantire l'aderenza tra le piastre di ancoraggio anteriore e posteriore con i compositi, si è applicato uno strato di pasta bicomponente per marmo in modo tale da evitare qualsiasi tipo di scorrimento.

Con questo particolare sistema di ancoraggio è possibile fare in modo che la delaminazione si manifesti in maniera più "stabile", con una propagazione lungo l'interfaccia più facilmente monitorabile, infatti la delaminazione è un meccanismo che si sviluppa in maniera estremamente fragile, a causa del rilascio improvviso dell'energia di deformazione elastica accumulata nei materiali.

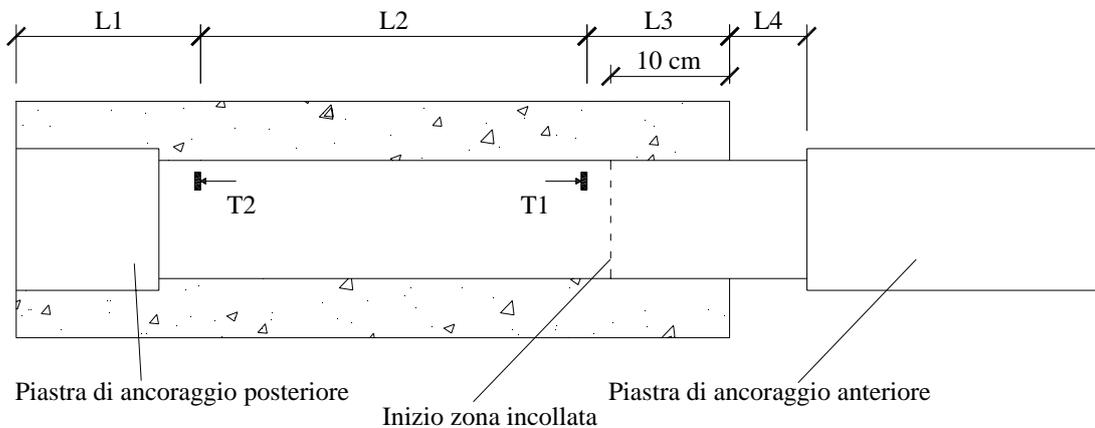


Figura 2.12 Ancoraggio Posteriore

2.5.1 Setup LVDT

In questa tipologia di prove si è previsto l'utilizzo di 2 LVDT per valutare l'allungamento del composito, valutando gli spostamenti relativi tra un punto prossimo a dove inizia l'incollaggio del composito e un punto vicino alla piastra di ancoraggio posteriore.

Nel seguente schema viene riportato il setup degli LVDT le cui distanze saranno elencate nel prossimo capitolo.



Gli LVDT sono poi stati collegati all'MGC con le seguenti impostazioni:

- tipo di trasduttore: IND FULL BRIDGE
- alimentazione: 1V
- unità di misura: uscita mm, entrata mV/V
- zero point: uscita 0, entrata 0
- scala: in uscita escursione in mm dell'LVDT, entrata 80000

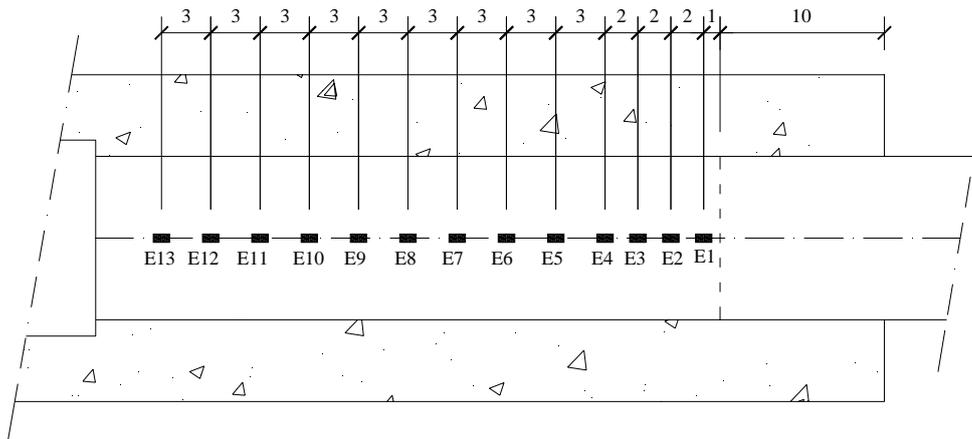
2.5.2 Setup Estensimetri

Gli estensimetri sono stati installati per valutare le deformazioni puntuali del composito lungo il suo asse, in modo tale da valutare successivamente deformazioni, tensioni tangenziali e scorrimenti di tutta la superficie incollata e per vari intervalli di carico.

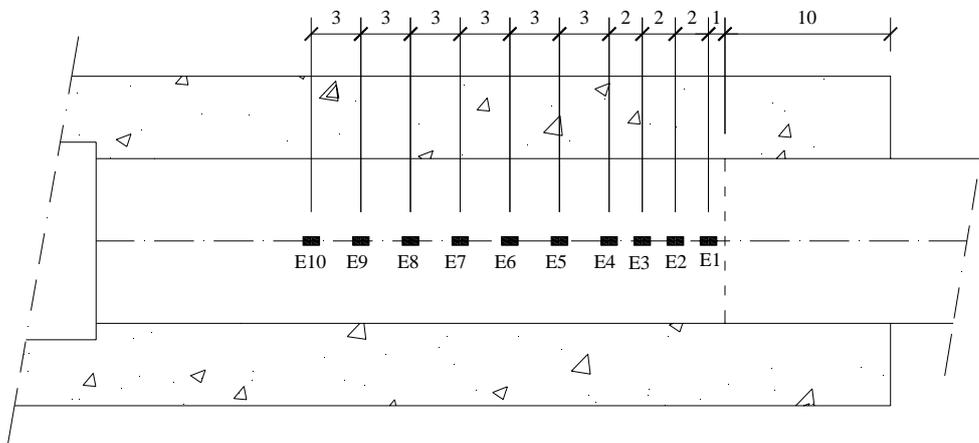
Per potere fare questo si è inserita l'ipotesi che le deformazioni e le tensioni sul composito sono costanti su tutta la sezione.

Gli estensimetri sono stati utilizzati anche per valutare il modulo elastico del composito, incollandone uno sopra e uno sotto al lato libero del composito tra il provino e la piastra di ancoraggio anteriore.

Di seguito sono descritti i vari setup utilizzati nelle prove.

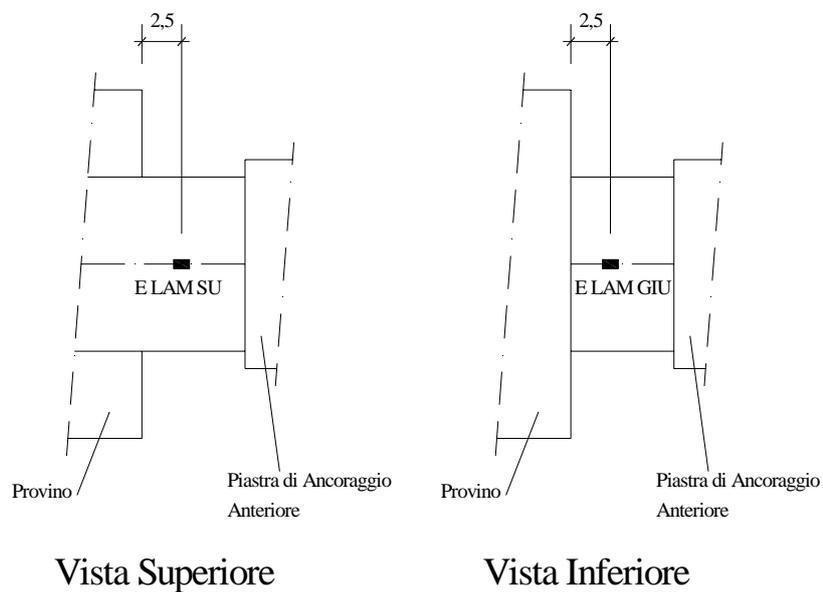


Setup a 13 Estensimetri



Setup a 10 Estensimetri

I due estensimetri utilizzati per valutare il modulo sono stati installati con il seguente setup:



Gli estensimetri sono stati collegati alla 2110 (nel caso del setup a 13 estensimetri sono stati utilizzati 2 amplificatori).

Invece i due estensimetri per valutare il modulo sono stati collegati all'MGC con le seguenti impostazioni:

- tipo di trasduttore: SG HALF BRIDGE
- alimentazione: 1V
- unità di misura: uscita $\mu\text{m/m}$, entrata mV/V
- zero point: uscita 0, entrata 0
- scala: in uscita 10000, entrata $= 5 \times \frac{2}{GF}$ dove GF è il Gauge Factor dell'estensimetro

2.5.3 Setup Cella di Carico

La cella di Carico è stata fissata tra la piastra di ancoraggio anteriore e il martinetto ad azione manuale, è poi stata collegata all'MGC con le seguenti impostazioni:

- tipo di trasduttore: SG FULL BRIDGE
- alimentazione: 5V
- unità di misura: uscita Kg, entrata mV/V
- zero point: uscita 0, entrata 0
- scala: in uscita 5000, entrata 1

2.6 Esecuzione della Prova

I test sono stati eseguiti applicando una forza di trazione all'estremo libero della lamina. In tempo reale, il sistema di acquisizione ha registrato i dati forniti trasmessi dai canali utilizzati per la strumentazione, l'assegnazione della strumentazione ai canali sarà descritta nel prossimo Capitolo.

Il martinetto usato ha un funzionamento di tipo manuale e l'applicazione del carico è stato effettuato ruotando semplicemente una delle due manovelle disponibili, quella ad asse orizzontale (cerchiata in verde) o quella ad asse verticale (cerchiata in rosso) collegata tramite un riduttore di giri. Queste si differenziano unicamente per il diverso spostamento che determinano a parità di angolo di rotazione.

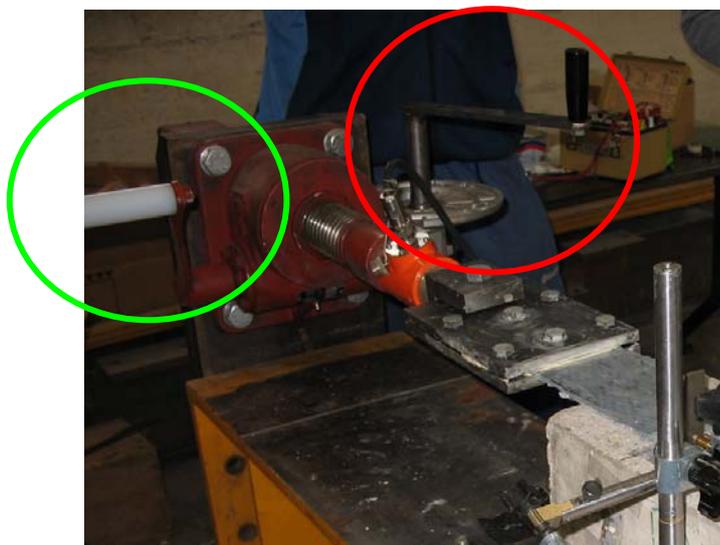


Figura 2.13 Martinetti per l'applicazione del Carico

Inizialmente, per ognuna delle prove, è stato compiuto un ciclo di carico fino al valore di 1.8 kN tenendo lenti i bulloni della piastra di ancoraggio posteriore per permettere l'assestamento del provino sul telaio e sull'elemento di contrasto anteriore.

Raggiunto questo livello di carico sono stati serrati i bulloni della piastra di ancoraggio posteriore utilizzando, quando necessario, la manovella ad asse verticale per mantenere costante il carico.

La variazione di carico durante il serraggio dei bulloni è dovuta alle imperfezioni delle superfici dei provini che appoggiano sugli elementi del telaio, per ridurre questi effetti sono state rettificate le superfici con boiaccia o pasta per marmo quando possibile, negli altri casi sono stati utilizzati degli spessori in metallo.

Dopo aver compiuto l'iniziale ciclo di carico e scarico si è dato inizio alla prova vera e propria e la forza è stata incrementata regolarmente fino all'innesco del meccanismo di delaminazione, sopraggiunto per valori del carico molto diversi a seconda del tipo di elemento composito applicato (lamina o tessuto).



Figura 2.14 Spessori (A) e strato di boiacca (B) per la rettifica delle superfici

In questa fase è stato possibile osservare il progressivo distacco dell'elemento composito dal provino lungo la lunghezza di incollaggio, meccanismo che si è propagato a partire dalla zona più vicina all'estremità caricata.



Figura 2.15 Fase della Delaminazione durante la prova

Una volta completato il processo di delaminazione si è continuato ad incrementare il carico per monitorare il comportamento post-critico del composito. Infine i provini sono stati scaricati e sottoposti ad un nuovo ciclo carico-scarico.

Capitolo 3

Prove di Laboratorio

3.1 Introduzione

In questo capitolo verranno descritte in dettaglio le varie prove di delaminazione svolte presso il LaPS (Laboratorio Prove Strutture) della Facoltà di Ingegneria di Bologna.

Ogni paragrafo sarà dedicato ad una singola prova, nel titolo del paragrafo la prima lettera e il numero indicano il codice identificativo del provino, mentre l'ultima lettera indica la faccia su cui è stata eseguita la prova (sono state usate 2 facce di ogni prisma in cls).

All'interno del paragrafo saranno indicati il tipo di condizionamento del provino, la data della prova e l'età del calcestruzzo al momento della prova.

In seguito viene descritto il setup della strumentazione, eventuali operazioni particolari che sono state eseguite sul provino e il tipo di collegamento della strumentazione al sistema di acquisizione.

Infine vengono mostrati tutti i risultati e le varie elaborazioni della prova sotto forma di grafici e tabelle.

Le informazioni e i risultati di tutte le prove eseguite per questa tesi sono stati riassunti nella seguente tabella 3.1.1 dove con la sigla “ ΔT ” si indica il condizionamento di gelo-disgelo, con “Aria” si indica che il provino è stato tenuto all'aperto dalla data indicata di seguito mentre con “NS” si indica il condizionamento in nebbia salina.

Provino	Rinforzo	Condizionamento	Data Conf.	Data Prova	Agg	Fmax(kN)	Fmin(kN)	E(MPa)
R01A	Tessuto	ΔT 133 cicli	08/05/2006	13/03/2007	278	26.65	20.46	333940
R01B	Tessuto	ΔT 133 cicli	08/05/2006	17/04/2007	313	25.8	19.15	XXX
R03A	Lamina80	Aria dal 15-09-06	08/05/2006					
R03B	Lamina80	Aria dal 15-09-06	08/05/2006					
R06A	Tessuto	ΔT 409 cicli	08/05/2006	31/05/2007	357	24.49	18.41	309462
R06B	Tessuto	ΔT 409 cicli	08/05/2006	31/07/2007	418	28.04	17.76	258150
R07A	Tessuto	Incondizionato	08/05/2006	23/02/2007	260	23.84	19.87	297470
R07B	Tessuto	Incondizionato	08/05/2006	13/03/2007	278	28.77	18.4	225160
R08A	Tessuto	Aria dal 15-09-06	08/05/2006					
R08B	Tessuto	Aria dal 15-09-06	08/05/2006					
R09A	Tessuto	NS 1 mese	08/05/2006	01/03/2007	266	25.28	22.15	297800
R09B	Tessuto	NS 1 mese	08/05/2006	17/04/2007	313	29	19.32	XXX
R10A	Tessuto	Incondizionato	08/05/2006	31/08/2007	449	38.01	25.45	317750
R10B	Tessuto	Incondizionato	08/05/2006	05/09/2007	454	24.4	18.68	274780
R11A	Lamina50	Aria dal 15-09-06	08/05/2006					
R11B	Lamina50	Aria dal 15-09-06	08/05/2006					
R12A	Lamina50	NS 1 mese	08/05/2006	24/10/2006	138	48.67	40.49	396195
R12B	Lamina50	NS 1 mese	08/05/2006	08/11/2006	153	44.94	38.63	347004
R13A	Lamina50	NS 2 mesi	08/05/2006	03/05/2007	329	49.94	45.9	363697
R13B	Lamina50	NS 2 mesi	08/05/2006	10/05/2007	336	50.17	47.67	XXX
R14A	Lamina80	NS 2 mesi	08/05/2006					
R14B	Lamina80	NS 2 mesi	08/05/2006					
R15A	Lamina50	ΔT 133 cicli	08/05/2006	24/10/2006	138	34.96	33.76	350000
R15B	Lamina50	ΔT 133 cicli	08/05/2006	07/12/2006	182	31.19	30.14	XXX
R16A	Lamina50	ΔT 409 cicli	08/05/2006	19/04/2007	315	41.61	34.84	371350
R16B	Lamina50	ΔT 409 cicli	08/05/2006	03/05/2007	329	31.57	30.16	383560
R17A	Lamina50	Aria dal 15-09-06	08/05/2006	12/07/2007	399	42.24	38.74	309570
R17B	Lamina50	Aria dal 15-09-06	08/05/2006	10/07/2007	397	41.56	38.47	346110
R18A	Lamina50	Incondizionato	08/05/2006	23/10/2006	137	35.09	29.94	347409
R18B	Lamina50	Incondizionato	08/05/2006	07/12/2006	182	33.6	32	XXX
R19A	Lamina50	Incondizionato	08/05/2006	28/06/2007	385	24.99	19.61	337900
R19B	Lamina50	Incondizionato	08/05/2006	26/06/2007	383	47.83	35.47	390756
R20A	Lamina50	ΔT+NS 125cicli,15gg	08/05/2006	17/05/2007	343	39.45	34.2	XXX
R20B	Lamina50	ΔT+NS 125cicli,15gg	08/05/2006	17/05/2007	343	52.57	43.66	XXX
R21A	Lamina50	ΔT+NS 250cicli,1mese	08/05/2006	24/05/2007	350	51.3	45.42	XXX
R21B	Lamina50	ΔT+NS 250cicli,1mese	08/05/2006	17/07/2007	405	51.88	45.32	XXX
R22A	Lamina80	ΔT 409 cicli	08/05/2006					
R22B	Lamina80	ΔT 409 cicli	08/05/2006					
R23A	Tessuto	NS 2 mesi	08/05/2006	02/08/2007	420	27.33	21.22	278760
R23B	Tessuto	NS 2 mesi	08/05/2006					
R28A	Lamina80	Incondizionato	08/05/2006					
R28B	Lamina80	Incondizionato	08/05/2006					

Tabella 3.1.1 Riassunto Prove

3.2 R1A



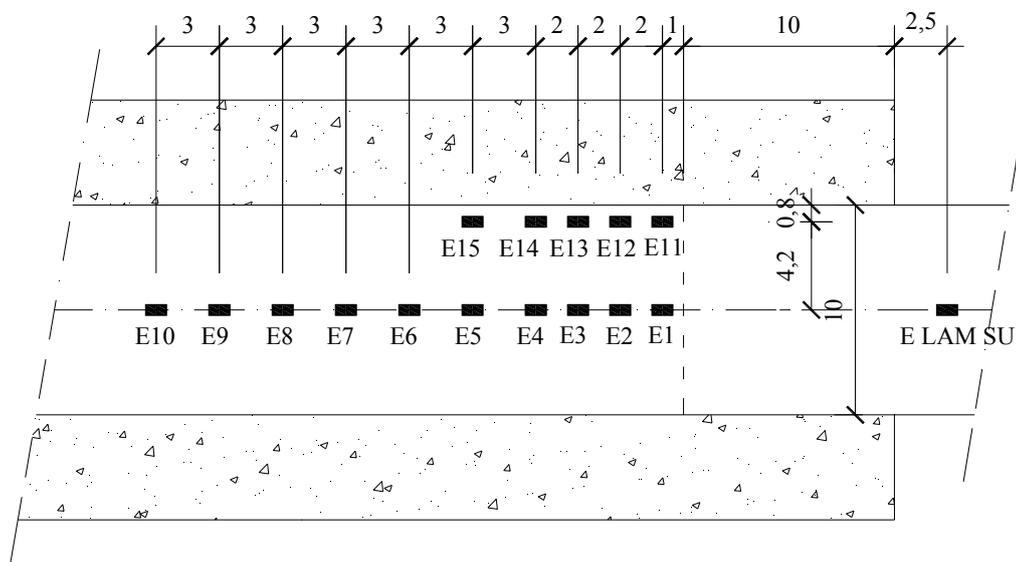
Figura 3.2.1 Prova R1A

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 13-03-07, quindi il cls ha avuto 278 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 133 cicli di gelo-disgelo.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 10 estensimetri con due estensimetri per il modulo sul tessuto e in aggiunta 5 estensimetri laterali incollati secondo il seguente schema:



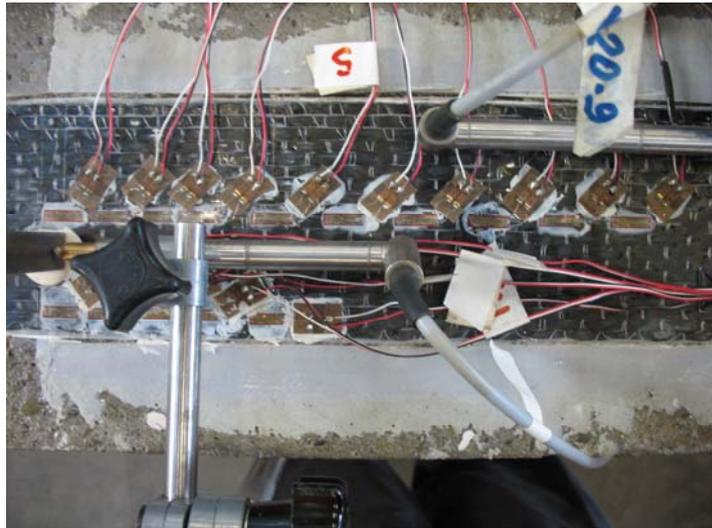


Figura 3.2.2 Setup Prova

La fila laterale degli estensimetri è stata incollata per valutare lo stato deformativo e tensionale del rinforzo in prossimità del bordo.

Il modello di estensimetri è il: PFL-10-11 da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.4 cm
L2	33.4 cm
L3	11.2 cm
L4	6 cm

Tabella 3.2.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	10	E8
1	T1, WA 10.1	11	E9
2	T2, WA 20.9	12	E10
3	E1	13	E11
4	E2	14	E12
5	E3	15	E13
6	E4	16	E14
7	E5	17	E15
8	E6	18	E LAM SU
9	E7	19	E LAM GIU

Tabella 3.2.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

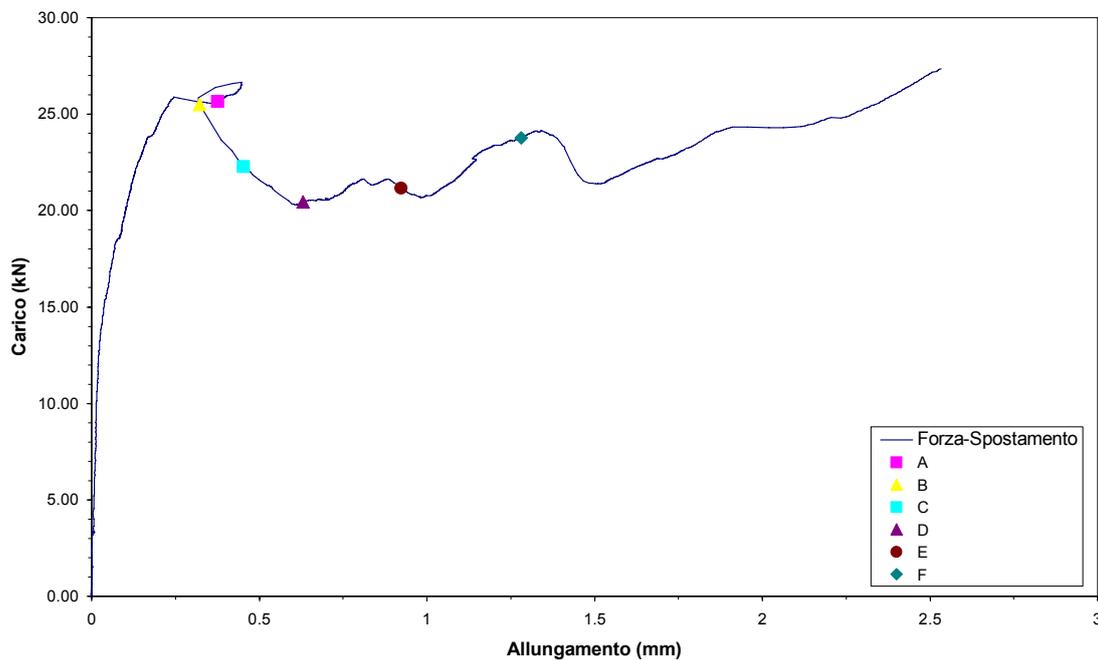


Grafico 3.2.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.2.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare.

Avvicinandosi al carico di delaminazione si nota una diminuzione progressiva della rigidità fino ad arrivare al carico di che innesca la delaminazione (punto A).

In questa prova, i valori di carico-allungamento in prossimità del carico di delaminazione hanno creato un “cappio”, questo fenomeno è dovuto alla rotazione del contrasto dell’LVDT T1 causata dall’innalzamento del tessuto al momento della delaminazione.

Raggiunto il punto A, si nota una riduzione del carico fino ad un valore (punto C), successivamente lo spostamento cresce con carico pressoché costante; è in questa fase che si propaga la delaminazione del tessuto dal provino di calcestruzzo.

La motivazione per cui il carico di innesco della delaminazione è maggiore del carico effettivo di delaminazione è dato dal fatto che l’energia necessaria per creare la fessura che provocherà la delaminazione è maggiore dell’energia necessaria per propagarla.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare; in questa fase l'unico elemento resistente è il tessuto di FRP, ancorato al supporto all'estremità del provino.

I punti A,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 26.65 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 20.46 kN.

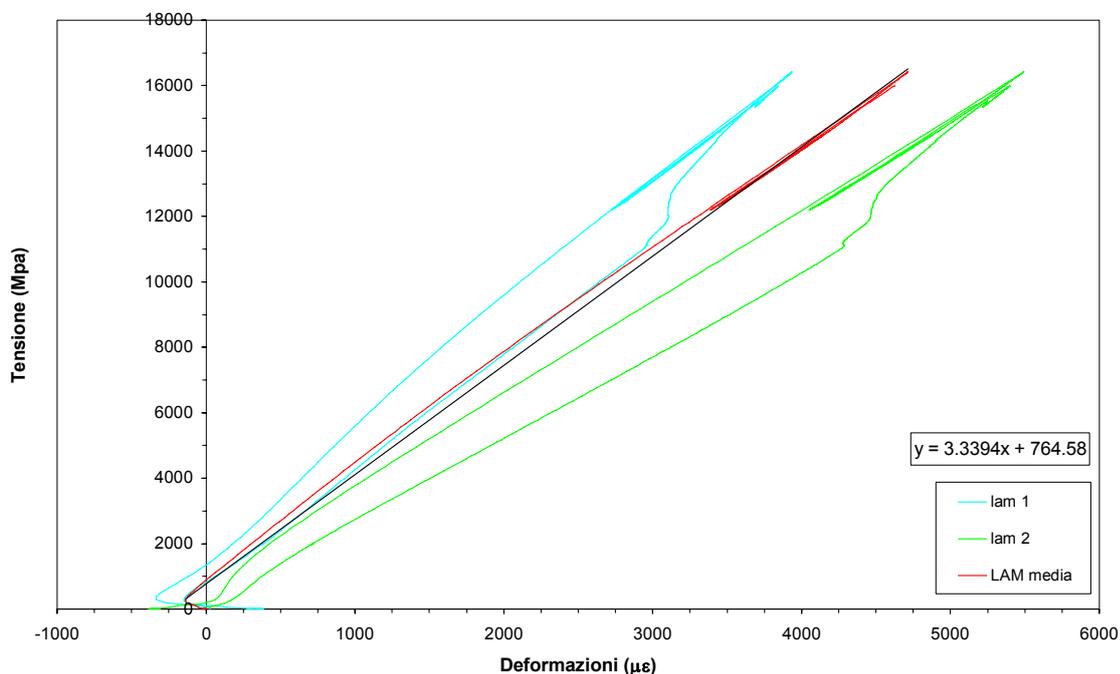


Grafico 3.2.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.2.2 sono riportate le deformazioni del tessuto misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva del tessuto in FRP che in questo caso è di 0.166 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico del tessuto è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo

valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato del tessuto pari a 333940 MPa.

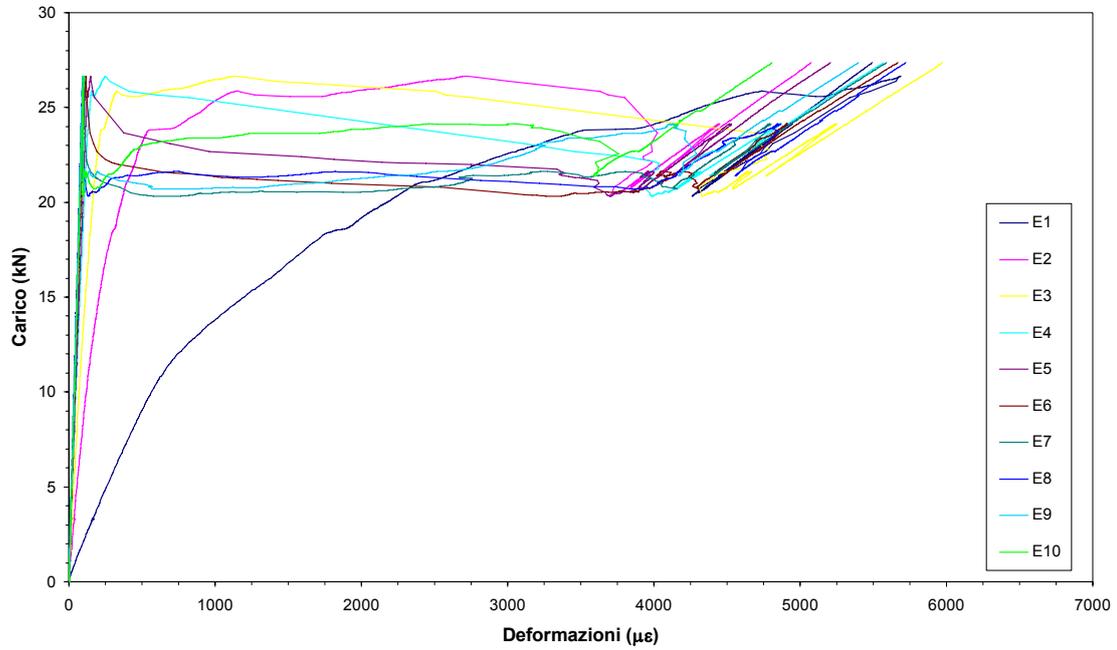


Grafico 3.2.3 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri centrali

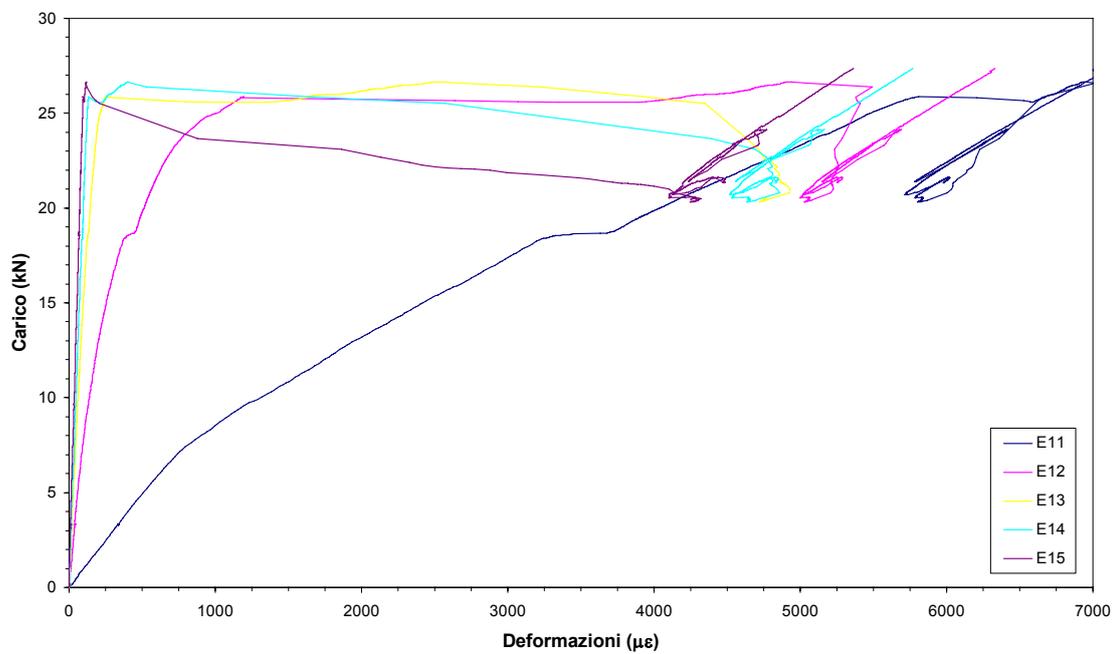


Grafico 3.2.4 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri laterali

I grafici 3.2.3 e 3.2.4 sono stati ottenuti rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sul tessuto in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

Si nota che gli estensimetri più vicini alla sezione di primo ancoraggio hanno un comportamento quasi elastico-lineare, mentre allontanandosi da quella zona, le deformazioni maggiori si hanno quando la delaminazione raggiunge la zona di incollaggio dell'estensimetro.

Questo fenomeno è dovuto al fatto che la superficie di ancoraggio dove sono stati posizionati i primi estensimetri non è sufficiente per ancorare perfettamente il tessuto al cls, quindi in quella zona la resistenza è data principalmente dall'FRP che ha un comportamento elastico-lineare.

Allontanandosi dalla sezione di primo ancoraggio, l'adesivo permette una completa collaborazione tra FRP e cls, che viene a mancare solo al raggiungimento del carico di delaminazione.

Si nota ulteriormente che questo fenomeno è accentuato nel bordo.

Durante la prova, l'estensimetro 13 ha smesso di funzionare vicino alla deformazione di $5000 \mu\epsilon$, quindi nel grafico carico-deformazioni di scarico successivo non sarà visualizzato.

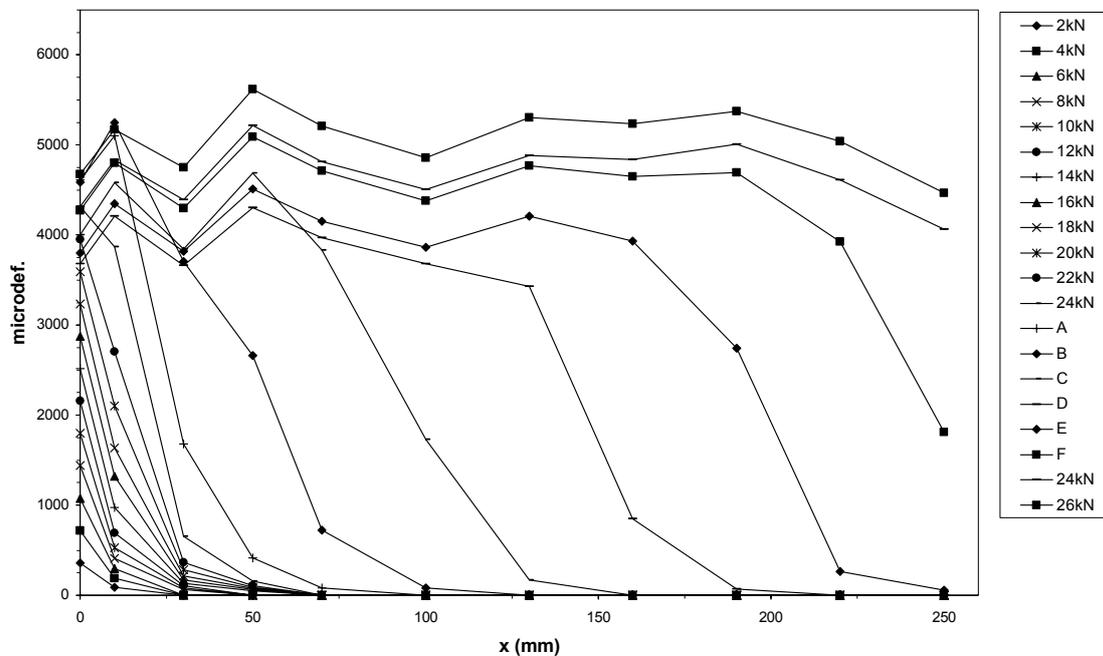


Grafico 3.2.5 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto centrale

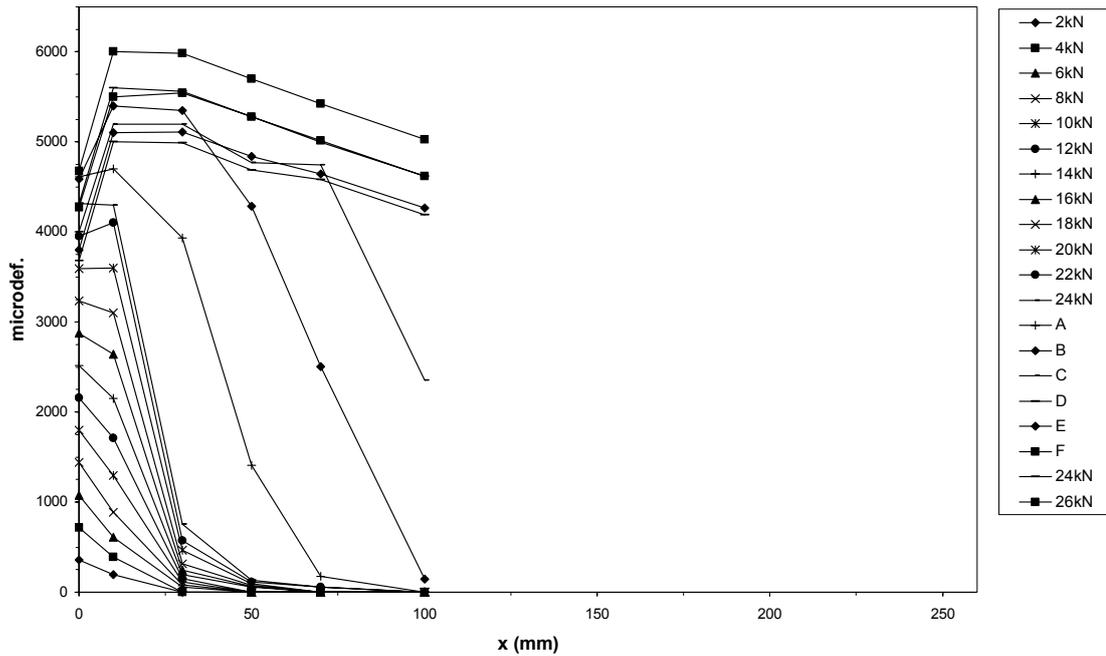


Grafico 3.2.6 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto laterale

I grafici 3.2.5 e 3.2.6 mostrano le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati, rispettivamente, nella zona di incollaggio lungo l'asse del tessuto e sul bordo.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I profili di deformazione illustrati sono relativi ai differenti livelli di carico, indicati nelle figure.

Dal grafico si nota che, per valori di carico inferiori al carico di delaminazione, i valori di deformazione calano molto rapidamente a partire dalla sezione iniziale, seguendo una legge di tipo esponenziale. In questa fase il comportamento dell'interfaccia è di tipo elastico lineare.

Quando viene raggiunto il carico di delaminazione, le deformazioni tendono ad assumere un andamento costante nella zona in prossimità dell'estremità caricata del tessuto: ciò è dovuto all'innesco della delaminazione.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio: si può notare come, con il propagarsi di tale meccanismo, trasli verso l'estremità non caricata il tratto esponenziale della curva, tratto che corrisponde alla zona in cui la delaminazione non si è ancora innescata e si ha perciò trasmissione di forza tra i due materiali, con un comportamento dell'interfaccia di tipo lineare. Al termine di questa fase, quando cioè la

delaminazione si è propagata su tutta la lunghezza di ancoraggio, le deformazioni sono costanti su tutta la placca e proporzionali al carico applicato.

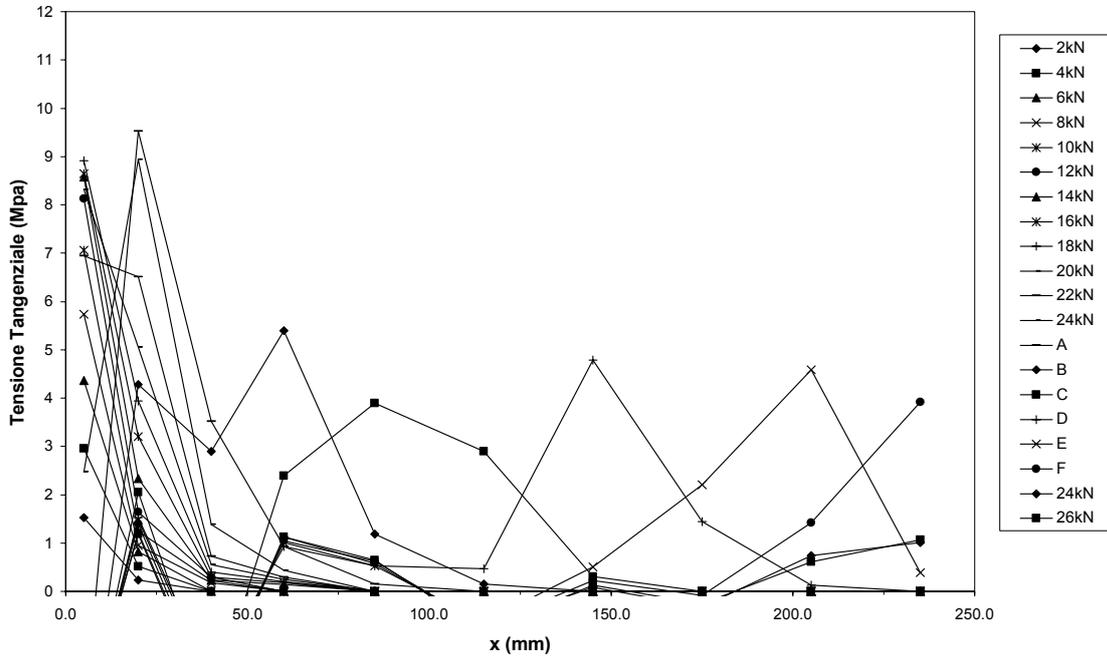


Grafico 3.2.7 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza del tessuto centrale

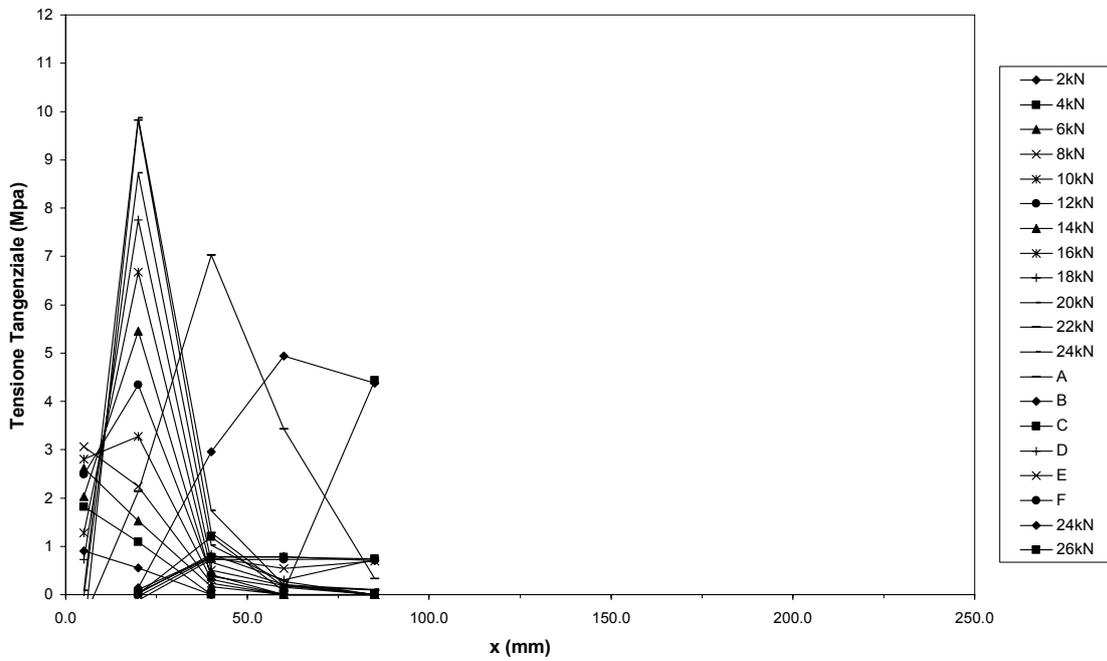


Grafico 3.2.8 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza del tessuto laterale

I grafici 3.2.7 e 3.2.8 mostrano gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato. Le tensioni tangenziali rappresentate nei grafici per ogni livello di carico rappresentano il valore medio delle tensioni valutate tra due successive sezioni x_i e x_{i+1} utilizzando i corrispondenti valori di deformazione ε_i e ε_{i+1} , secondo la seguente equazione:

$$\tau_{i+1/2} = -\frac{E_{FRP} \cdot A_{FRP} \cdot (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{B_{FRP} \cdot (x_{i+1} - x_i)} \quad (3.2.1)$$

dove B_{FRP} indica la larghezza e A_{FRP} indica l'area effettiva del tessuto.

Tale valor medio si considera costante all'interno del tratto considerato, quello cioè delimitato dalle sezioni x_i e x_{i+1} .

Eseguendo questa operazione per tutti gli estensimetri per ogni livello di carico si ottengono i grafici 3.2.7 e 3.2.8.

I risultati mostrano che, per livelli di carico inferiori a quello di delaminazione, le tensioni tangenziali crescono principalmente nelle sezioni iniziali con un andamento di tipo esponenziale

Raggiunto il carico di delaminazione, ho la tensione tangenziale massima, successivamente, si ha uno abbattimento e una traslazione verso destra del picco di tensioni, dovuto al fatto che, a causa della propagazione della delaminazione, l'area efficace di incollaggio si sposta.

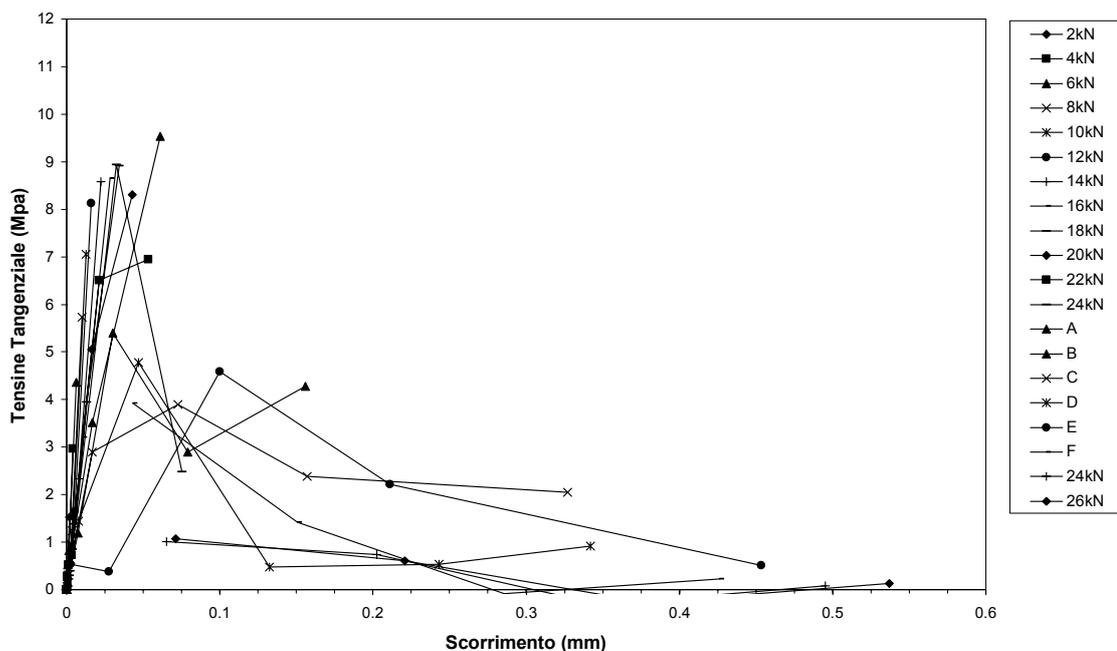


Grafico 3.2.9 Grafico Tensioni-Scorrimento del tessuto centrale

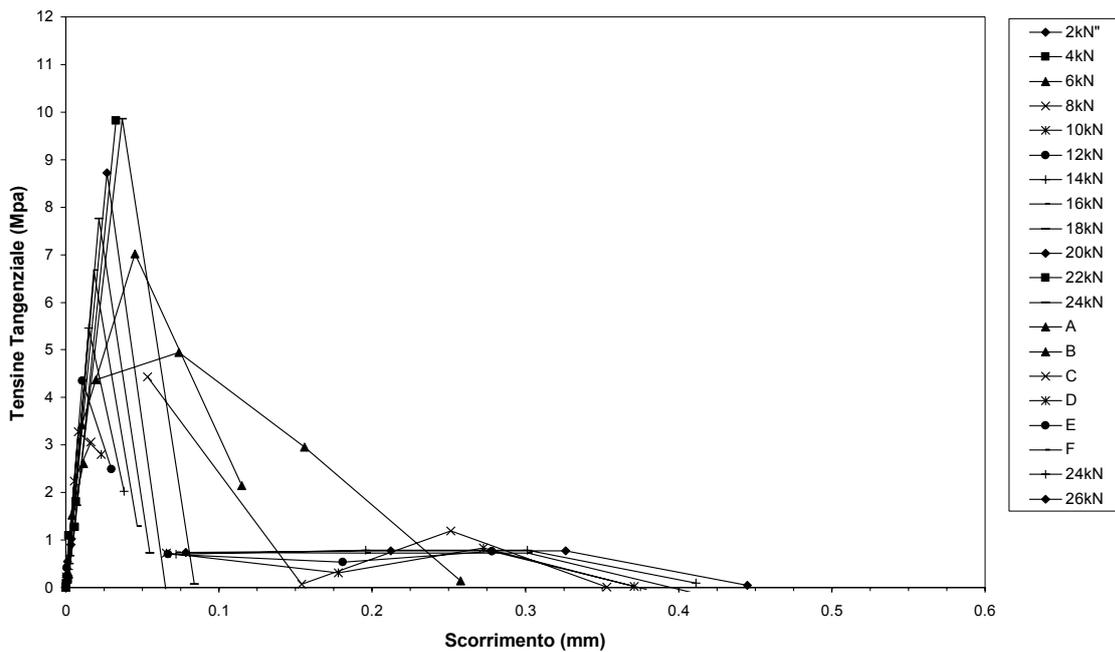


Grafico 3.2.10 Grafico Tensioni-Scorrimento del tessuto laterale

I grafici 3.2.9 e 3.2.10 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

Gli scorrimenti FRP-clt viene ricavata calcolando l'area sottesa dai grafici 3.2.5 e 3.2.6 e considerando soddisfatte le seguenti ipotesi:

- perfetta aderenza (assenza di scorrimento) tra elemento in FRP e calcestruzzo in corrispondenza dell'ultima sezione x_m della quale si è misurata la deformazione (quindi si assume $s(x_m)=0$). Si osserva che tale ipotesi risulta verificata con buona approssimazione se la lunghezza di incollaggio della lamina risulta più lunga della lunghezza effettiva di ancoraggio.
- le deformazioni subite durante la prova dal provino di calcestruzzo si considerano trascurabili rispetto a quelle misurate sull'elemento di rinforzo per cui si assume $\epsilon_{cls}=0$
- andamento lineare delle deformazioni tra due successive sezioni x_i e x_{i+1}

L'equazione per determinare gli scorrimenti è la seguente:

$$s(x') = s(x_{i+1}) - \frac{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}{x_{i+1} - x_i} \cdot \frac{(x_{i+1} - x')^2}{2} + \epsilon_{i+1} \cdot (x_{i+1} - x') \quad (3.2.2)$$

Il valore medio dello scorrimento riportato nei grafici 3.29 e 3.2.10 tra due successive sezioni x_i e x_{i+1} viene calcolato con la semplice formula:

$$s_{i+1/2} = \frac{s_{i+1} + s_i}{2} \quad (3.2.3)$$

Nei grafici si nota che all'aumentare dello scorrimento si ha un incremento di tensione tangenziale fino al raggiungimento del valore corrispondente al carico di delaminazione. Successivamente si ha un ramo decrescente, denominato di "softening" corrispondente a valori elevati dello scorrimento.

Proprio in tale zona dei diagrammi si nota che la tensione tangenziale presenta valori che oscillano attorno allo zero e, in alcuni casi, assume segno negativo.

Il motivo di questi risultati deriva dal fatto che le deformazioni ottenute nella zona in cui già si è verificata la delaminazione del composito non hanno un andamento perfettamente costante, come in teoria dovrebbe essere, ma presentano alcune piccole variazioni.

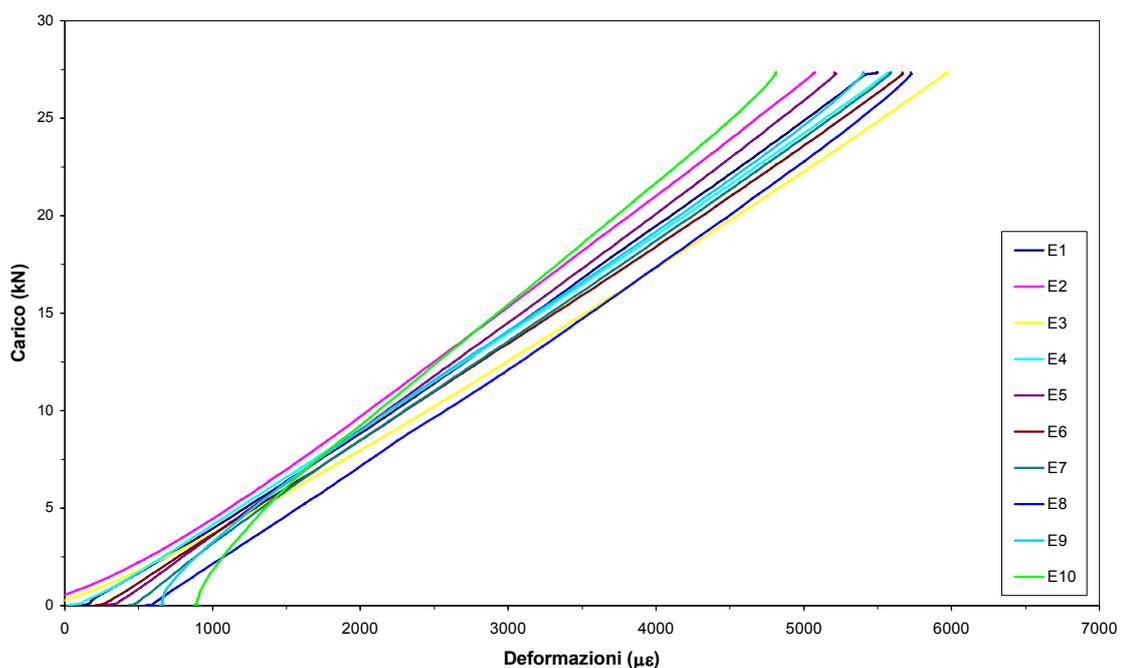


Grafico 3.2.11 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri centrali per il calcolo del modulo

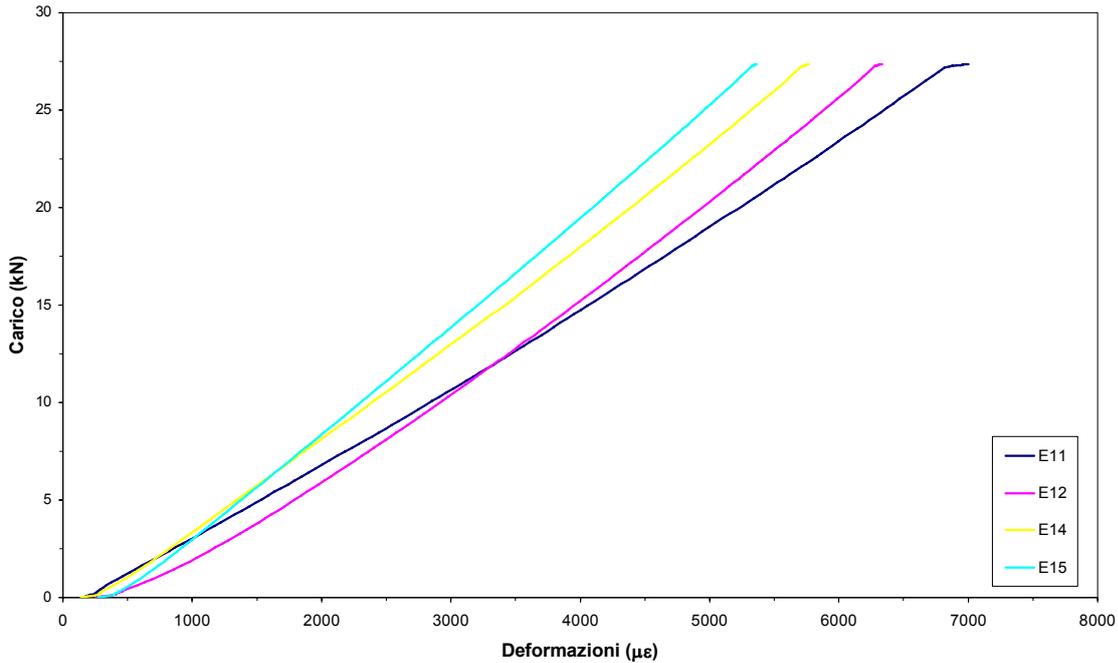


Grafico 3.2.12 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri laterali per il calcolo del modulo

I due grafici precedenti rappresentano i grafici carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico del tessuto con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera del tessuto.

Il modulo elastico ricavato dai due estensimetri nella parte libera risulta 333940 MPa, mentre il modulo ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali e laterali mediato risulta 300385 MPa.

I punti dei grafici tensione tangenziale-scorrimento ottenuti sperimentalmente sono stati utilizzati per calibrare una legge analitica τ -slip proposta da e con equazione:

$$\tau(s) = \tau_{\max} \frac{s}{s_{\max}} \frac{n}{(n-1) + (s/s_{\max})^n} \quad (3.2.4)$$

dove “n” è un parametro che governa il ramo di softening.

Mediante procedura ai minimi quadrati, sono stati definiti i parametri contenuti nell’equazione 3.2.1 e sono stati riportati nelle tabelle 3.2.3 e 3.2.4 rispettivamente per gli estensimetri centrali e per quelli laterali.

I grafici 3.2.13 e 3.2.14 riportano i valori τ -slip degli estensimetri centrali e laterali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica sopra descritta.

Estensimetri centrali				
F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
22500	333940	3.4938	0.027647	7.543

Tabella 3.2.3 Parametri dell'equazione analitica per gli estensimetri centrali

Estensimetri laterali				
F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
22500	333940	2.7499	0.027468	5.778

Tabella 3.2.4 Parametri dell'equazione analitica per gli estensimetri laterali

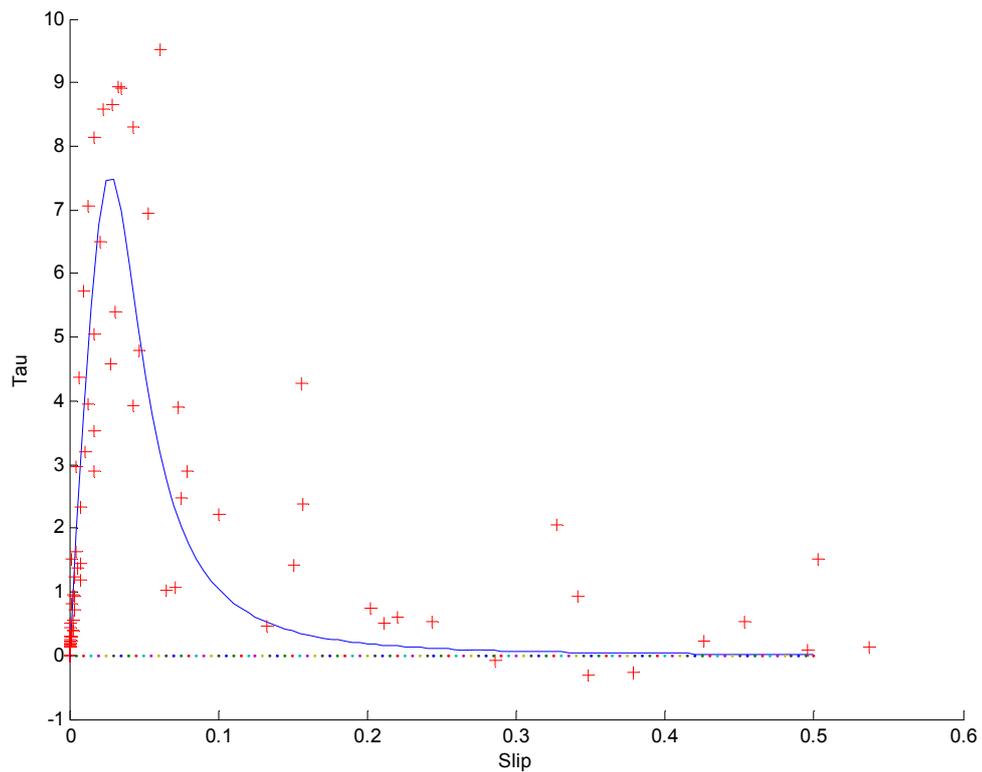


Grafico 3.2.13 Grafico τ -slip e curva interpolante per gli estensimetri centrali

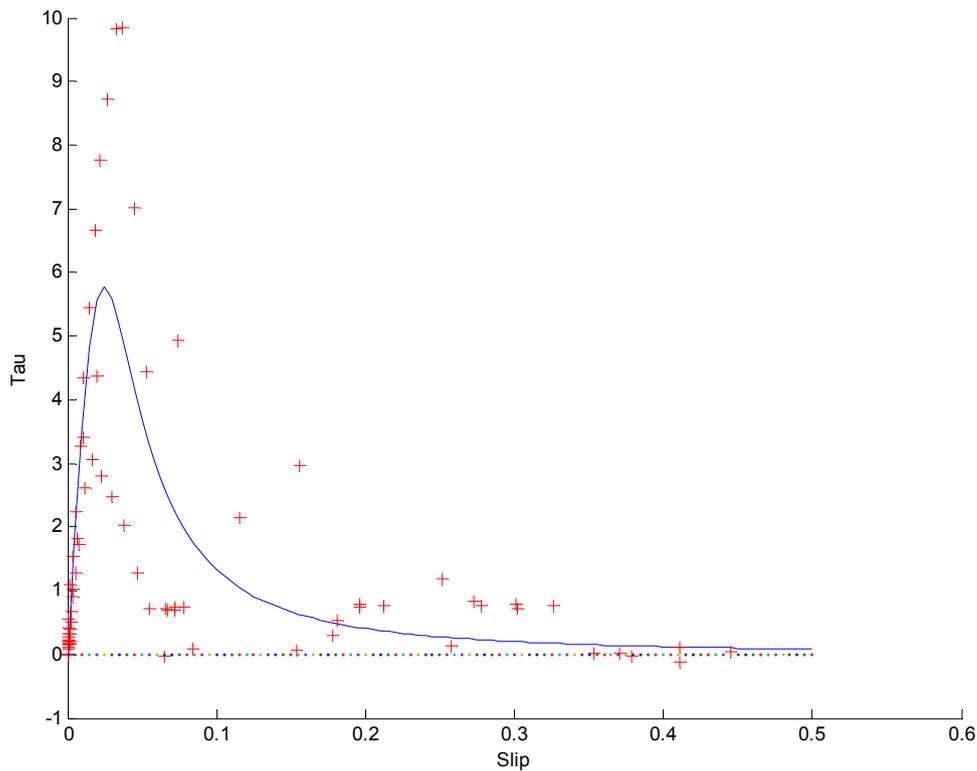


Grafico 3.2.14 Grafico τ -slip e curva interpolante per gli estensimetri laterali

Dai risultati analitici si nota che le tensioni tangenziali sviluppate lungo l'asse centrale del tessuto sono superiori del 25% circa di quelle sviluppate lungo il bordo, questo dimostra che lo stato tensionale e deformativo nelle sezioni ortogonali all'asse del tessuto non sono costanti.

Più in particolare, allontanandosi dal centro, il tessuto perde di rigidità e quindi la capacità di sviluppare resistenza, questo fenomeno si nota anche dai grafici 3.2.5 e 3.2.6, dove la delaminazione si è sviluppata con una deformazione degli estensimetri maggiore sul lato rispetto alla parte centrale.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto, sono facilmente osservabili anche le lamelle di cls inclinate di 45° rispetto alla direzione di applicazione della forza, questo fenomeno rivela il comportamento del cls al di sotto del tessuto

Lo strato superficiale di cls si comporta come una serie di puntoni compressi che si oppongono allo scorrimento del tessuto, la delaminazione avviene per la crisi di questo

sistema provocando un leggero innalzamento del tessuto, questo effetto motiva l'effetto "cappio" notato nel grafico 3.2.1.



Figura 3.2.3 Superficie delaminata



Figura 3.2.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.2.5 Particolare superficie delaminata

3.3 R1B



Figura 3.3.1 Prova R1B

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 17-04-07, quindi il cls ha avuto 313 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 133 cicli di gelo-disgelo.

Per la strumentazione sono stati utilizzati solo i due LVDT T1 e T2.

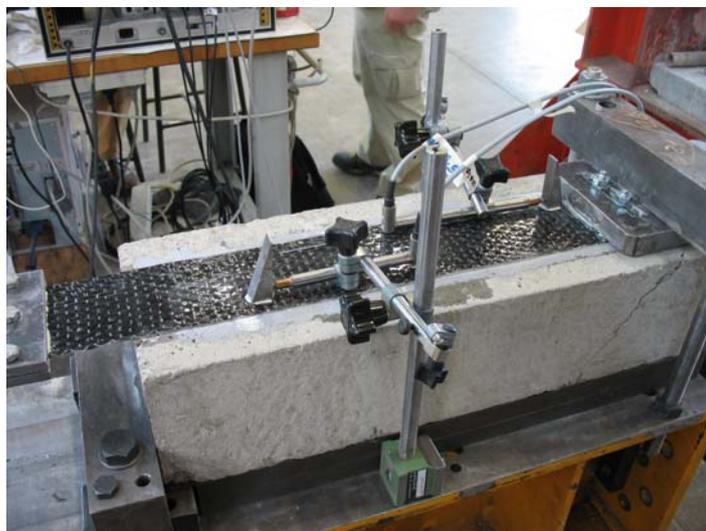


Figura 3.3.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.0 cm
L2	33.0 cm
L3	12.0 cm
L4	7.0 cm

Tabella 3.3.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.3.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

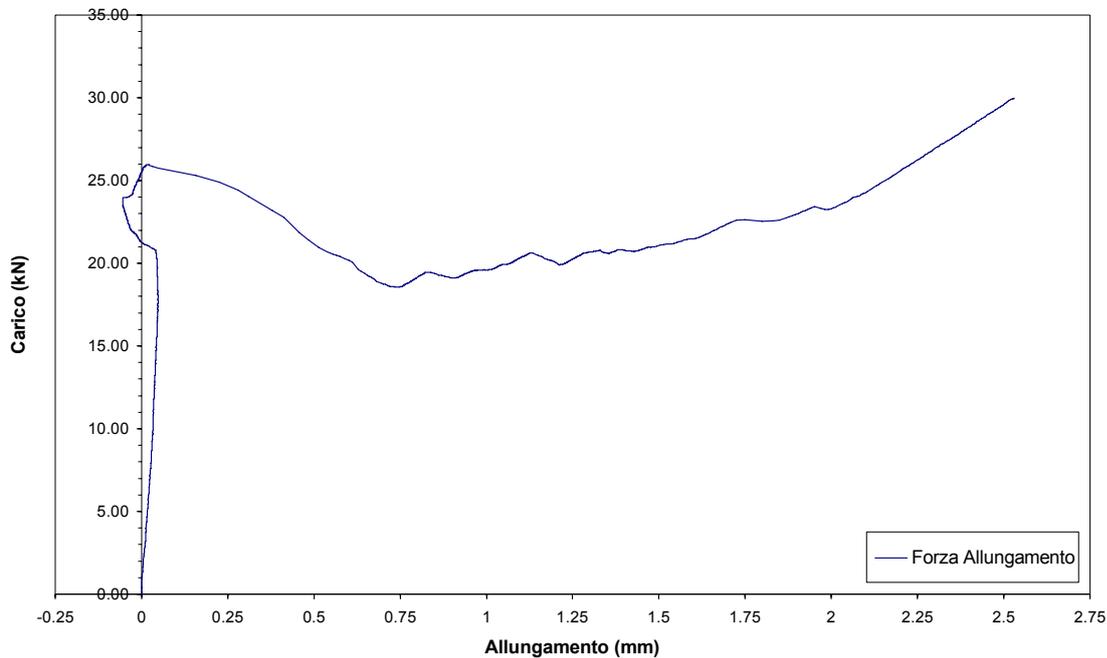


Grafico 3.3.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.3.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare.

Al raggiungimento della forza minima di delaminazione il grafico inverte la pendenza fino a raggiungere valori negativi.

Il motivo di questo fenomeno è che il tessuto, durante la delaminazione, si è sollevato, provocando una rotazione del contrasto dell'LVDT T1.

Raggiunto il carico che attiva di delaminazione, si nota un plateau abbastanza costante, infine raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 25.8 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 19.15 kN.

Non essendo stati previsti estensimetri non è possibile ricavare il modulo elastico.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto.

Si nota la centro del tessuto una zona in cui il distacco è avvenuto per la crisi dello strato di resina.



Figura 3.3.3 Superficie delaminata



Figura 3.3.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.3.5 Particolare superficie delaminata

3.4 R6A



Figura 3.4.1 Prova R6A

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 31-05-07, quindi il cls ha avuto 357 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 409 cicli di gelo-disgelo.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 13 estensimetri con due estensimetri per il modulo sul tessuto.

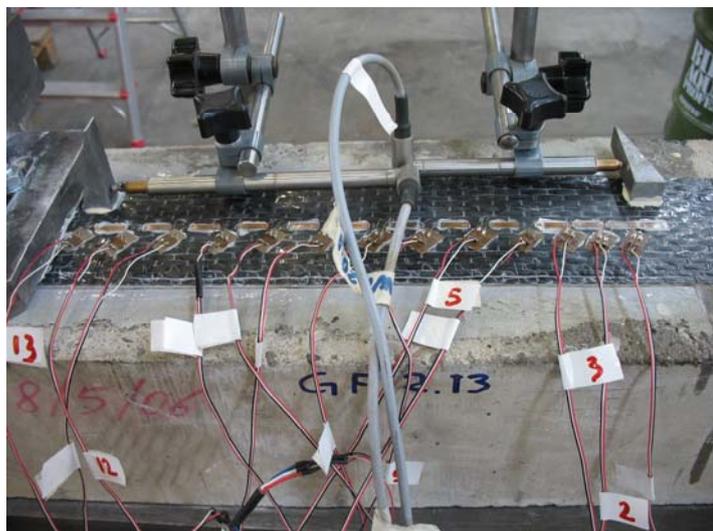


Figura 3.4.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: PFL-10-11 da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.0 cm
L2	32.9 cm
L3	12.1 cm
L4	6.7 cm

Tabella 3.4.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	9	E7
1	T1, WA 10.1	10	E8
2	T2, WA 20.9	11	E9
3	E1	12	E10
4	E2	13	E11
5	E3	14	E12
6	E4	15	E13
7	E5	16	E LAM SU
8	E6	17	E LAM GIU

Tabella 3.4.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

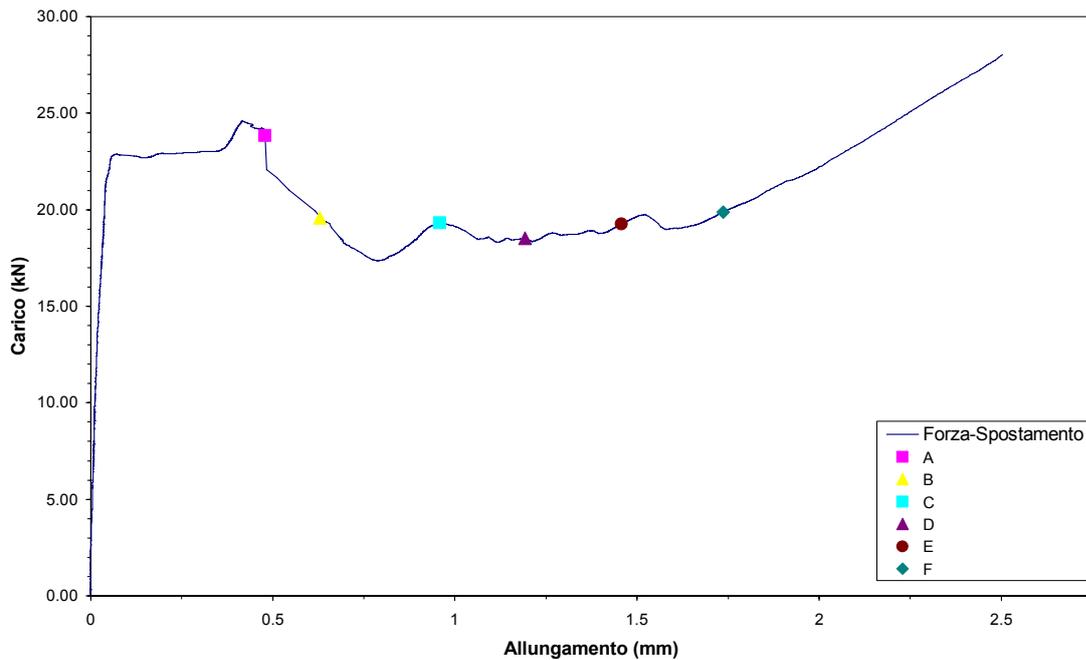


Grafico 3.4.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.4.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare.

Raggiunto il carico di delaminazione, si ha un abbattimento del carico e successivamente un plateau relativamente costante.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

I punti A,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 24.49 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 17.76 kN.

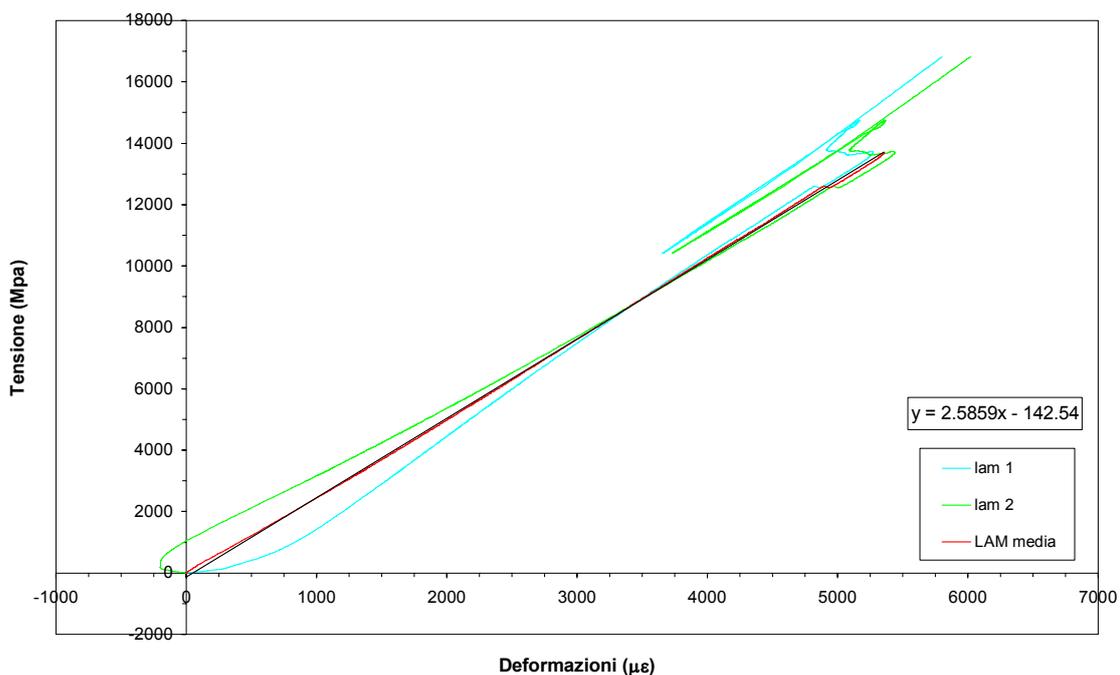


Grafico 3.4.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.4.2 sono riportate le deformazioni del tessuto misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva del tessuto in FRP che in questo caso è di 0.166 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico del tessuto è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato del tessuto pari a 258590 MPa.

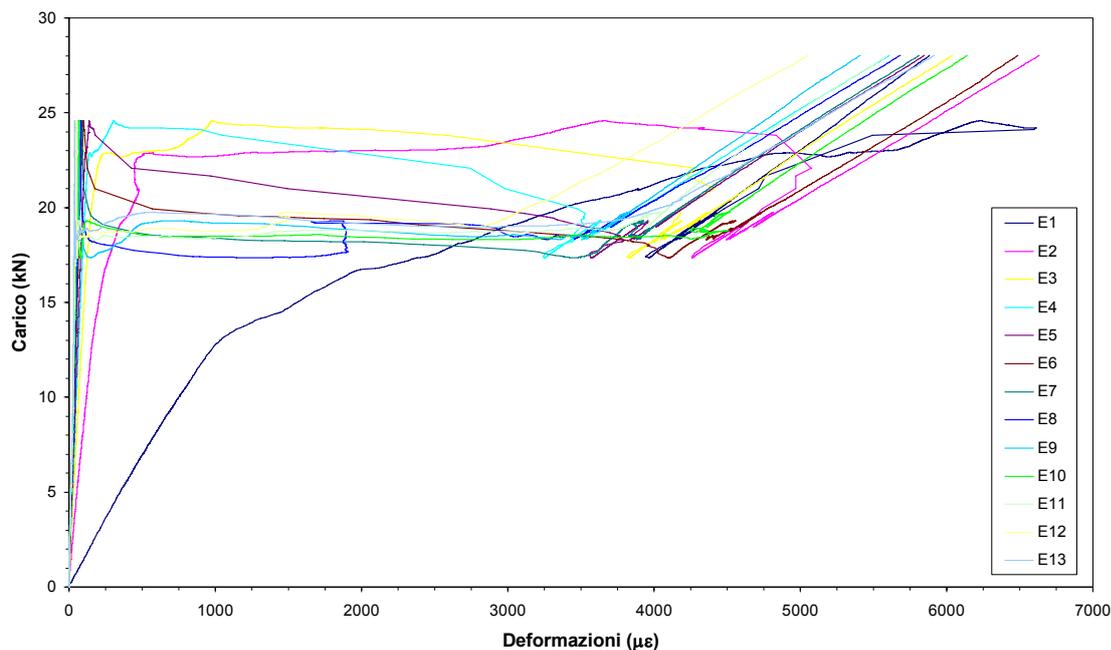


Grafico 3.4.3 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.4.3 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sul tessuto in funzione del carico misurato dalla cella di carico. Ne grafico si nota che i primi estensimetri, al momento della delaminazione, perdono parte del carico, il fenomeno è dovuto alla traslazione del punto di inizio dell'incollaggio. In quel momento si passa da una situazione in cui la rigidità del sistema è data dal composito e dal cls, ad una situazione in cui la rigidità dipende solamente dal composito, questo comporta una diminuzione del carico e un aumento della deformabilità.

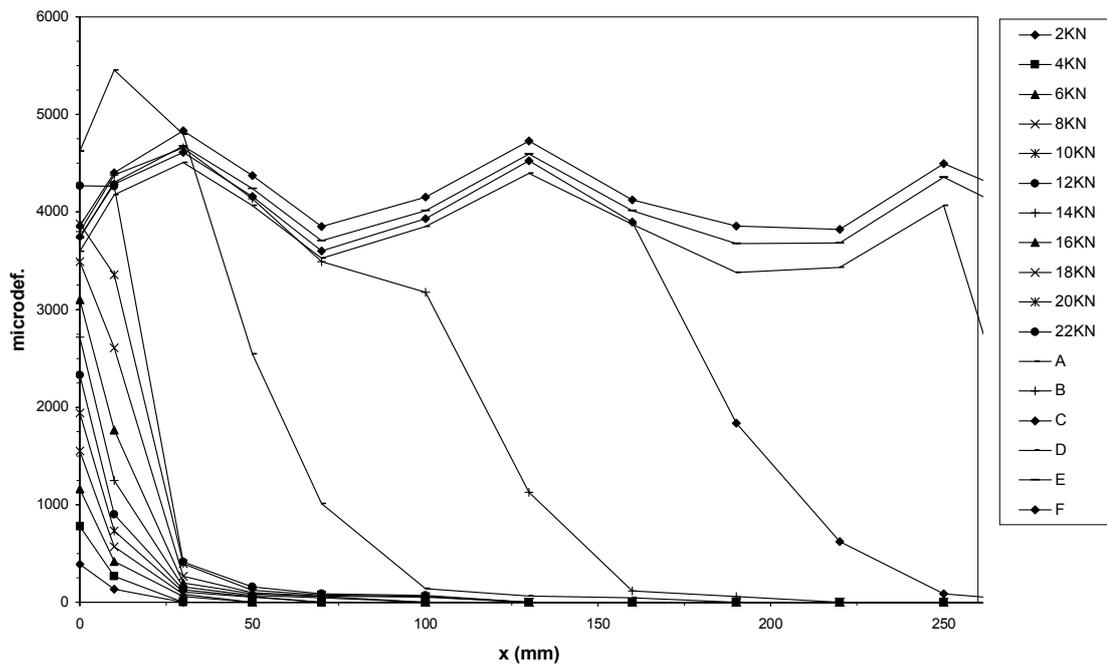


Grafico 3.4.4 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.4.4 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse del tessuto.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

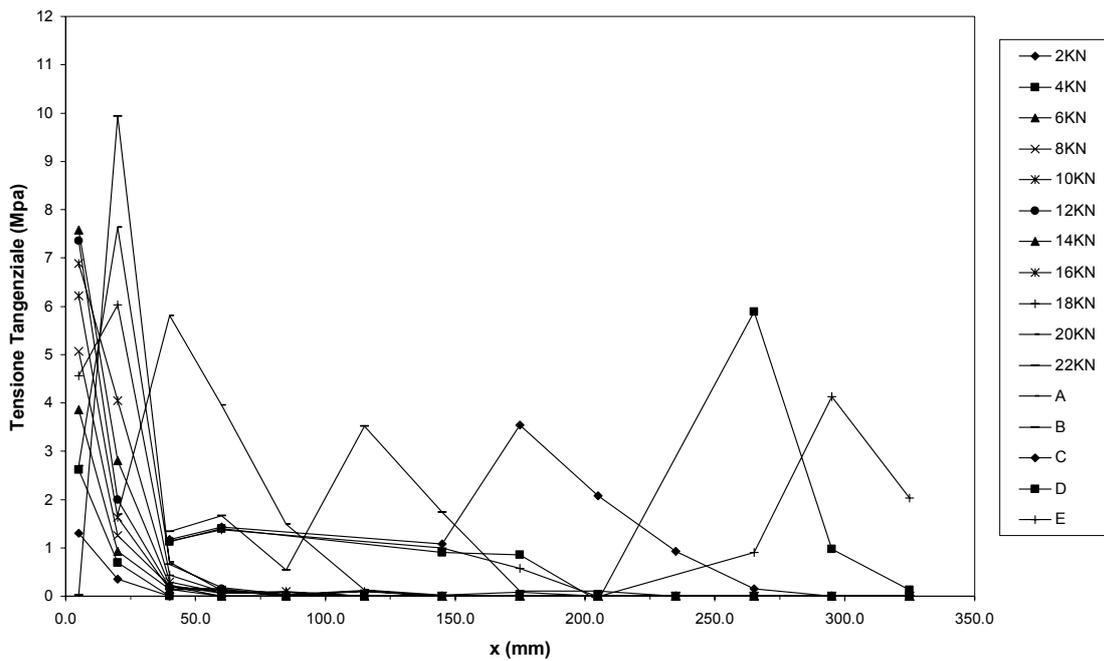


Grafico 3.4.5 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.4.5 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

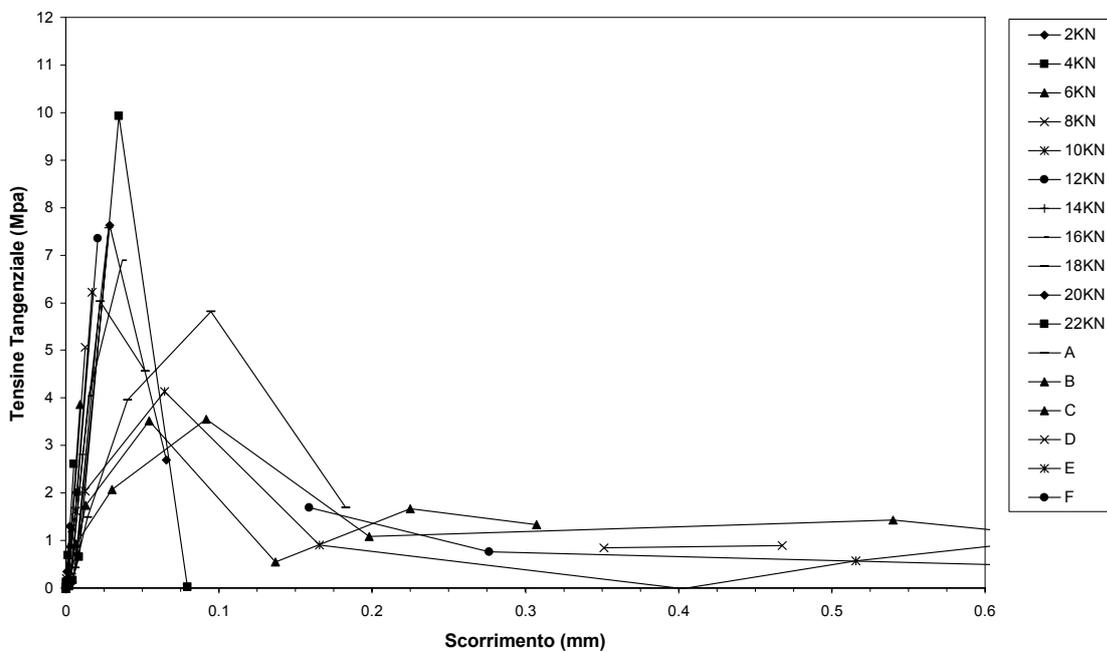


Grafico 3.4.6 Grafico Tensioni-Scorrimento del tessuto

Il grafico 3.4.6 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

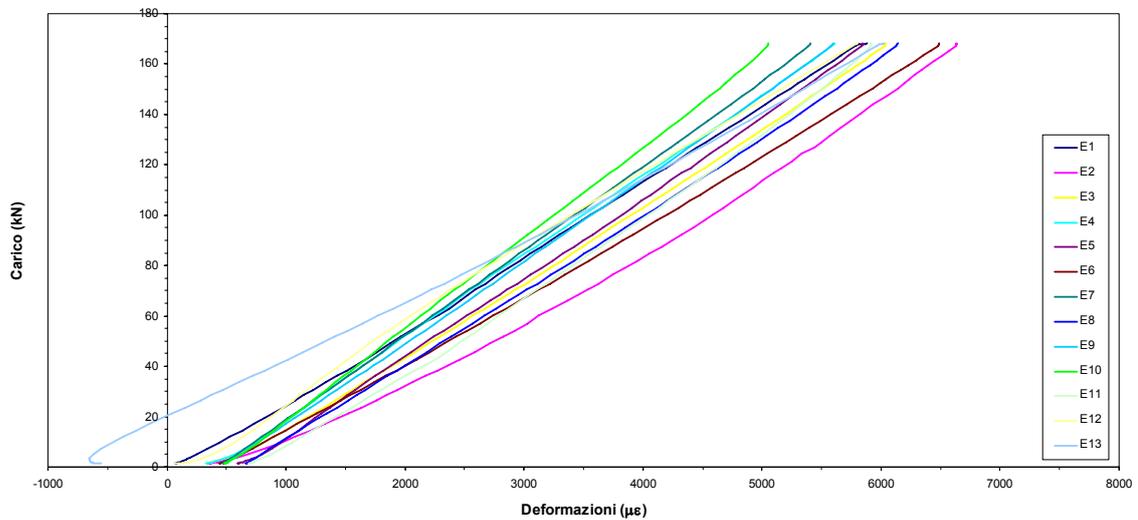


Grafico 3.4.7 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri centrali per il calcolo del modulo

Il grafico 3.4.7 rappresenta il rapporto carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico del tessuto con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera del tessuto.

Il modulo elastico ricavato dai due estensimetri nella parte libera risulta 258590 MPa, mentre il modulo ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali mediato risulta 309462.5 MPa.

Il grafico 3.4.8 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.4.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
19270	309462.5	3.251	0.023963	6.1131

Tabella 3.4.3 Parametri dell'equazione analitica

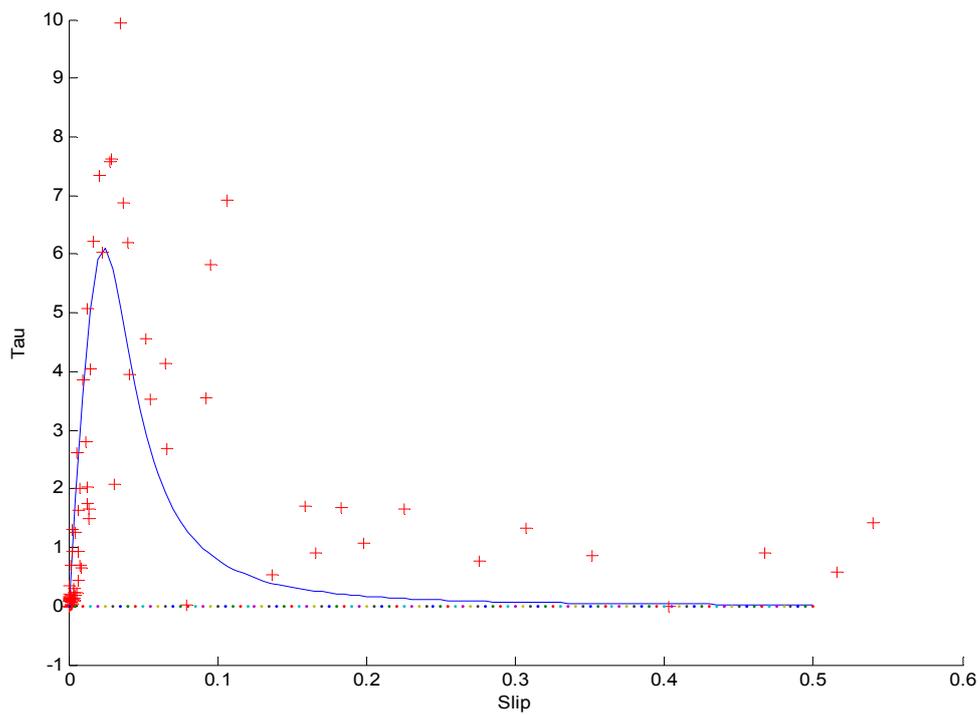


Grafico 3.4.8 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto.



Figura 3.4.3 Superficie delaminata



Figura 3.4.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.4.5 Particolare superficie delaminata



Figura 3.4.6 Particolare superficie delaminata

3.5 R6B



Figura 3.5.1 Prova R6B

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 31-07-07, quindi il cls ha avuto 418 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 409 cicli di gelo-disgelo.

Per la strumentazione sono stati installati i due estensimetri per il modulo sul tessuto.



Figura 3.5.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: PFL-10-11 da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.2 cm
L2	32.4 cm
L3	12.4 cm
L4	6.7 cm

Tabella 3.5.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	3	E LAM SU
1	T1, WA 10.1	4	E LAM GIU
2	T2, WA 20.9	5	

Tabella 3.5.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

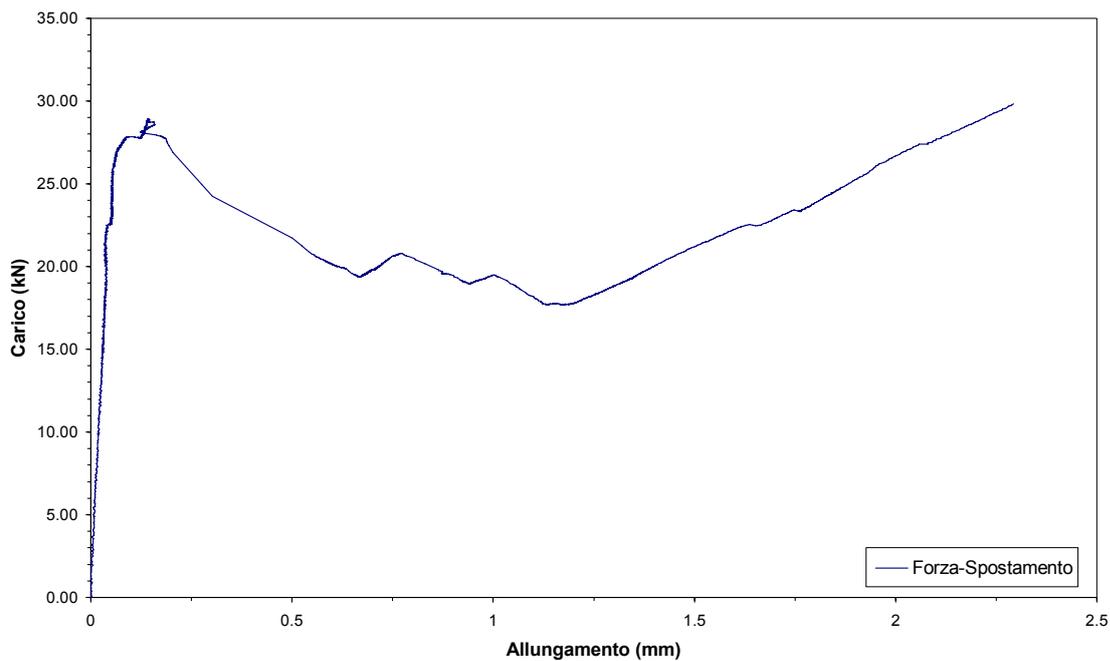


Grafico 3.5.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.5.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare.

Raggiunto il carico di delaminazione, si nota un piccolo “cappio”, dovuto alla rotazione del contrasto dell’LVDT T1, il difetto risulta notevolmente attenuato rispetto alle altre prove, questo perché il contrasto è stato incollato sul suo lato in modo tale da ruotare il meno possibile.



Figura 3.5.3 Particolare contrasto anteriore

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare; in questa fase l’unico elemento resistente è il tessuto di FRP, ancorato al supporto all’estremità del provino.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 28.04 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 17.76 kN.

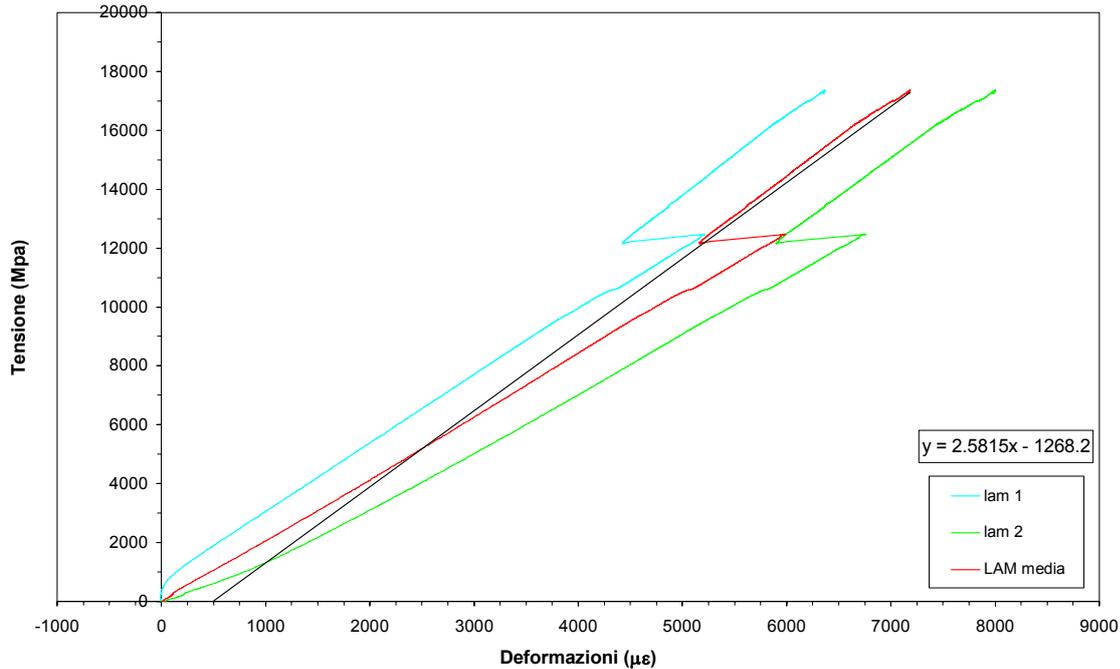


Grafico 3.5.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.5.2 sono riportate le deformazioni del tessuto misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva del tessuto in FRP che in questo caso è di 0.166 cm^2 .

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico del tessuto è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato del tessuto pari a 258150 MPa.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto.



Figura 3.5.4 Superficie delaminata



Figura 3.5.5 Particolare superficie delaminata



Figura 3.5.6 Particolare superficie delaminata



Figura 3.5.7 Particolare superficie delaminata

3.6 R7A



Figura 3.6.1 Prova R7A

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 23-02-07, quindi il cls ha avuto 260 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il provino è stato provato incondizionato.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 10 estensimetri e i due estensimetri per il modulo sul tessuto.

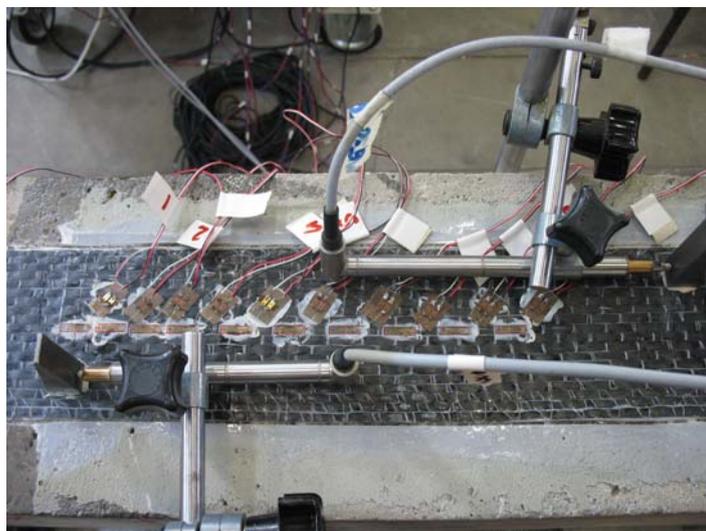


Figura 3.6.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: 10/120 LY da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.7 cm
L2	32.3 cm
L3	12.0 cm
L4	6.6 cm

Tabella 3.6.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	8	E6
1	T1, WA 10.1	9	E7
2	T2, WA 20.9	10	E8
3	E1	11	E9
4	E2	12	E10
5	E3	13	E LAM SU
6	E4	14	E LAM GIU
7	E5	15	

Tabella 3.6.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

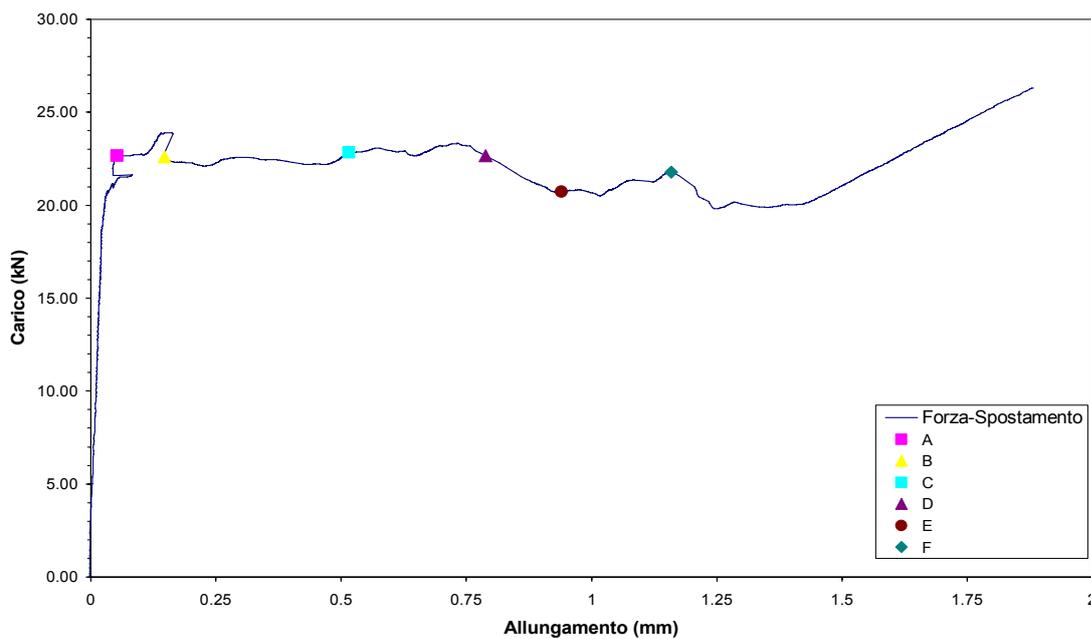


Grafico 3.6.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.6.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, successivamente la delaminazione si sviluppa con un carico praticamente costante

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

I punti A,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 23.84 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 19.87 kN.

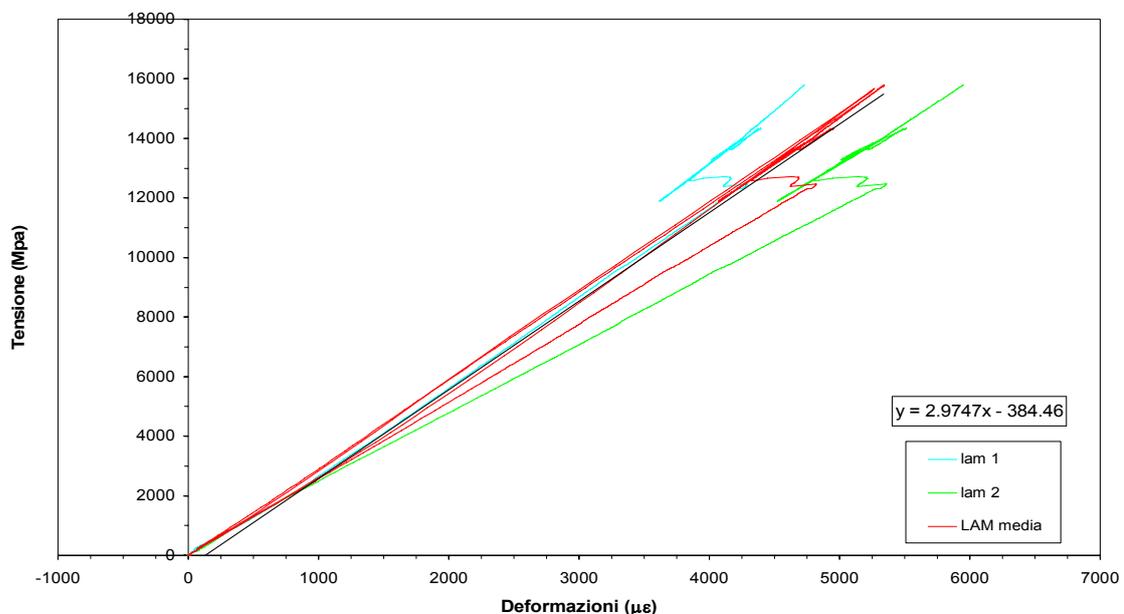


Grafico 3.6.2 Grafico Tensione–Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.6.2 sono riportate le deformazioni del tessuto misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva del tessuto in FRP che in questo caso è di 0.166 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico del tessuto è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato del tessuto pari a 297470 MPa.

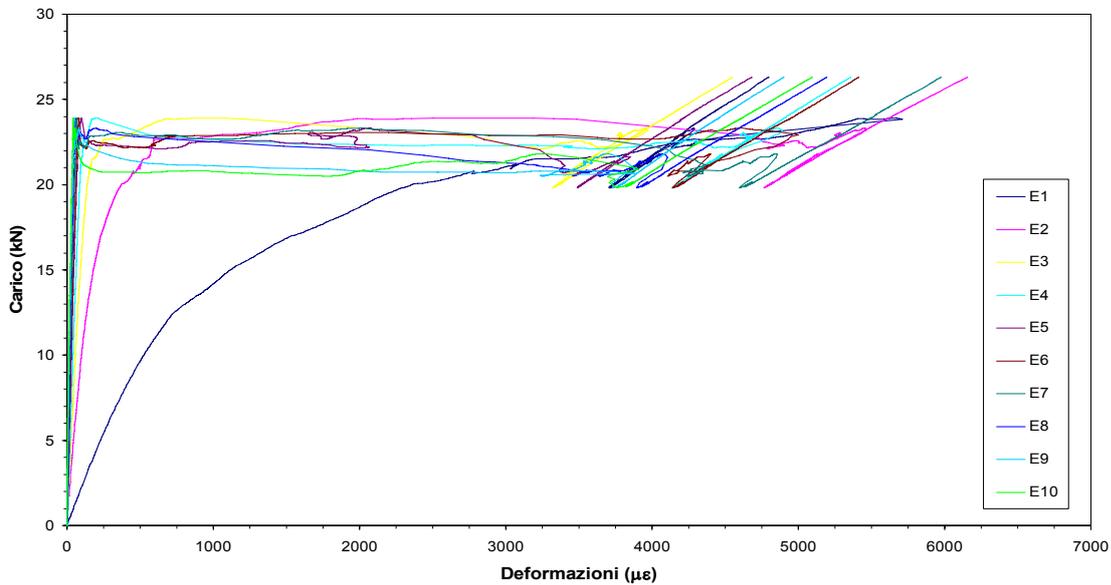


Grafico 3.6.3 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.6.3 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sul tessuto in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

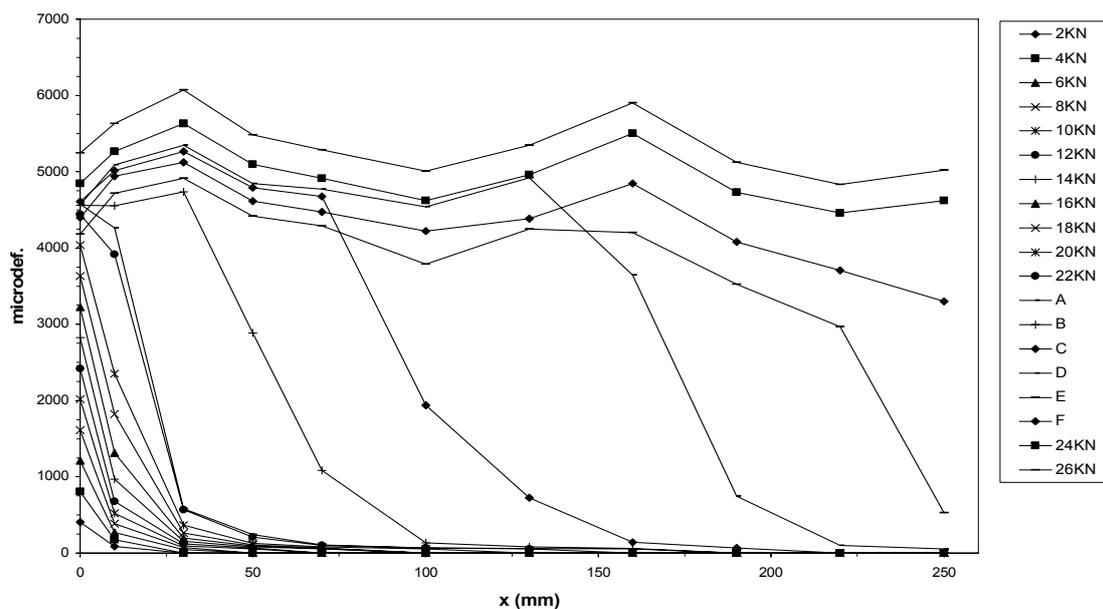


Grafico 3.6.4 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.6.4 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse del tessuto.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

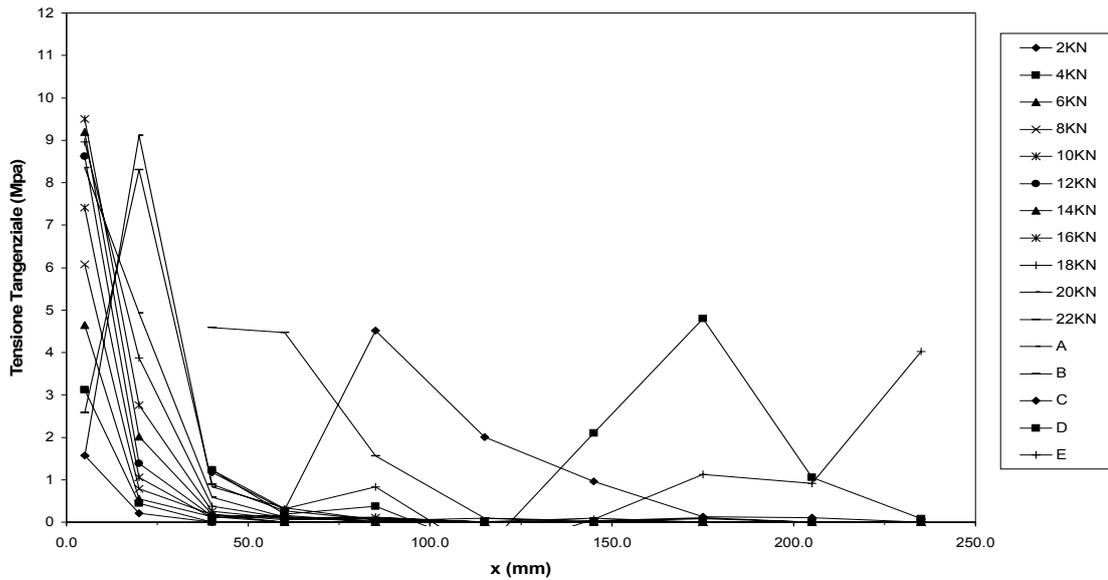


Grafico 3.6.5 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.6.5 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

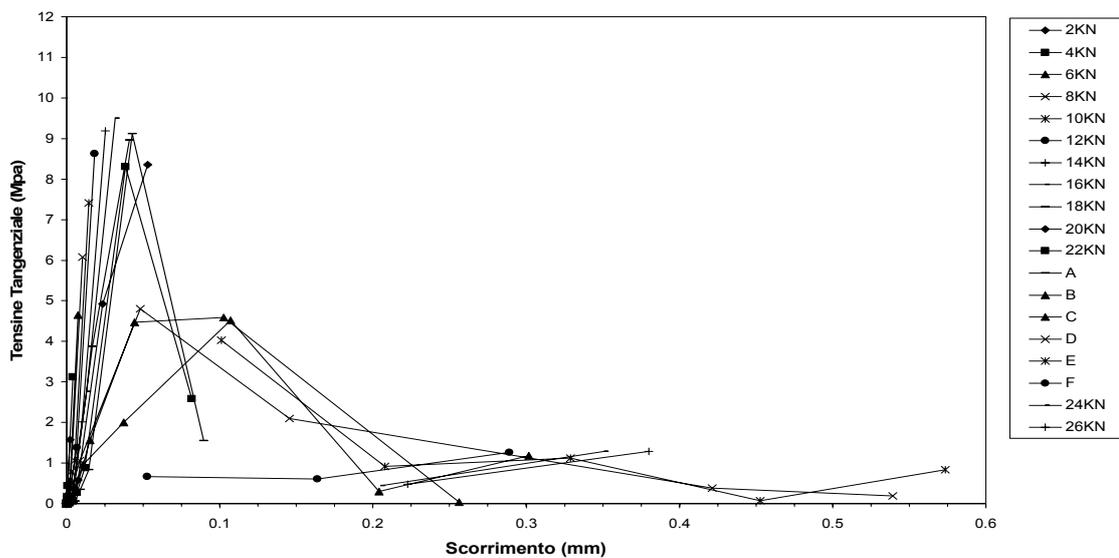


Grafico 3.6.6 Grafico Tensioni-Scorrimento del tessuto

Il grafico 3.6.6 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

Il grafico 3.6.7 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.6.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
22000	297470	3.5933	0.036282	6.4337

Tabella 3.6.3 Parametri dell'equazione analitica

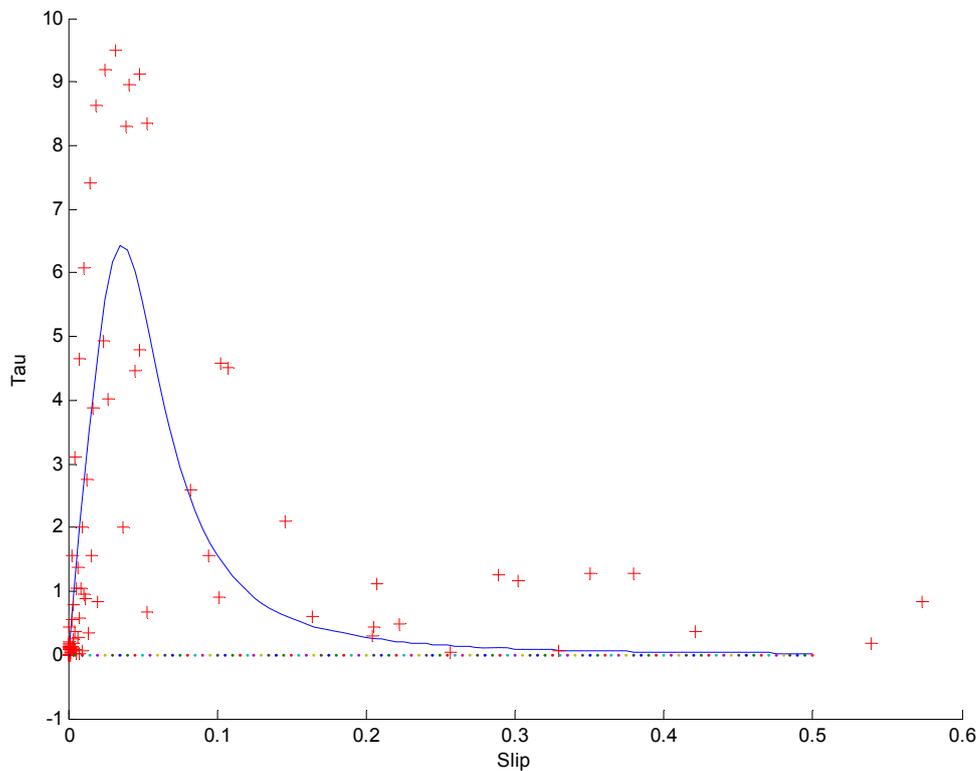


Grafico 3.6.7 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto.



Figura 3.6.3 Superficie delaminata



Figura 3.6.4 Particolare superficie delaminata

3.7 R7B



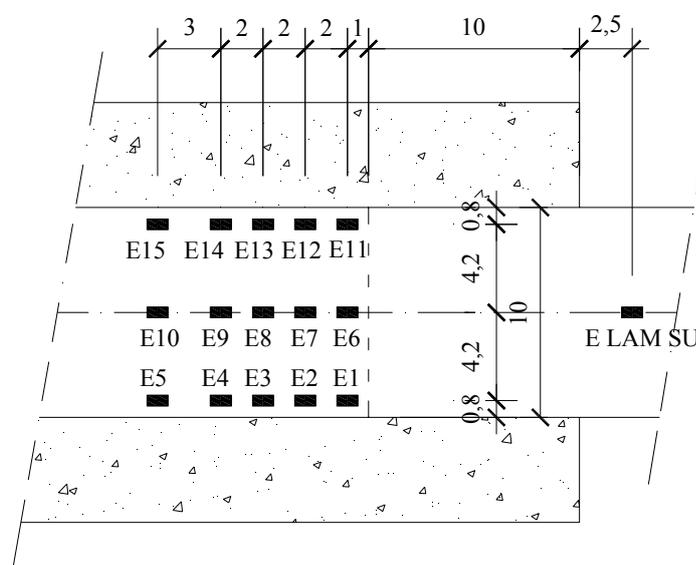
Figura 3.7.1 Prova R7B

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 13-03-07, quindi il cls ha avuto 278 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il provino è stato provato incondizionato.

Per la strumentazione sono stati utilizzati, oltre ai due estensimetri sul tessuto libero per valutare il modulo elastico, 3 file da 5 estensimetri l'una disposte una sull'asse del tessuto e due sui bordi parallelamente all'asse con il seguente schema:



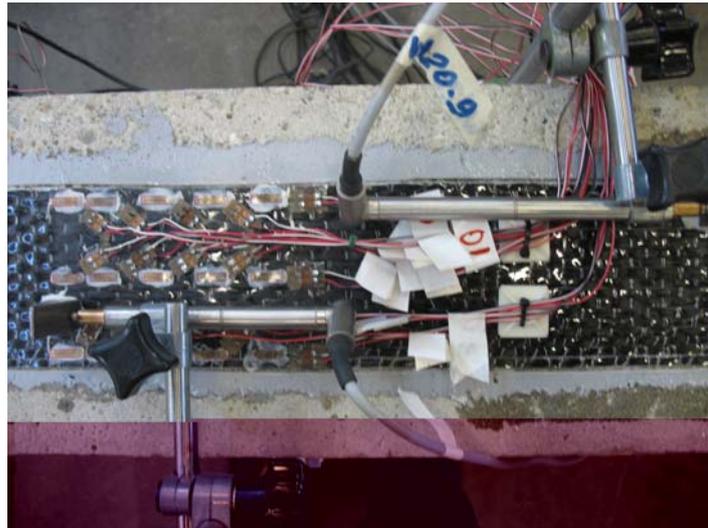


Figura 3.7.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: 10/120 LY da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.0 cm
L2	33.3 cm
L3	11.7 cm
L4	7.0 cm

Tabella 3.7.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	10	E8
1	T1, WA 10.1	11	E9
2	T2, WA 20.9	12	E10
3	E1	13	E11
4	E2	14	E12
5	E3	15	E13
6	E4	16	E14
7	E5	17	E15
8	E6	18	E LAM SU
9	E7	19	E LAM GIU

Tabella 3.7.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

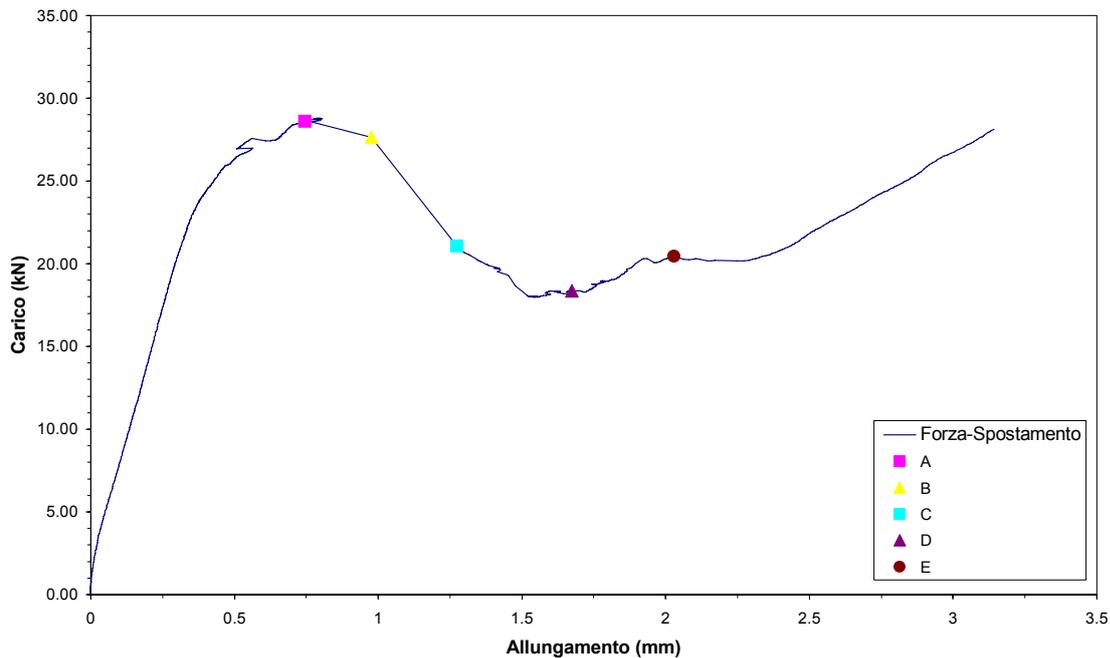


Grafico 3.7.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.7.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale elastico-lineare ma con una rigidezza inferiore rispetto alla prova R7A.

Dal carico di delaminazione, si è avuto un abbattimento del carico del 40% circa, e poi un breve plateau.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

I punti A,B,C,D,E rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 28.77 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 18.40 kN.

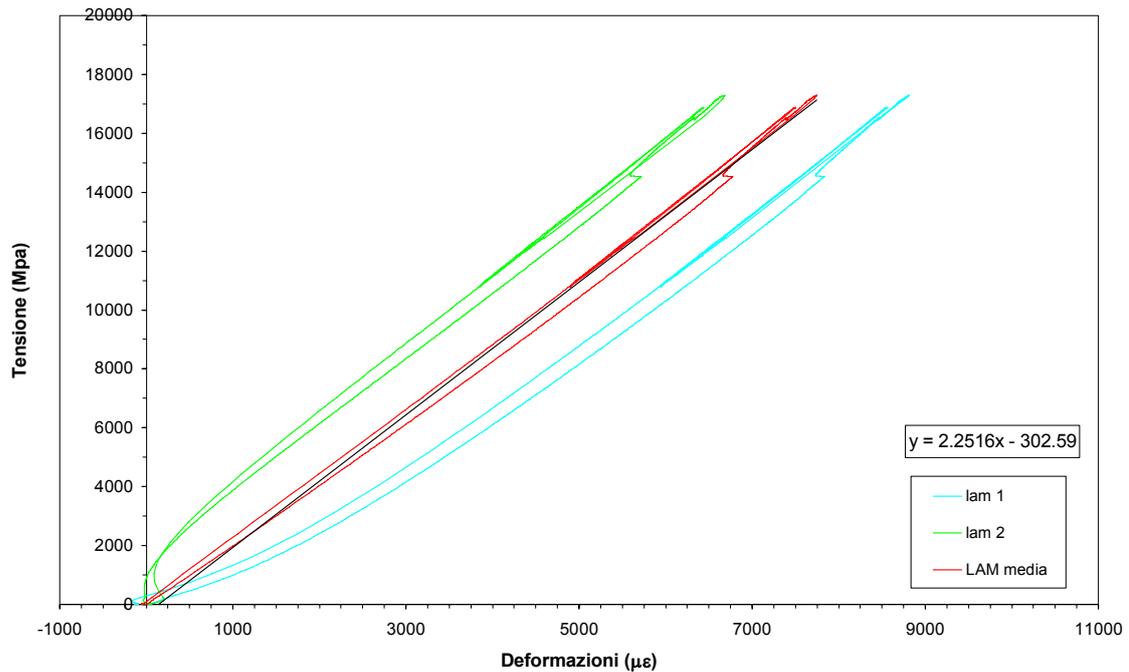


Grafico 3.7.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.7.2 sono riportate le deformazioni del tessuto misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva del tessuto in FRP che in questo caso è di 0.166 cm^2 .

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico del tessuto è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato del tessuto pari a 225160 MPa.

Di seguito verranno descritti i grafici delle 3 file di estensimetri, per chiarezza saranno identificati come "estensimetri lato DX" gli estensimetri 1-5, "estensimetri centrali" gli estensimetri 6-10 e "estensimetri lato SX" gli estensimetri 11-15.

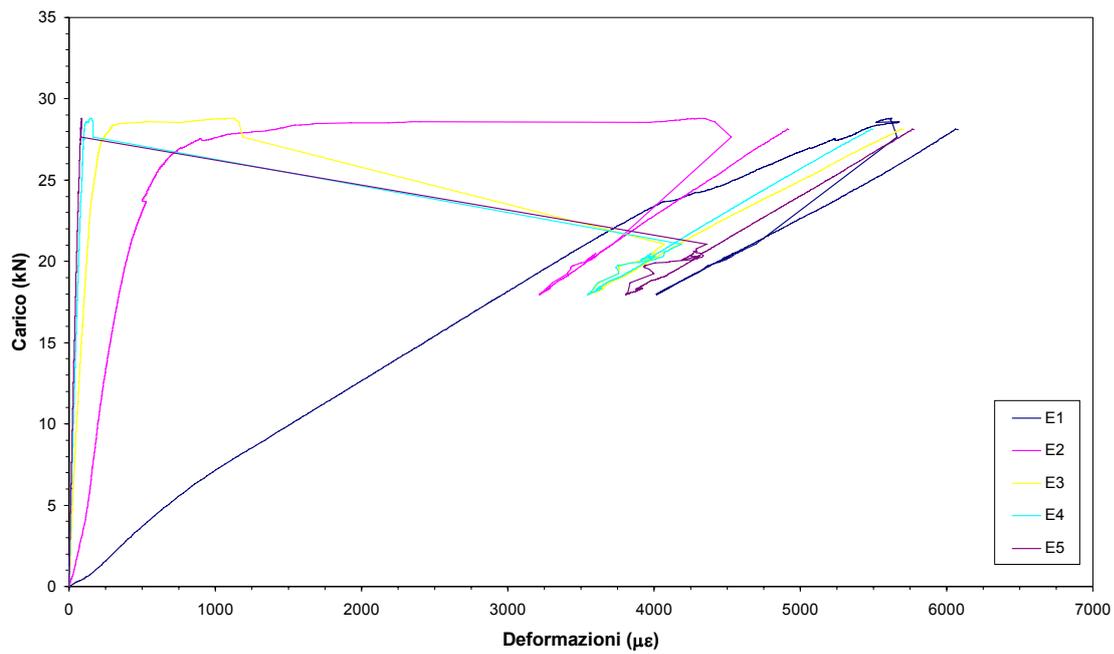


Grafico 3.7.3 Grafico Carico–Deformazioni degli estensimetri lato DX

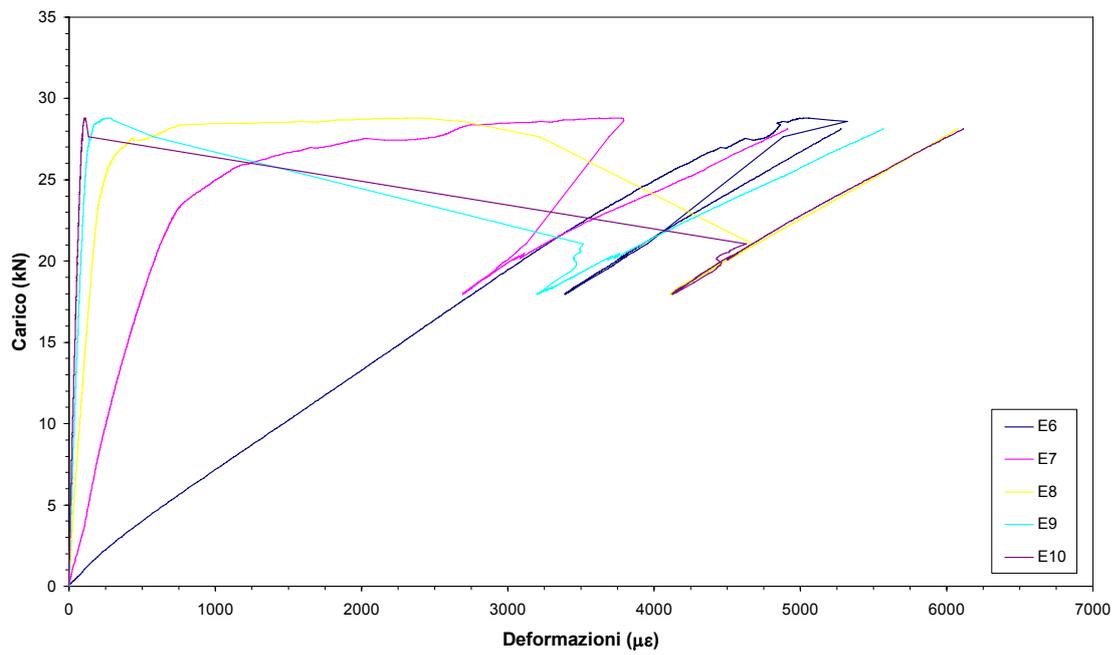


Grafico 3.7.4 Grafico Carico–Deformazioni degli estensimetri centrali

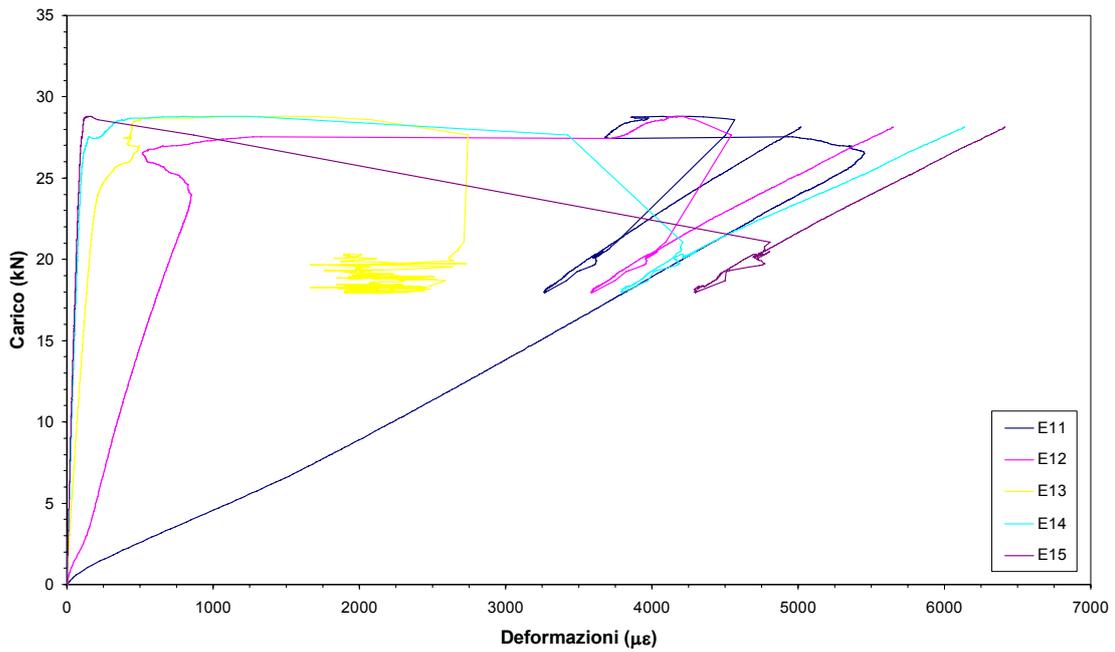


Grafico 3.7.5 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri lato SX

I grafici 3.7.3, 3.7.4 e 3.7.5 sono stati ottenuti rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sul tessuto in funzione del carico misurato dalla cella di carico. Durante la prova, l'estensimetro ha smesso di funzionare quasi al termine della delaminazione.

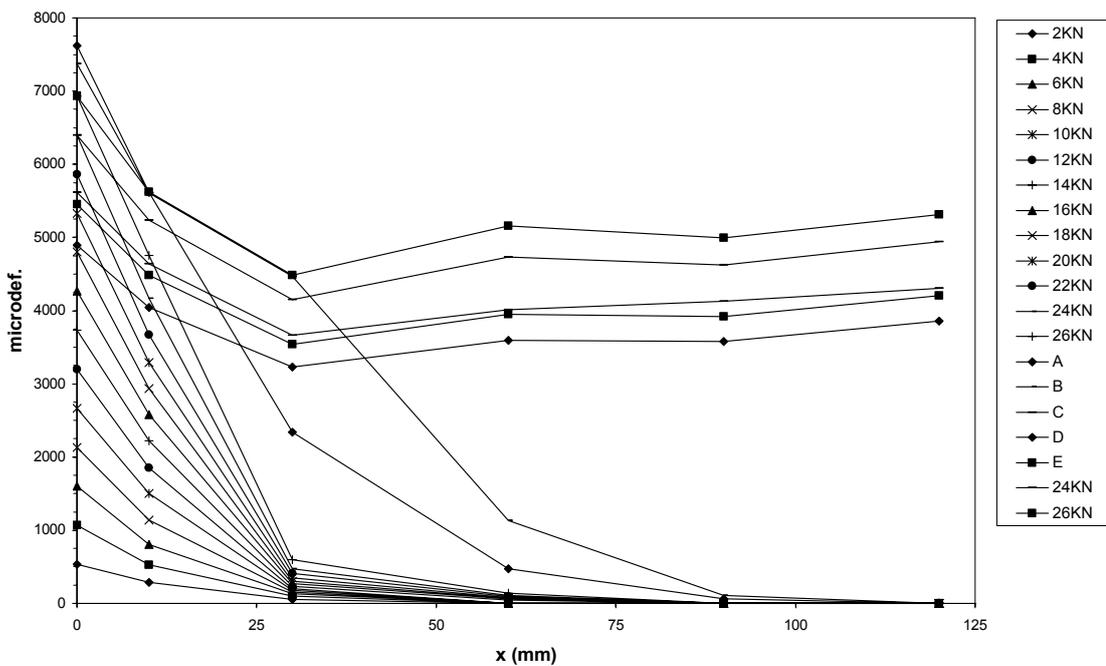


Grafico 3.7.6 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto nel lato DX

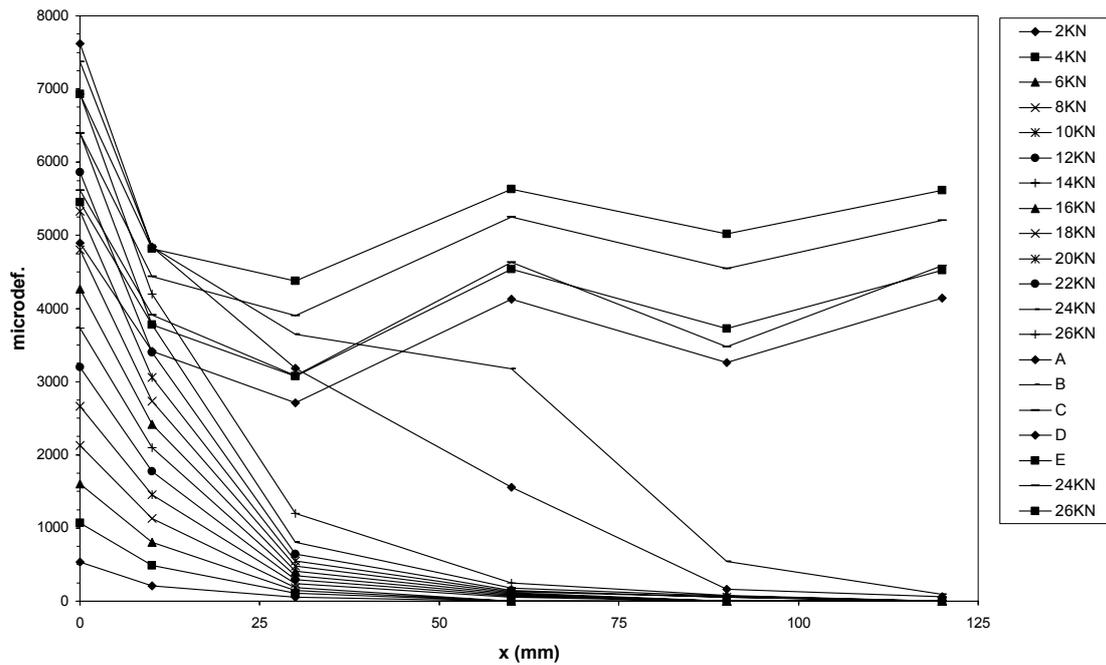


Grafico 3.7.7 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto al centro

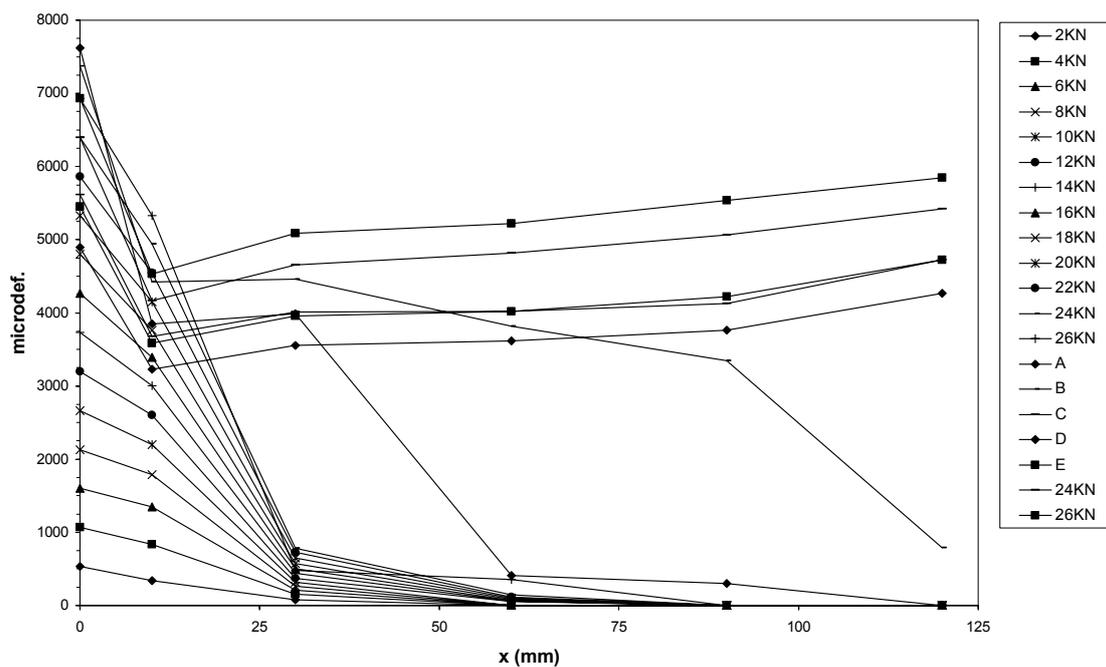


Grafico 3.7.8 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto nel lato SX

I grafici 3.7.6, 3.7.7 e 3.7.8 mostrano le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo i tre assi previsti nel tessuto.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

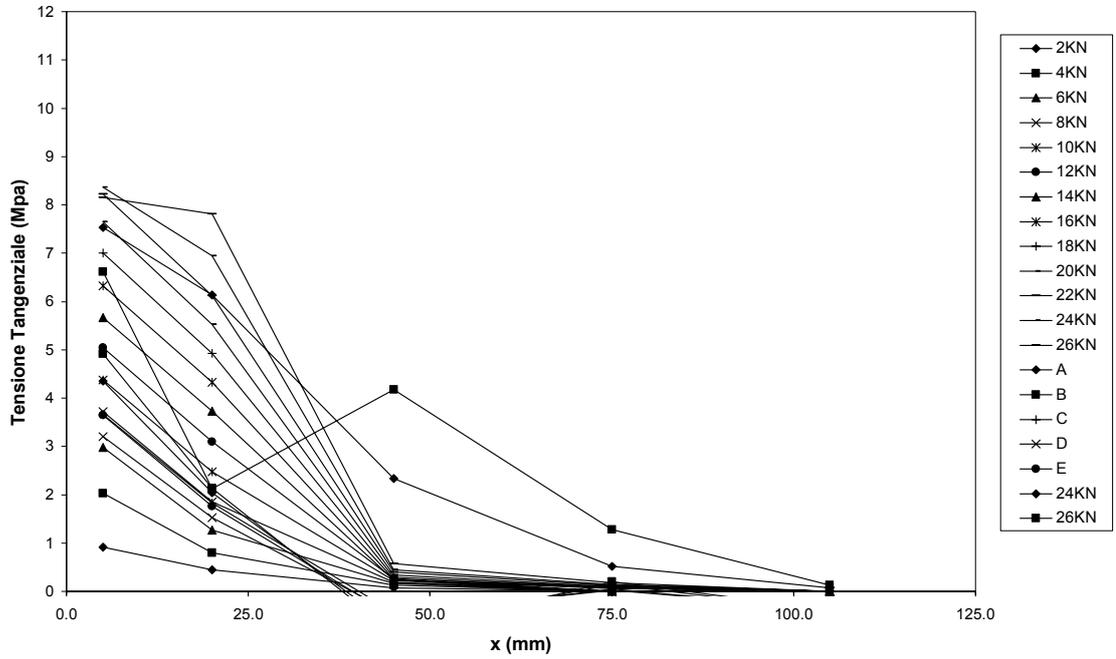


Grafico 3.7.9 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza del tessuto nel lato DX

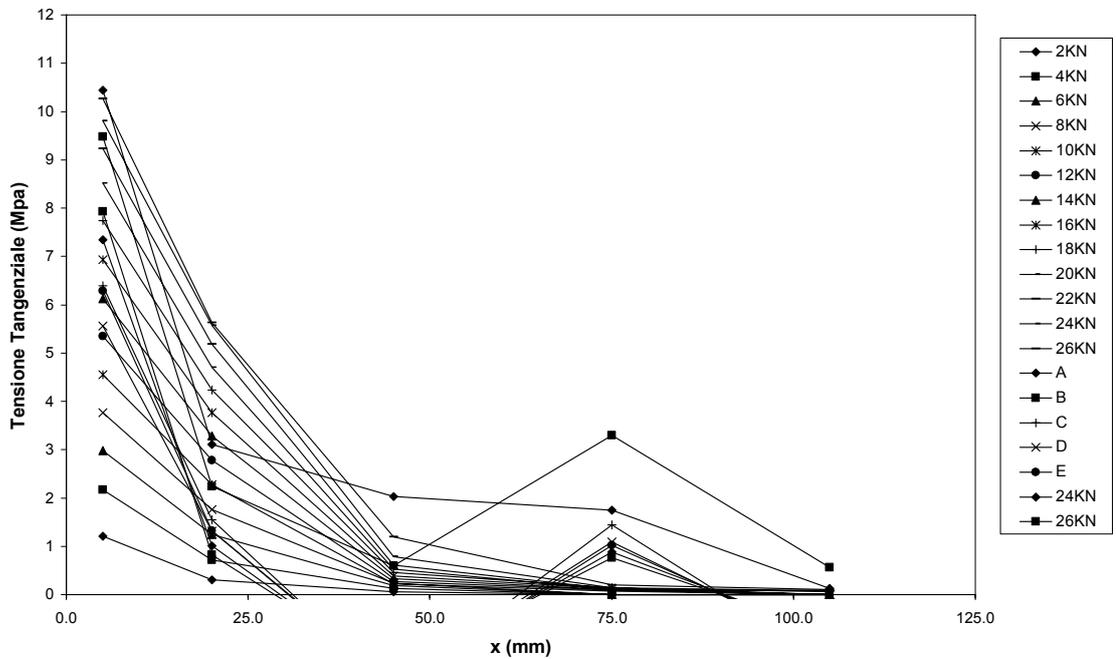


Grafico 3.7.10 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza del tessuto al centro

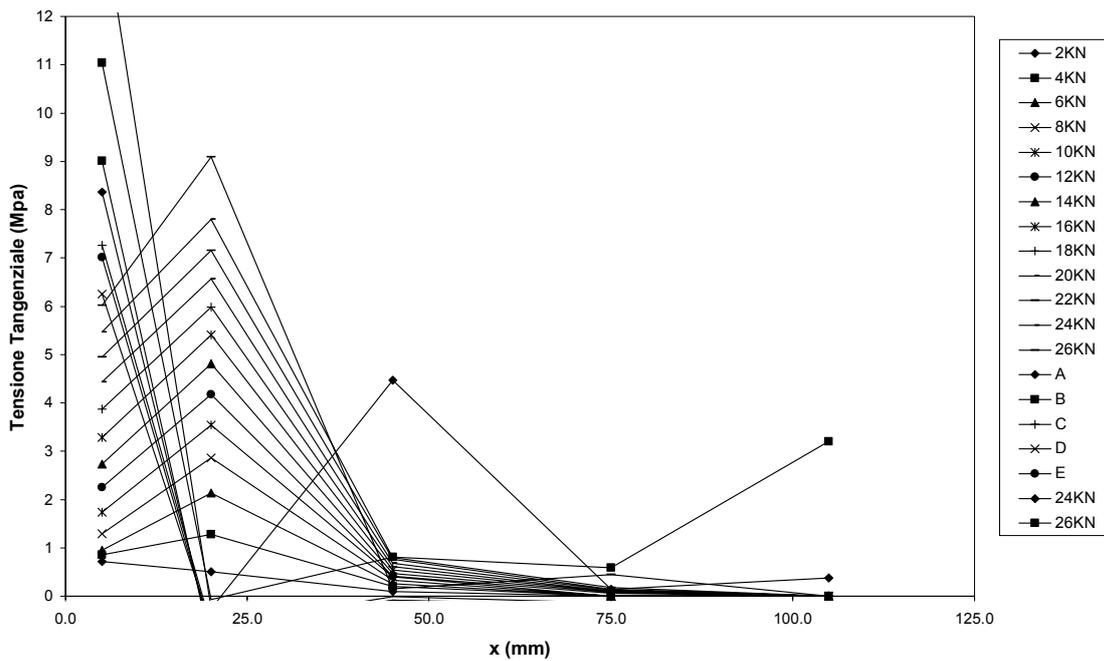


Grafico 3.7.11 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza del tessuto nel lato SX

I grafici 3.7.9, 3.7.10 e 3.7.11 mostrano gli andamenti delle tensioni tangenziali lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

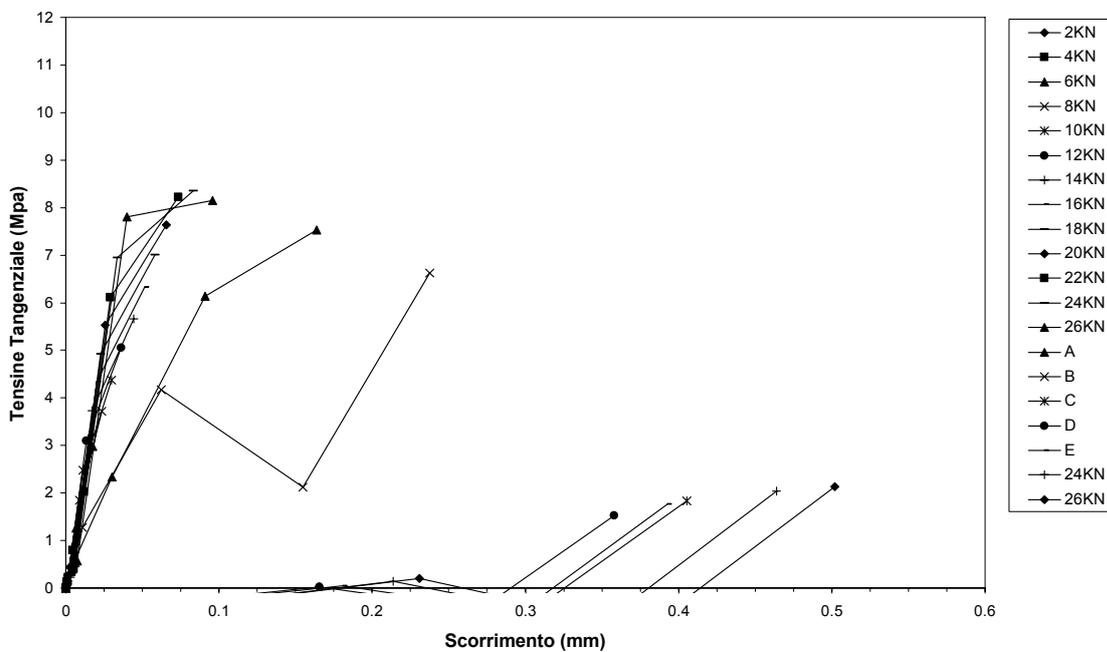


Grafico 3.7.12 Grafico Tensioni–Scorrimento del tessuto nel lato DX

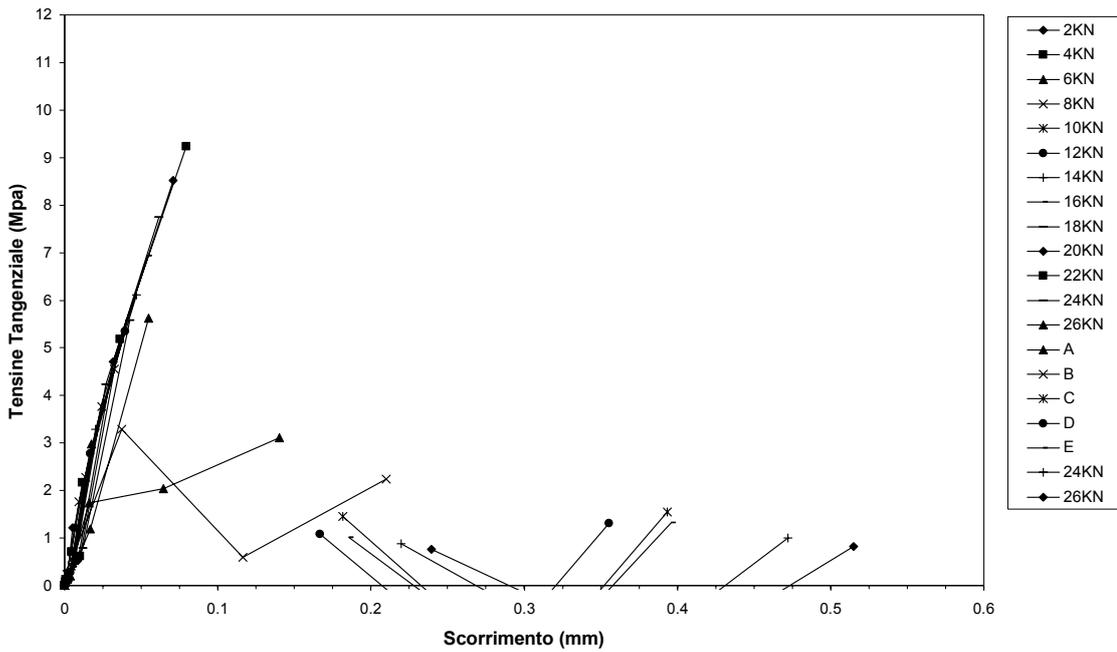


Grafico 3.7.13 Grafico Tensioni–Scorrimento del tessuto al centro

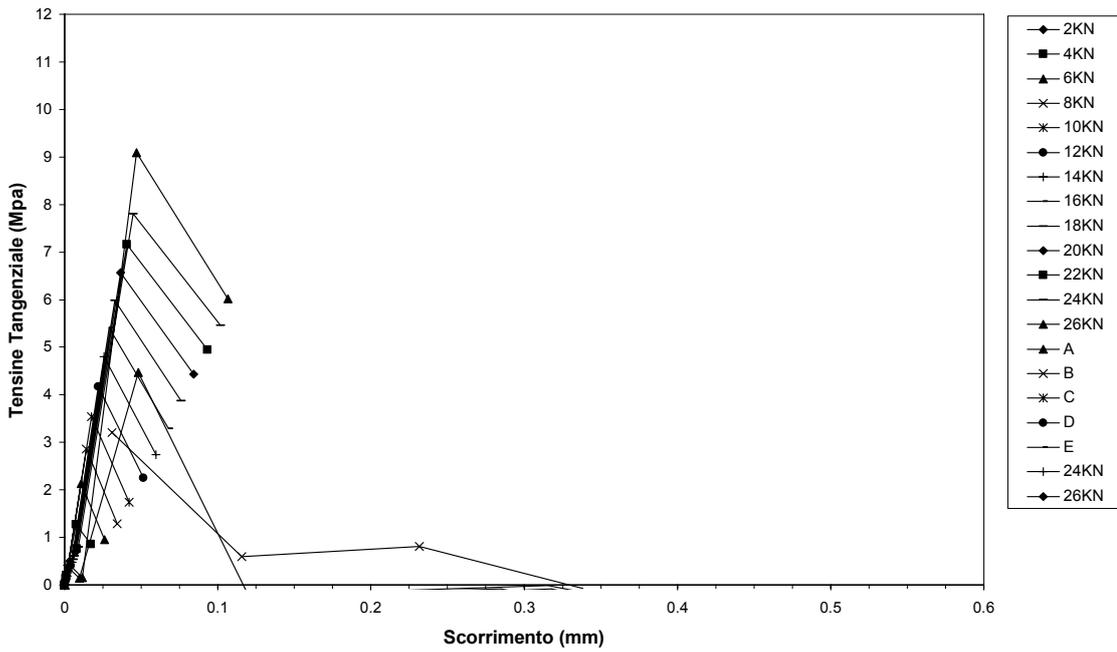


Grafico 3.7.14 Grafico Tensioni–Scorrimento del tessuto nel lato SX

I grafici 3.7.12, 3.7.13 e 3.7.14 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

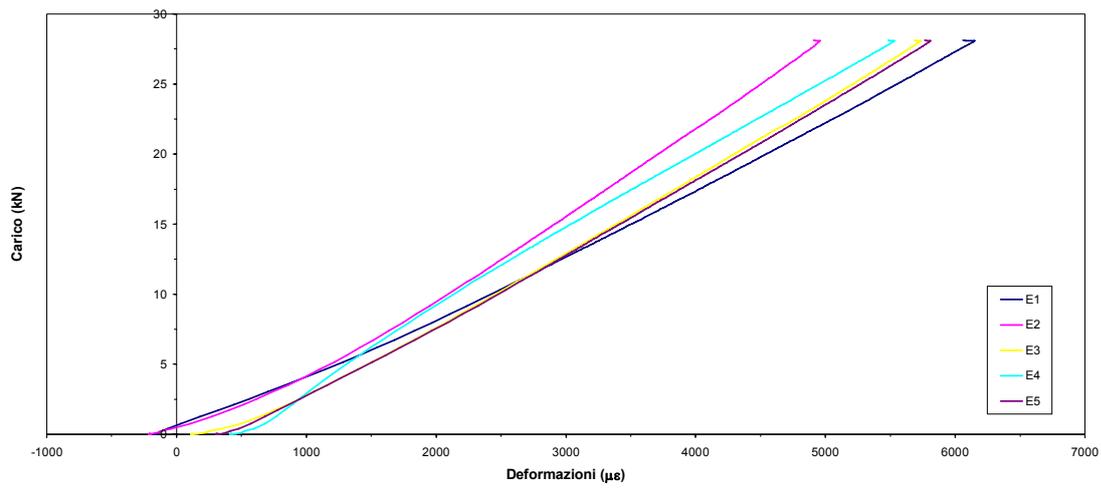


Grafico 3.7.15 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo lato DX

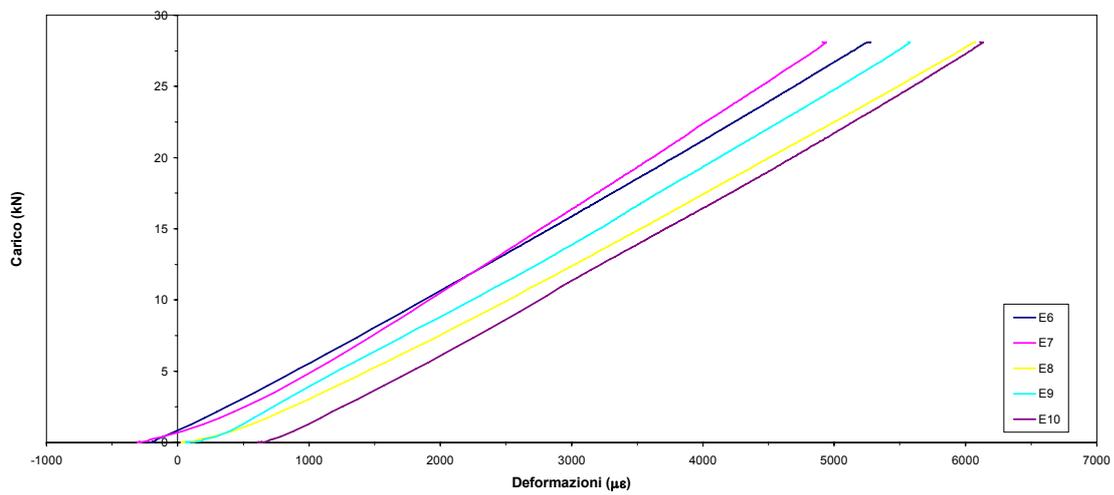


Grafico 3.7.16 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo centro

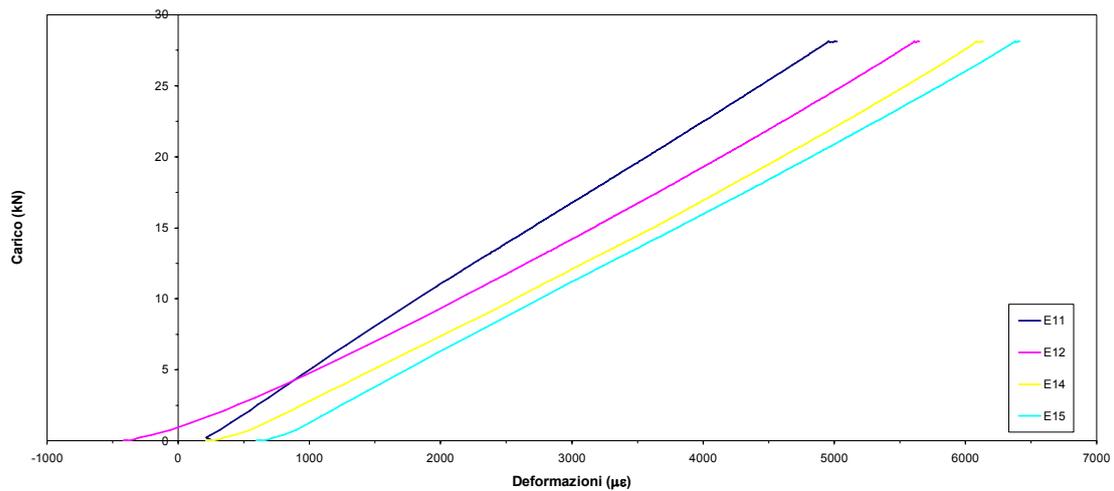


Grafico 3.7.17 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo lato SX

I grafici 3.7.15, 3.7.16 e 3.7.17 rappresentano il rapporto carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico del tessuto con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera del tessuto.

Il modulo elastico ricavato dai due estensimetri nella parte libera risulta 225160 MPa, mentre il modulo ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali mediato risulta 305124 MPa.

I grafici 3.7.18, 3.7.19 e 3.7.20 riportano rispettivamente i valori τ -slip degli estensimetri del lato DX, centrali e del lato SX e le rispettive curve ottenute con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nelle tabelle 3.7.3, 3.7.4 e 3.7.5.

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
20000	225160	3.2668	0.041892	5.2221

Tabella 3.7.3 Parametri dell'equazione analitica per gli estensimetri lato DX

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
20000	225160	16.2933	0.081414	8.5797

Tabella 3.7.4 Parametri dell'equazione analitica per gli estensimetri centrali

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
20000	225160	2.8692	0.03945	4.2345

Tabella 3.7.5 Parametri dell'equazione analitica per gli estensimetri lato SX

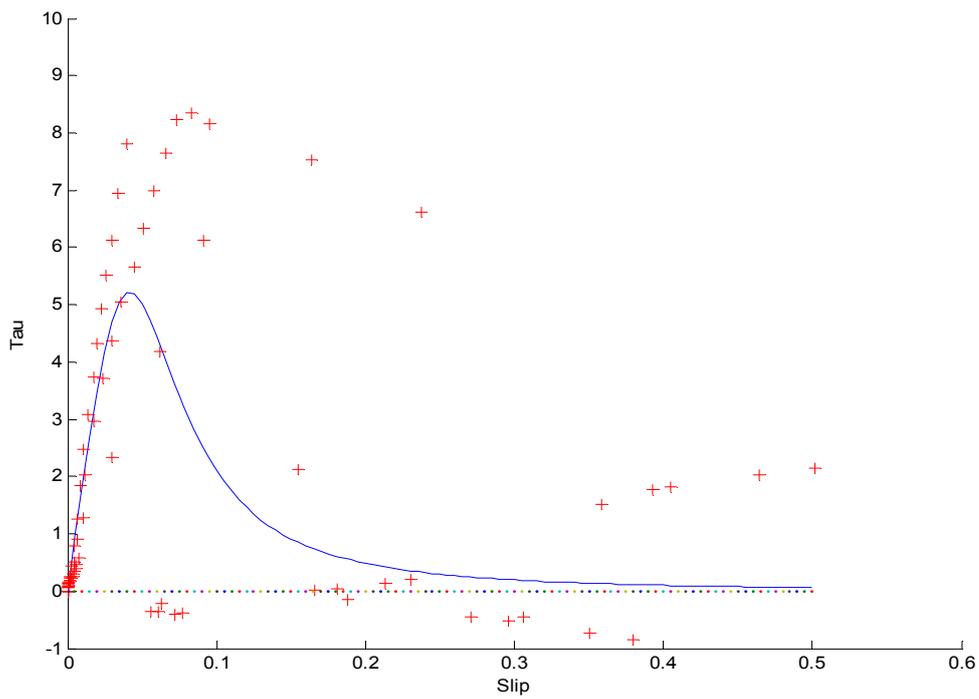


Grafico 3.7.18 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri lato DX

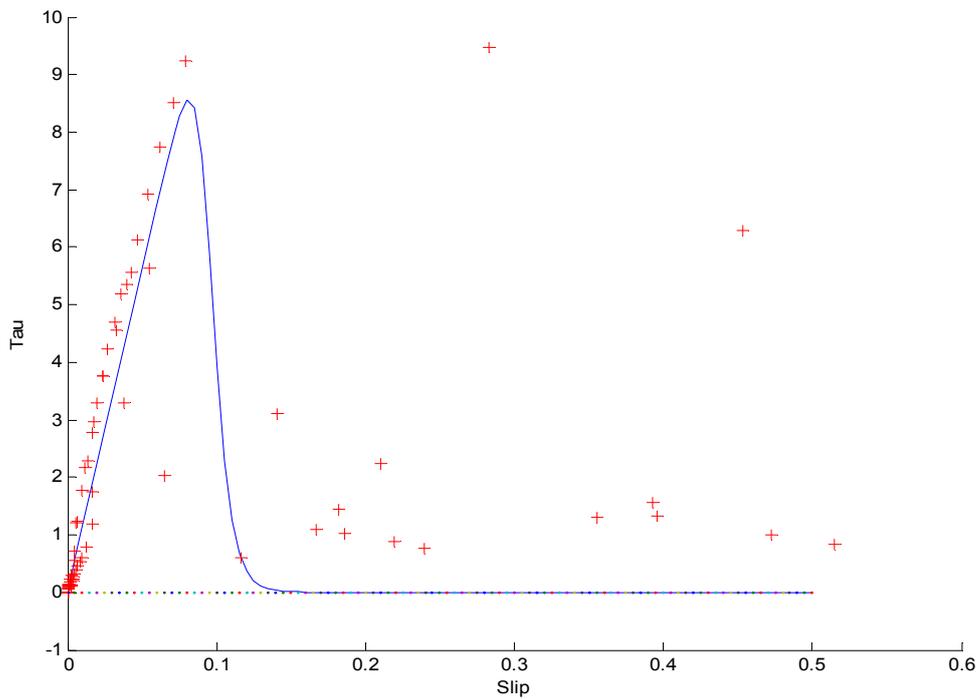


Grafico 3.7.19 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri centrali

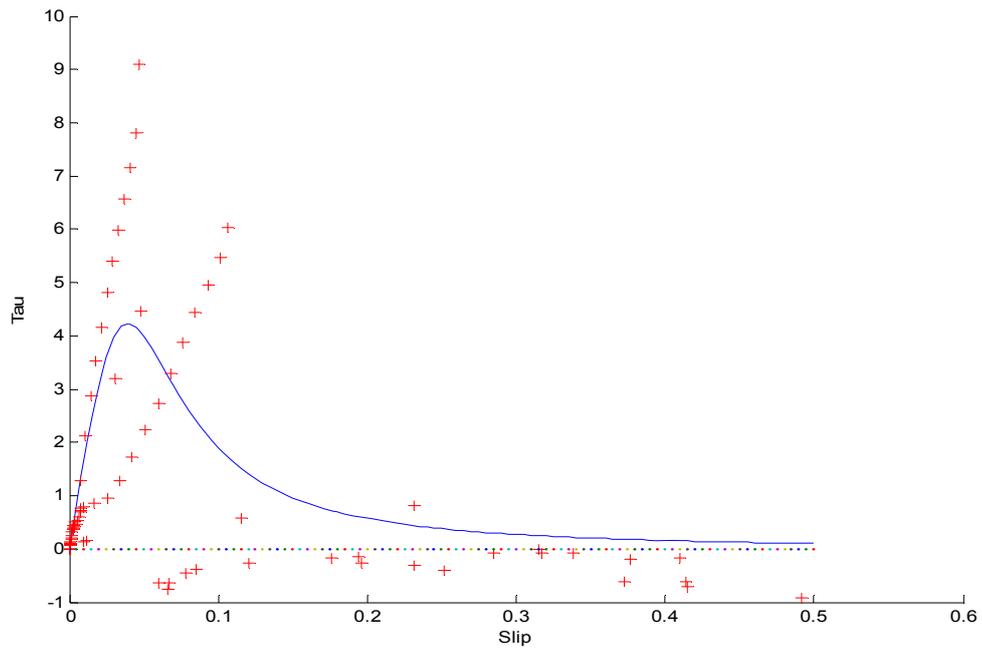


Grafico 3.7.20 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri lato SX

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto.



Figura 3.7.3 Superficie delaminata

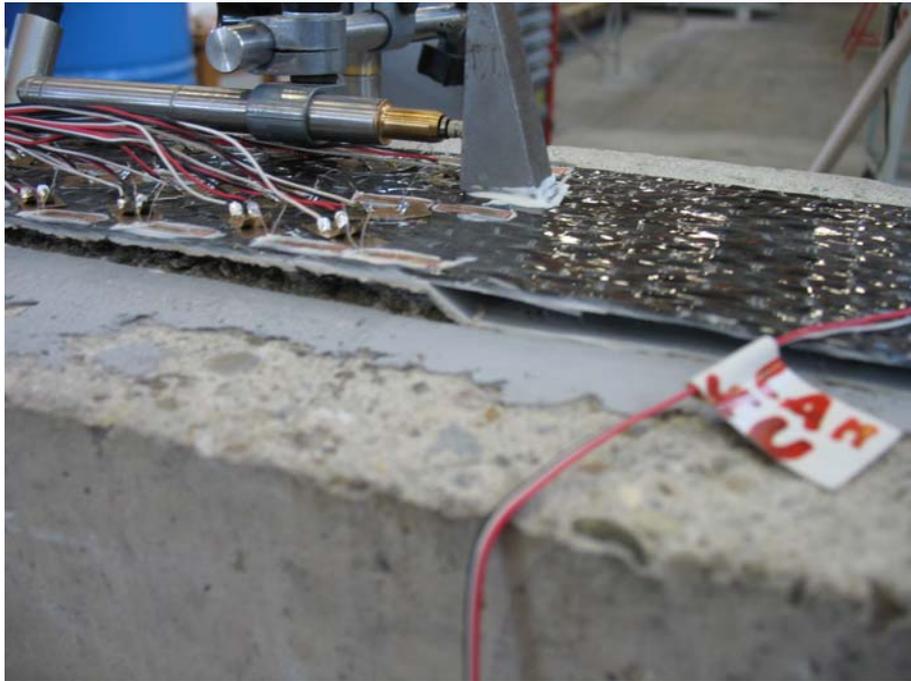


Figura 3.7.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.7.5 Particolare superficie delaminata

3.8 R9A



Figura 3.8.1 Prova R9A

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 01-03-07, quindi il cls ha avuto 266 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino è stato sottoposto per un mese a nebbie saline.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 10 estensimetri e i due estensimetri per il modulo sul tessuto.

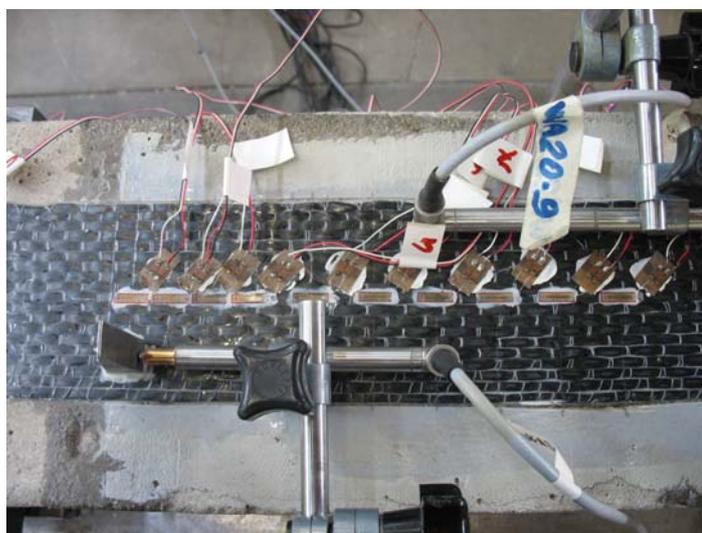


Figura 3.8.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: 10/120 LY da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.0 cm
L2	32.8 cm
L3	12.2 cm
L4	8.4 cm

Tabella 3.8.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	8	E6
1	T1, WA 10.1	9	E7
2	T2, WA 20.9	10	E8
3	E1	11	E9
4	E2	12	E10
5	E3	13	E LAM SU
6	E4	14	E LAM GIU
7	E5		

Tabella 3.8.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

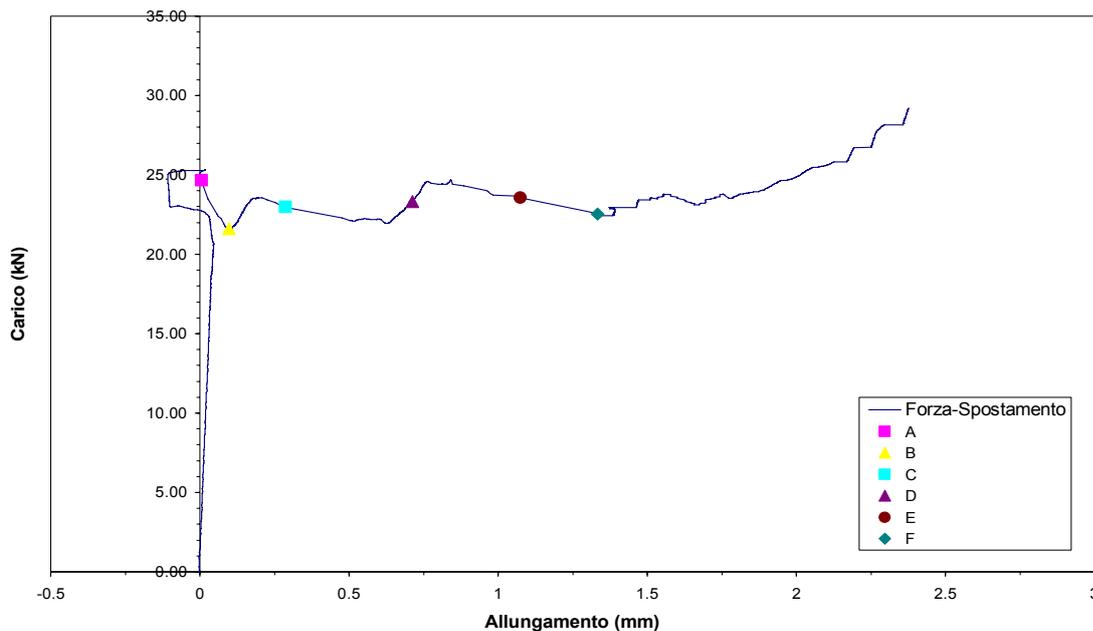


Grafico 3.8.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.8.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare.

Al raggiungimento del carico di delaminazione il grafico inverte la pendenza fino a raggiungere valori negativi.

Il motivo di questo fenomeno è che il tessuto, durante la delaminazione, si è sollevato, provocando una rotazione del contrasto dell'LVDT T1.

Raggiunto il carico di delaminazione, si nota un plateau costante, infine raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

I punti A,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 25.28 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 22.15 kN.

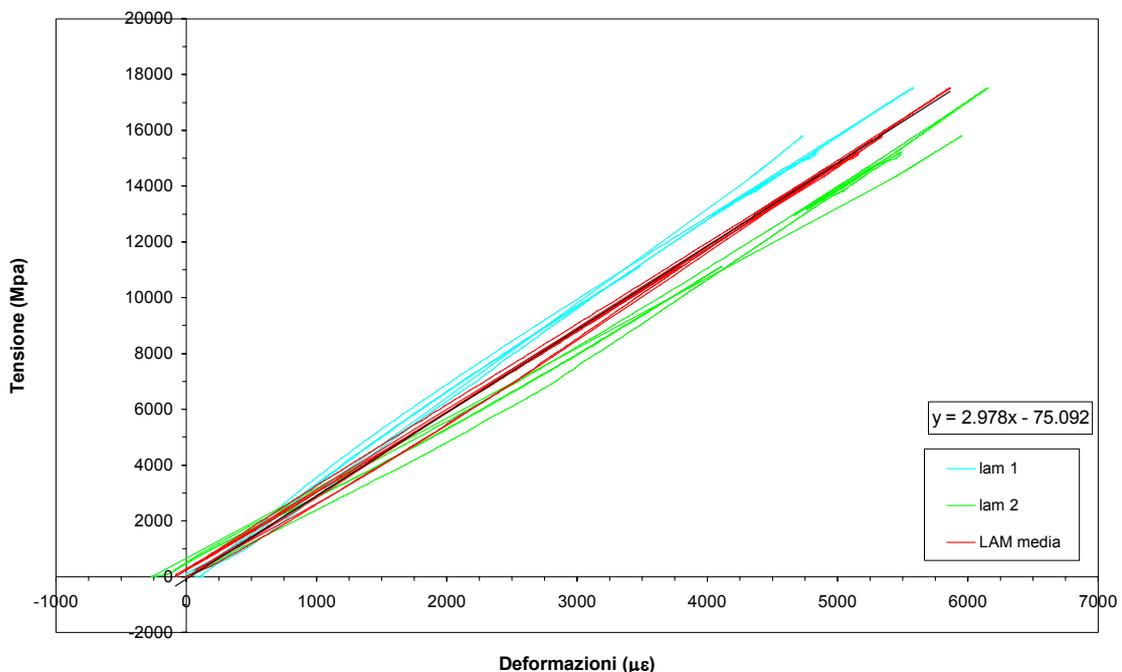


Grafico 3.8.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

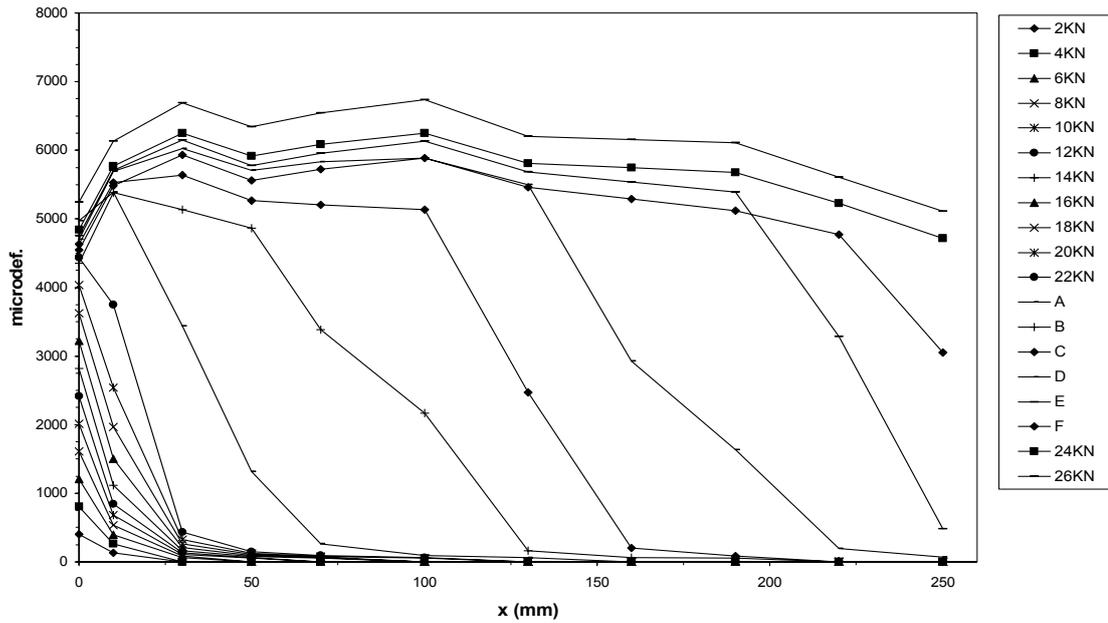


Grafico 3.8.4 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.8.4 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse del tessuto.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

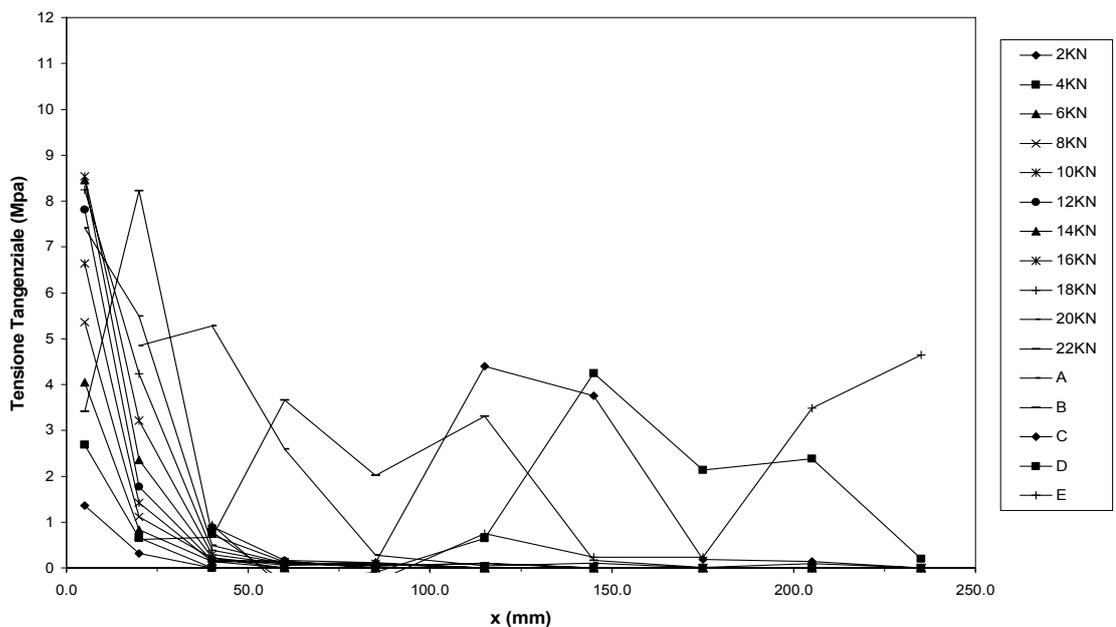


Grafico 3.8.5 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.8.5 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

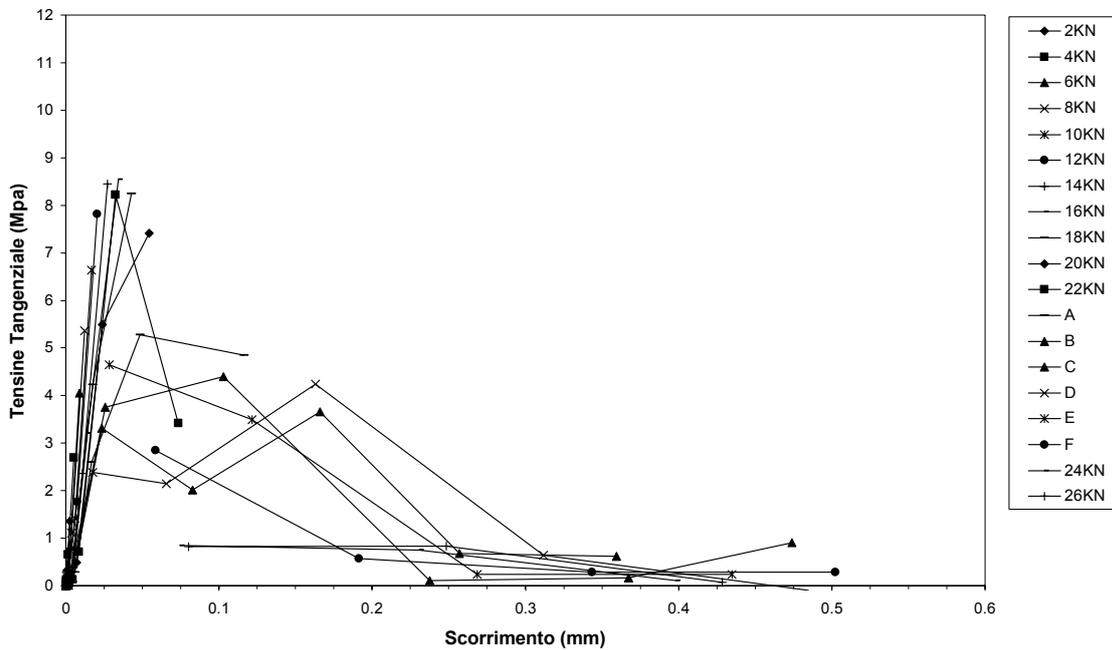


Grafico 3.8.6 Grafico Tensioni–Scorrimento del tessuto

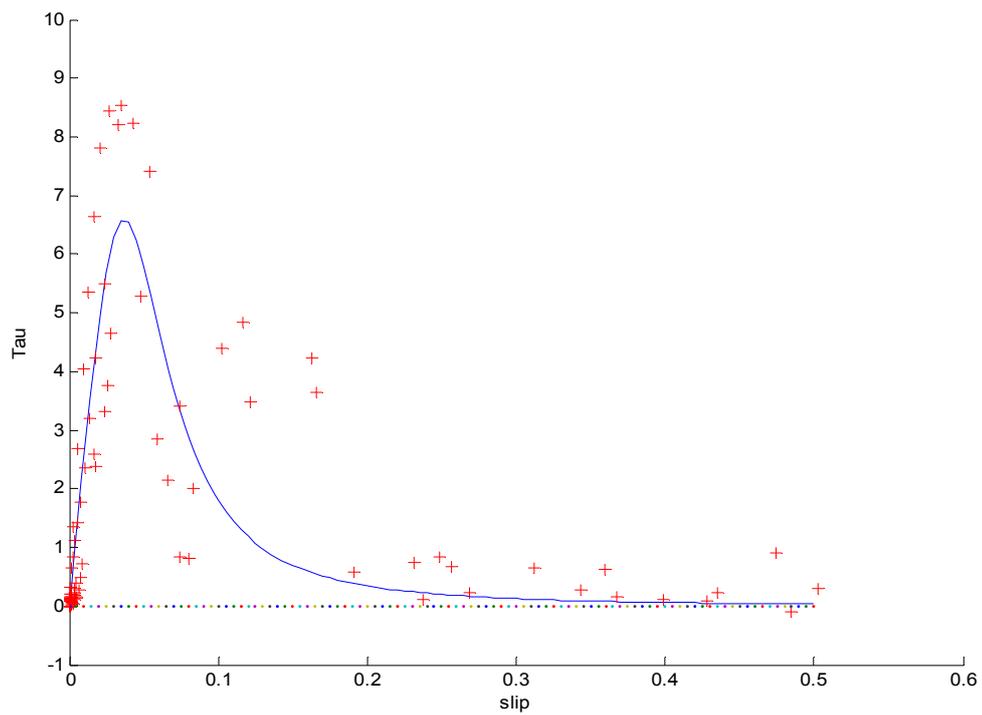
Il grafico 3.8.6 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

Il grafico 3.8.7 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.8.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
23000	297800	3.4848	0.036922	6.5919

Tabella 3.8.3 Parametri dell'equazione analitica

Grafico 3.8.7 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto.



Figura 3.8.3 Superficie delaminata



Figura 3.8.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.8.5 Particolare superficie delaminata

3.9 R9B



Figura 3.9.1 Prova R9B

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 17-04-07, quindi il cls ha avuto 313 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino è stato sottoposto per un mese a nebbie saline.

Per la strumentazione è stato utilizzato solamente il setup LVDT



Figura 3.9.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	14.2 cm
L2	32.6 cm
L3	13.2 cm
L4	6.5 cm

Tabella 3.9.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.9.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

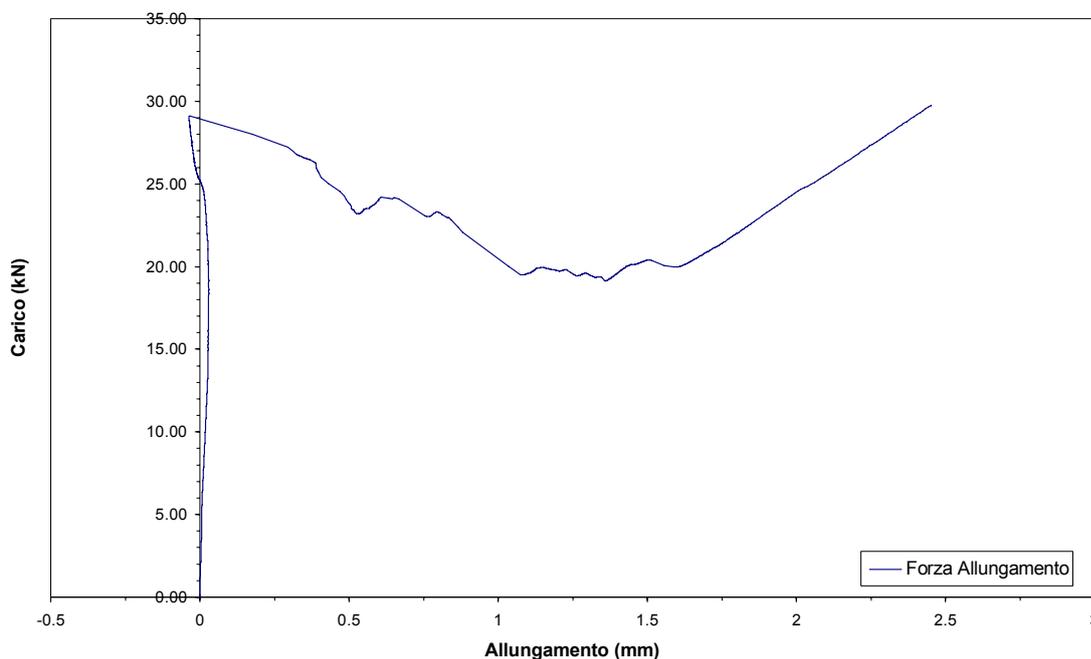


Grafico 3.9.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.9.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare abbastanza rigido. Al raggiungimento del carico di delaminazione, il grafico inverte la pendenza fino a raggiungere valori negativi, il motivo di questo fenomeno è che il tessuto, durante la delaminazione, si è sollevato, provocando una rotazione del contrasto dell'LVDT T1.

La delaminazione in questo caso non è avvenuta a carico costante, ma si è sviluppata abbastanza rapidamente con un abbattimento del carico.

Questo fenomeno è avvenuto probabilmente per l'accumulo di tensione prima della delaminazione che è stata liberata in un colpo solo al momento della delaminazione.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 29.00 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 19.32 kN.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto.



Figura 3.9.3 Superficie delaminata



Figura 3.9.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.9.5 Particolare superficie delaminata

3.10 R10A



Figura 3.10.1 Prova R10A

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 31-08-07, quindi il cls ha avuto 449 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il provino è stato provato incondizionato, come si nota nell'immagine 3.10.2, sul provino non sono stati effettuati le incisioni con la smerigliatrice ai lati del tessuto.

Per la strumentazione sono stati utilizzati i due estensimetri per il modulo sul tessuto.



Figura 3.10.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: PFL-10-11 da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	14.8 cm
L2	32.2 cm
L3	13.0 cm
L4	6.8 cm

Tabella 3.10.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	3	E LAM SU
1	T1, WA 10.1	4	E LAM GIU
2	T2, WA 20.9		

Tabella 3.10.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

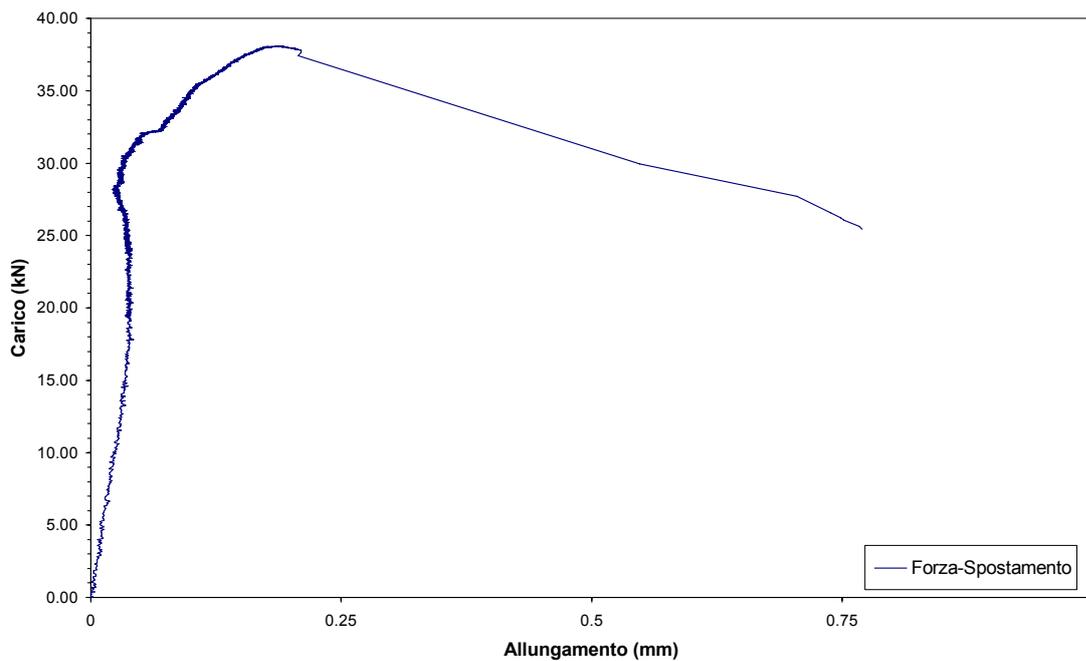


Grafico 3.10.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.10.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare.

Raggiunto il carico di delaminazione, il sollevamento improvviso del tessuto ha staccato il contrasto dell'LVDT T1, rendendo impossibile l'acquisizione dei dati della fase di delaminazione.

La mancanza dell'incisione sulla resina, ha incrementato il carico di delaminazione e, al momento della delaminazione, ha provocato il sollevamento del tessuto, come si nota dall'immagine 3.10.3.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 38.01 kN mentre la forza minima misurata è stata di 25.45 kN.

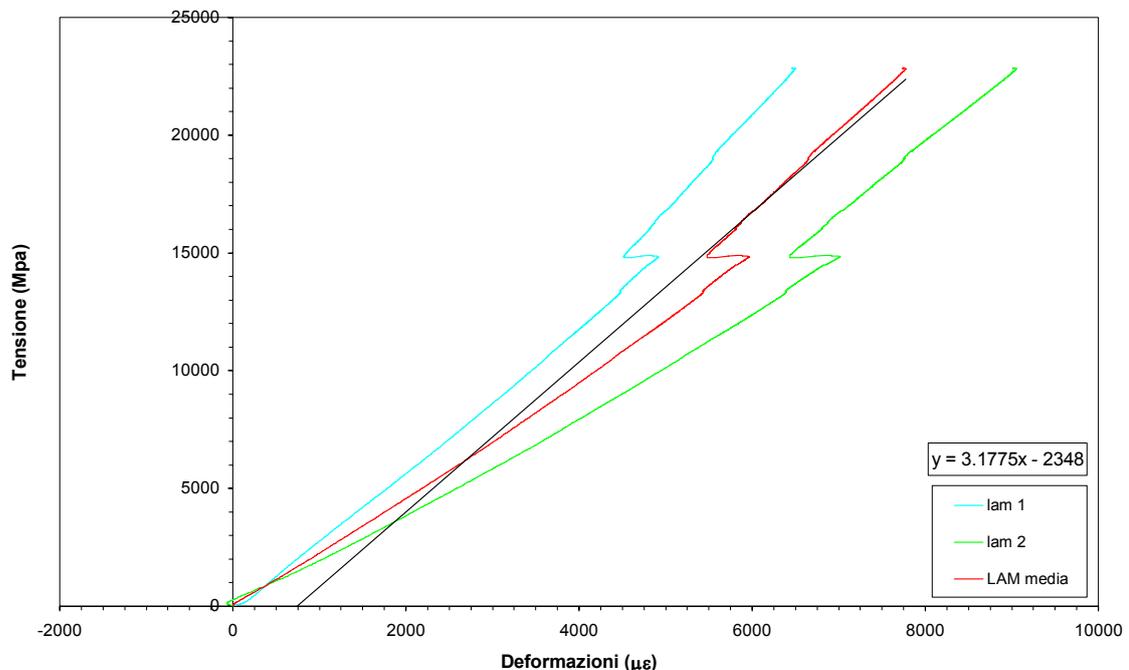


Grafico 3.10.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.10.2 sono riportate le deformazioni del tessuto misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva del tessuto in FRP che in questo caso è di 0.166 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico del tessuto è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato del tessuto pari a 317750 MPa.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla resina che, non essendo stata incisa, è rimasta incollata al tessuto anche nel bordo.



Figura 3.10.3 Particolare superficie delaminata

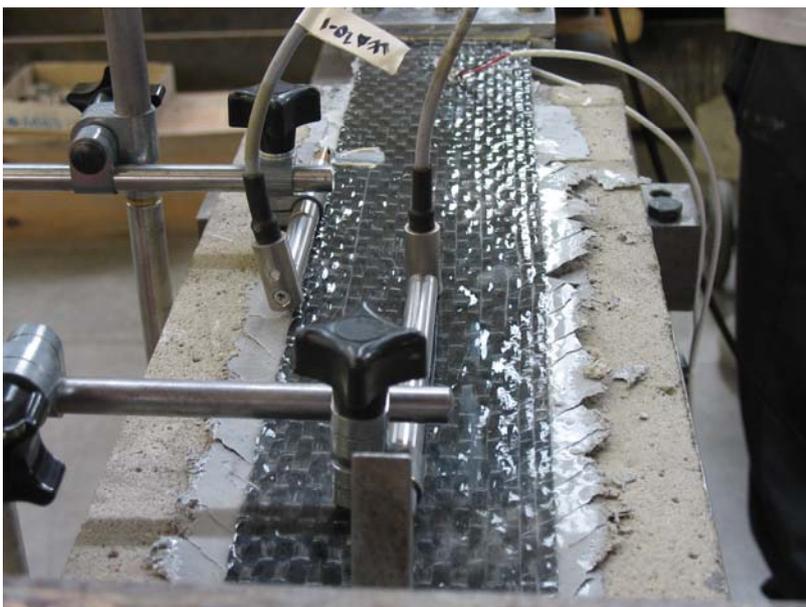


Figura 3.10.4 Vista globale della delaminazione



Figura 3.10.5 Particolare della delaminazione



Figura 3.10.6 Superficie delaminata



Figura 3.10.7 Particolare superficie delaminata



Figura 3.10.8 Particolare superficie delaminata

3.11 R10B

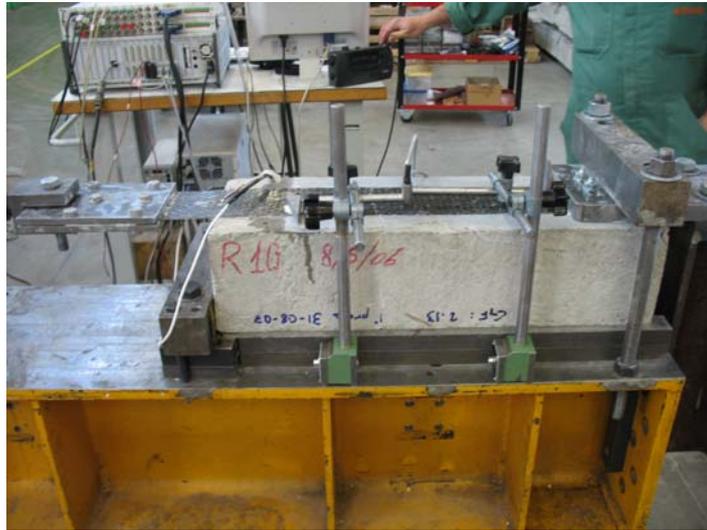


Figura 3.11.1 Prova R10B

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 05-09-07, quindi il cls ha avuto 454 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il provino è stato provato incondizionato.

Per la strumentazione sono stati utilizzati i due estensimetri per il modulo sul tessuto.

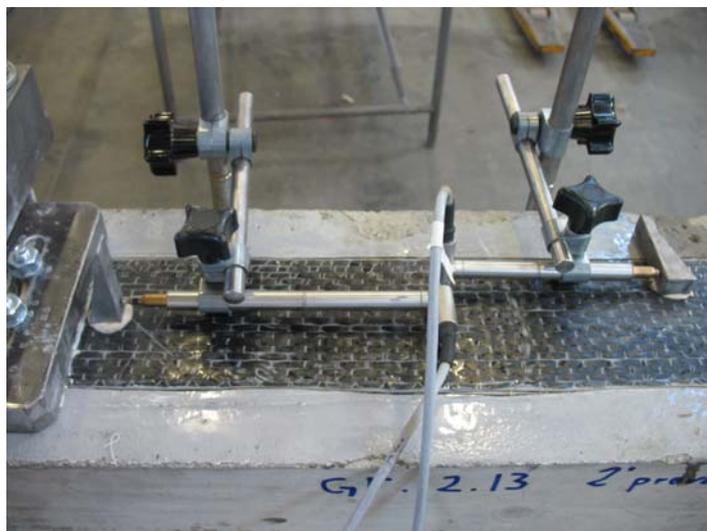


Figura 3.11.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: PFL-10-11 da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.0 cm
L2	33.3 cm
L3	11.7 cm
L4	7.2 cm

Tabella 3.11.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	3	E LAM SU
1	T1, WA 10.1	4	E LAM GIU
2	T2, WA 20.9		

Tabella 3.11.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

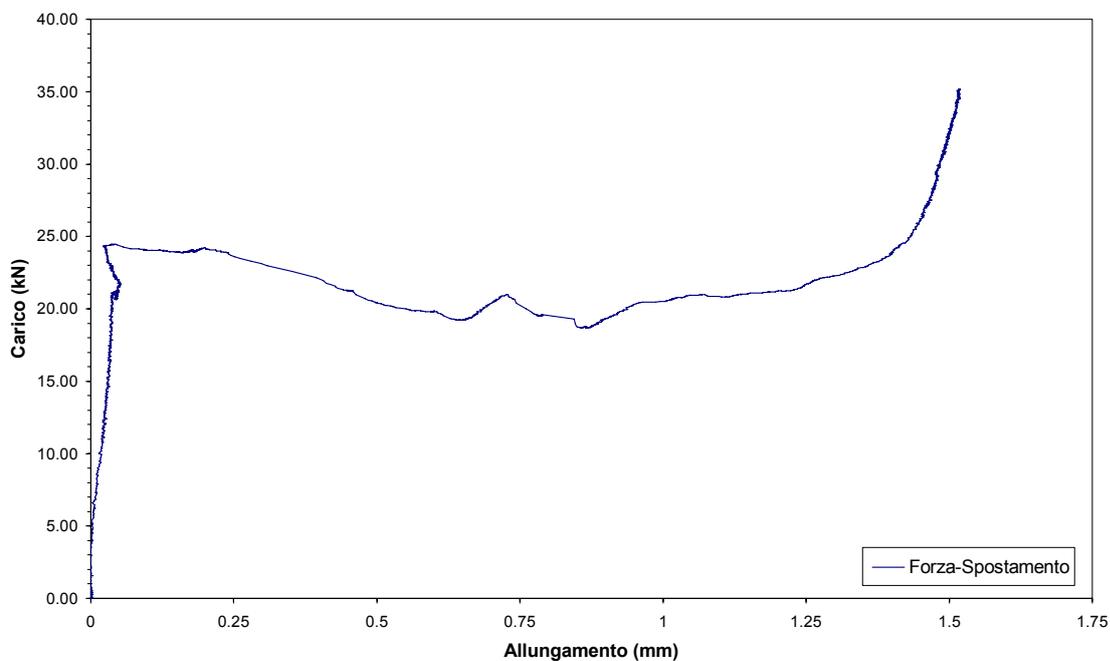


Grafico 3.11.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.11.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, la delaminazione è avvenuta a carico pressoché costante

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 24.40 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 18.62 kN.

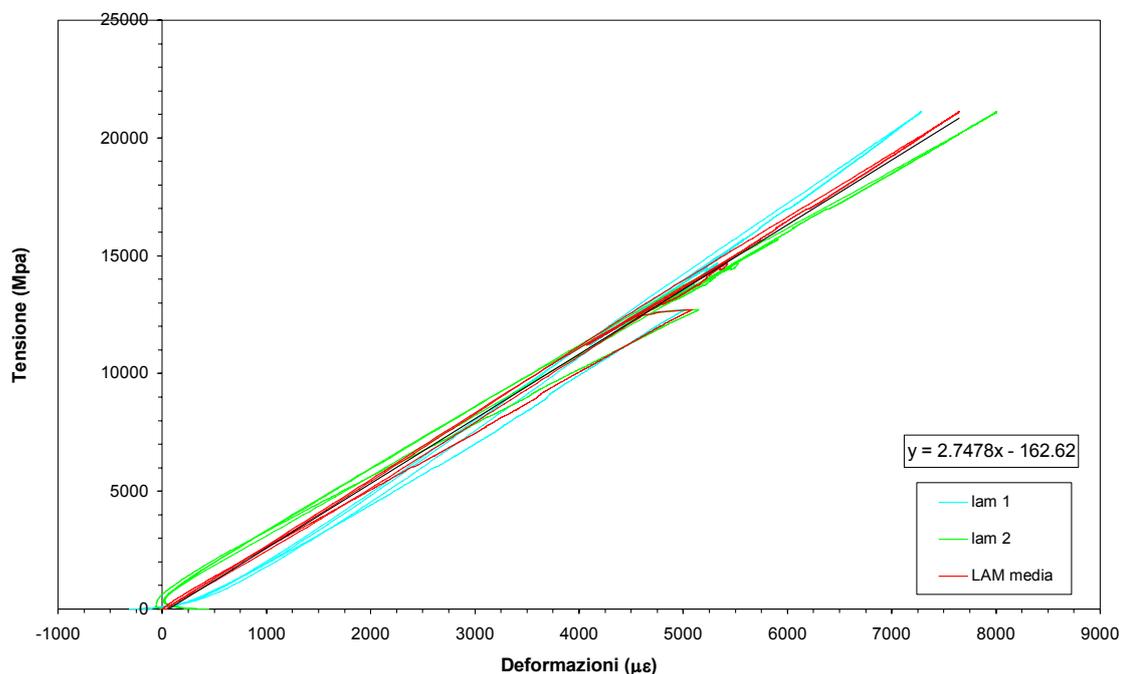


Grafico 3.11.2 Grafico Tensione–Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.11.2 sono riportate le deformazioni del tessuto misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva del tessuto in FRP che in questo caso è di 0.166 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico del tessuto è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo

valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato del tessuto pari a 274780 MPa.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto.



Figura 3.11.3 Superficie delaminata



Figura 3.11.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.11.5 Particolare superficie delaminata



Figura 3.11.6 Particolare superficie delaminata

3.12 R12A



Figura 3.12.1 Prova R12A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 24-10-06, quindi il cls ha avuto 138 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino è stato sottoposto per un mese a nebbie saline.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 10 estensimetri.



Figura 3.12.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: 6/120 LY 11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.08 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.4 cm
L2	32.6 cm
L3	12.3 cm
L4	5.5 cm

Tabella 3.12.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	7	E5
1	T1, WA 10.1	8	E6
2	T2, WA 20.9	9	E7
3	E1	10	E8
4	E2	11	E9
5	E3	12	E10
6	E4		

Tabella 3.12.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

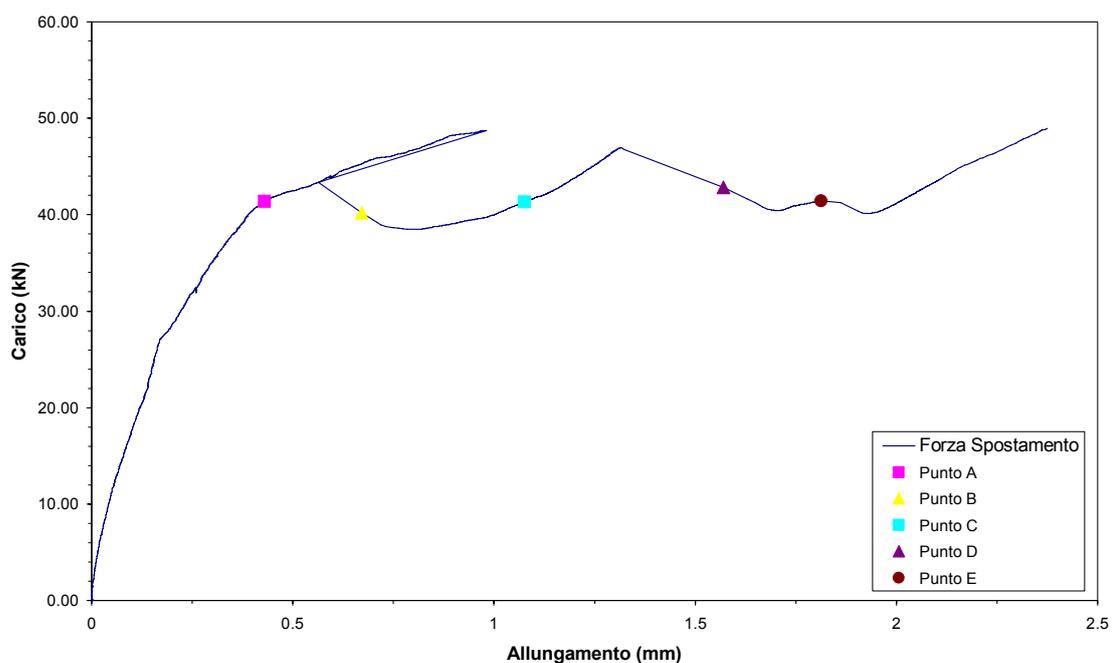


Grafico 3.12.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.12.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, si nota che superato il punto A, il carico ha continuato a salire per poi scaricare istantaneamente lungo lo stesso ramo di carico.

La delaminazione è avvenuta a carico abbastanza costante, raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

I punti A,B,C,D,E rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 48,67 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 40,49 kN.

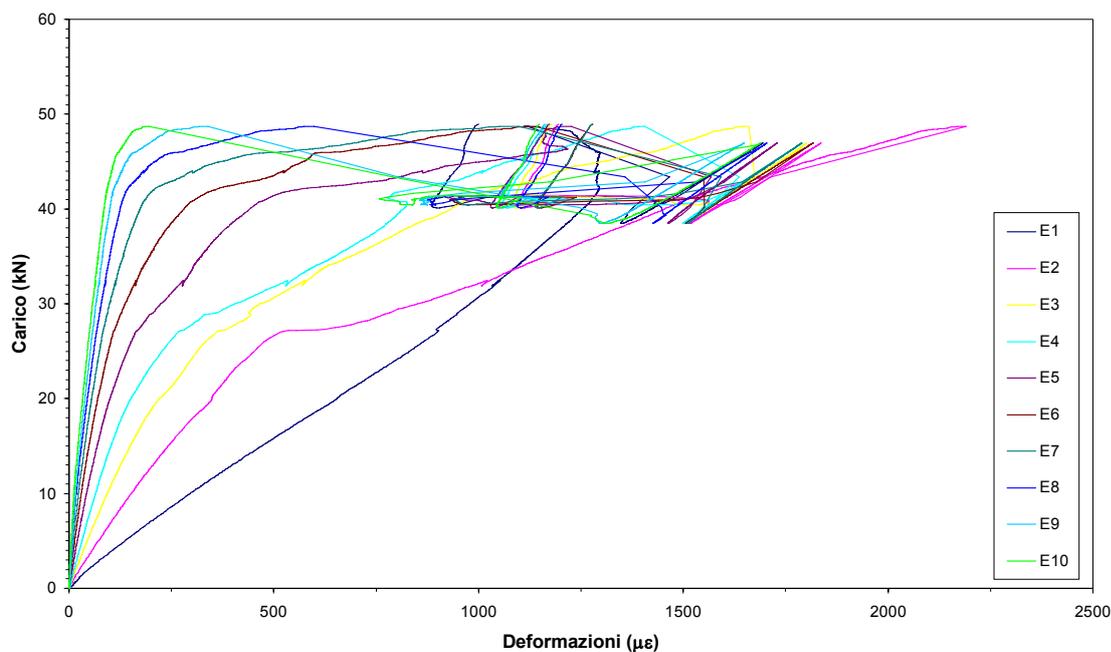


Grafico 3.12.2 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.12.3 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sulla lamina in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

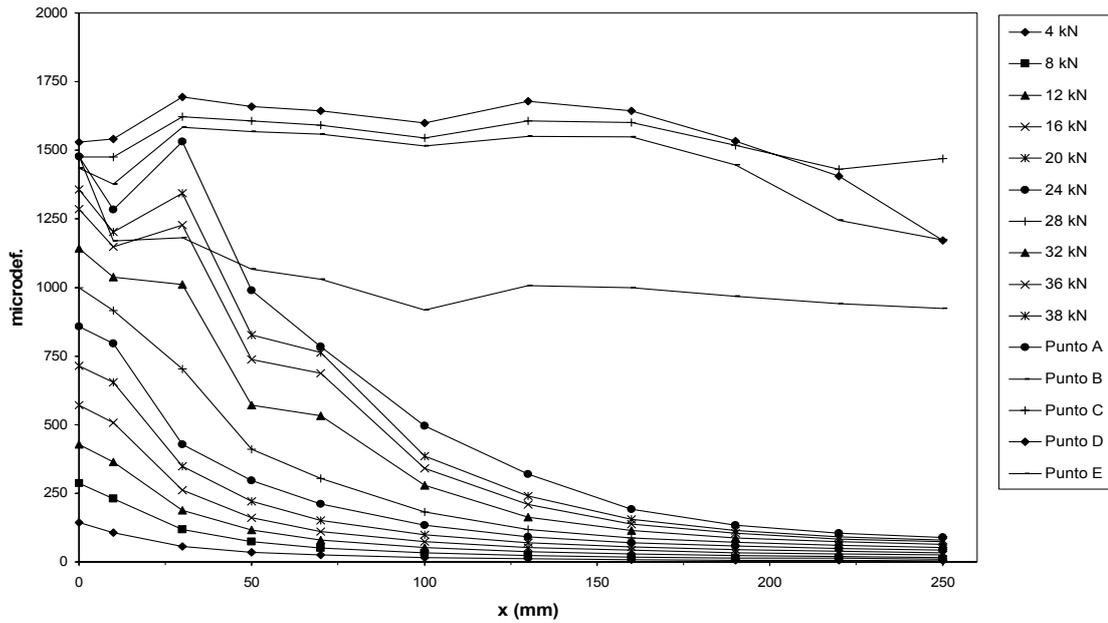


Grafico 3.12.3 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.12.3 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse della lamina.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

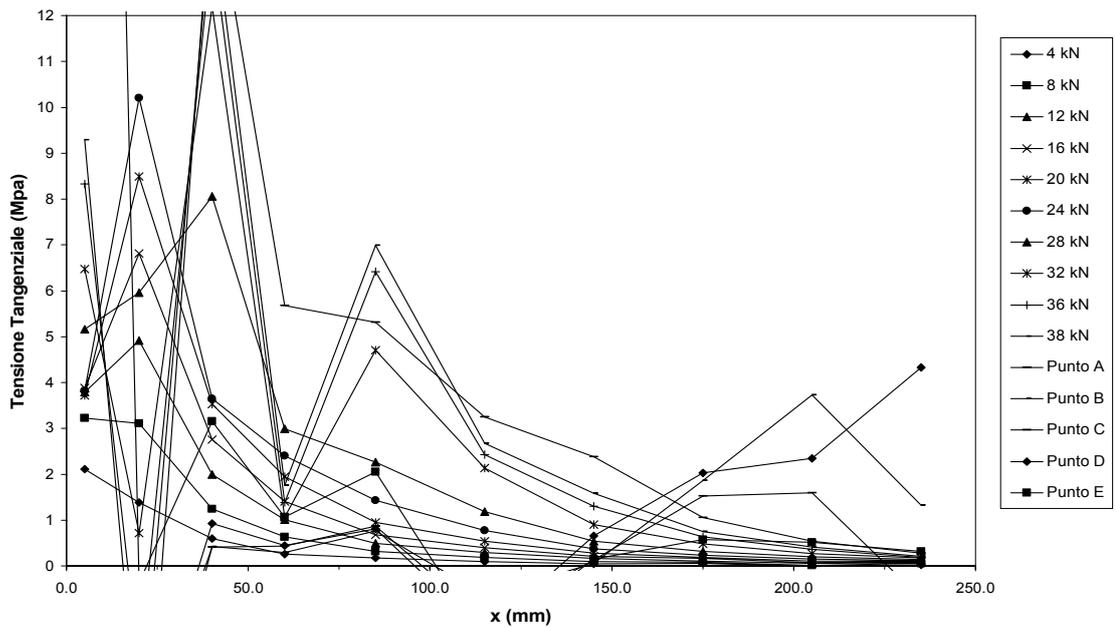


Grafico 3.12.4 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.12.4 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

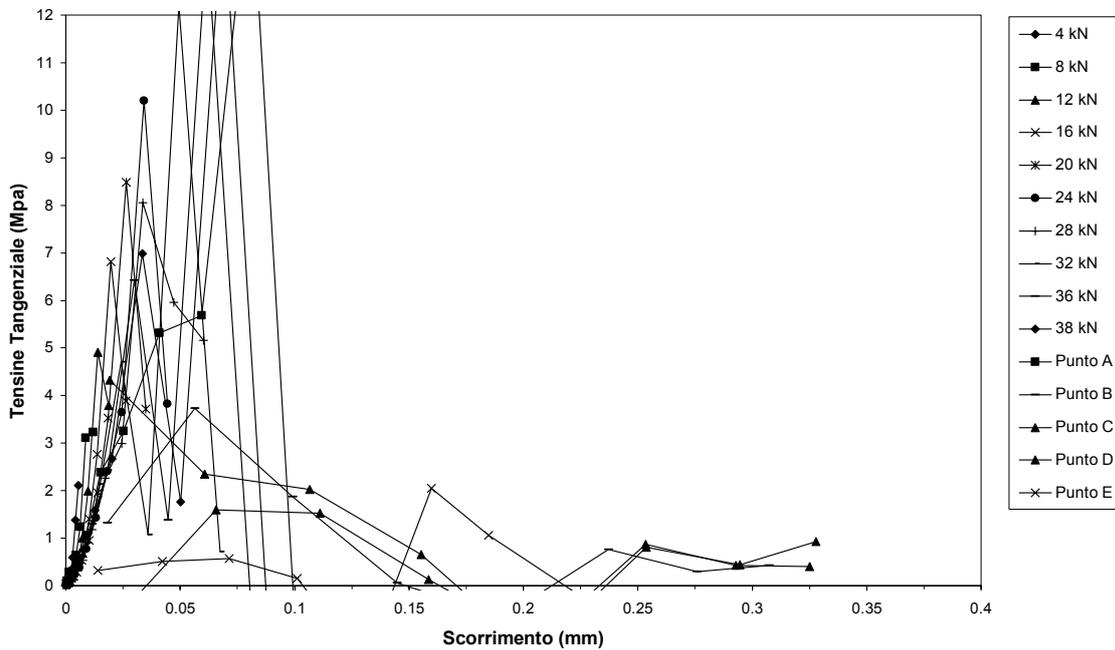


Grafico 3.12.5 Grafico Tensioni–Scorrimento della lamina

Il grafico 3.12.5 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

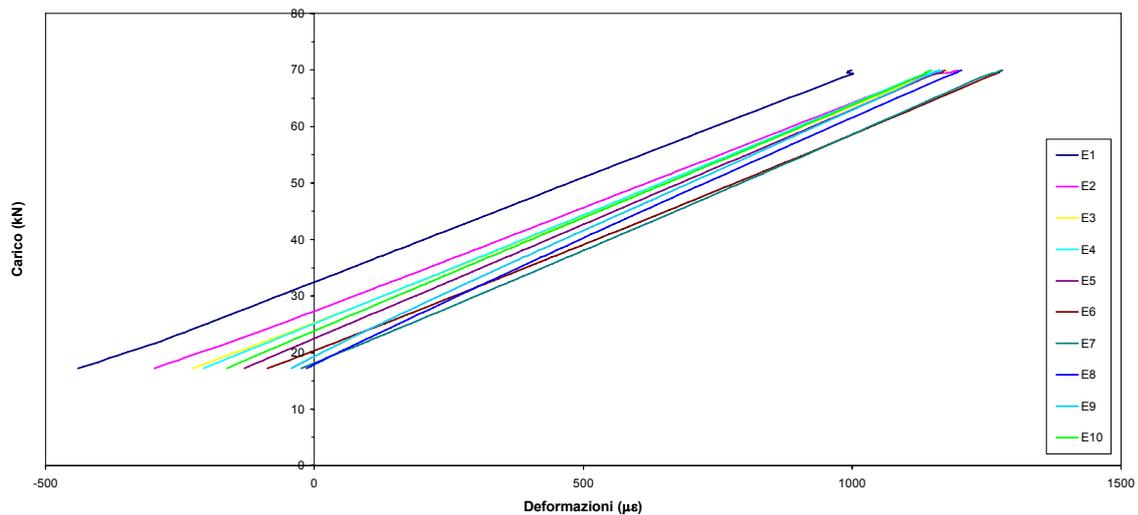


Grafico 3.12.6 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo
 Il grafico 3.12.6 rappresenta il rapporto carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico del tessuto con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera del tessuto.

Il modulo ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali mediato risulta 396195 MPa.

Lo scatto registrato nel grafico carico-spostamento, ha causato la mancanza di dati per valutare le deformazioni durante la delaminazione come si vede nel grafico 3.12.3, questo problema ha falsato tutte le elaborazioni delle tensioni tangenziali e degli scorrimenti e ha reso inutile l'elaborazione analitica della curva interpolante Tau-Slip. Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina, si nota che in alcuni punti del bordo la crisi è avvenuta per distacco della resina dal cls.



Figura 3.12.3 Superficie delaminata



Figura 3.12.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.12.5 Particolare superficie delaminata

3.13 R12B



Figura 3.13.1 Prova R12B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.
La prova è stata eseguita il 8-11-06, quindi il cls ha avuto 153 giorni di maturazione dal confezionamento.
A partire dal 15-09-06 il provino è stato sottoposto per un mese a nebbie saline.
Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 10 estensimetri.



Figura 3.13.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: 6/120 LY 11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.11 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.4 cm
L2	33.5 cm
L3	11.1 cm
L4	5.5 cm

Tabella 3.13.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	7	E5
1	T1, WA 10.1	8	E6
2	T2, WA 20.9	9	E7
3	E1	10	E8
4	E2	11	E9
5	E3	12	E10
6	E4		

Tabella 3.13.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

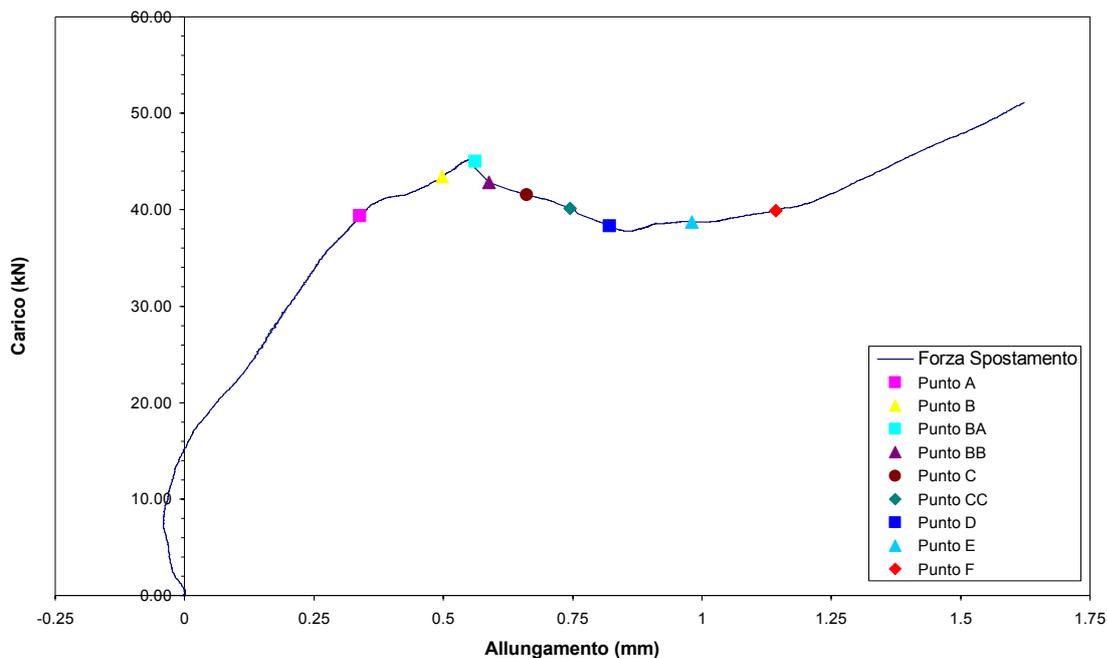


Grafico 3.13.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.13.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Il grafico della prova è pressoché identico a quello della prova precedente, fatta eccezione per il ramo di carico e scarico immediato visto al momento della delaminazione che in questo caso non si è verificato.

I punti A,B,BA,BB,C,CC,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 44.94 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 38.63 kN.

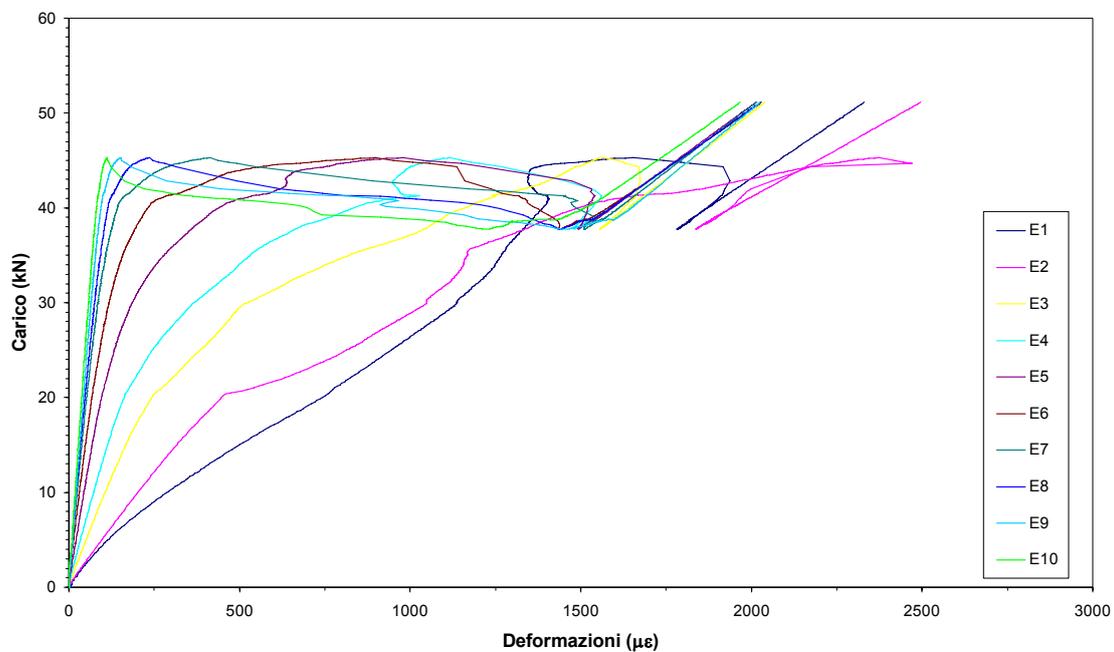


Grafico 3.13.2 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.13.2 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sulla lamina in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

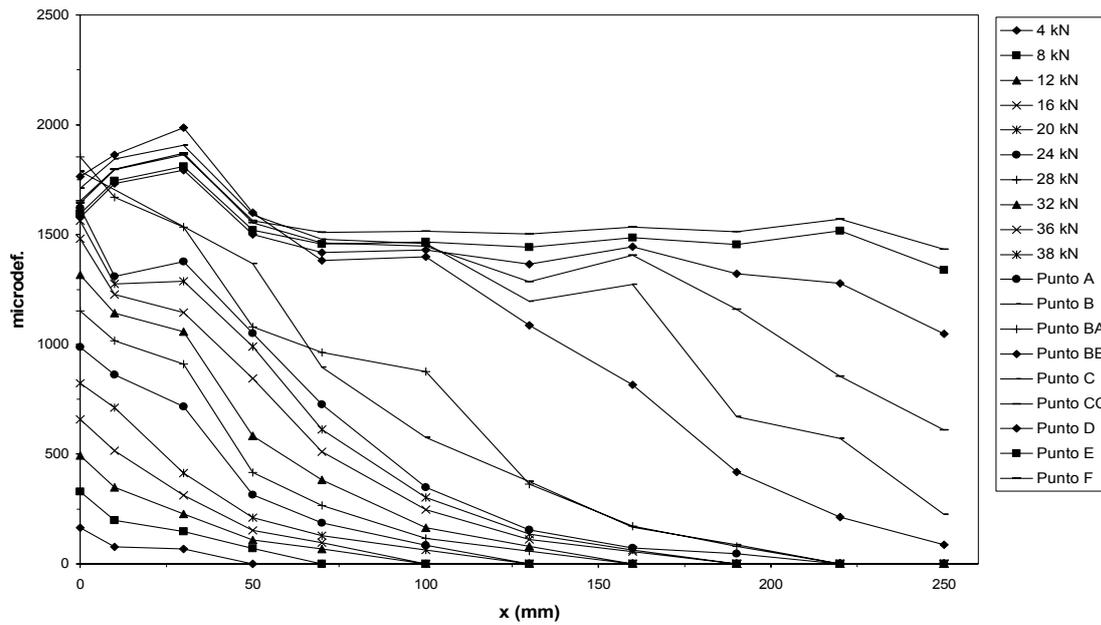


Grafico 3.13.3 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.13.3 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse della lamina.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,BA,BB,C,CC,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

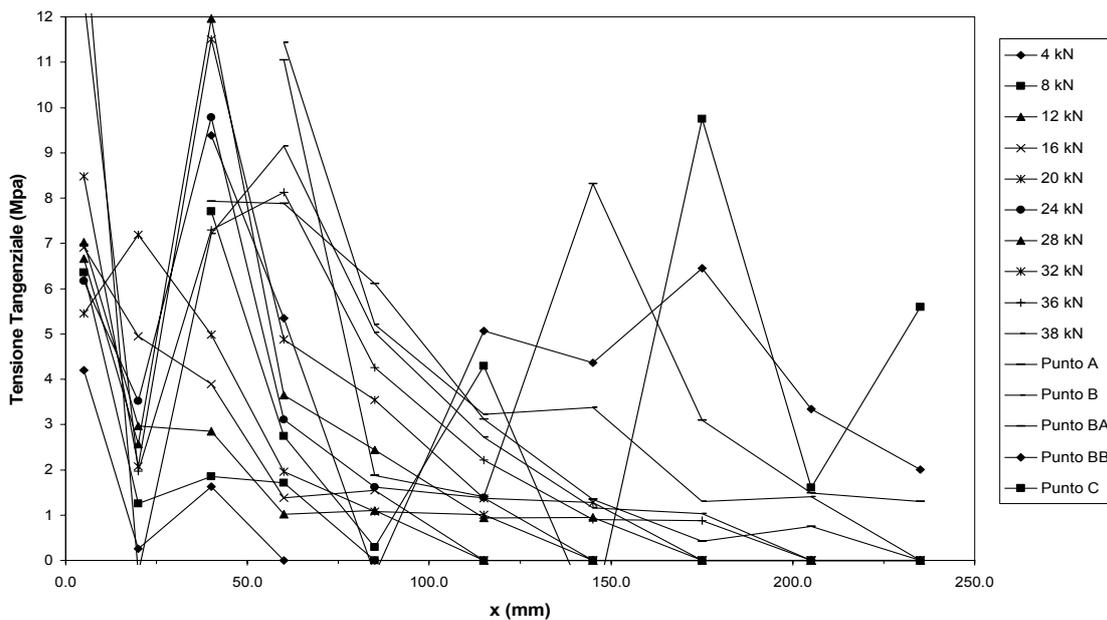


Grafico 3.13.4 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.13.4 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

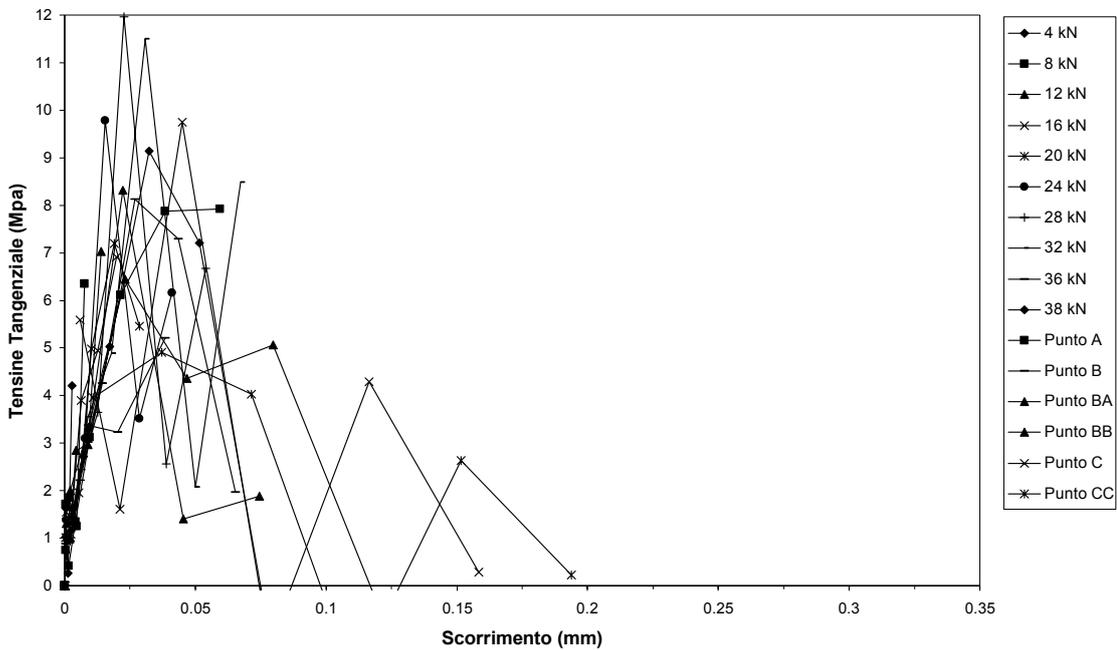


Grafico 3.13.5 Grafico Tensioni–Scorrimento della lamina

Il grafico 3.13.5 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

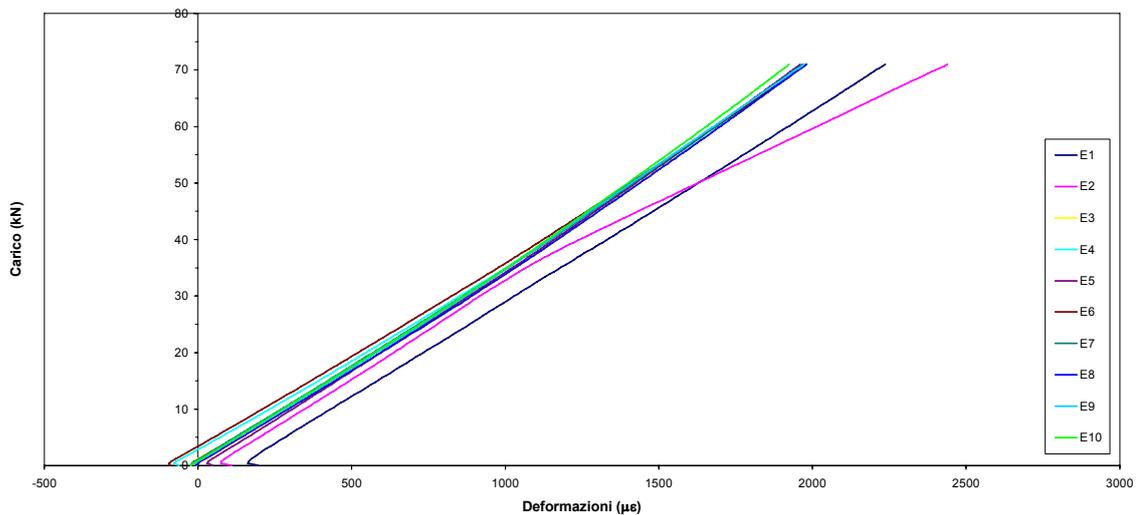


Grafico 3.13.6 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo

Il grafico 3.13.6 rappresenta il rapporto carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico della lamina con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera della lamina.

Il modulo elastico ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali mediato risulta 347004 MPa.

Il grafico 3.13.7 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.13.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
42000	347004	3.1736	0.038405	7.359

Tabella 3.13.3 Parametri dell'equazione analitica

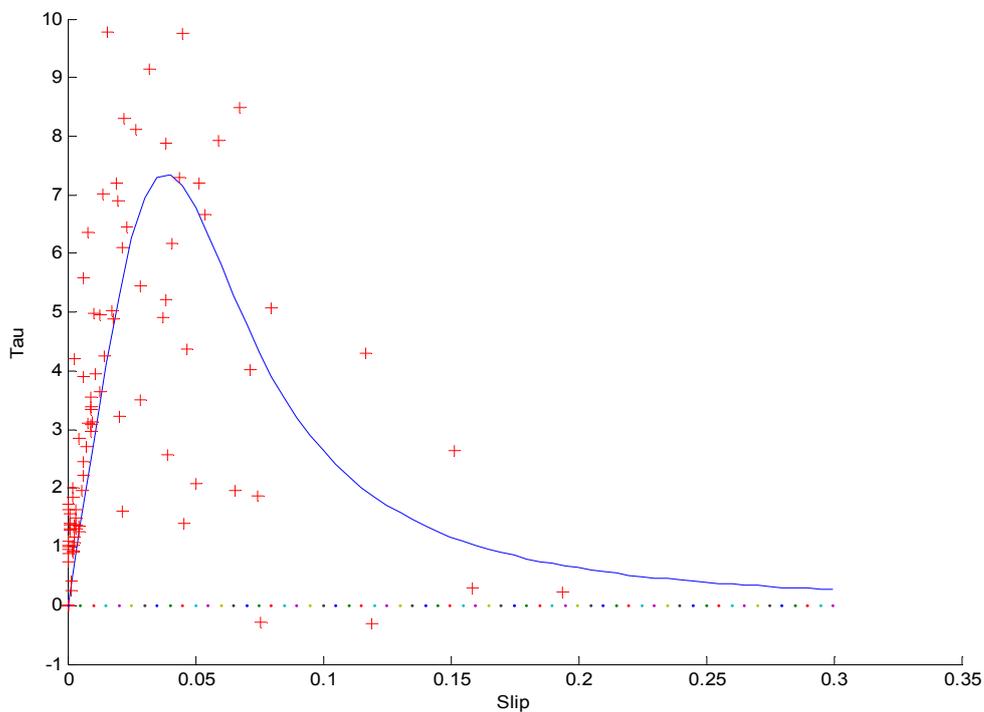


Grafico 3.13.7 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

In questa prova abbiamo avuto una crisi mista, abbiamo zone in cui la crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls e zone in cui la resine si è scollata dal cls, come avevamo visto in maniera meno evidente nella prova R12A.



Figura 3.13.3 Superficie delaminata



Figura 3.13.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.13.5 Particolare superficie delaminata



Figura 3.13.6 Particolare superficie delaminata

3.14 R13A

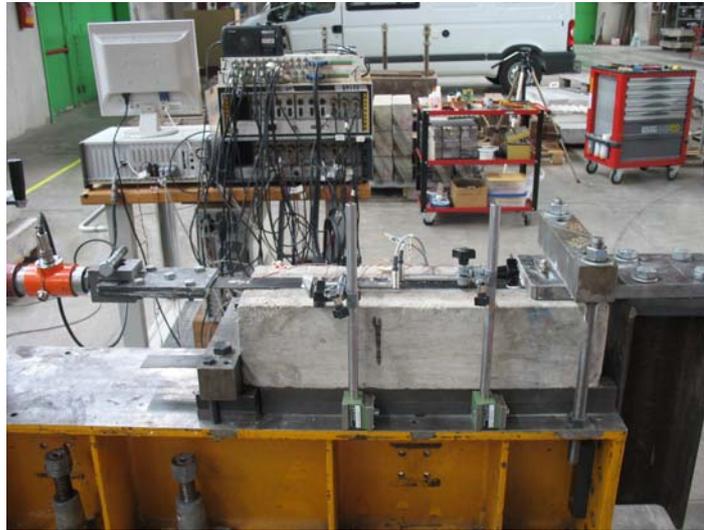


Figura 3.14.1 Prova R13A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm. La prova è stata eseguita il 02-05-07, quindi il cls ha avuto 329 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino è stato sottoposto per due mesi a nebbie saline.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 13 estensimetri e i due estensimetri per il modulo sulla lamina.

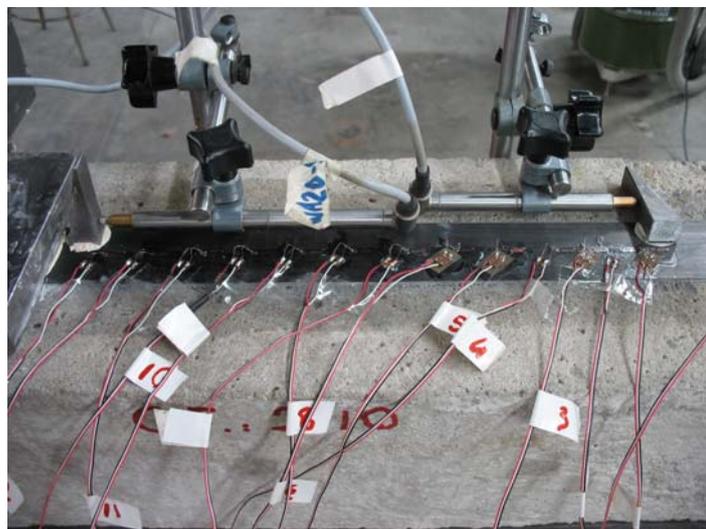


Figura 3.14.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: FLA 6-11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.0 cm
L2	34.5 cm
L3	10.9 cm
L4	6.1 cm

Tabella 3.14.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	7	E5
1	T1, WA 10.1	8	E6
2	T2, WA 20.9	9	E7
3	E1	10	E8
4	E2	11	E9
5	E3	12	E10
6	E4		

Tabella 3.14.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

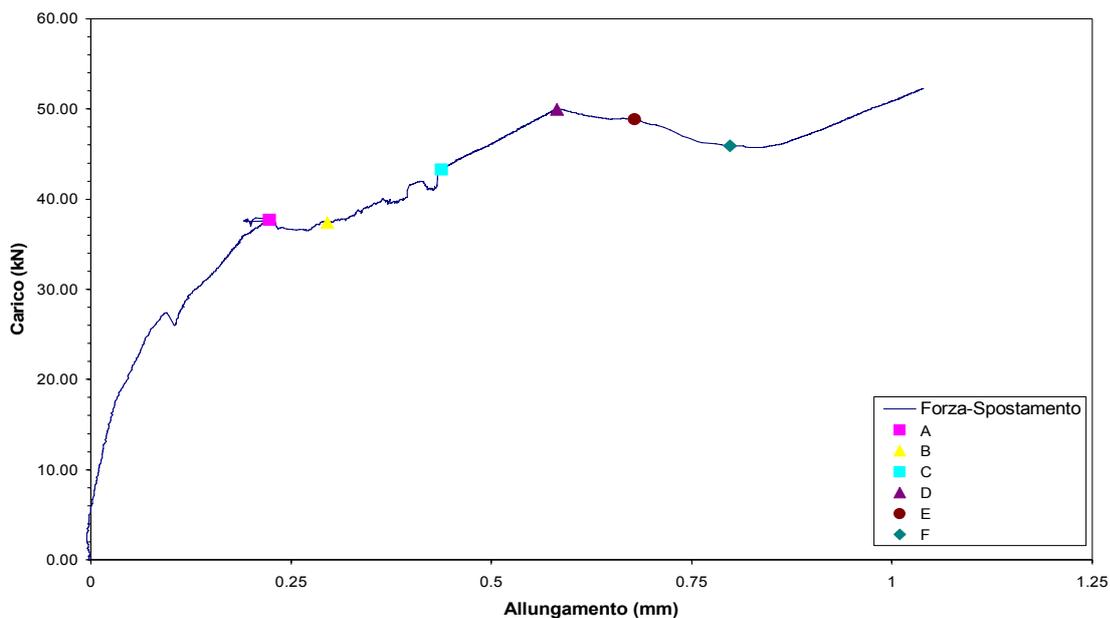


Grafico 3.14.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.14.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Il grafico non ha il classico grafico descritto in letteratura, non presenta il plateau costante che si vede nelle altre prove, il carico di delaminazione è stato individuato osservando il comportamento del primo estensimetro.

I punti A,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 49.94 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 45.90 kN.

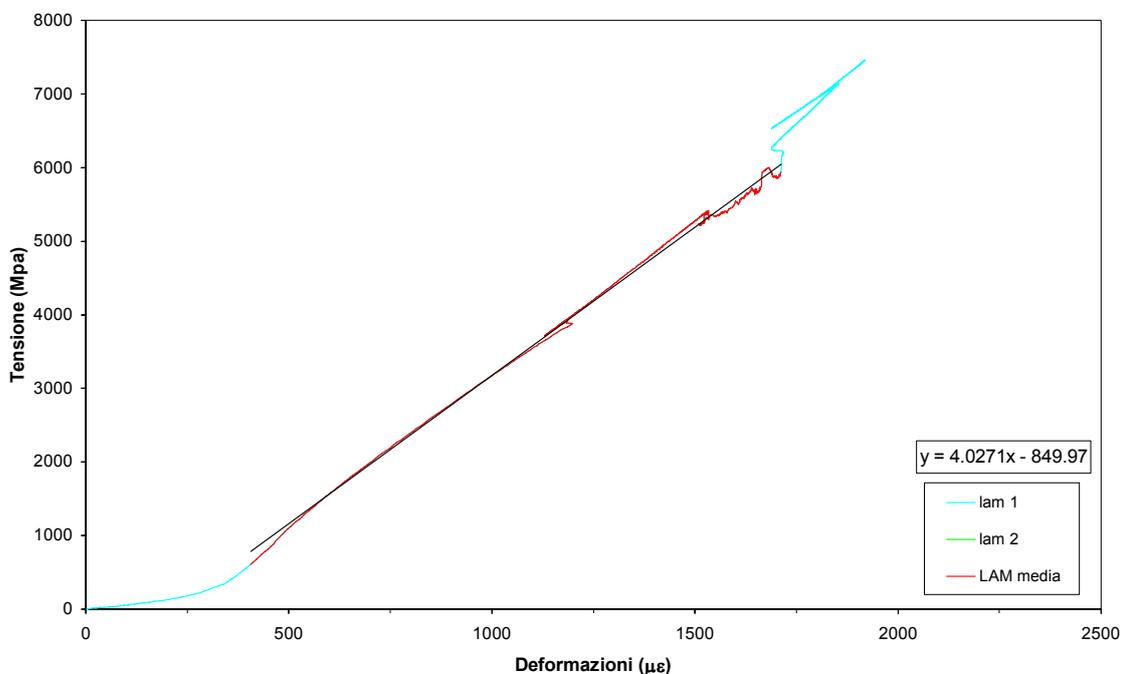


Grafico 3.14.2 Grafico Tensione–Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.14.2 sono riportate le deformazioni della lamina misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva della lamina in FRP che in questo caso è di 0.7 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico della lamina è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato della lamina pari a 402710 MPa.

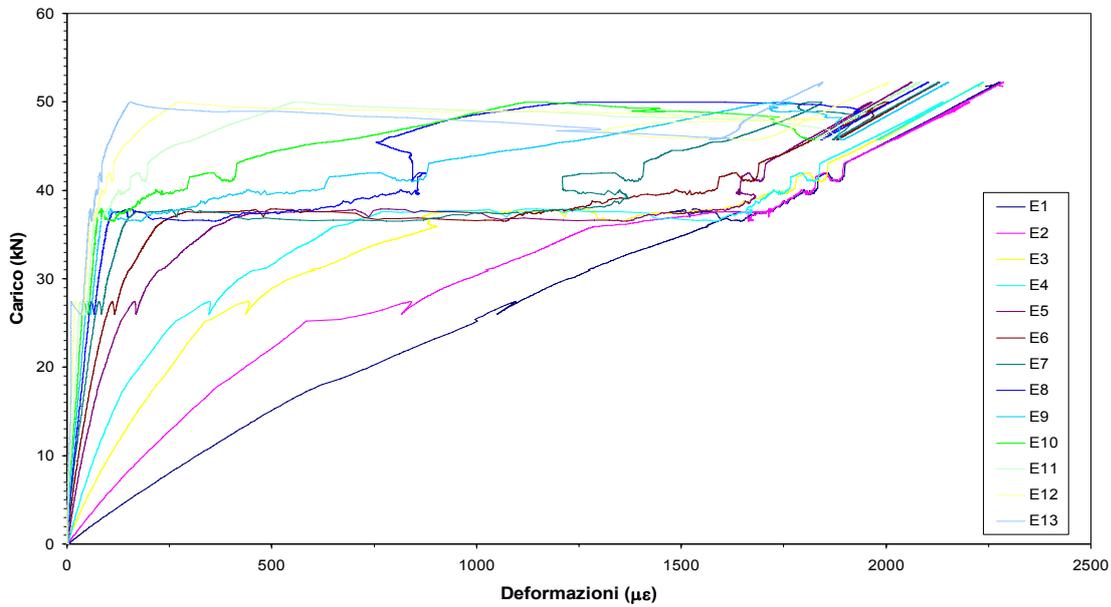


Grafico 3.14.3 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.14.3 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sulla lamina in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

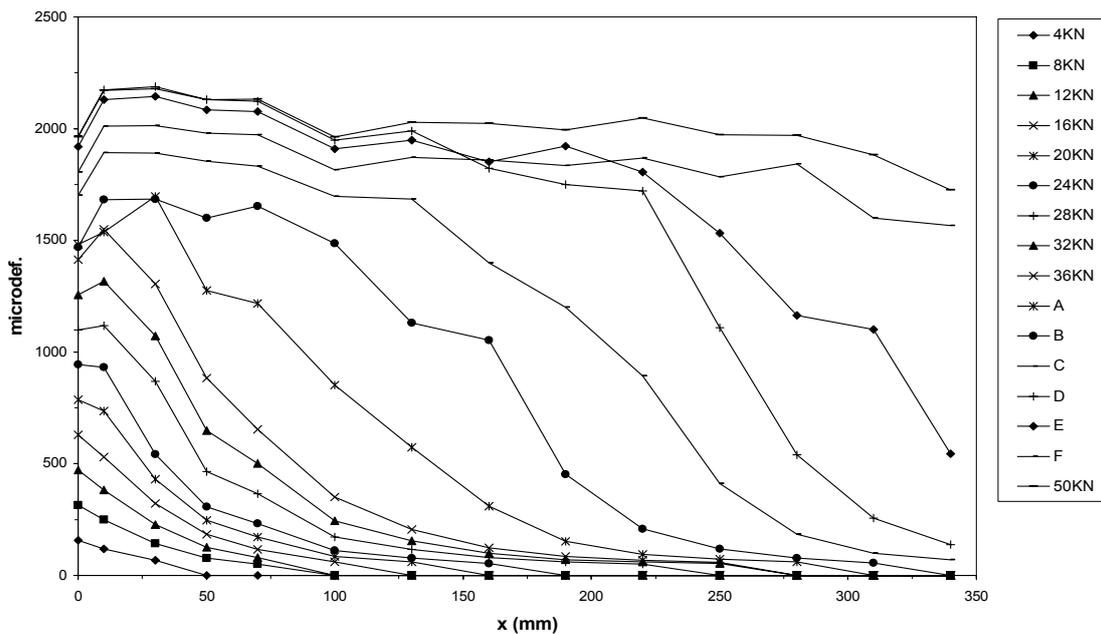


Grafico 3.14.4 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.14.4 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse della lamina.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

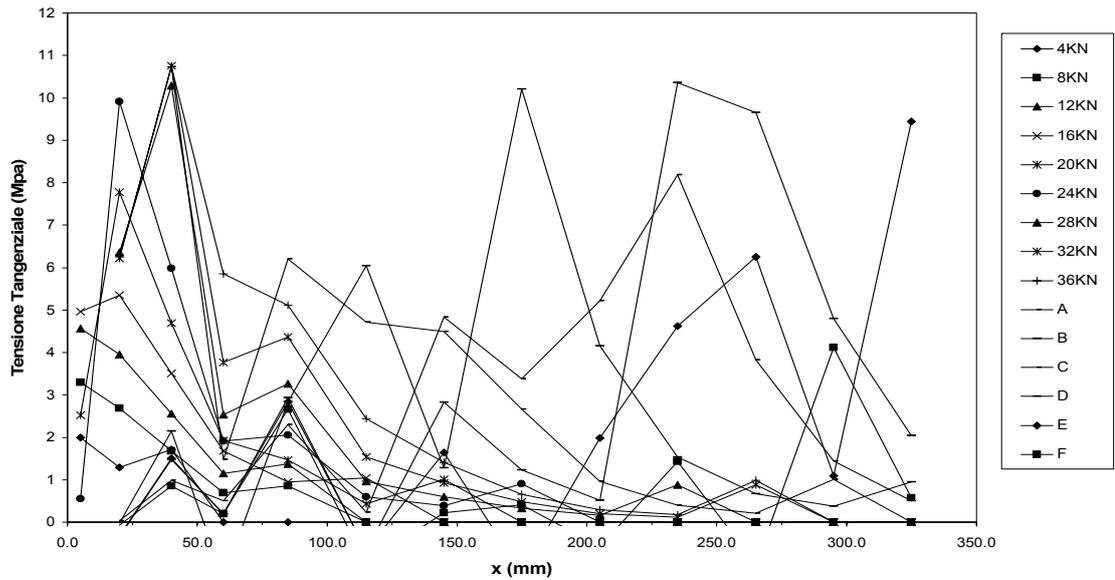


Grafico 3.14.5 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.14.5 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

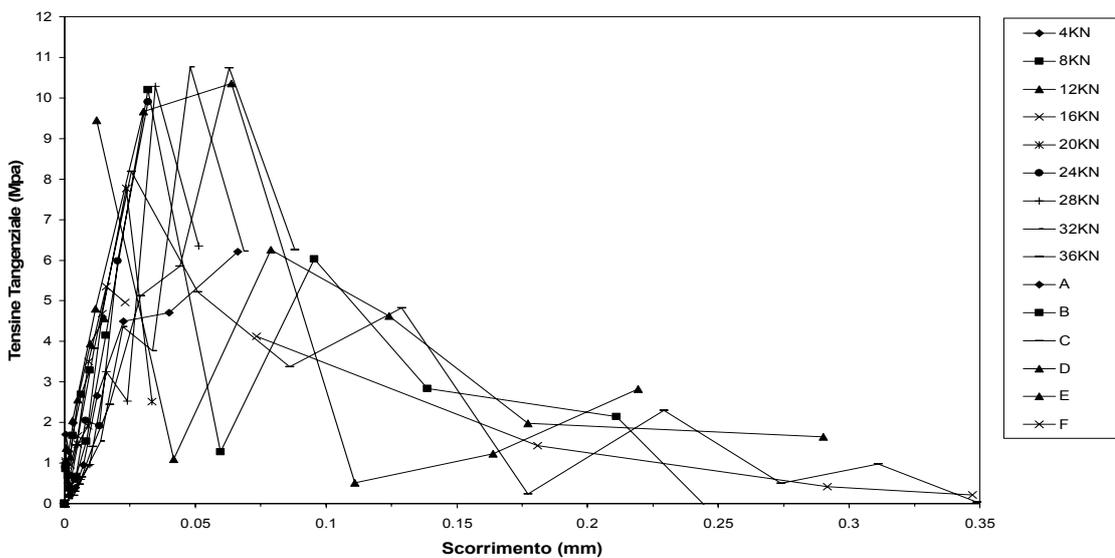


Grafico 3.14.6 Grafico Tensioni-Scorrimento della lamina

Il grafico 3.14.6 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

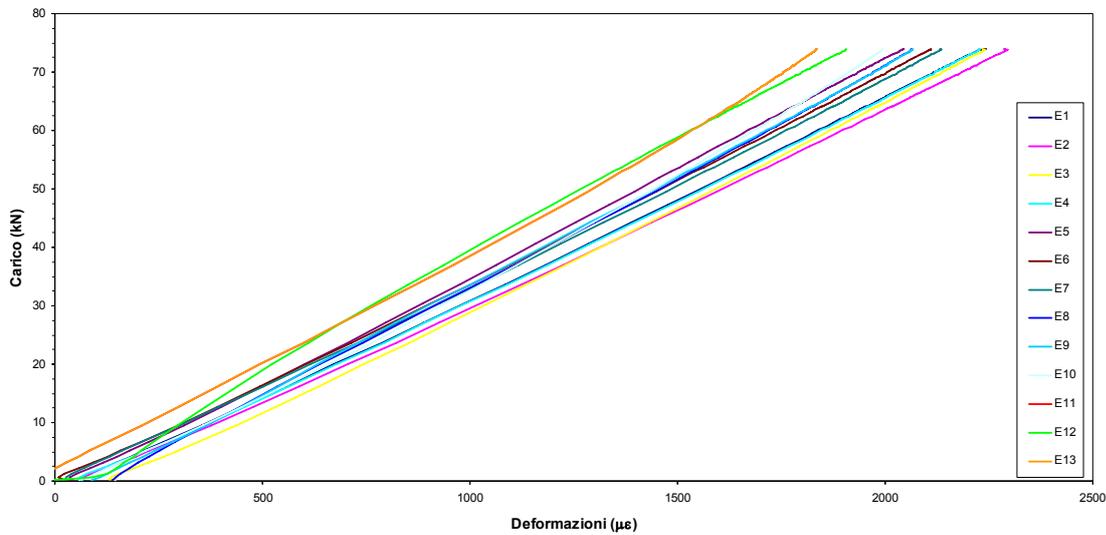


Grafico 3.14.7 Grafico Carico-Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo

Il grafico 3.14.7 rappresenta il rapporto carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico della lamina con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera della lamina.

Il modulo elastico ricavato dai due estensimetri nella parte libera risulta 402710 MPa, mentre il modulo ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali mediato risulta 363697.5 MPa.

Il grafico 3.14.8 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.14.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
49940	363697.5	4.1435	0.079396	7.0924

Tabella 3.14.3 Parametri dell'equazione analitica

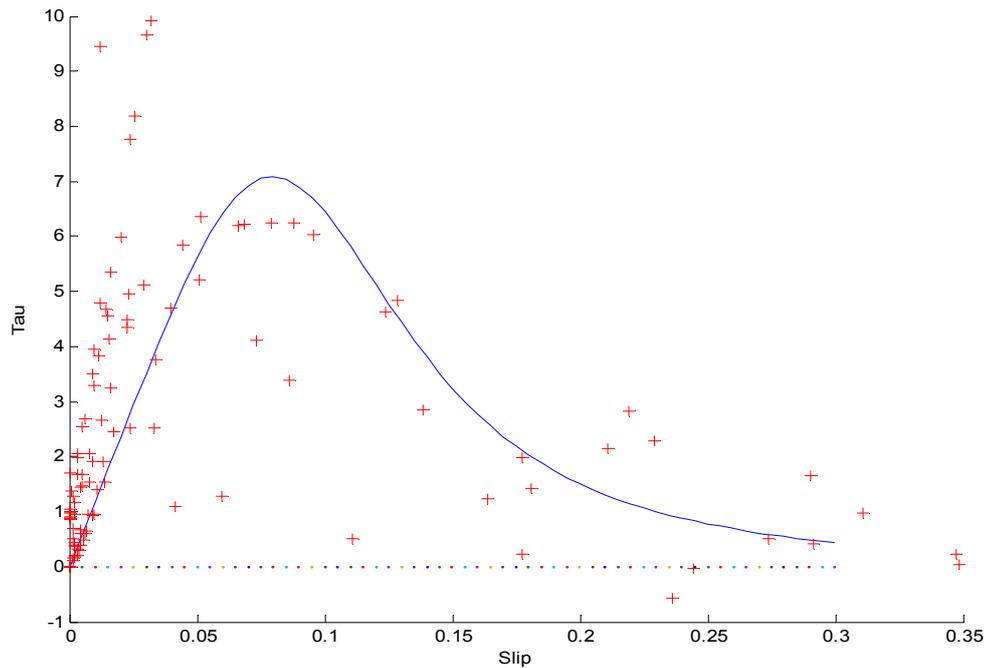


Grafico 3.14.8 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Come si nota nel grafico, l'elaborazione numerica dei dati crea una discrepanza tra i risultati della prova e i risultati dell'interpolazione rappresentata dalla curva azzurra.

Per un problema analitico, la curva ha una rigidezza del ramo crescente che non rappresenta in maniera corretta l'andamento dei punti ottenuti con la prova, questo comporta un abbattimento del tensione tangenziale massima.

Per ottenere un grafico che rappresenti in maniera corretta i dati sperimentali, è stata tarata una nuova curva imponendo il vincolo di mantenere l'energia di frattura costante valutata con la seguente equazione:

$$G_f = \int_0^{+\infty} \tau(s_p) ds_p = g_f(n) \tau_{\max} s_{\max} \quad (3.14.1)$$

dove $g_f(n)$ è valutata come

$$g_f(n) = \pi \left(\frac{1}{n-1} \right)^{1-\frac{2}{n}} \frac{1}{\sin(2\pi/n)} \quad (3.14.2)$$

L'energia di frattura graficamente è l'area sottesa della curva azzurra, valutandola con i dati della tabella 3.14.3 risulta essere pari a 0.965825, mantenendola costante sono stati variati i parametri fino ad ottenere una curva che rappresentasse in maniera corretta i risultati sperimentali.

I parametri della curva corretta sono elencati nella tabella 3.14.4, mentre nel grafico 3.14.9 viene confrontata la curva corretta con quella originale.

n	S max	Tau max (MPa)
4.1435	0.079396	7.0924

Tabella 3.14.4 Parametri dell'equazione analitica corretta

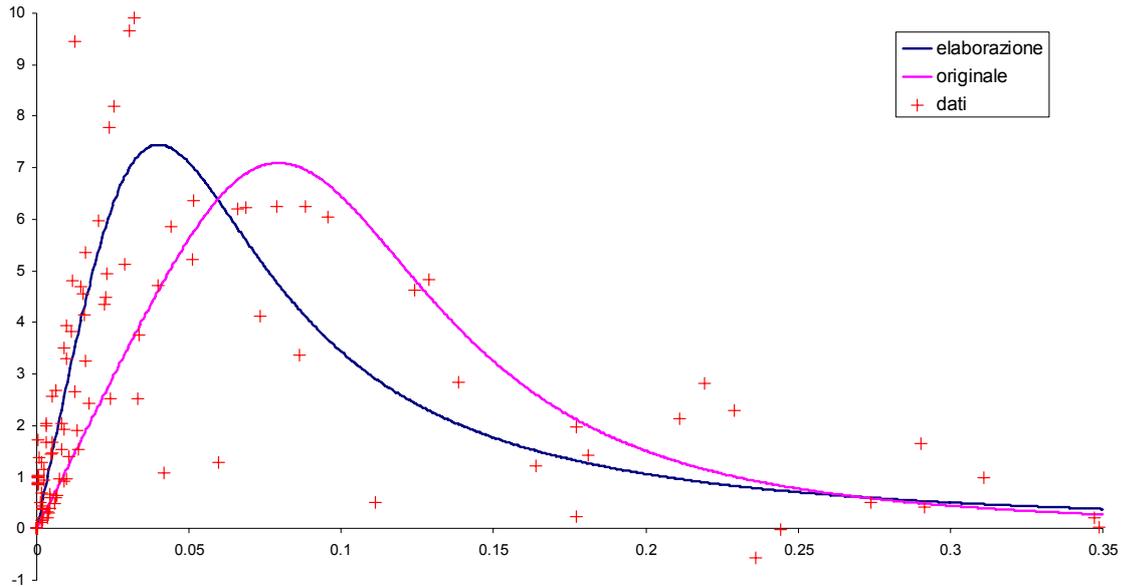


Grafico 3.14.9 Confronto tra curva originale e curva modificata

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

In questa prova abbiamo avuto una crisi mista, abbiamo zone in cui la crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls e zone in cui la resine si è scollata dal cls, come avevamo visto nella prova R12B.



Figura 3.14.3 Superficie delaminata



Figura 3.14.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.14.5 Particolare superficie delaminata

3.15 R13B



Figura 3.15.1 Prova R13B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm. La prova è stata eseguita il 10-05 07, quindi il cls ha avuto 336 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino è stato sottoposto per due mesi a nebbie saline.

Per la strumentazione sono stati installati solamente i due LVDT T1 e T2.



Figura 3.15.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	12.4 cm
L2	35.9 cm
L3	11.7 cm
L4	6.2 cm

Tabella 3.15.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.15.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

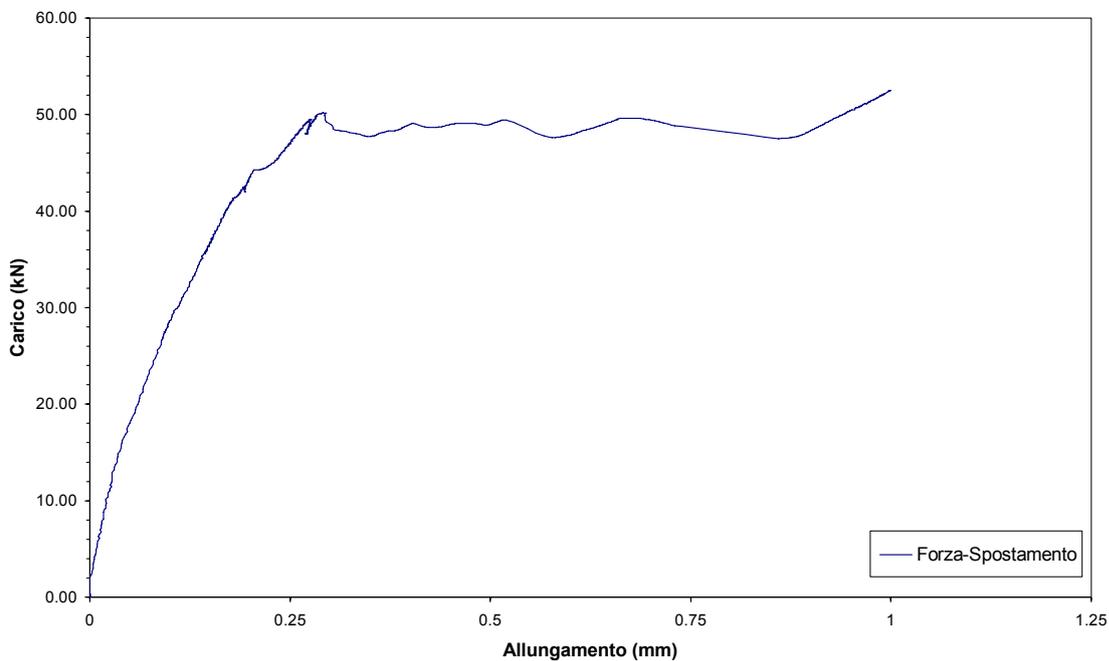


Grafico 3.15.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.15.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, fino al carico di delaminazione, raggiunto il quale la delaminazione si è sviluppata a carico costante.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico-lineare, in questo caso il ramo non è particolarmente lungo in quanto la cella di carico è non può essere sottoposta ad un carico superiore a 50 kN

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 50.17 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 47.67 kN.

Non avendo previsto la strumentazione degli estensimetri, non è stato valutato il modulo.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP, la parte di provino sotto all'ancoraggio posteriore ha prodotto una crepa durante la fase di sbloccaggio dei bulloni della piastra posteriore, probabilmente dovuta alla tensione prodotta dall'ancoraggio.

In questa prova abbiamo avuto una crisi mista, abbiamo zone in cui la crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls e zone in cui la resine si è scollata dal cls, come avevamo visto nella prova R12B, si nota la formazione di evidenti lamelle di cls, segno evidente delle tensioni elevate a cui era sottoposto il provino.



Figura 3.15.3 Superficie delaminata



Figura 3.15.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.15.5 Particolare superficie delaminata



Figura 3.15.6 Particolare superficie delaminata



Figura 3.15.7 Fessura nella parte posteriore del provino

3.16 R15A



Figura 3.16.1 Prova R15A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 24-10-06, quindi il cls ha avuto 138 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 133 cicli di gelo-disgelo.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 10 estensimetri.

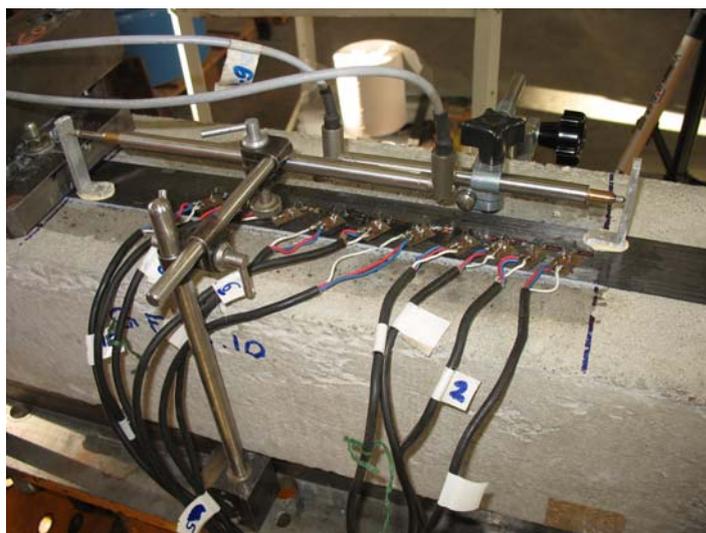


Figura 3.16.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: 6/120 LY 11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	13.7 cm
L2	37.3 cm
L3	9.0 cm
L4	5.5 cm

Tabella 3.16.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	7	E5
1	T1, WA 10.1	8	E6
2	T2, WA 20.9	9	E7
3	E1	10	E8
4	E2	11	E9
5	E3	12	E10
6	E4		

Tabella 3.16.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

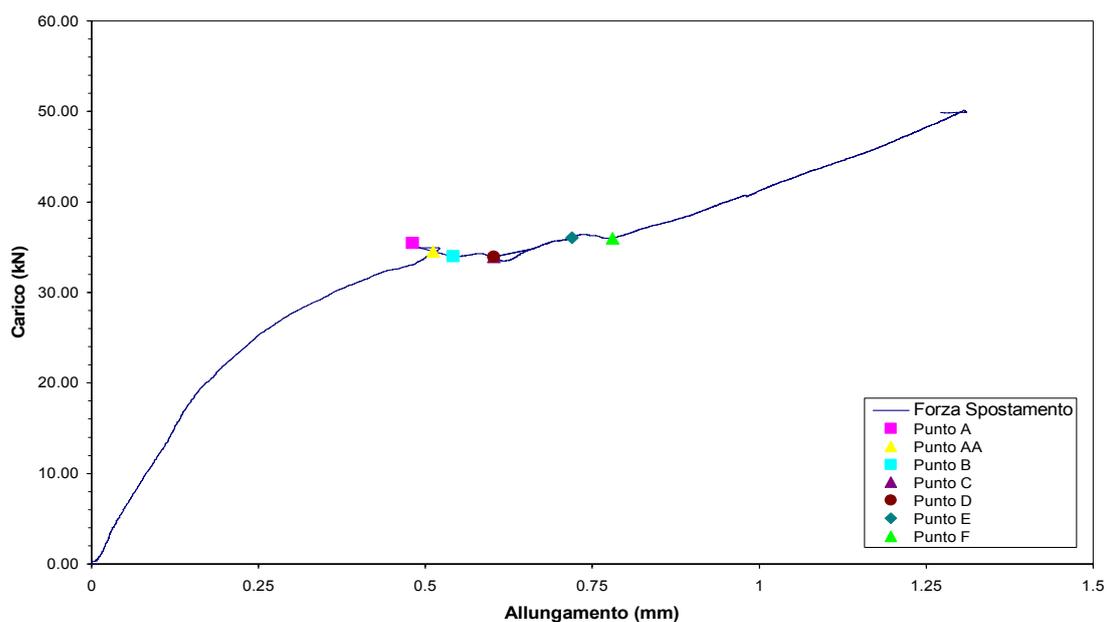


Grafico 3.16.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.16.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

In questa prova la delaminazione è avvenuta con un allungamento molto ridotto.

I punti A,AA,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 34.96 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 33.76 kN.

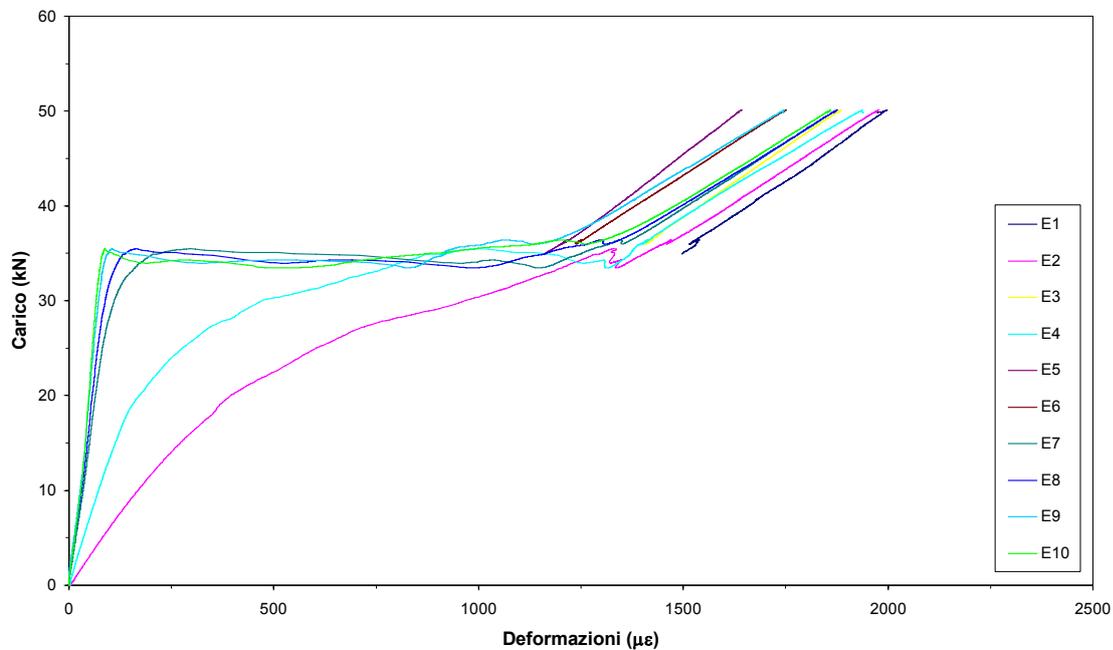


Grafico 3.16.2 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.16.2 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sulla lamina in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

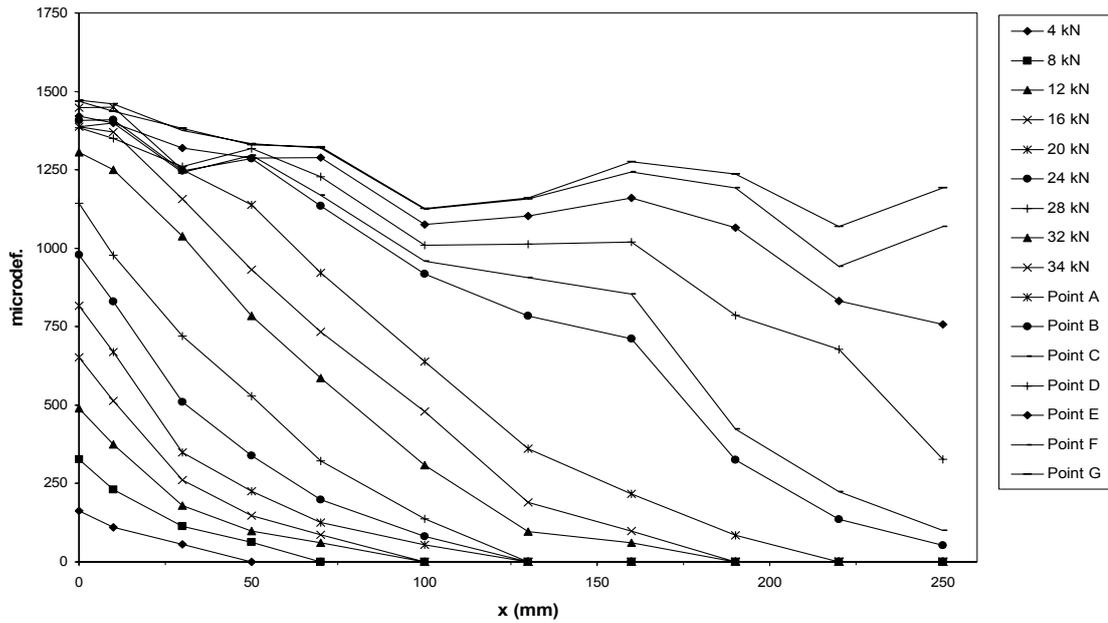


Grafico 3.16.3 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.16.3 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse della lamina.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

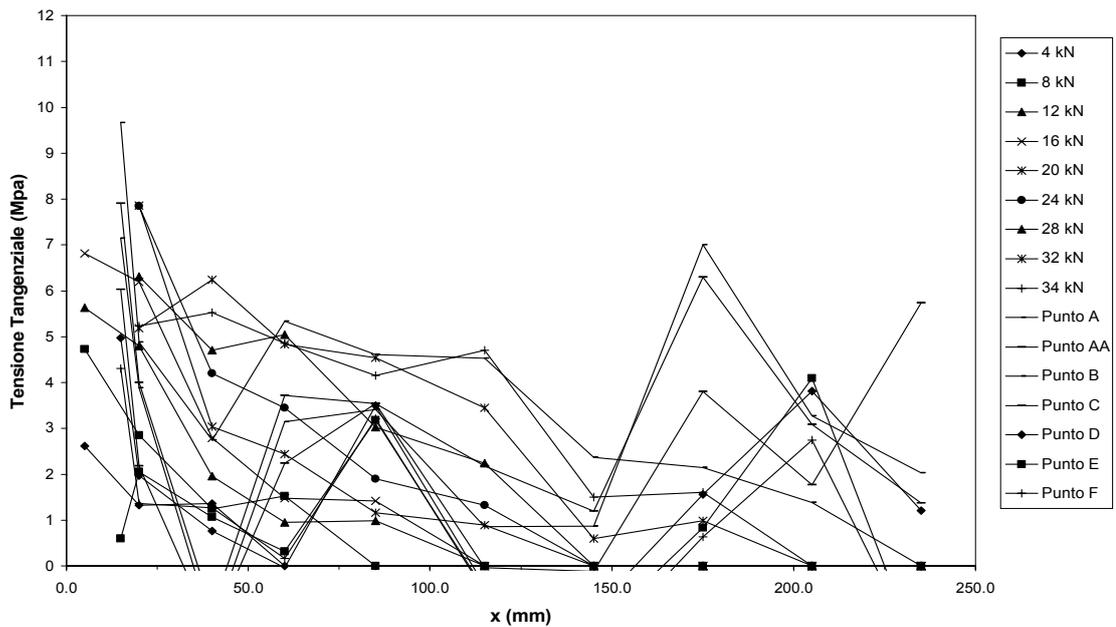


Grafico 3.16.4 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.16.4 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

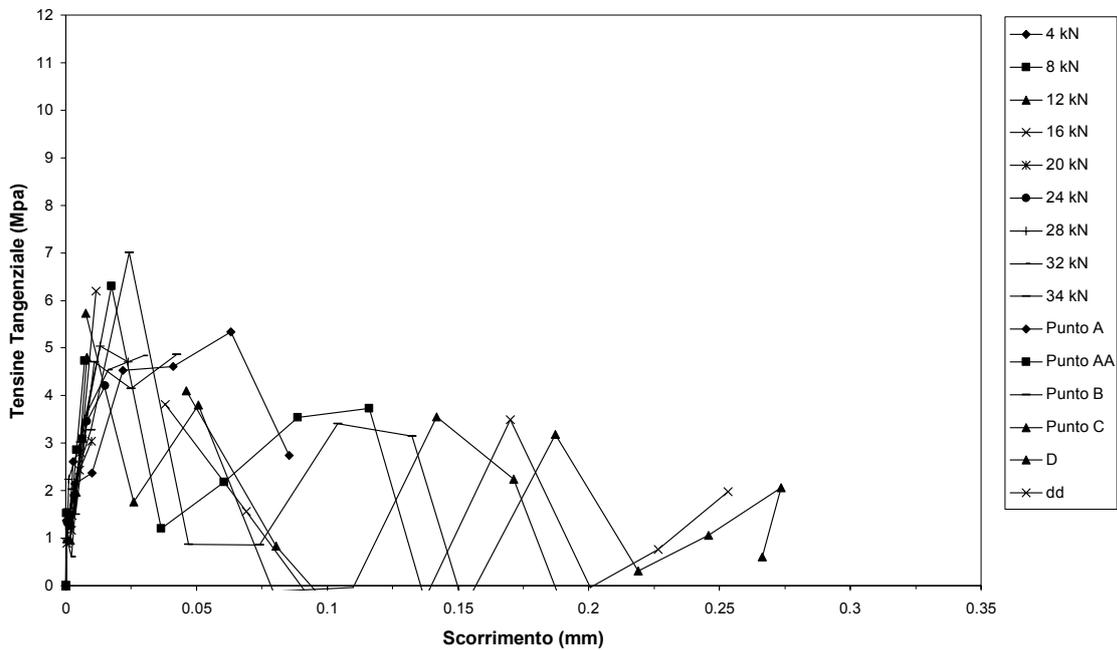


Grafico 3.16.5 Grafico Tensioni–Scorrimento della lamina

Il grafico 3.16.5 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

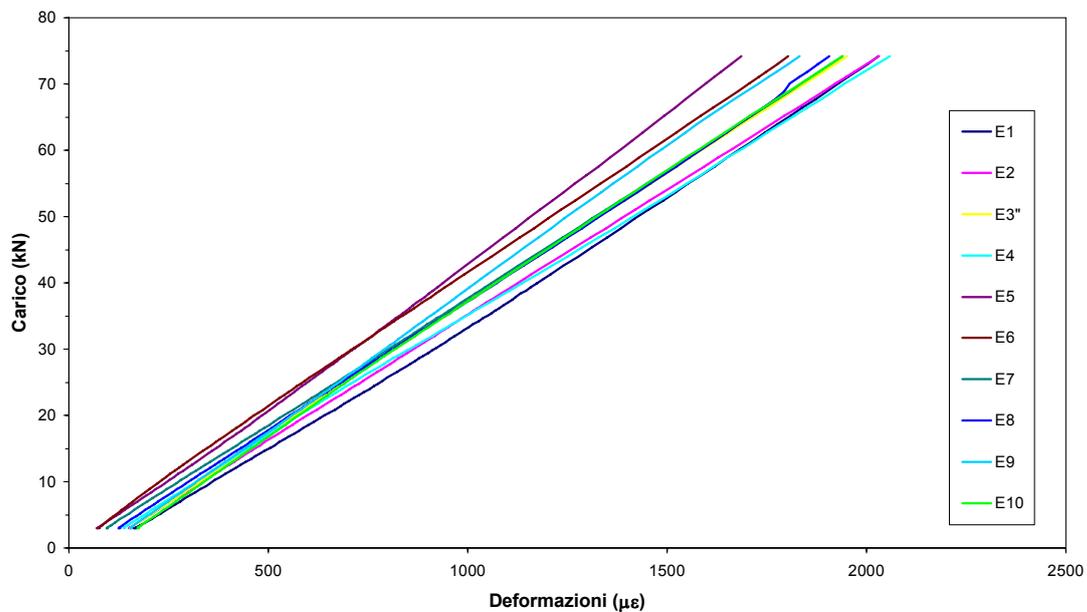


Grafico 3.16.6 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo

Il grafico 3.16.6 rappresenta il rapporto carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico della lamina con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera della lamina.

Il modulo ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali mediato risulta 397953 MPa.

Il grafico 3.16.7 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.16.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
34000	397953	2.4193	0.0136	5.3484

Tabella 3.16.3 Parametri dell'equazione analitica

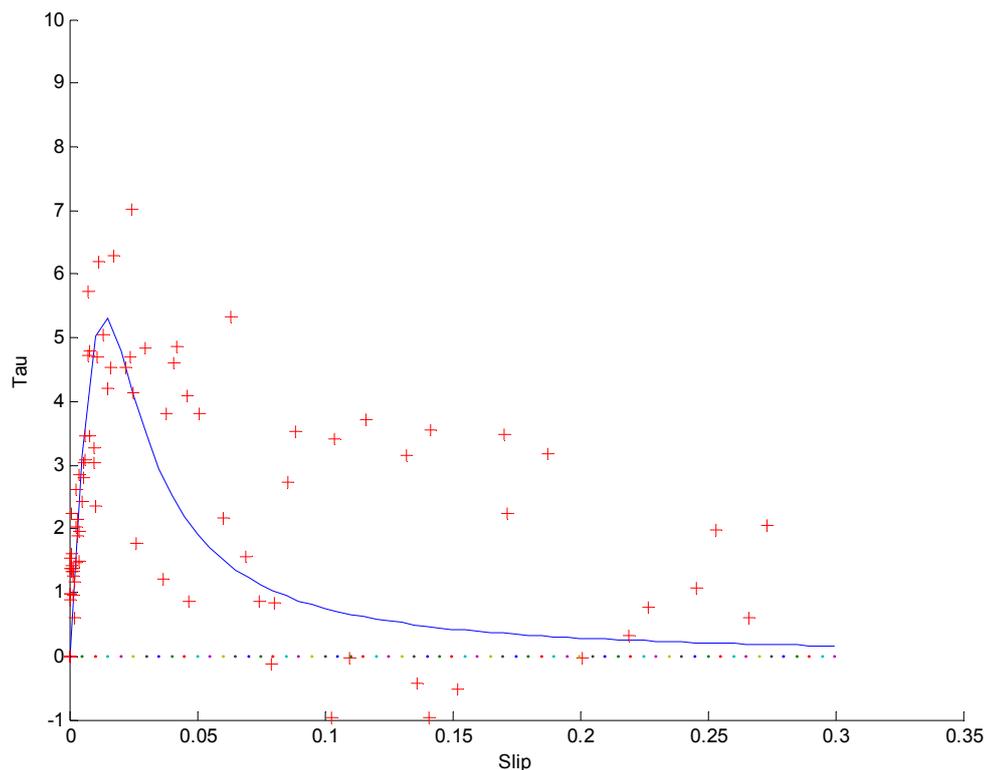


Grafico 3.16.7 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina, si nota nella superficie diversi inerti fratturati.



Figura 3.16.3 Superficie delaminata



Figura 3.16.4 Particolare superficie delaminata

3.17 R15B



Figura 3.17.1 Prova R15B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 07-12-06, quindi il cls ha avuto 182 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 133 cicli di gelo-disgelo.

Per la strumentazione sono stati installati solamente i due LVDT T1 e T2.

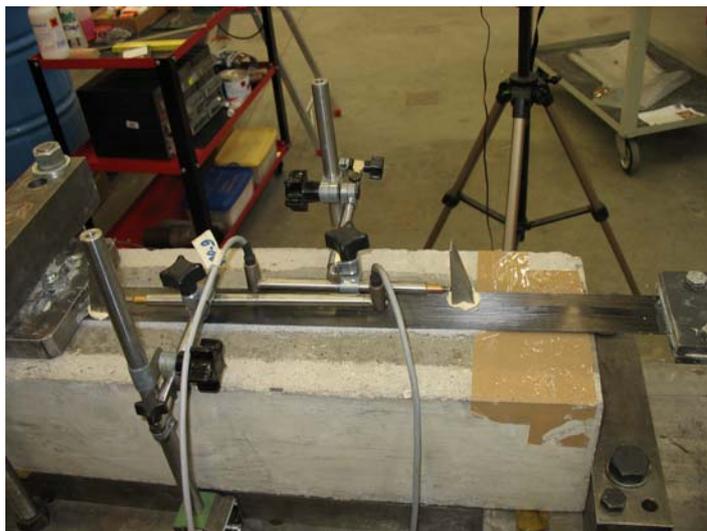


Figura 3.17.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.0 cm
L2	32.8 cm
L3	12.2 cm
L4	6.3 cm

Tabella 3.17.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.17.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Al momento della preparazione della prova si è notato che la lamina era fessurata longitudinalmente nella parte libera (figura 3.17.3), si è proceduto comunque nella prova in quanto il tipo di fessura non comprometteva il risultato.

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

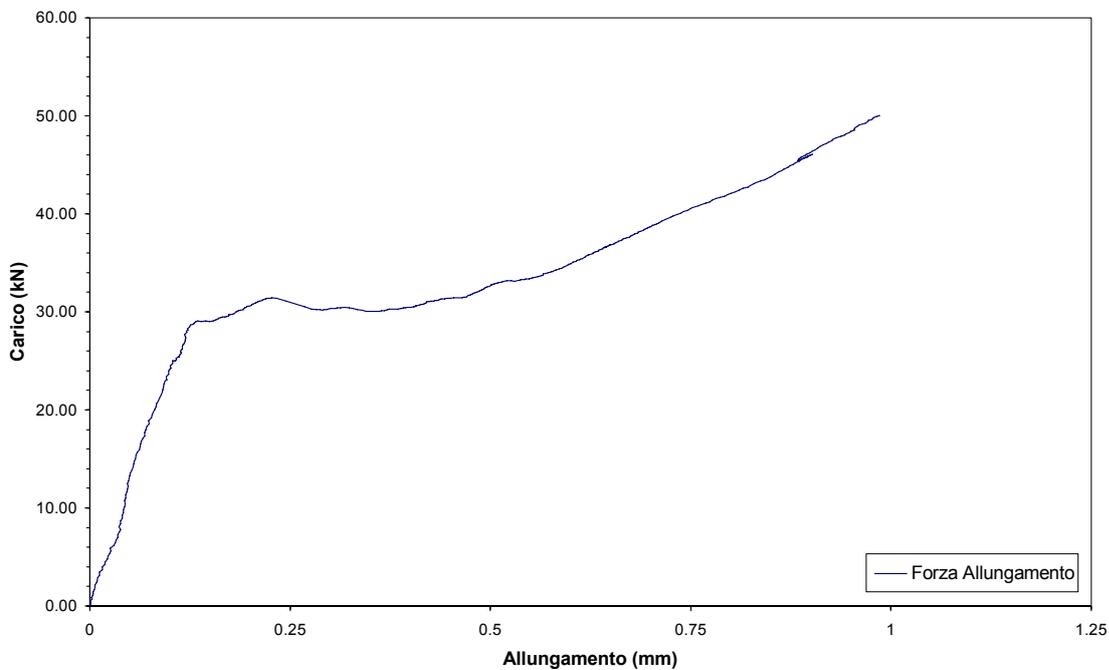


Grafico 3.17.1 Grafico Carico–Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.17.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, al raggiungimento del carico di delaminazione si nota un plateau abbastanza costante.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 31.19 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 30.14 kN.

Non avendone prevista la strumentazione, non si hanno i dati per valutare i moduli della lamina.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina.



Figura 3.17.3 Fessura longitudinale della lamina



Figura 3.17.4 Superficie delaminata



Figura 3.17.5 Particolare superficie delaminata

3.18 R16A



Figura 3.18.1 Prova R16A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 19-04-07, quindi il cls ha avuto 315 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 409 cicli di gelo-disgelo.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 13 estensimetri e i due estensimetri per il modulo sulla lamina.

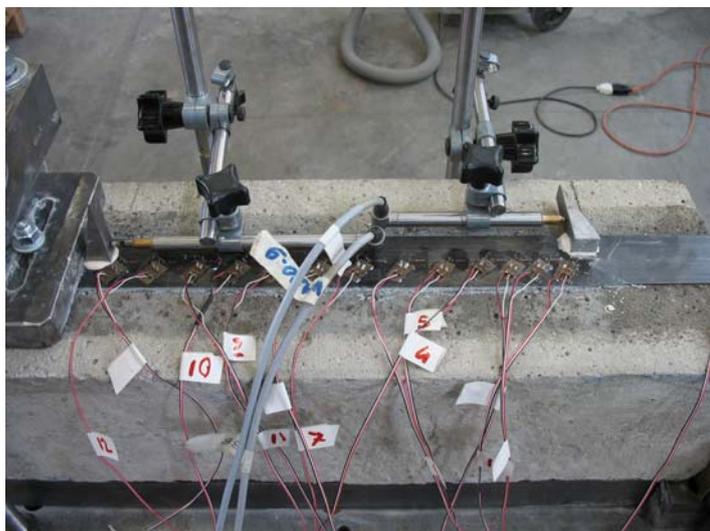


Figura 3.18.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: FLA 6-11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.4 cm
L2	32.8 cm
L3	11.8 cm
L4	6.0 cm

Tabella 3.18.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	9	E7
1	T1, WA 10.1	10	E8
2	T2, WA 20.9	11	E9
3	E1	12	E10
4	E2	13	E11
5	E3	14	E12
6	E4	15	E13
7	E5	16	E LAM SU
8	E6	17	E LAM GIU

Tabella 3.18.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

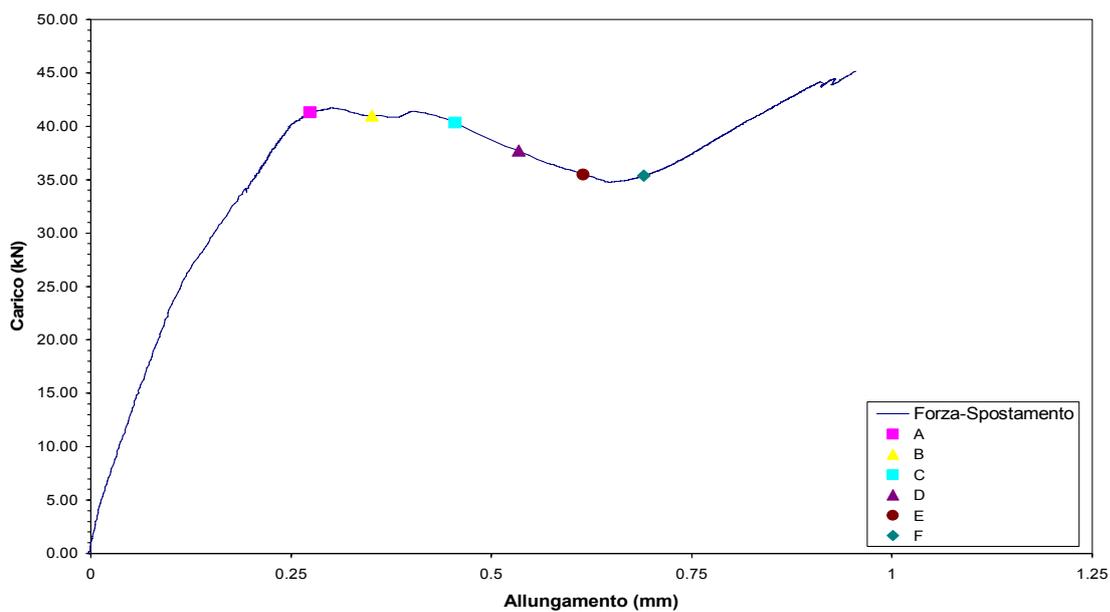


Grafico 3.18.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.18.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, raggiunto il carico critico, la delaminazione si sviluppa all'inizio con carico costante, successivamente con un abbattimento del carico.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

I punti A,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 41.61 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 34.84 kN.

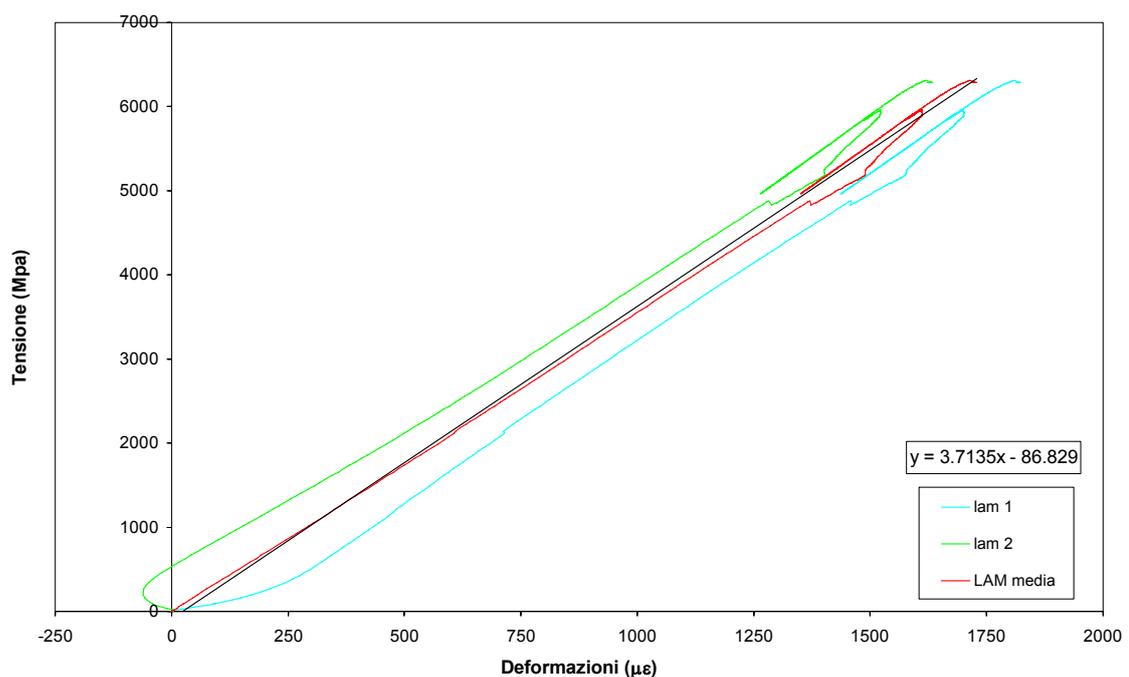


Grafico 3.18.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.18.2 sono riportate le deformazioni della lamina misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva della lamina in FRP che in questo caso è di 0.7 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico della lamina è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato della lamina pari a 371350 MPa.

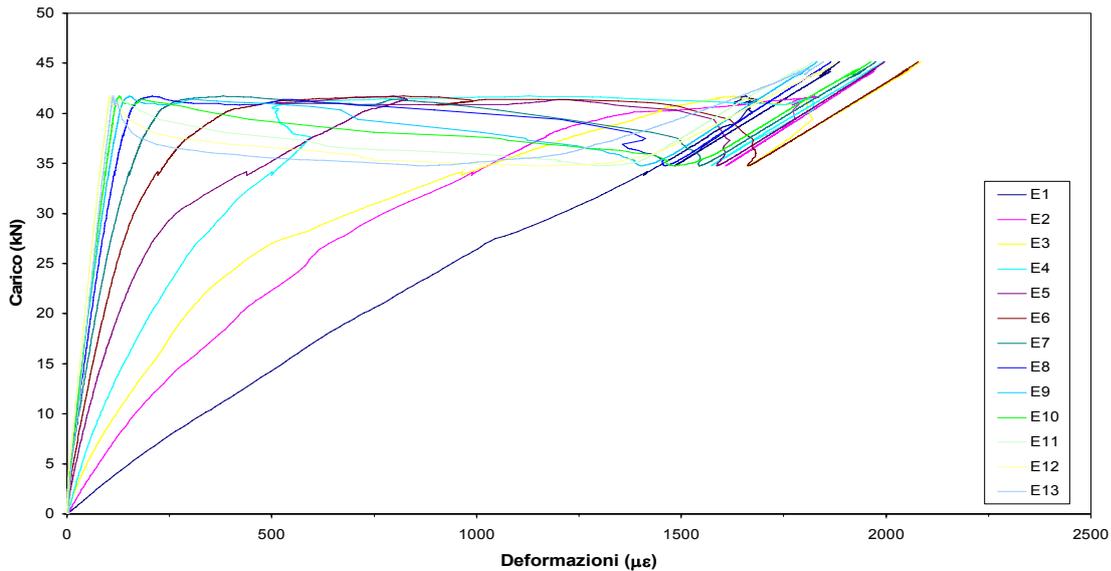


Grafico 3.18.3 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.18.3 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sulla lamina in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

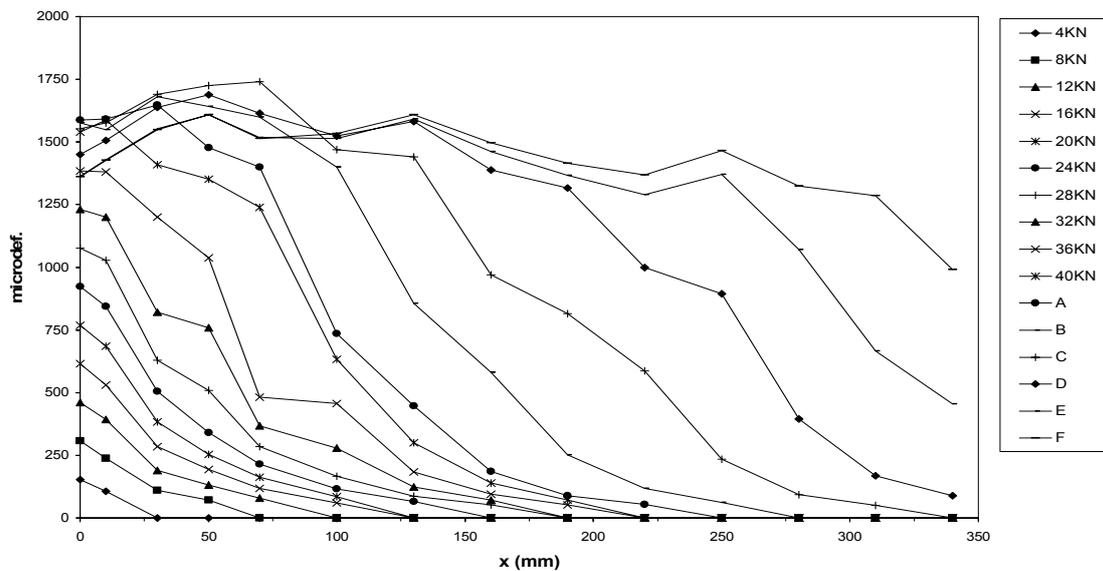


Grafico 3.18.4 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.2.4 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse della lamina.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

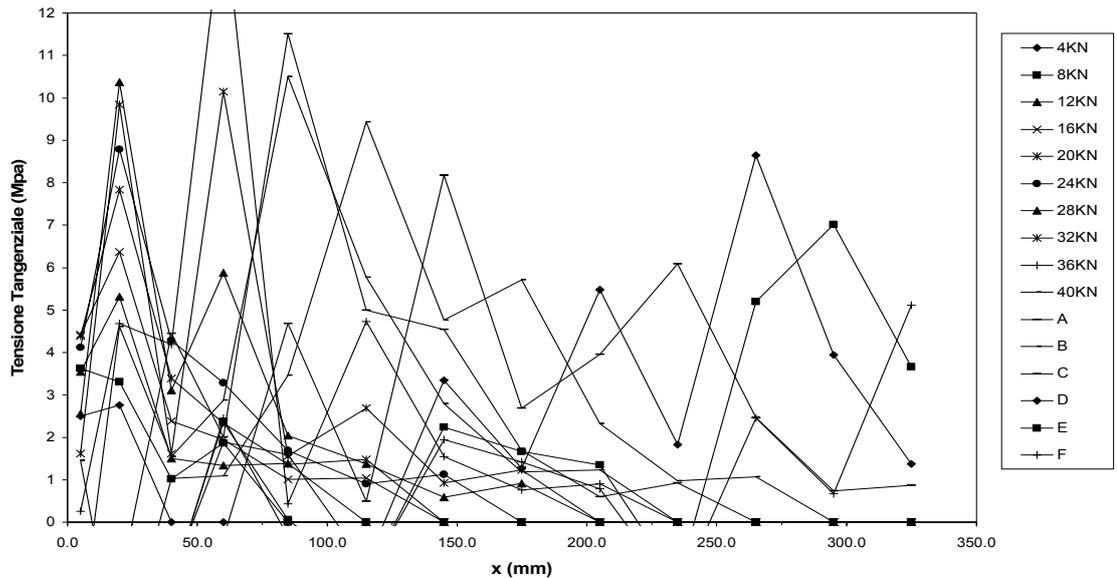


Grafico 3.18.5 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.18.5 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

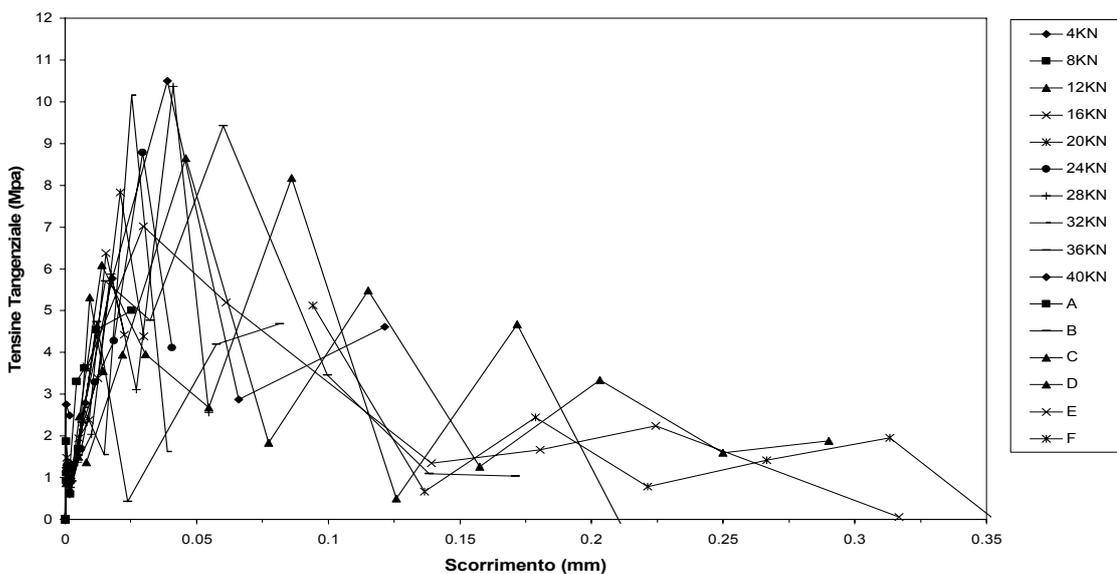


Grafico 3.18.6 Grafico Tensioni–Scorrimento della lamina

Il grafico 3.18.6 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

Il grafico 3.18.7 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.18.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
37000	371350	2.9536	0.028609	6.1767

Tabella 3.18.3 Parametri dell'equazione analitica

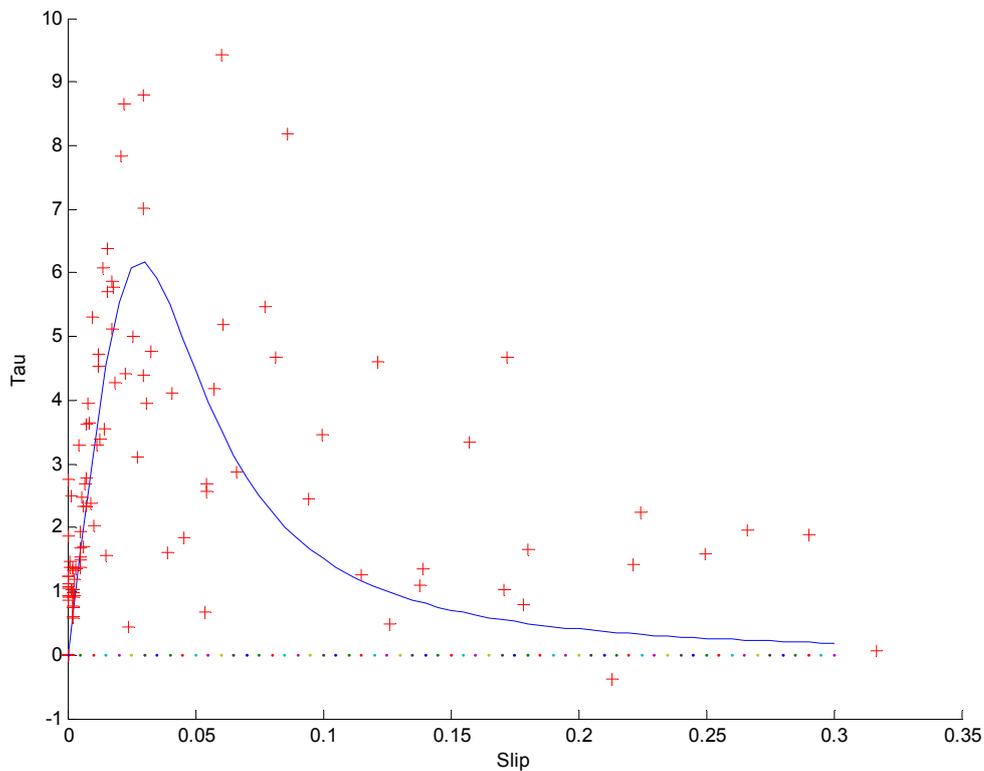


Grafico 3.18.7 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina.



Figura 3.18.3 Superficie delaminata



Figura 3.18.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.18.5 Particolare superficie delaminata

3.19 R16B



Figura 3.19.1 Prova R16B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 03-05-07, quindi il cls ha avuto 329 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 409 cicli di gelo-disgelo.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 10 estensimetri e i due estensimetri per il modulo sulla lamina.

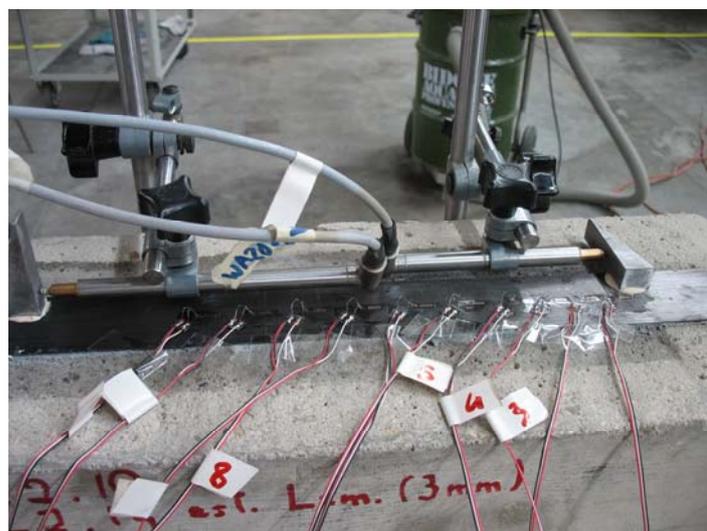


Figura 3.19.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: FLA 6-11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per i dieci estensimetri sulla lamina, 2.14 per i due estensimetri utilizzati per valutare il modulo elastico.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.2 cm
L2	33.8 cm
L3	11.0 cm
L4	6.3 cm

Tabella 3.19.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	8	E6
1	T1, WA 10.1	9	E7
2	T2, WA 20.9	10	E8
3	E1	11	E9
4	E2	12	E10
5	E3	13	E LAM SU
6	E4	14	E LAM GIU
7	E5		

Tabella 3.19.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

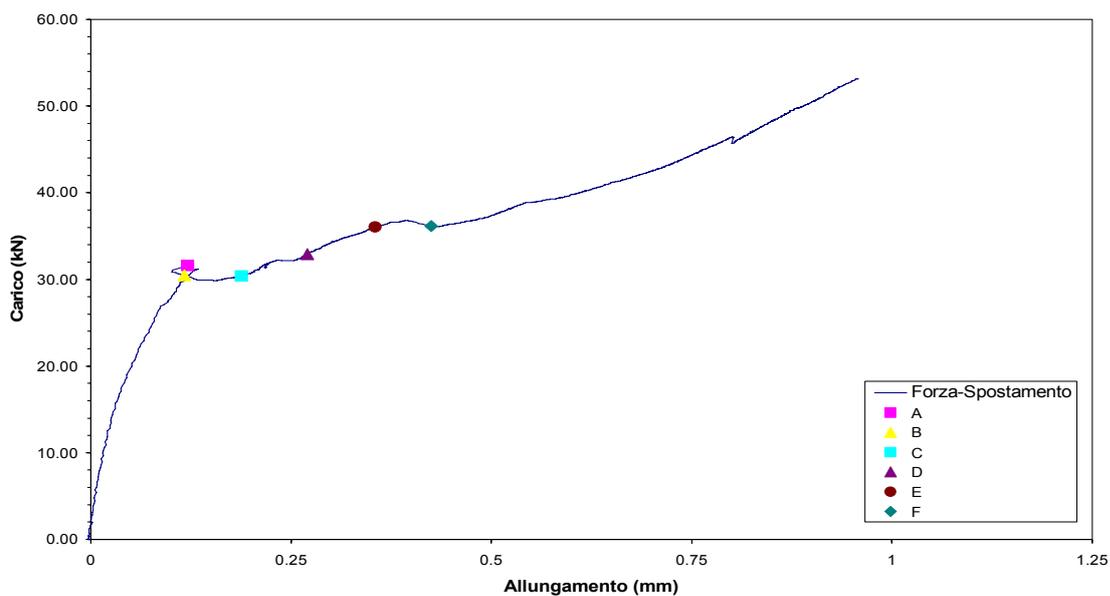


Grafico 3.19.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.19.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, raggiunto il carico di delaminazione, si nota un piccolo “cappio” dovuto probabilmente alla rotazione del contrasto dell’LVDT T1.

La delaminazione è avvenuta con un leggero aumento di carico, non si distingue con precisione la fine della delaminazione e la ripresa del tratto elastico-lineare.

I punti A,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 31.57 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 30.16 kN.

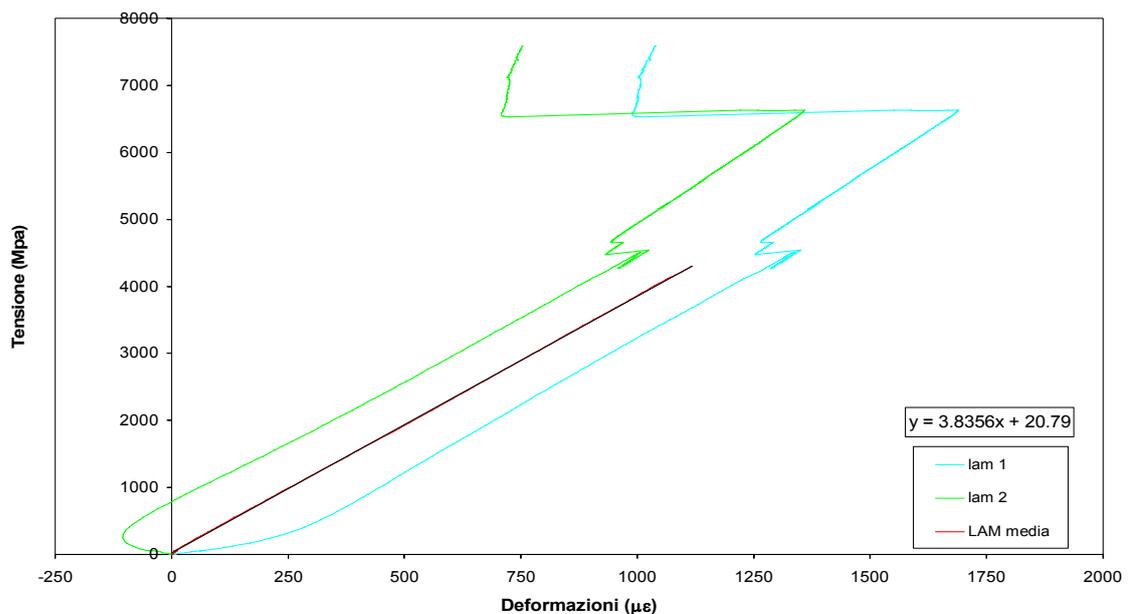


Grafico 3.19.2 Grafico Tensione–Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.19.2 sono riportate le deformazioni della lamina misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l’area effettiva della lamina in FRP che in questo caso è di 0.7 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico della lamina è rappresentato dall’inclinazione di quest’ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato della lamina pari a 383560 MPa.

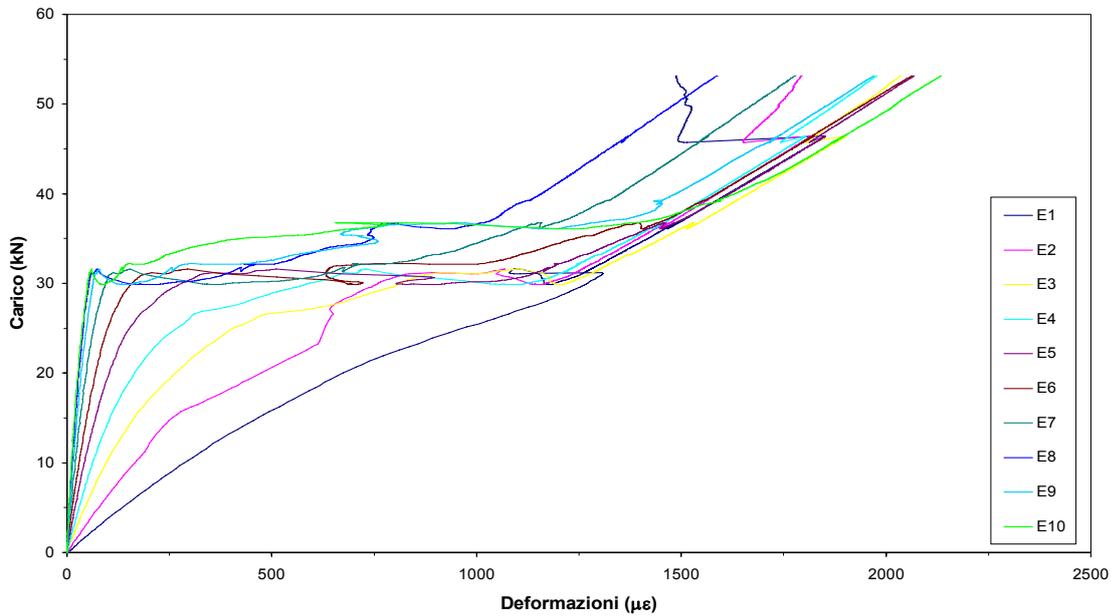


Grafico 3.19.3 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.19.3 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sulla lamina in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

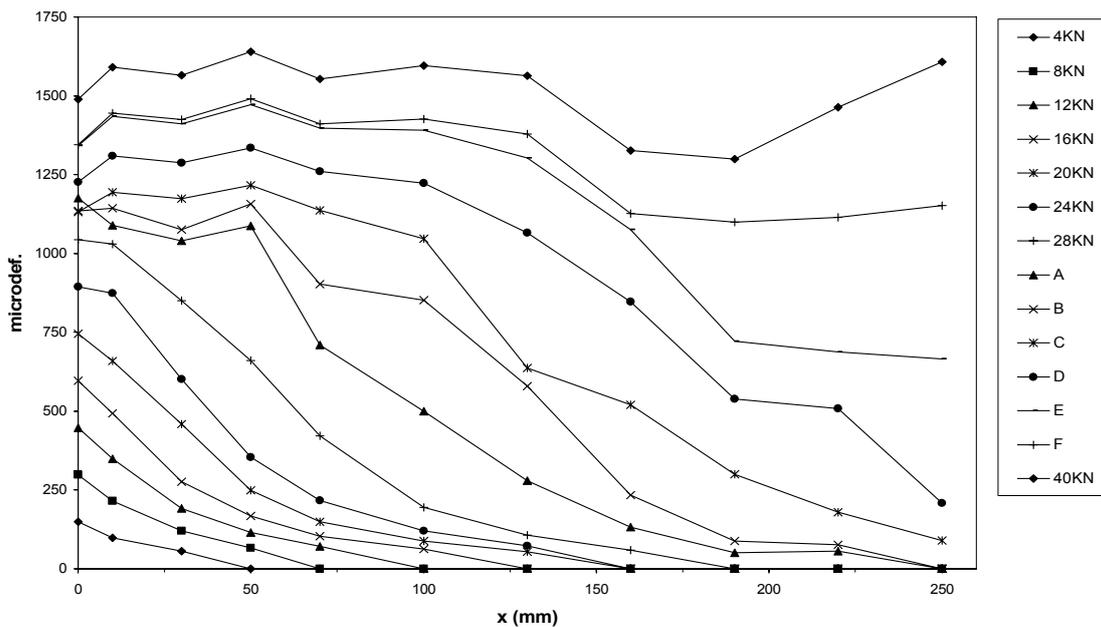


Grafico 3.19.4 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.19.4 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse della lamina.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

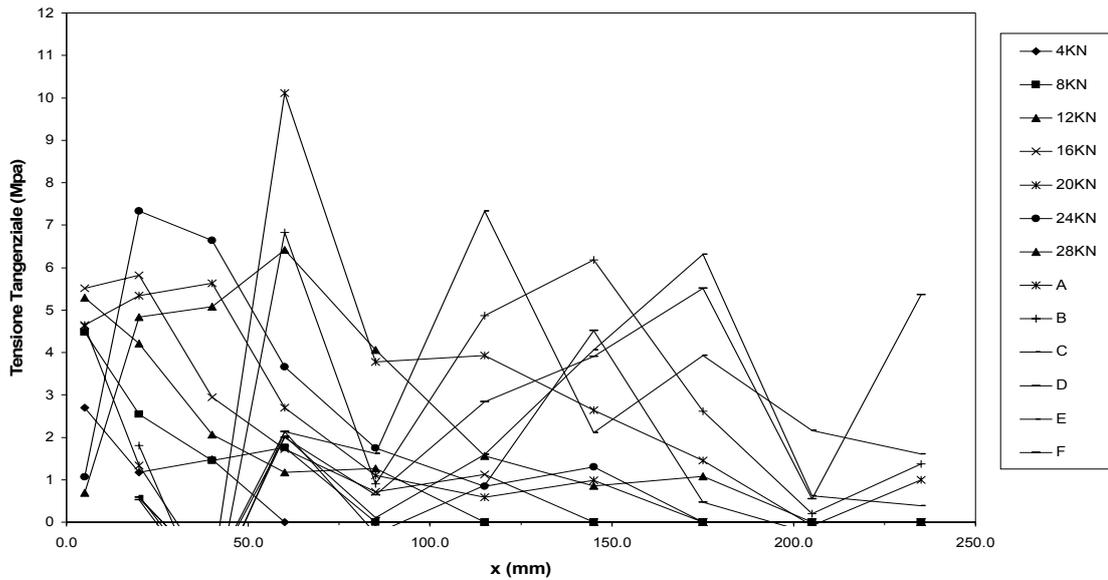


Grafico 3.19.5 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.19.5 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

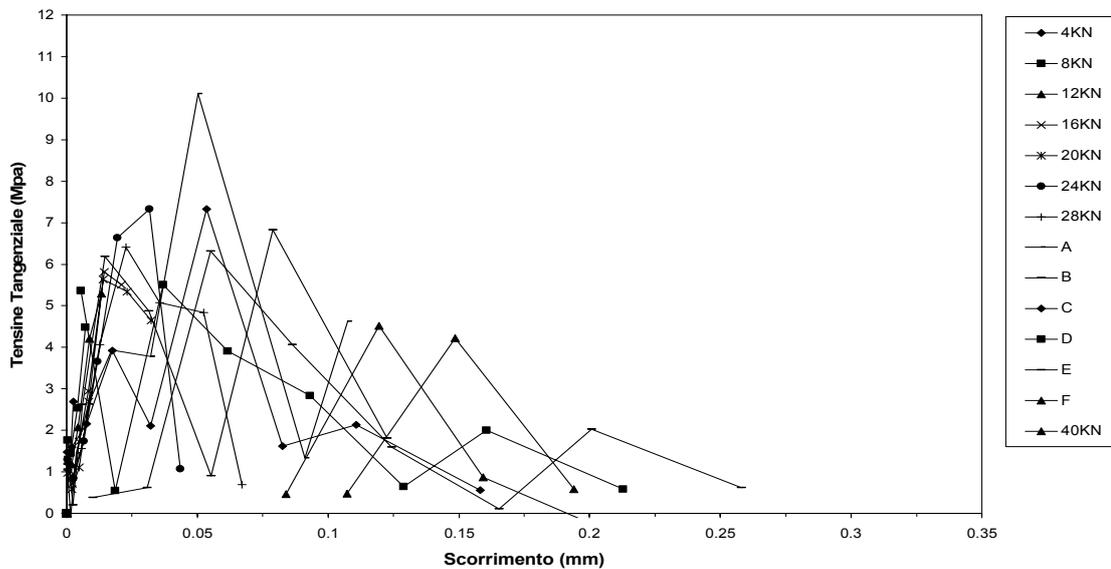


Grafico 3.19.6 Grafico Tensioni-Scorrimento della lamina

Il grafico 3.19.6 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

Il grafico 3.19.7 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.19.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
32000	383560	2.7607	0.01974	5.4732

Tabella 3.19.3 Parametri dell'equazione analitica

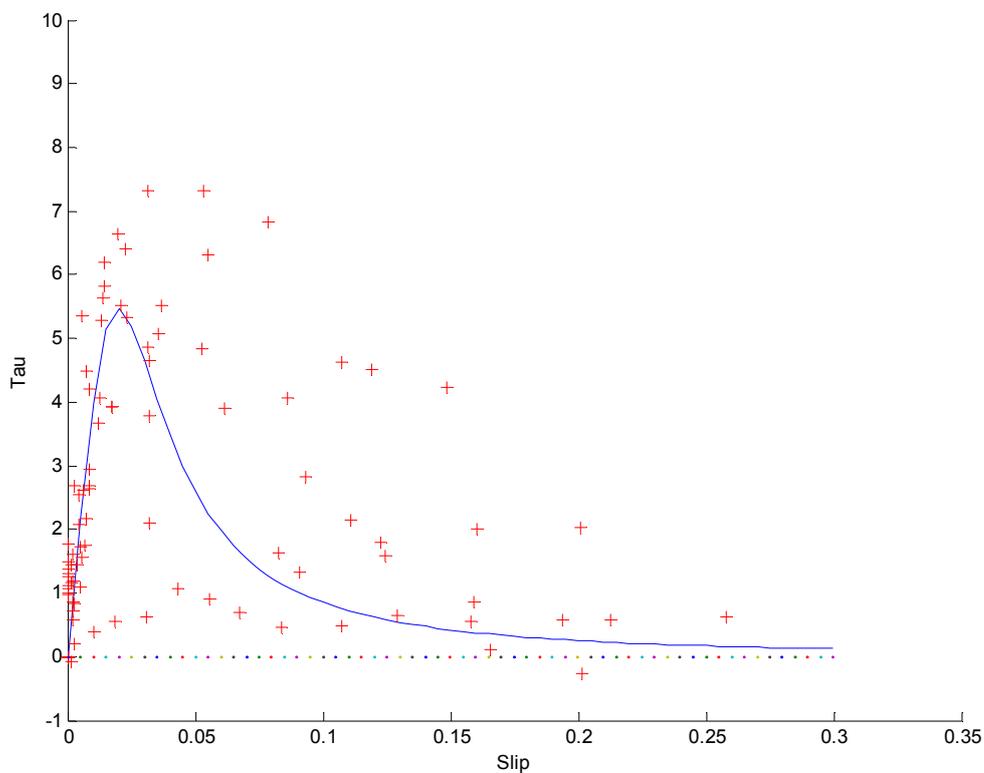


Grafico 3.19.7 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina, si nota inoltre che la resina del bordo lamina è rimasta attaccata alla stessa asportando parte del cls.

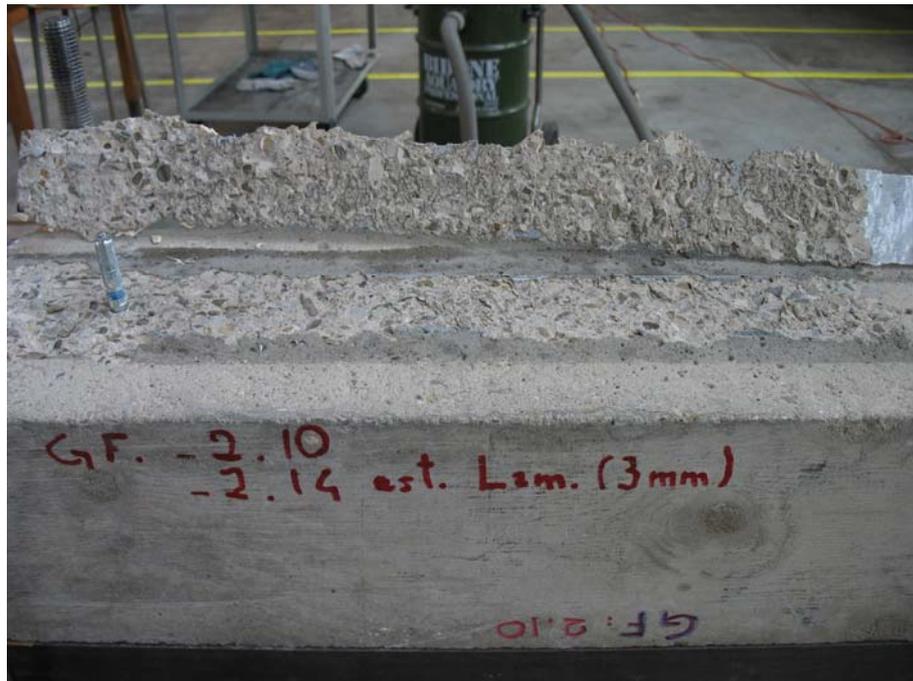


Figura 3.19.3 Superficie delaminata



Figura 3.19.4 Particolare superficie delaminata

3.20 R17A



Figura 3.20.1 Prova R17A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 12-07-07, quindi il cls ha avuto 399 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il Provino è rimasto all'aperto dal 15-09-06 fino alla data della prova.

Per la strumentazione sono stati utilizzati i due estensimetri per il modulo sulla lamina.



Figura 3.20.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: FLA 6-11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.2 cm
L2	32.9 cm
L3	11.9 cm
L4	6.4 cm

Tabella 3.20.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	3	E LAM SU
1	T1, WA 10.1	4	E LAM GIU
2	T2, WA 20.9		

Tabella 3.20.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

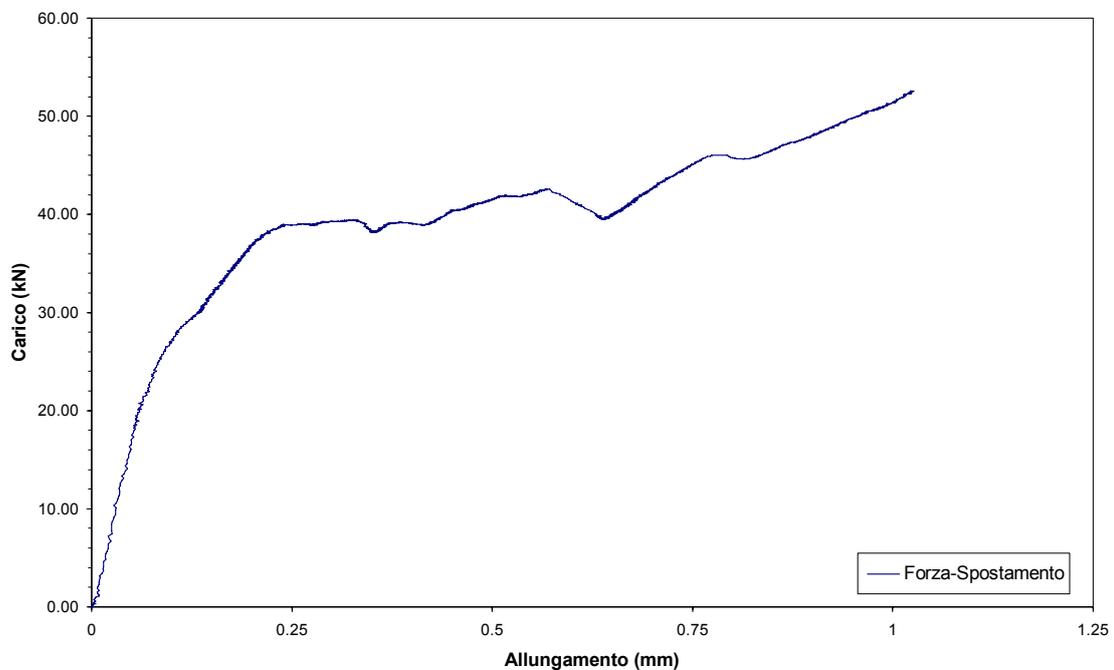


Grafico 3.20.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.20.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, raggiunto il carico di delaminazione, ho un plateau relativamente costante.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 42.24 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 38.74 kN.

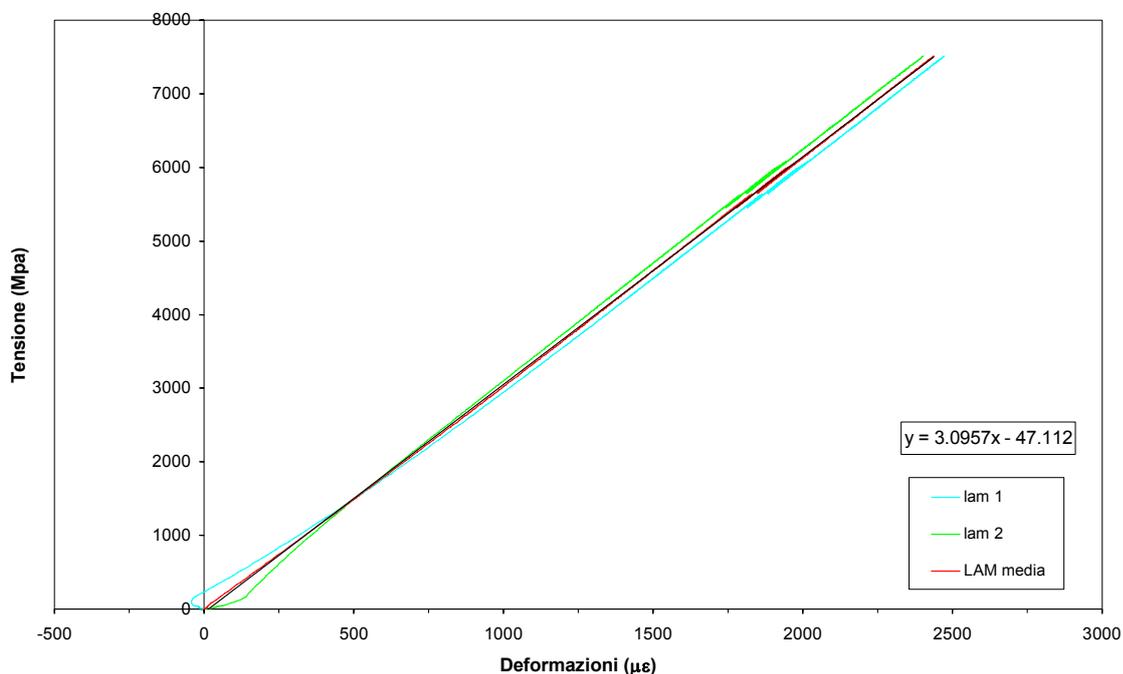


Grafico 3.20.2 Grafico Tensione–Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.20.2 sono riportate le deformazioni della lamina misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva della lamina in FRP che in questo caso è di 0.7 cm^2 .

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico della lamina è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo

valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato della lamina pari a 309570 MPa.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina

La resina, con la delaminazione, ha asportato parte di cls al bordo.



Figura 3.20.3 Superficie delaminata



Figura 3.20.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.20.5 Particolare superficie delaminata

3.21 R17B

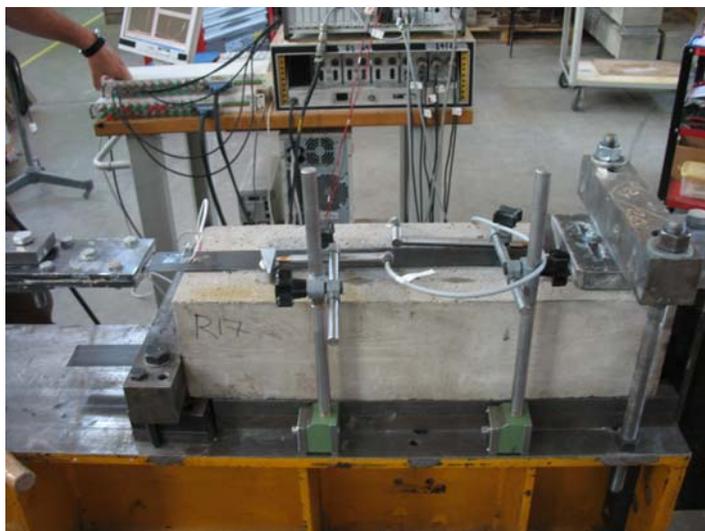


Figura 3.21.1 Prova R17B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 10-07-07, quindi il cls ha avuto 397 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il Provino è rimasto all'aperto dal 15-09-06 fino alla data della prova.

Per la strumentazione sono stati utilizzati i due estensimetri per il modulo sulla lamina.



Figura 3.21.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: FLA 6-11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	14.5 cm
L2	34.0 cm
L3	11.5
L4	5.7 cm

Tabella 3.21.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	3	E LAM SU
1	T1, WA 10.1	4	E LAM GIU
2	T2, WA 20.9		

Tabella 3.21.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

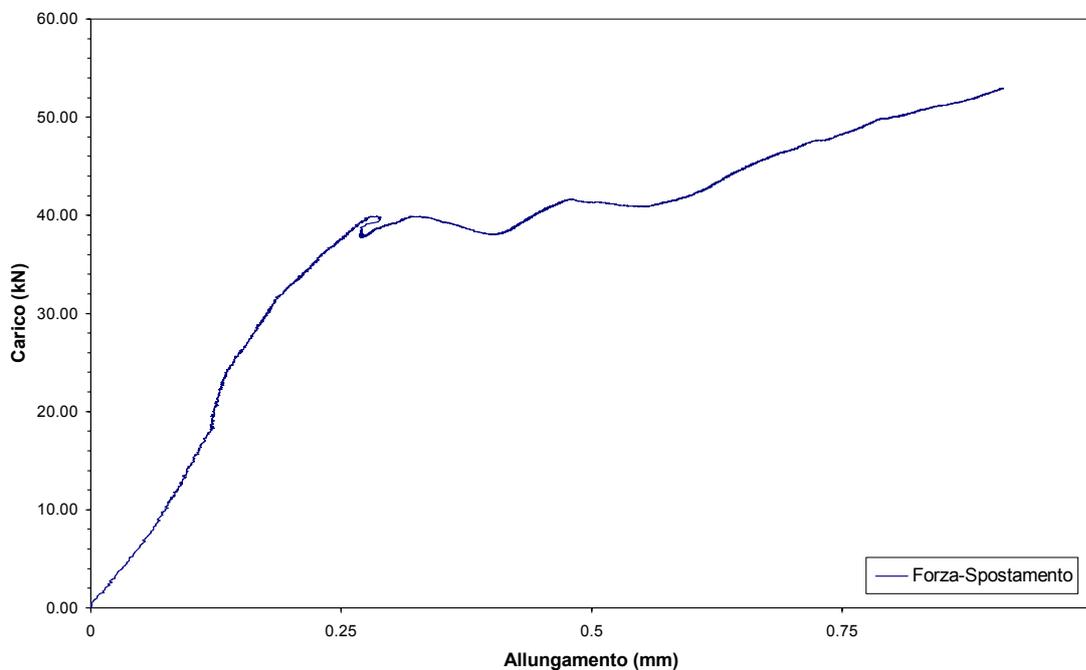


Grafico 3.21.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.21.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si nota che il grafico della prova è simile a quello della prova R17A.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 41.56 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 38.47 kN.

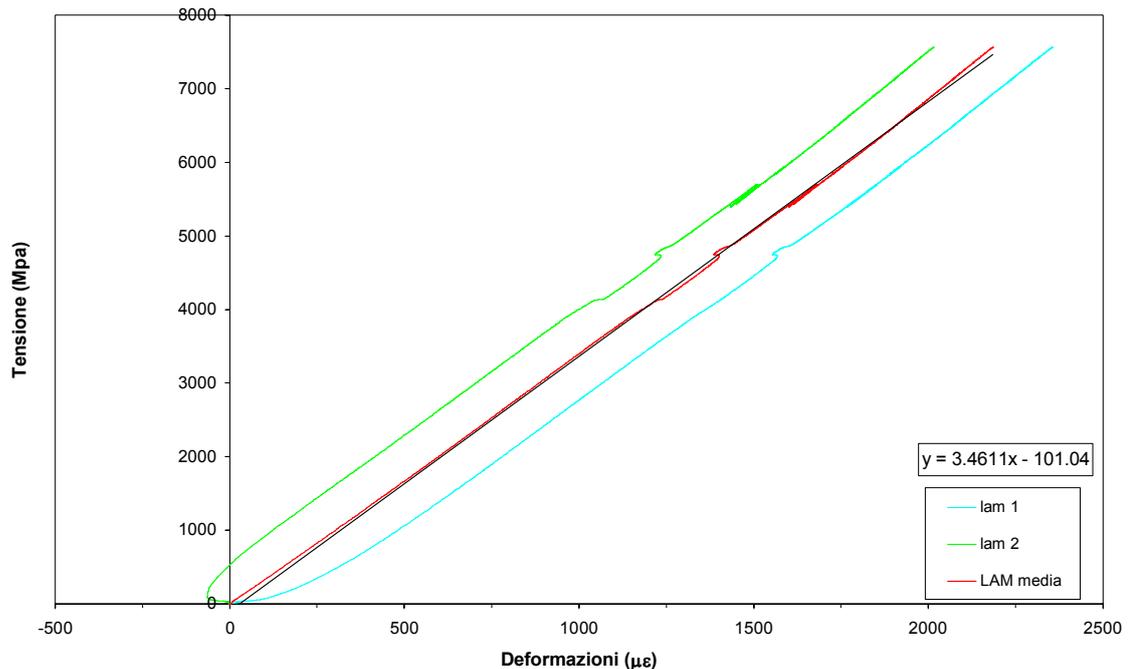


Grafico 3.21.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.2.2 sono riportate le deformazioni della lamina misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva della lamina in FRP che in questo caso è di 0.7 cm^2 .

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico della lamina è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato della lamina pari a 346110 MPa.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina.

Nella figura 3.21.5 si nota che la crisi è avvenuta per il distacco della lamina dalla resina.



Figura 3.21.3 Superficie delaminata



Figura 3.21.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.21.5 Particolare superficie delaminata

3.22 R18A



Figura 3.22.1 Prova R18A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 23-10-06, quindi il cls ha avuto 137 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il provino è stato provato incondizionato.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 10 estensimetri.



Figura 3.22.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: 6/120 LY 11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.2 cm
L2	32.0 cm
L3	12.8 cm
L4	5.0 cm

Tabella 3.22.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	7	E5
1	T1, WA 10.1	8	E6
2	T2, WA 20.9	9	E7
3	E1	10	E8
4	E2	11	E9
5	E3	12	E10
6	E4		

Tabella 3.22.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

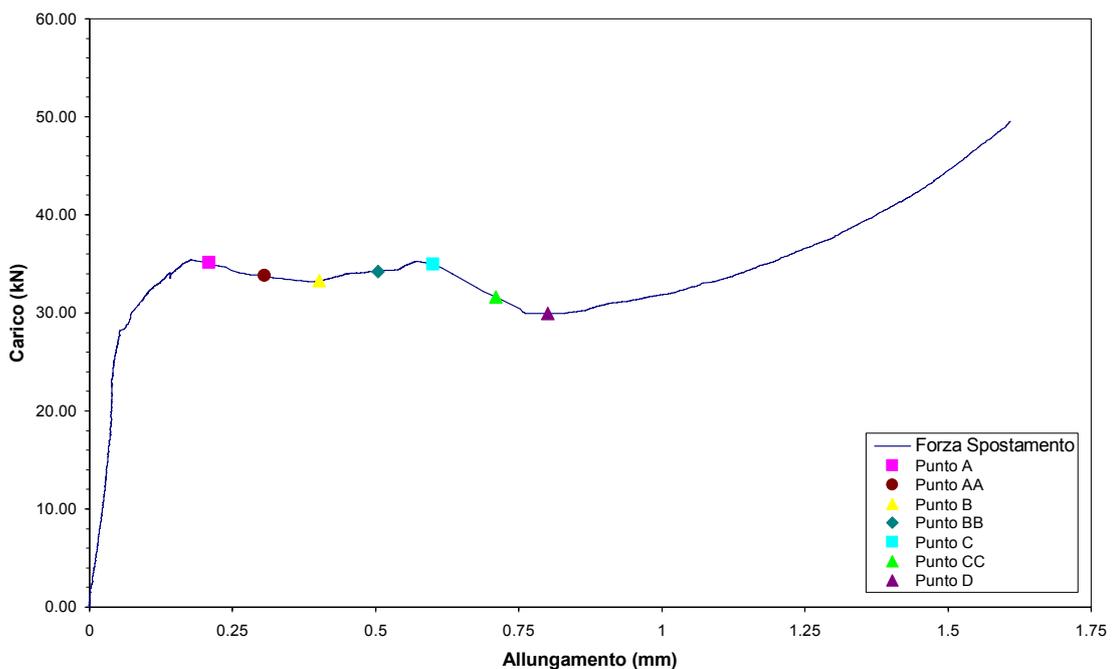


Grafico 3.22.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.22.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, alla delaminazione si ha un plateau quasi costante.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

I punti A,AA,B,BB,C,CC,D rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 35.09 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 29.94 kN.

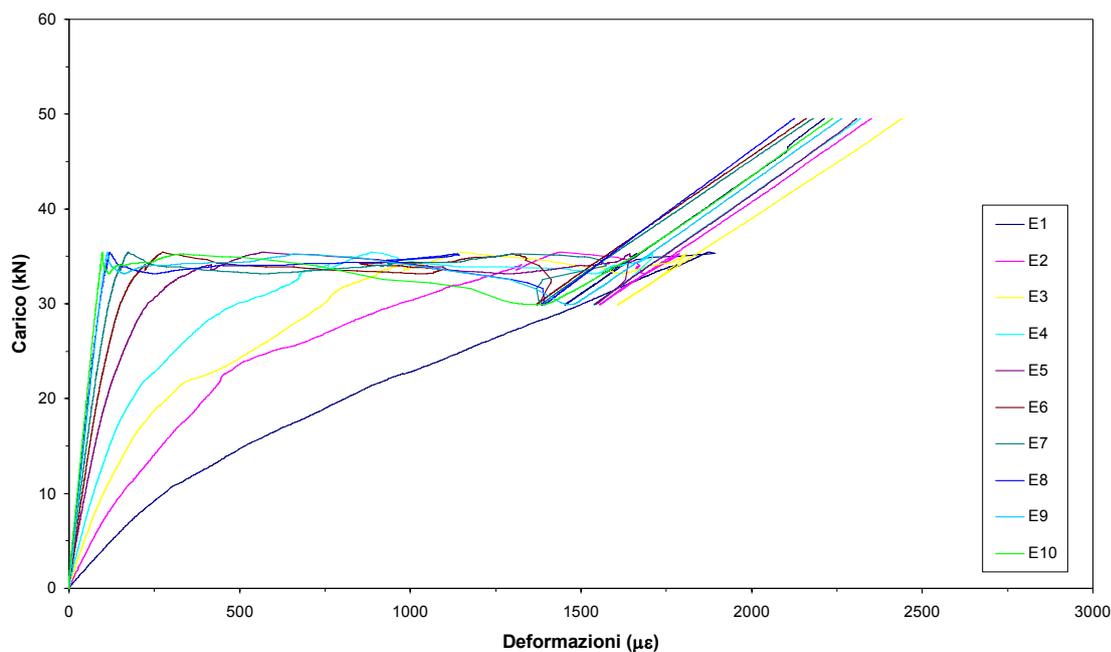


Grafico 3.22.2 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.22.2 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sulla lamina in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

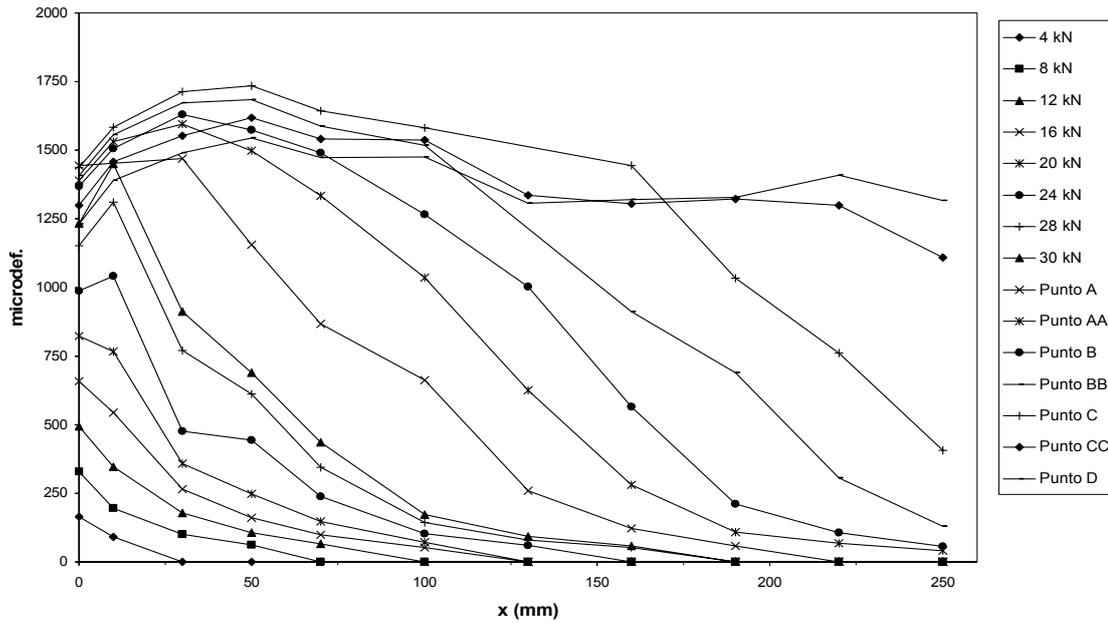


Grafico 3.22.3 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.22.3 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse della lamina.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,AA,B,BB,C,CC,D sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

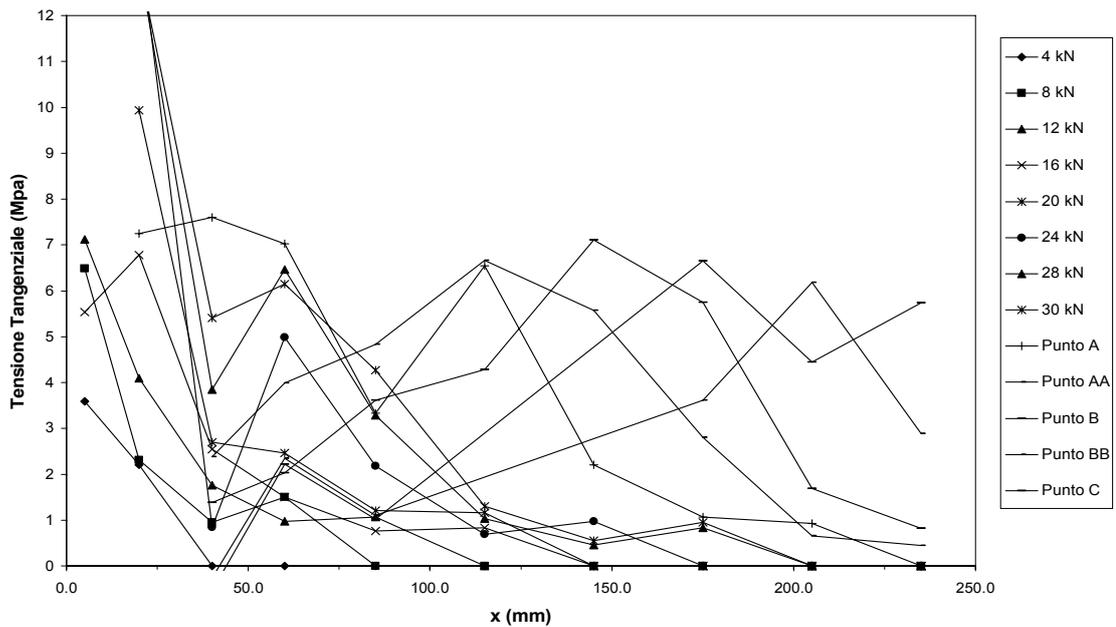


Grafico 3.22.4 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.22.4 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

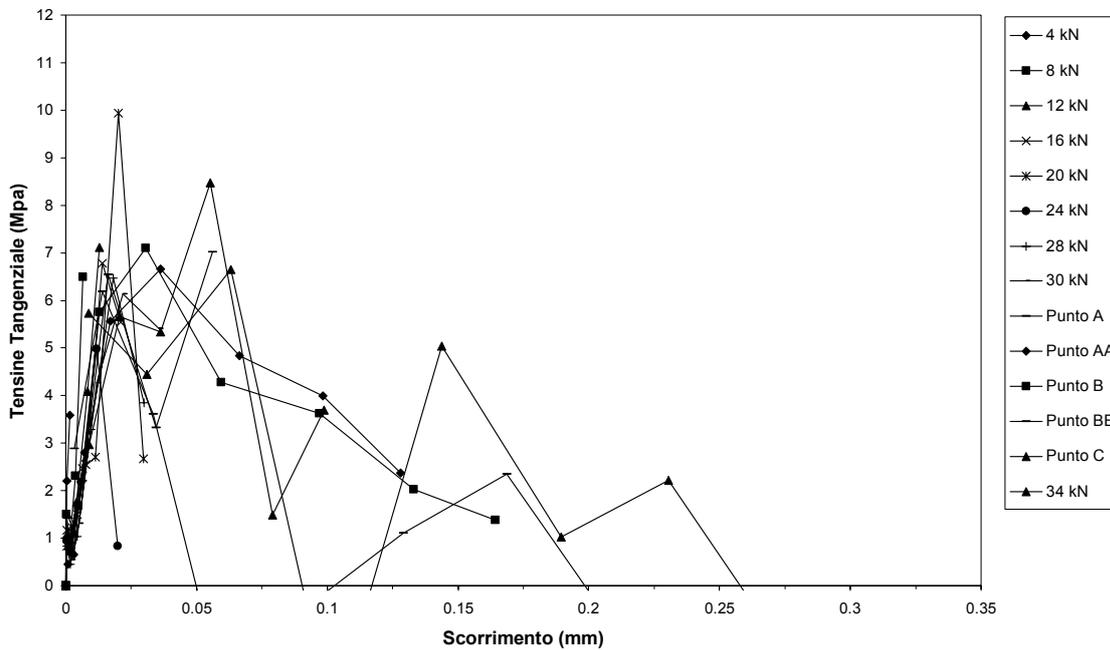


Grafico 3.22.5 Grafico Tensioni–Scorrimento della lamina

Il grafico 3.22.5 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

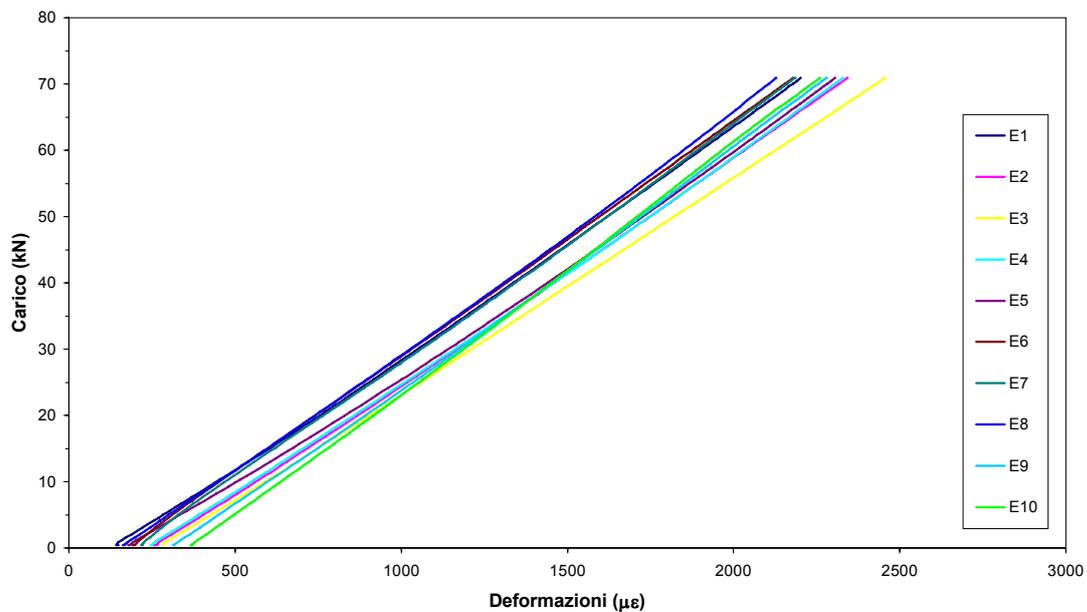


Grafico 3.22.6 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo

Il grafico 3.22.6 rappresenta il rapporto carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico della lamina con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera della lamina.

Il modulo elastico ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali mediato risulta 347409 MPa.

Il grafico 3.22.7 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.22.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
34000	347409	2.6964	0.020458	6.1486

Tabella 3.22.3 Parametri dell'equazione analitica

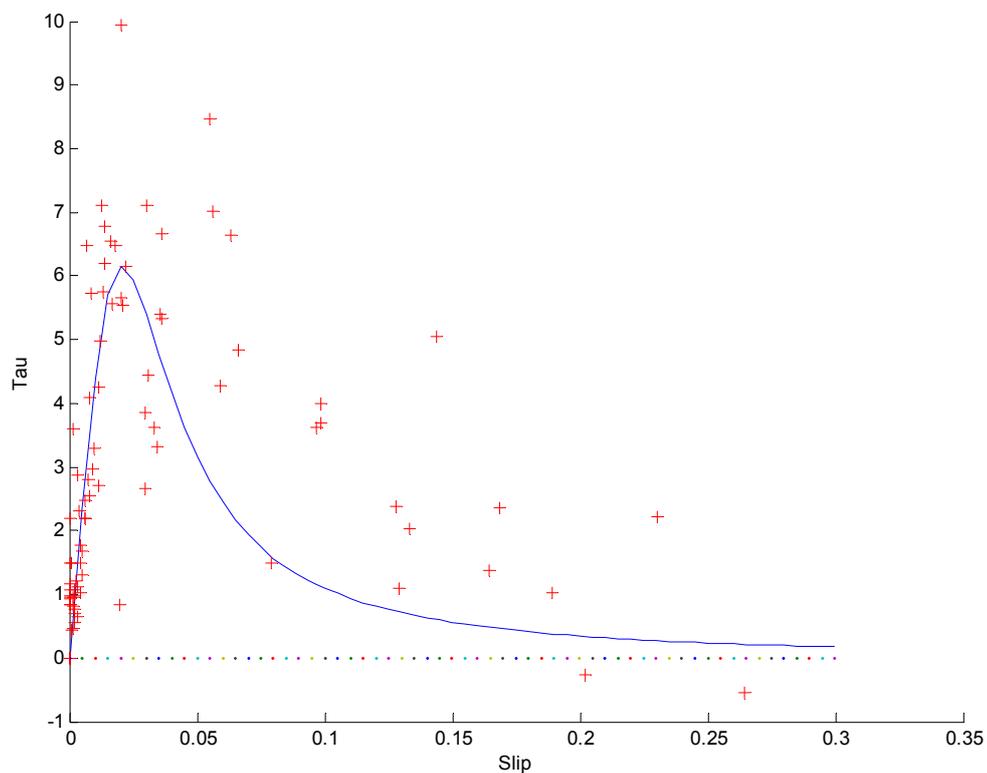


Grafico 3.22.7 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

In questa prova abbiamo avuto una crisi mista, abbiamo zone in cui la crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls e zone in cui la resine si è scollata dal cls.



Figura 3.22.3 Superficie delaminata



Figura 3.22.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.22.5 Particolare superficie delaminata



Figura 3.22.6 Particolare superficie delaminata

3.23 R18B



Figura 3.23.1 Prova R18B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 07-12-06, quindi il cls ha avuto 182 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il provino è stato provato incondizionato.

Per la strumentazione è stato utilizzato solamente il setup LVDT.



Figura 3.23.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	14.9 cm
L2	33.4 cm
L3	11.7 cm
L4	6.0 cm

Tabella 3.23.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.23.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

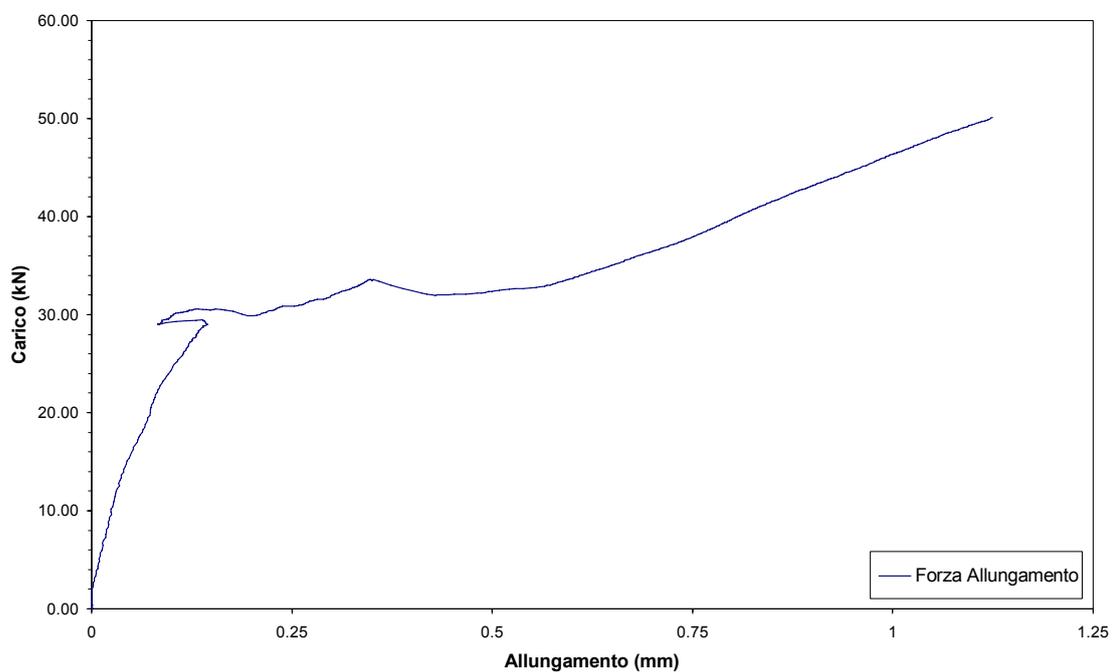


Grafico 3.23.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.23.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare.

Raggiunto il carico di delaminazione si nota una riduzione dello spostamento, forse dovuta alla rotazione del contrasto dell'LVDT T1, e successivamente un plateau.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 33.60 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 32.00 kN.

Non avendo previsto la strumentazione con estensimetri, non è stato possibile determinare il modulo elastico.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina.



Figura 3.23.3 Superficie delaminata



Figura 3.23.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.23.5 Particolare superficie delaminata

3.24 R19A



Figura 3.24.1 Prova R19A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 28/06-07, quindi il cls ha avuto 385 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il provino è stato provato incondizionato.

Per la strumentazione sono stati utilizzati i due estensimetri per il modulo sulla lamina.



Figura 3.24.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: FLA 6-11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	16.5 cm
L2	31.9 cm
L3	11.6 cm
L4	6.6 cm

Tabella 3.24.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	3	E LAM SU
1	T1, WA 10.1	4	E LAM GIU
2	T2, WA 20.9		

Tabella 3.24.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Si è notato che l'incollaggio della lamina in questa prova non è stato eseguito a regola d'arte, si nota che la lamina non è incollata su tutta la sua superficie come si vede nelle figure 3.24.3 e 3.24.4, quindi si prevede la delaminazione ad un carico basso.

Inoltre al momento della preparazione della prova si è notato che la lamina ha una fessura longitudinale per tutta la parte libera come si vede nella figura 3.24.5, il tipo di fessura non dovrebbe compromettere la prova.

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

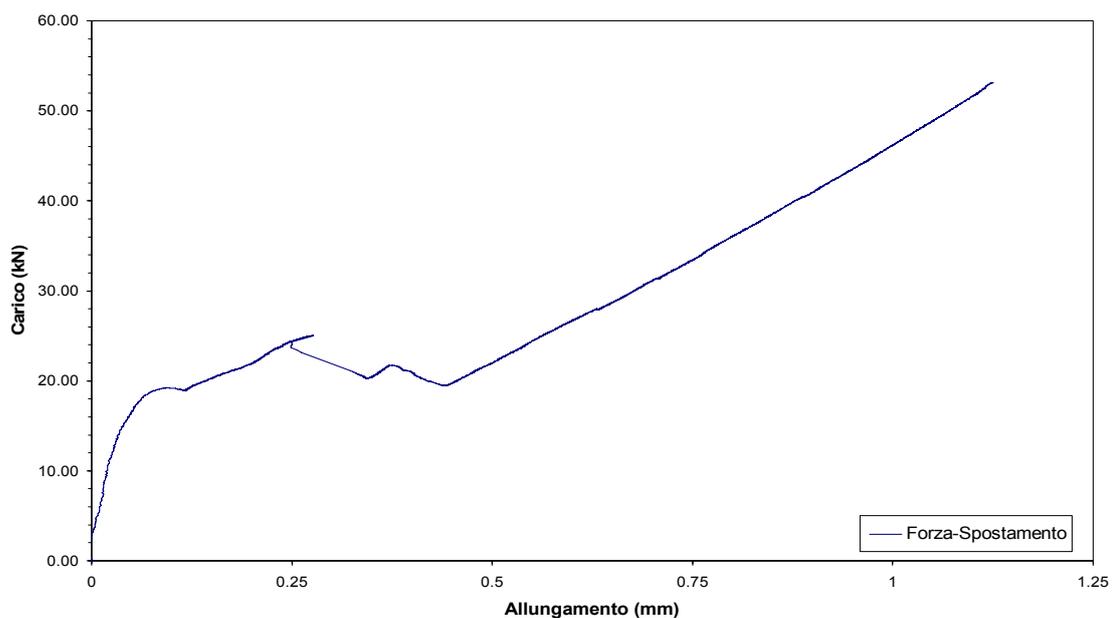


Grafico 3.24.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, la delaminazione è iniziata, come previsto, ad un livello di carico basso.

La delaminazione si è sviluppata con un carico abbastanza costante.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 24.99 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 19.61 kN.

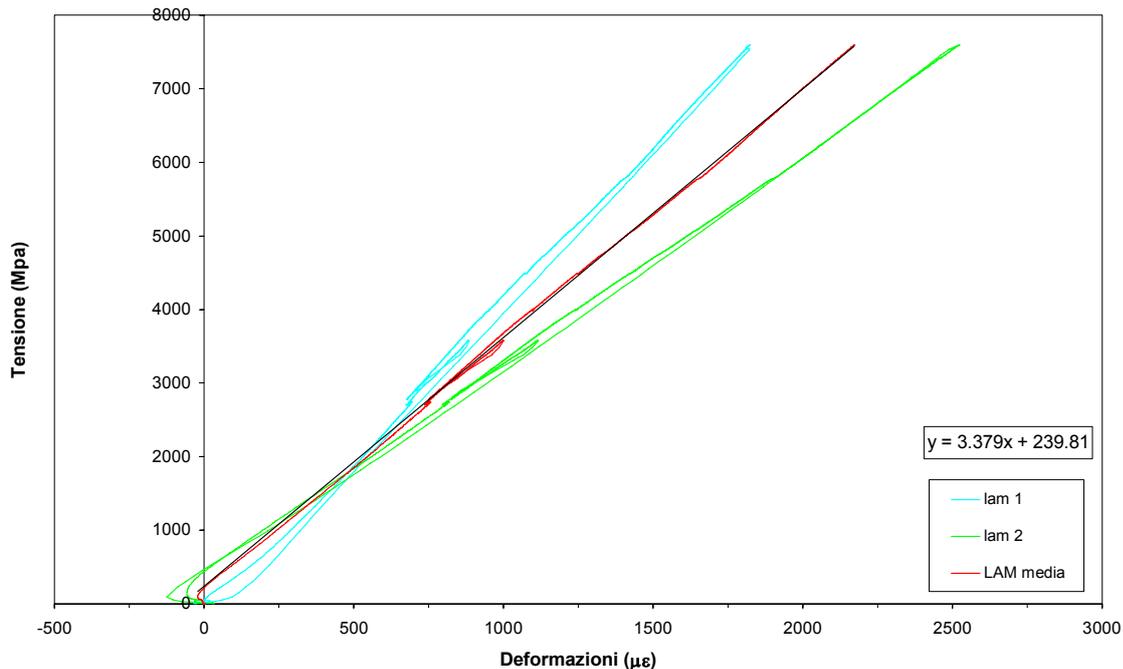


Grafico 3.24.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.24.2 sono riportate le deformazioni della lamina misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva della lamina in FRP che in questo caso è di 0.7 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico della lamina è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato della lamina pari a 337900 MPa.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

Come si era notato prima di eseguire la prova, la superficie delaminata presenta zone in cui la resina non era in contatto con il cls, quindi la superficie di ancoraggio era visibilmente ridotta.

Nelle zone in cui la resina ha lavorato, si nota che la delaminazione è avvenuta per distacco dello strato superficiale del cls.



Figura 3.24.3 Particolare dell'incollaggio



Figura 3.24.4 Particolare dell'incollaggio



Figura 3.24.5 Fessura longitudinale della lamina



Figura 3.24.6 Superficie delaminata



Figura 3.24.7 Particolare superficie delaminata

3.25 R19B

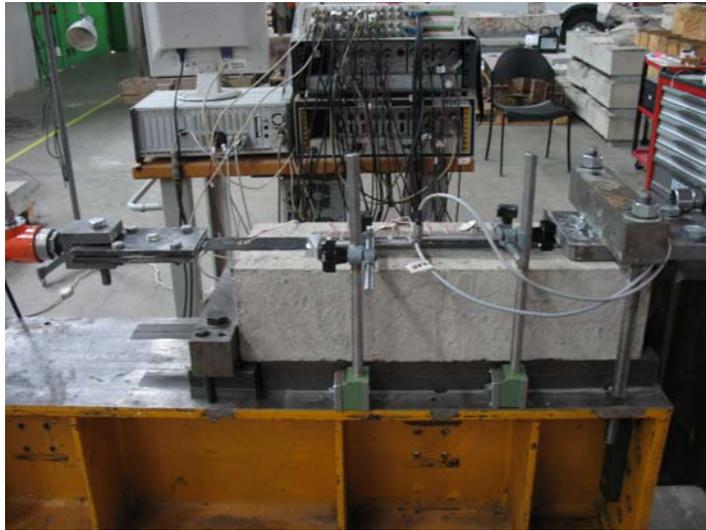


Figura 3.25.1 Prova R19B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 26-06-07, quindi il cls ha avuto 383 giorni di maturazione dal confezionamento.

Il provino è stato provato incondizionato.

Per la strumentazione è stato utilizzato il setup a 13 estensimetri e i due estensimetri per valutare il modulo elastico.

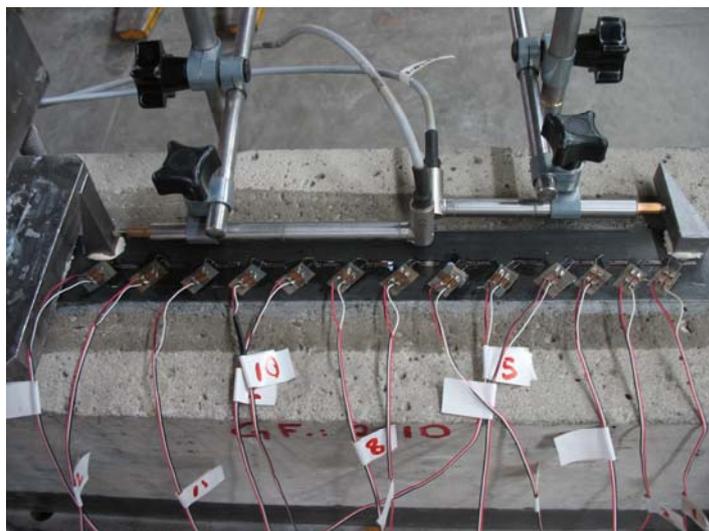


Figura 3.25.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: FLA 6-11 da 6 mm, il Gauge Factor è 2.10 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	14.4 cm
L2	33.6 cm
L3	12.0 cm
L4	6.8 cm

Tabella 3.25.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	9	E7
1	T1, WA 10.1	10	E8
2	T2, WA 20.9	11	E9
3	E1	12	E10
4	E2	13	E11
5	E3	14	E12
6	E4	15	E13
7	E5	16	E LAM SU
8	E6	17	E LAM GIU

Tabella 3.25.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

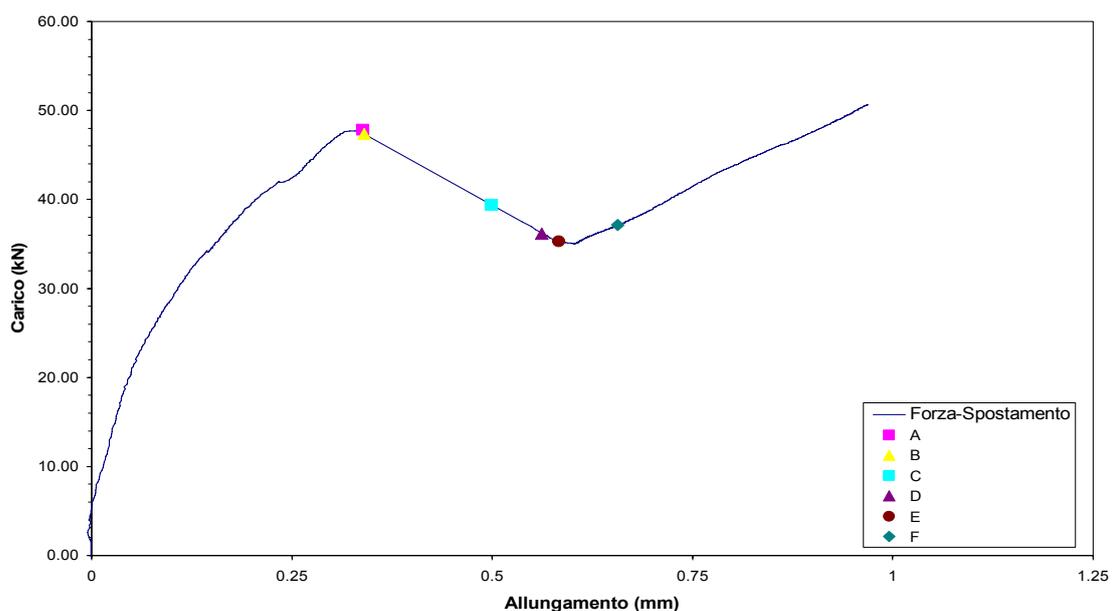


Grafico 3.25.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.25.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, la delaminazione si è sviluppata in maniera istantanea con un abbassamento di carico rilevante.

Terminata la delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

I punti A,B,C,D,E,F rappresentati nel grafico indicano i livelli di carico che sono stati scelti per valutare lo stato deformativo e tensionale del provino nella fase di delaminazione.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 47.83 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 35.47 kN.

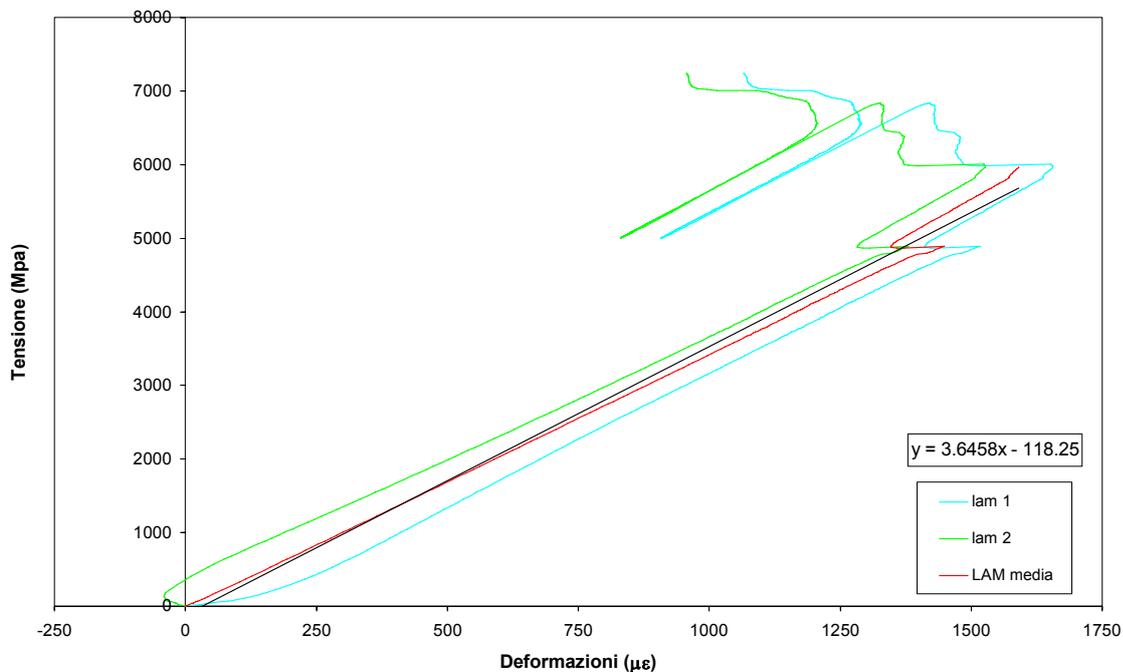


Grafico 3.25.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.25.2 sono riportate le deformazioni della lamina misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva della lamina in FRP che in questo caso è di 0.7 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico della lamina è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato della lamina pari a 364580 MPa.

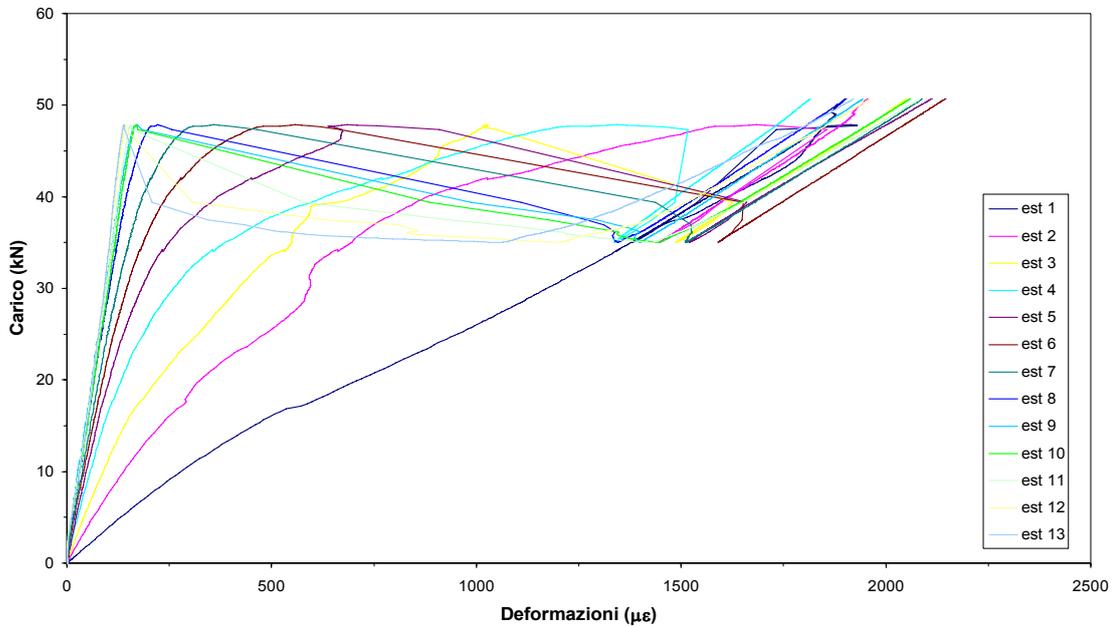


Grafico 3.25.3 Grafico Carico-Deformazioni degli estensimetri

Il grafico 3.25.3 è stato ottenuto rappresentando le deformazioni misurate dagli estensimetri incollati sulla lamina in funzione del carico misurato dalla cella di carico.

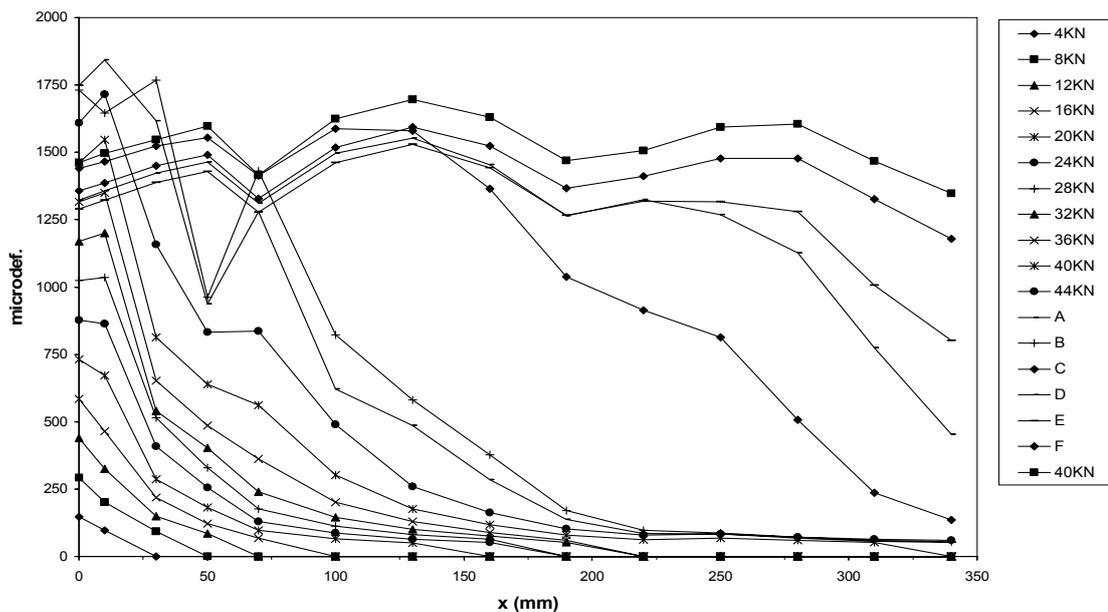


Grafico 3.25.4 Grafico delle Deformazioni sulla lunghezza del tessuto

Il grafico 3.25.4 mostra le deformazioni misurate dagli estensimetri applicati nella zona di incollaggio lungo l'asse della lamina.

L'ascissa x ha origine nella sezione di primo ancoraggio del rinforzo dal lato di applicazione della forza.

I punti A,B,C,D,E,F sono relativi ai diversi livelli di carico registrati durante la propagazione della delaminazione lungo la zona di incollaggio.

Si nota una parte di grafico senza dati, dovuta alla rapidità della delaminazione.

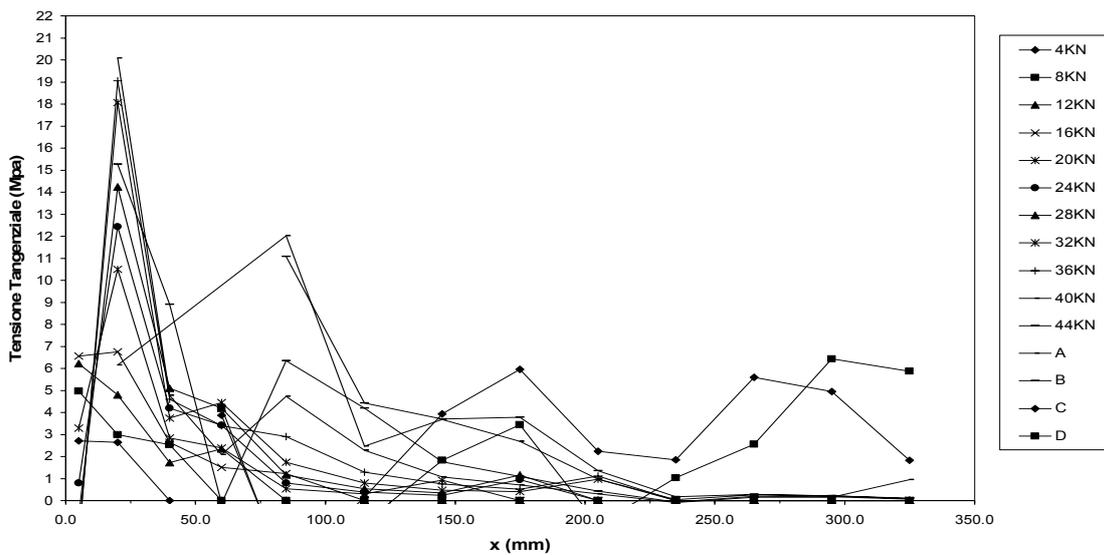


Grafico 3.25.5 Grafico delle Tensioni sulla lunghezza della lamina

Il grafico 3.25.5 mostra gli andamenti della tensione tangenziale lungo la lunghezza di incollaggio corrispondenti ai diversi valori considerati del carico applicato.

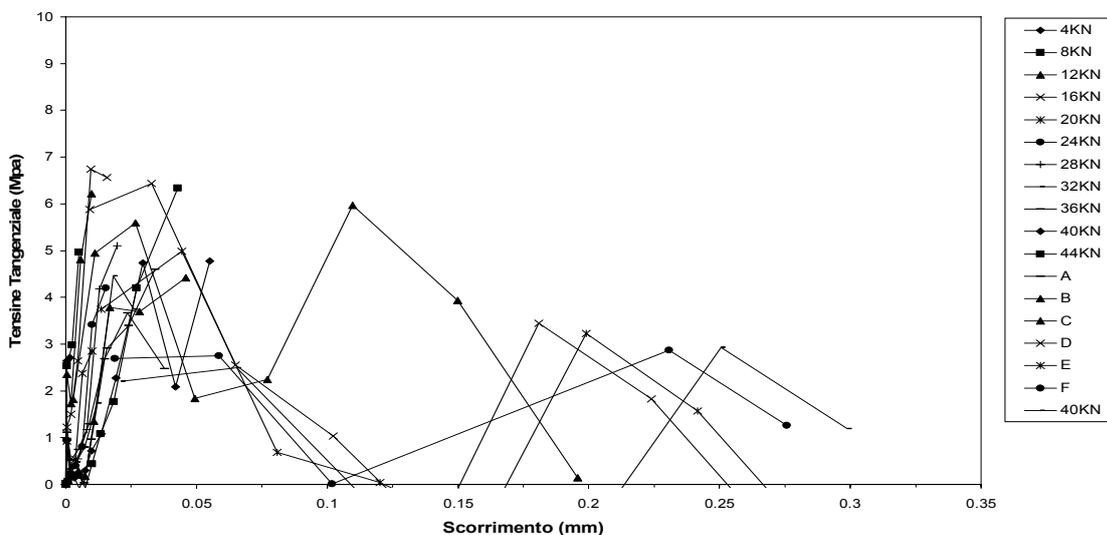


Grafico 3.25.6 Grafico Tensioni-Scorrimento della lamina

Il grafico 3.25.6 rappresentano i valori dello scorrimento per i vari livelli di carico in funzione delle tensioni tangenziali corrispondenti.

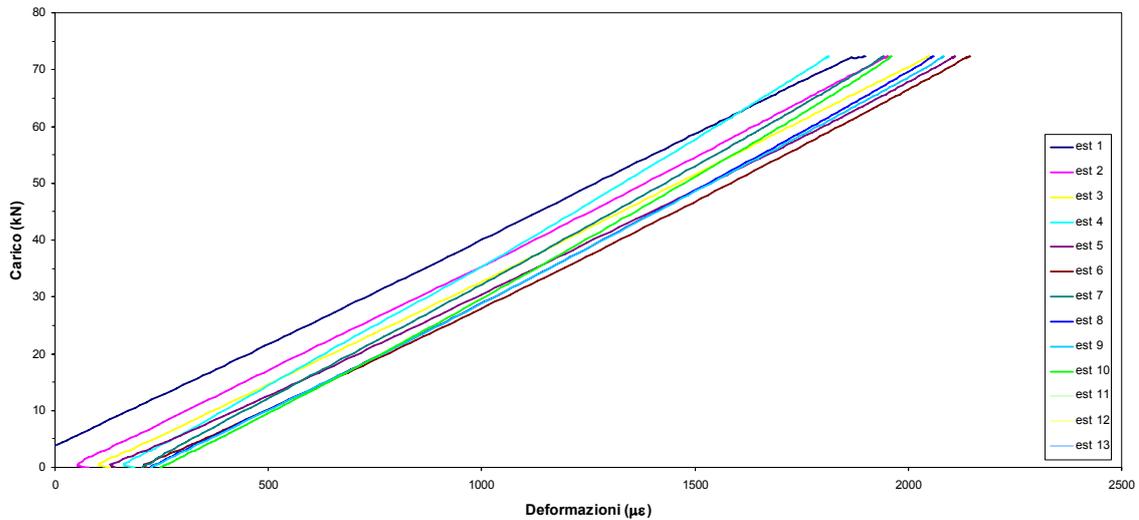


Grafico 3.25.7 Grafico Carico–Deformazione di scarico degli estensimetri per il calcolo del modulo

Il grafico 3.25.7 rappresenta il rapporto carico-deformazione degli estensimetri nella fase di scarico, utilizzati per valutare il modulo elastico della lamina con lo stesso criterio descritto per i due estensimetri nella parte libera della lamina.

Il modulo elastico ricavato dai due estensimetri nella parte libera risulta 364580 MPa, mentre il modulo ricavato dai tratti di scarico degli estensimetri centrali mediato risulta 390756 MPa.

Il grafico 3.25.8 riporta i valori τ -slip degli estensimetri centrali e la rispettiva curva ottenuta con la legge analitica descritta nel paragrafo 3.2.

I parametri che descrivono la legge analitica sono elencati nella tabella 3.25.3

F (N)	E (MPa)	n	S max	Tau max (MPa)
34000	364580	2.6517	0.0338	4.4245

Tabella 3.25.3 Parametri dell'equazione analitica

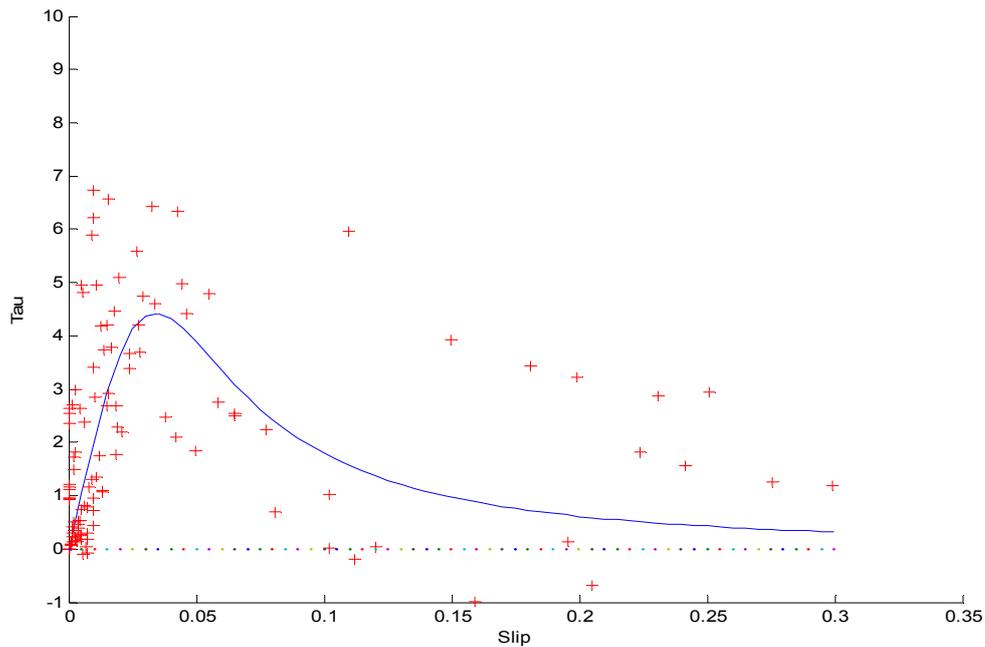


Grafico 3.25.8 Grafico τ -slip e curva interpolante degli estensimetri

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina fatta eccezione della zona iniziale, la sua delaminazione può essere avvenuta



Figura 3.25.3 Superficie delaminata



Figura 3.25.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.25.5 Particolare superficie delaminata

3.26 R20A



Figura 3.26.1 Prova R20A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 17-05-07, quindi il cls ha avuto 343 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 125 cicli di gelo-disgelo ed è stato sottoposto a 15 giorni di nebbie saline.

Per la strumentazione è stato utilizzato solamente il setup LVDT.



Figura 3.26.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	14.7 cm
L2	33.3 cm
L3	12.0 cm
L4	5.8 cm

Tabella 3.26.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.26.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

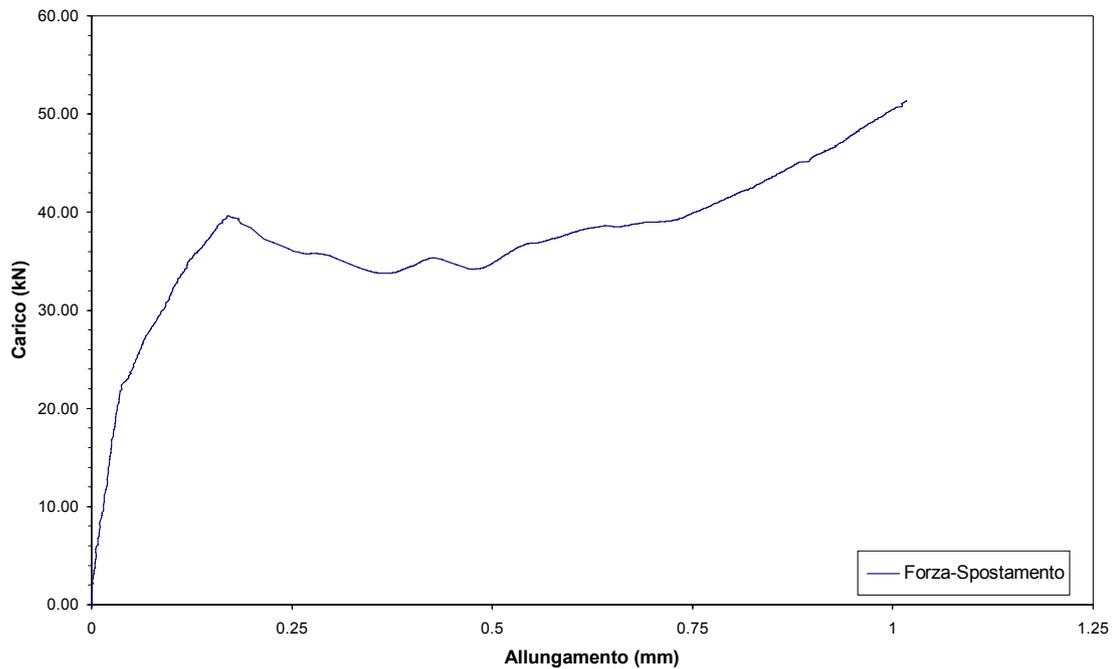


Grafico 3.26.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.26.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare fino al raggiungimento del carico di delaminazione, successivamente un plateau pressoché costante.

Raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 39.45 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 34.20 kN.

Non avendo previsto la strumentazione con estensimetri, non è stato possibile determinare il modulo elastico.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina.



Figura 3.26.3 Superficie delaminata



Figura 3.26.4 Particolare delaminazione



Figura 3.26.5 Particolare superficie delaminata

3.27 R20B



Figura 3.27.1 Prova R20B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 17-05-07, quindi il cls ha avuto 343 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 125 cicli di gelo-disgelo ed è stato sottoposto a 15 giorni di nebbie saline.

Per la strumentazione è stato utilizzato solamente il setup LVDT.



Figura 3.27.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	18.3 cm
L2	30.3 cm
L3	11.4 cm
L4	5.7 cm

Tabella 3.27.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.27.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Il provino, avendo la superficie di appoggio sul telaio deformata, ha reso difficoltoso il fissaggio delle piastre di ancoraggio, in quanto, ogni volta che venivano serrati i bulloni, il provino si muoveva.

Sono stati provati a inserire spessori nelle zone di appoggio, ma erano inefficaci, infine si è deciso di inserire un elemento di acciaio tra l'elemento di contrasto e il provino in modo tale che la piastra di ancoraggio posteriore avesse più superficie di contatto come si vede nella figura 3.27.3.

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

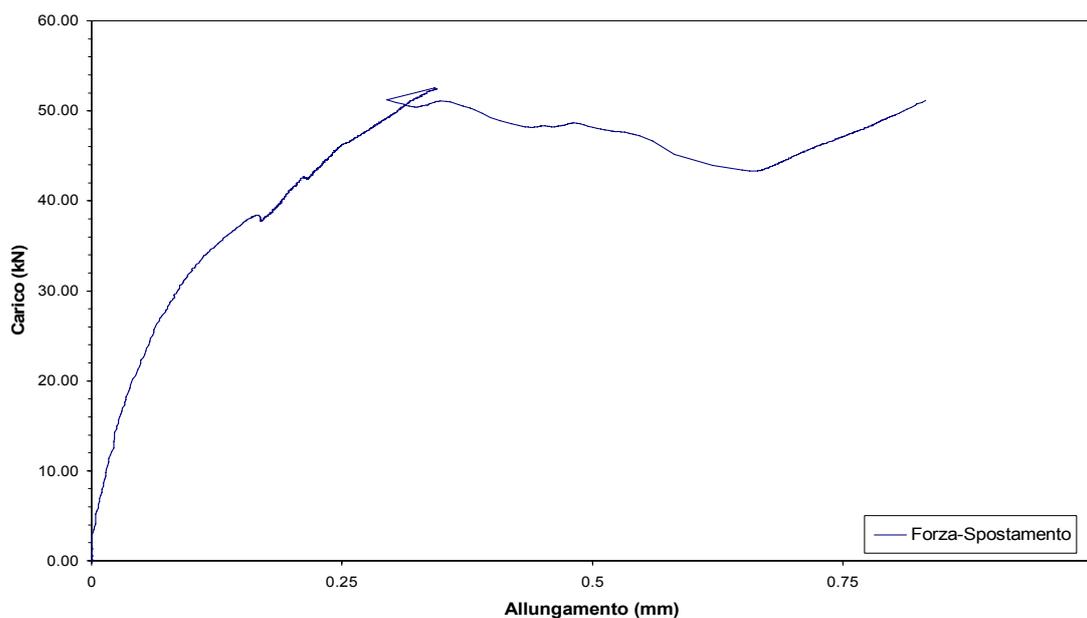


Grafico 3.27.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.27.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, la delaminazione è avvenuta con una leggera rotazione del contrasto dell'LVDT T1 ad un livello di carico molto alto.

La delaminazione si è sviluppata con una diminuzione del carico, raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 52.57 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 43.66 kN.

Non avendo previsto la strumentazione con estensimetri, non è stato possibile determinare il modulo elastico.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato alla lamina, fatta eccezione per una zona nella parte iniziale della superficie di incollaggio in cui la crisi è avvenuta per distacco della resina dal cls.



Figura 3.27.3 Particolare del contrasto e della piastra di ancoraggio posteriore



Figura 3.27.4 Superficie delaminata



Figura 3.27.5 Particolare superficie delaminata



Figura 3.27.6 Particolare superficie delaminata



Figura 3.27.7 Particolare superficie delaminata

3.28 R21A



Figura 3.28.1 Prova R21A

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 24-05-07, quindi il cls ha avuto 350 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 250 cicli di gelo-disgelo ed è stato sottoposto a un mese di nebbie saline.

Per la strumentazione è stato utilizzato solamente il setup LVDT.



Figura 3.28.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	14.8 cm
L2	32.9 cm
L3	12.3 cm
L4	4.7 cm

Tabella 3.28.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.28.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

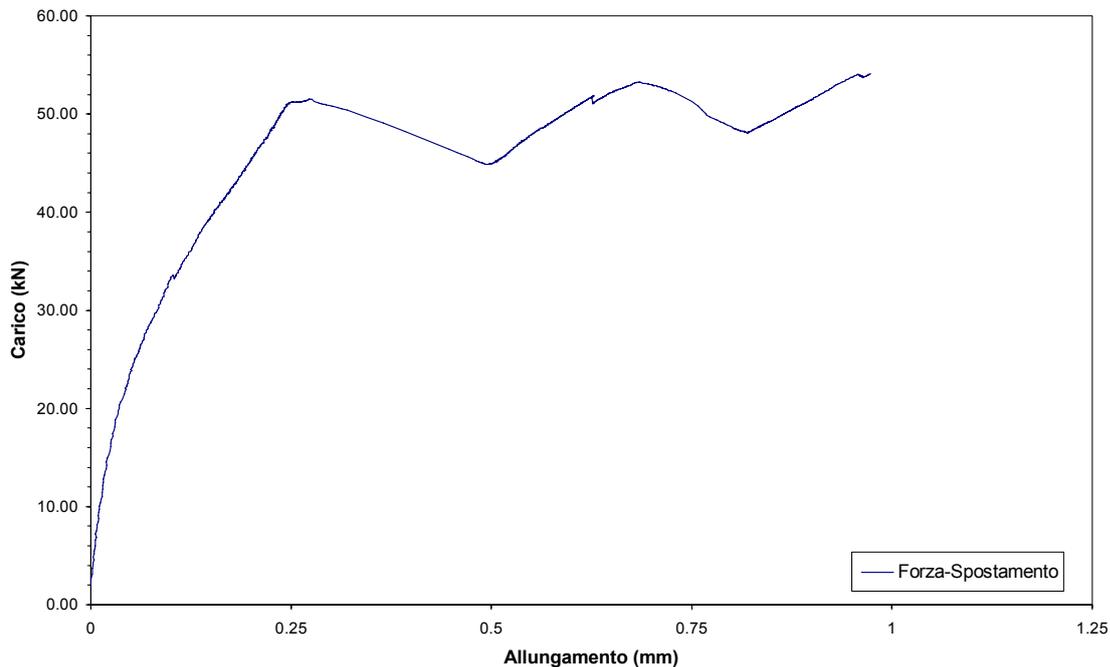


Grafico 3.28.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.28.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, la delaminazione è avvenuta ad un livello di carico molto alto, la delaminazione si è sviluppata con una diminuzione del carico

A metà della delaminazione si è registrato un aumento del carico fino al raggiungimento del valore di carico di delaminazione precedente, successivamente si avuta una ulteriore diminuzione del carico, raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 51.88 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 45.32 kN.

Non avendo previsto la strumentazione con estensimetri, non è stato possibile determinare il modulo elastico.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

In questa prova abbiamo avuto una crisi mista, abbiamo zone in cui la crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls e zone in cui la resine si è scollata dal cls.



Figura 3.28.3 Superficie delaminata



Figura 3.28.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.28.5 Particolare superficie delaminata

3.29 R21B



Figura 3.29.1 Prova R21B

Il provino è stato rinforzato mediante lamina tipo Sika UH514 di larghezza 5 cm.

La prova è stata eseguita il 17-07-07, quindi il cls ha avuto 405 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino ha subito 250 cicli di gelo-disgelo ed è stato sottoposto a un mese di nebbie saline.

Per la strumentazione è stato utilizzato solamente il setup LVDT.



Figura 3.29.2 Setup Prova

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	15.8 cm
L2	27.1 cm
L3	17.1 cm
L4	6.1 cm

Tabella 3.29.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento
0	Cella carico
1	T1, WA 10.1
2	T2, WA 20.9

Tabella 3.29.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Alla preparazione della prova, la lamina era seriamente danneggiata nella zona libera, presentava fessure longitudinali che raggiungevano la zona incollata al cls e fratture trasversali che interrompevano la continuità delle fibre.

Per potere eseguire la prova, è stata eseguita una riparazione, sono stati incollati due tessuti unidirezionali in fibra di carbonio del tipo SikaWrap Hex-230 C utilizzando l'adesivo Sikadur-330, nella zona danneggiata.

Il tessuto nella faccia al di sotto è stato incollato su tutta la lunghezza (figura 3.29.3), mentre il tessuto nella faccia superiore è stato incollato su tutta la zona libera ed è stato prolungato per 14.7 cm nella lamina sul provino (figura 3.29.4)



Figura 3.29.3 Rinforzo al di sotto della lamina



Figura 3.29.4 Rinforzo al di sopra della lamina

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

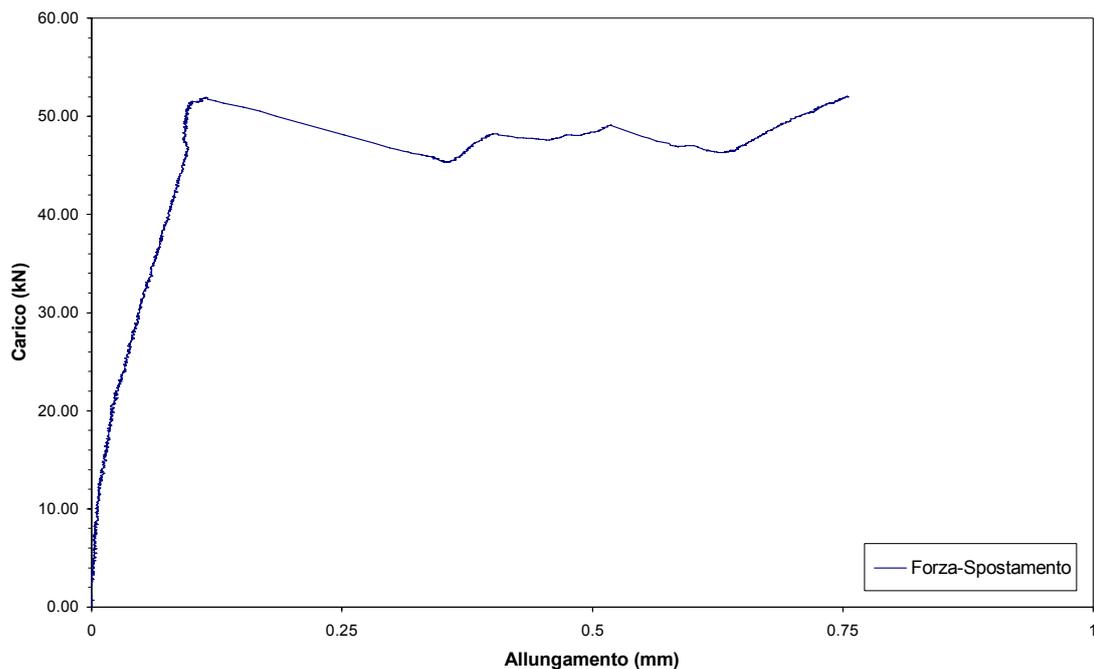


Grafico 3.29.1 Grafico Carico–Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.29.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Si può osservare un comportamento iniziale pressoché elastico-lineare, si nota che il carico di delaminazione è molto alto.

Successivamente si ha il plateau a carico quasi costante, raggiunta la completa delaminazione, si torna ad un ramo caratterizzato da un comportamento elastico lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 51.88 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 45.32 kN.

Non avendo previsto la strumentazione con estensimetri, non è stato possibile determinare il modulo elastico.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta quasi completamente per distacco dello strato superficiale di cls rimasto attaccato alla lamina, fatta eccezione di una piccola zona al centro della lamina e della zona iniziale, in cui la delaminazione è avvenuta per distacco della resina dal cls.



Figura 3.29.5 Superficie delaminata



Figura 3.29.6 Particolare superficie delaminata



Figura 3.29.7 Particolare superficie delaminata

3.30 R23A



Figura 3.30.1 Prova R23A

Il provino è stato rinforzato mediante tessuto tipo MapeWrap C UNI-AX 300/10 di larghezza 10 cm.

La prova è stata eseguita il 02-08-07, quindi il cls ha avuto 420 giorni di maturazione dal confezionamento.

A partire dal 15-09-06 il provino è stato sottoposto per due mesi a nebbie saline.

Per la strumentazione sono stati utilizzati i due estensimetri per il modulo sul tessuto.



Figura 3.30.2 Setup Prova

Il modello di estensimetri è il: PFL 10-11 da 10 mm, il Gauge Factor è 2.13 per tutti gli estensimetri.

Le distanze della piastra di fissaggio con il provino e degli LVDT sono (vedi schema di par. 2.5.1):

L1	14.5 cm
L2	32.8 cm
L3	12.7 cm
L4	6.8 cm

Tabella 3.30.1 Posizione LVDT

Il collegamento degli strumenti alla morsettiera è:

Canali	Strumento	Canali	Strumento
0	Cella carico	3	E LAM SU
1	T1, WA 10.1	4	E LAM GIU
2	T2, WA 20.9		

Tabella 3.30.2 Collegamento della strumentazione alla morsettiera

Di seguito vengono riportati i principali risultati della prova:

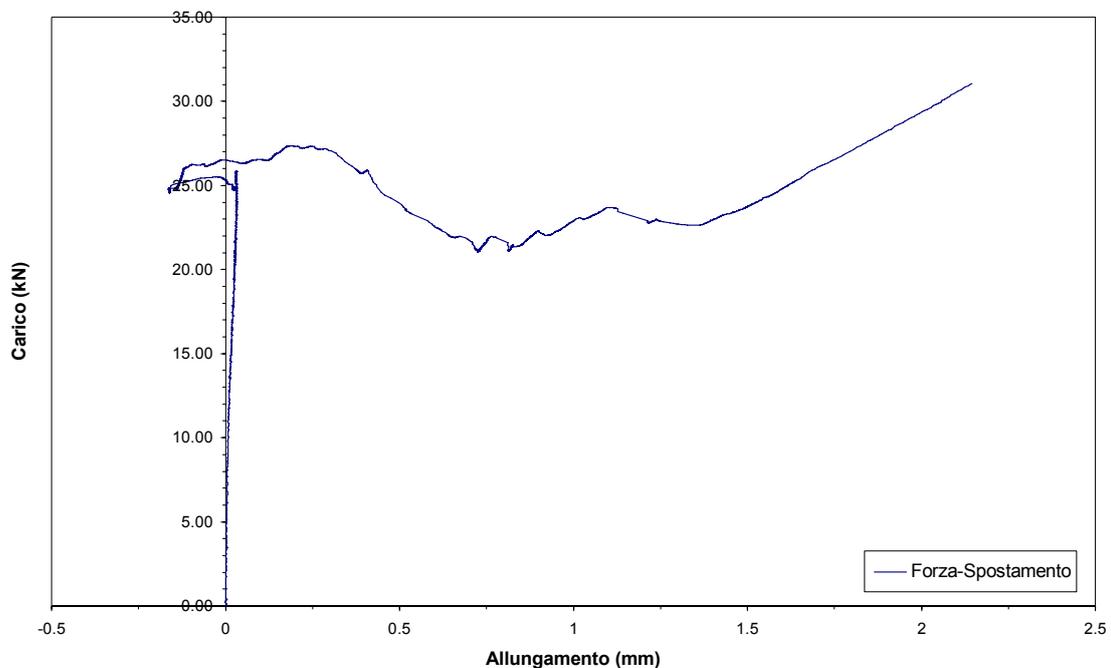


Grafico 3.30.1 Grafico Carico-Spostamento degli LVDT

Il grafico 3.30.1 è stato ottenuto rappresentando nelle ascisse la differenza degli spostamenti misurati dagli LVDT (T1, T2) e nelle ordinate il carico misurato dalla cella di carico.

Il grafico nella prima parte ha un comportamento elastico-lineare, al raggiungimento del carico di delaminazione si ha un'inversione di tendenza con valori anche negativi, questo perché il tessuto, delaminandosi, si è sollevato facendo ruotare il contrasto dell'LVDT T1.

La delaminazione è proseguita con un abbassamento del carico sempre minore fino ad un livello quasi costante, nell'ultima parte del grafico, si ritorna ad un comportamento elastico-lineare.

Il rinforzo in FRP si è delaminato ad una forza massima di 27.33 kN mentre, durante la delaminazione, la forza minima misurata è stata di 21.22 kN.

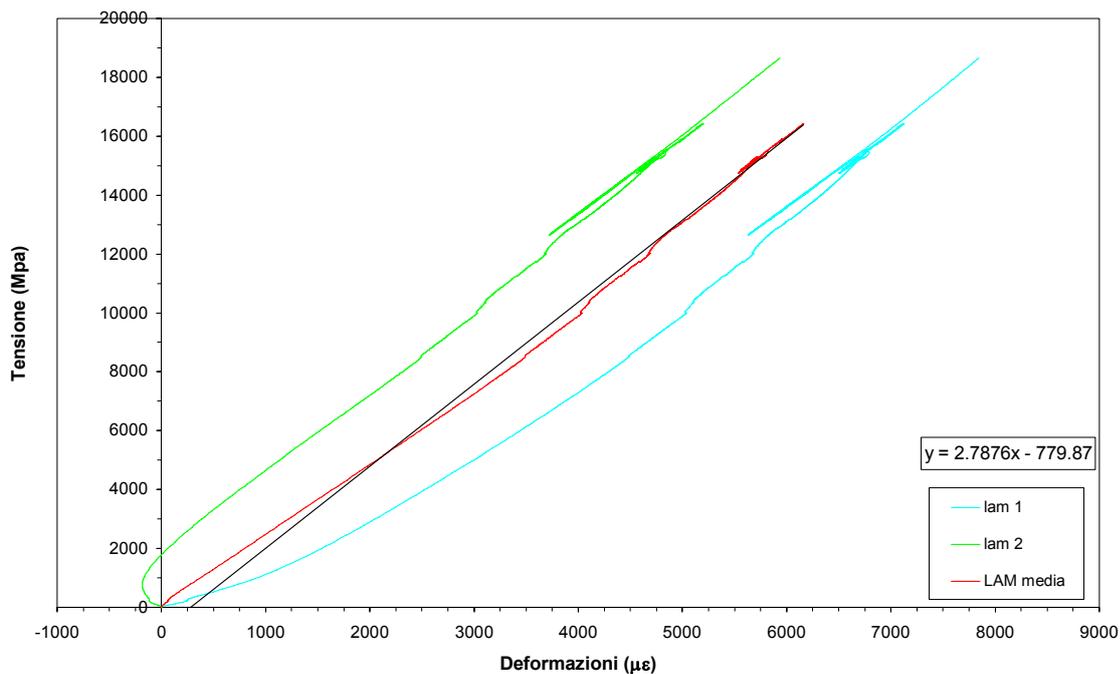


Grafico 3.30.2 Grafico Tensione-Deformazione degli estensimetri per il calcolo del modulo

Nel grafico 3.30.2 sono riportate le deformazioni della lamina misurate dai due estensimetri incollati nella parte libera del tessuto in funzione della tensione applicata dal martinetto al tessuto.

La tensione è stata determinata dividendo il carico misurato dalla cella di carico per l'area effettiva del tessuto in FRP che in questo caso è di 0.166 cm².

La linea rossa rappresenta la media dei due grafici, il modulo elastico del tessuto è rappresentato dall'inclinazione di quest'ultima curva.

L'equazione all'interno del grafico rappresenta l'equazione della linea di tendenza lineare della media dei grafici tensione-deformazione dei due estensimetri, il primo valore, moltiplicato per 100000, rappresenta il modulo elastico approssimato del tessuto pari a 278760 MPa.

Si riportano nel seguito alcune fotografie della superficie di cls dopo la delaminazione dell'FRP.

La crisi è avvenuta per distacco dello strato superficiale di cls, rimasto attaccato al tessuto, si nota nella prima zona che il cls ha formato delle lamelle come in altre prove, mentre nella parte posteriore della superficie si nota che la delaminazione è avvenuta in parte per distacco della resina dal cls.

Questo può motivare l'abbassamento di carico registrato durante la prova nella delaminazione.



Figura 3.30.3 Superficie delaminata



Figura 3.30.4 Particolare superficie delaminata



Figura 3.30.5 Particolare superficie delaminata



Figura 3.30.6 Particolare superficie delaminata



Figura 3.30.7 Particolare superficie delaminata

Capitolo 4

PROVE DI LABORATORIO SUPPLEMENTARI

4.1 Valutazione della rugosità mediante profilografo laser

Come anticipato nel Capitolo 1, lo stato della superficie del supporto su cui viene incollato il materiale composito è determinante per un funzionamento ottimale del rinforzo.

Il meccanismo di adesione consiste principalmente nell'aggrappaggio meccanico (mechanical interlocking) dell'adesivo con la superficie dell'aderendo, ossia del substrato, oltre che nella formazione di legami chimici tra le molecole polimeriche e quelle del substrato stesso. Come mostrato nella figura 4.1, il legame sfrutta la resistenza allo scorrimento reciproco delle due superfici localmente compenstrate: da qui l'importanza di avere superfici molto irregolari su scala microscopica sulle quali l'adesivo può spandersi, riempire i pori e le microfessure presenti per poi solidificare.

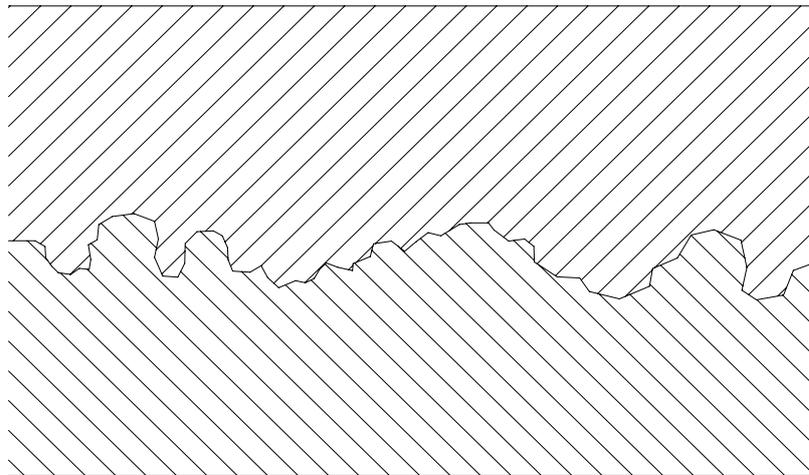


Figura 4.1 Aggrappaggio meccanico

Un altro contributo per incrementare la resistenza alla delaminazione può essere dato dalla macrorugosità della superficie, questa caratteristica può creare in scala maggiore gli stessi effetti della presenza di microrugosità.

Per la valutazione di queste caratteristiche è stata studiata una prova svolta nei laboratori del Politecnico di Milano, per la prova è stato utilizzato un profilografo laser.



Figura 4.2 Profilografo Laser

Il profilografo è composto da un laser montato su un supporto, la struttura è fissato ad una vite infinita che si muove attraverso un motore elettrico a controllo di spostamento. Tutto il sistema è gestito da una pulsantiera e da un apposito programma su PC che permette di impostare la velocità e il numero di dati acquisiti al secondo durante la prova.



Figura 4.3 Programma e pulsantiera del profilografo laser

Il laser attraverso la vite e il motore elettrico viene spostato orizzontalmente, contemporaneamente misura la distanza tra il provino e la sua lente con una precisione del micron.

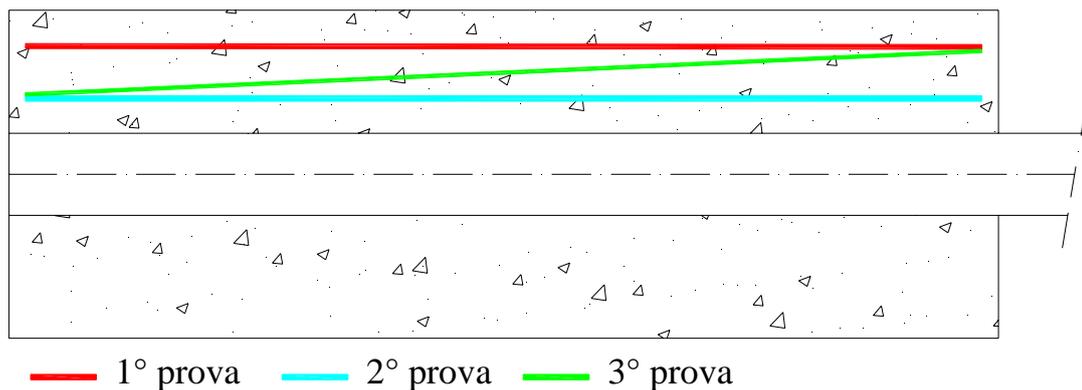
Il programma registra i dati durante la prova e, al termine, crea un una cartella Excell con tre colonne; nella prima inserisce il tempo registrato ad ogni misurazione, nella seconda colloca il valore dello spostamento orizzontale del laser in quell'istante e nella terza colonna inserisce la distanza misurata dal laser in corrispondenza della posizione in cui il laser si trovava.

Per preparare la prova, è necessario posizionare il provino in modo tale che il laser percorra la superficie in cui vogliamo valutare la rugosità, successivamente bisogna posizionare il laser e azzerare la strumentazione.

La prova è stata eseguita dopo il placcaggio e il condizionamento dei prismi, quindi non è stato possibile eseguire la prova sulla superficie in cui sono state incollate le lamine e i tessuti, quindi le prove sono state eseguite ai lati dei rinforzi.

Inoltre, in diversi provini, le superfici libere erano coperte dal primer o da residui laterali di resina, quindi si è cercato, dove possibile di evitare queste zone e eseguire la prova dove il cls era scoperto.

Per valutare una rugosità media delle superfici, sono state eseguite tre prove per ogni faccia dei prismi secondo il seguente schema:



I risultati, sotto forma di grafico, sono stati elaborati in Excell, è stato inserito in ascissa la posizione del laser sul provino e in ordinata la distanza misurata in corrispondenza della posizione del laser, tutte le misure sono in millimetri.

I prismi sottoposti a questo tipo di prova sono: R3, R6, R8, R10, R11, R13, R14, R16, R17, R19, R20, R21, R22, R23, R28.

Nella tabella 4.1 sono riportate le note sulle prove, in cui vengono descritti i casi in cui non è stato possibile eseguire la prova come descritto precedentemente.

Provino	Nota
R06	la prova 1 e 3 della faccia A è stata eseguita sul primer tra 435 mm e 445 mm
R06	la prova 2 della faccia A è stata eseguita completamente su primer
R08	le 3 prove della faccia A sono state eseguite su primer
R10	le 3 prove della faccia B sono state eseguite su primer
R16	la prova 1 della faccia B è stata eseguita su primer da 270 mm
R23	le 3 prove della faccia A sono state eseguite su primer

Tabella 4.1 Note sulle prove

Di seguito vengono illustrati i risultati delle prove eseguite sul provino R19 nella faccia A, il prisma in questione è stato placcato con la lamina da 5 cm e non è stato condizionato.

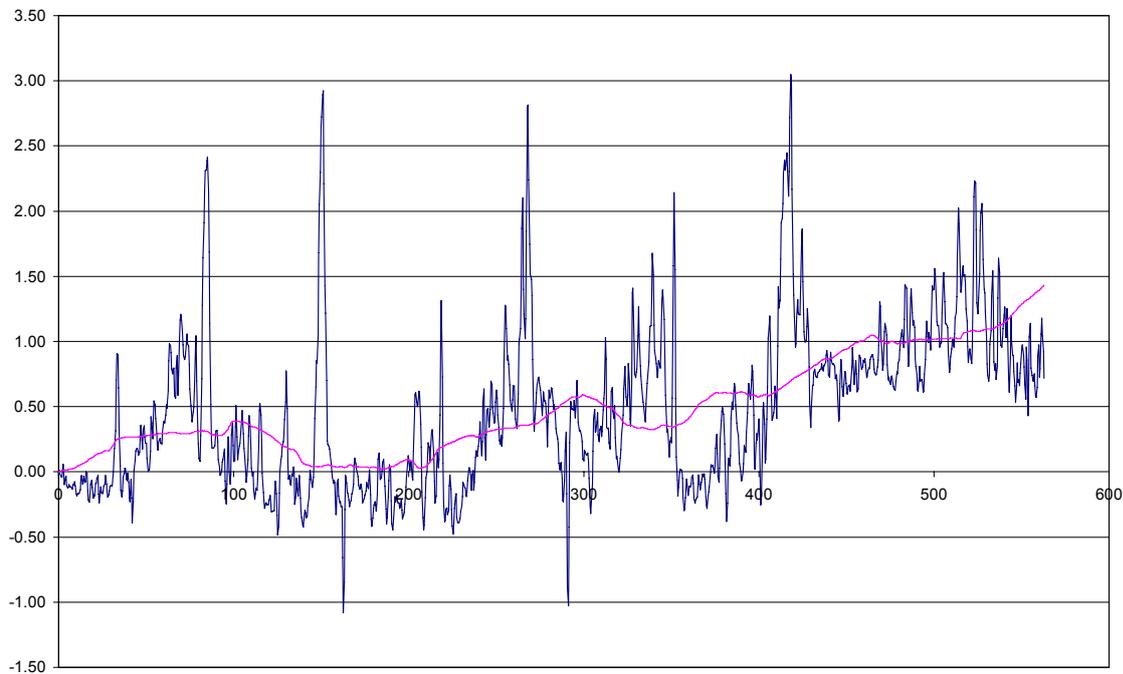


Grafico 4.1 Profilo R19A 1° prova

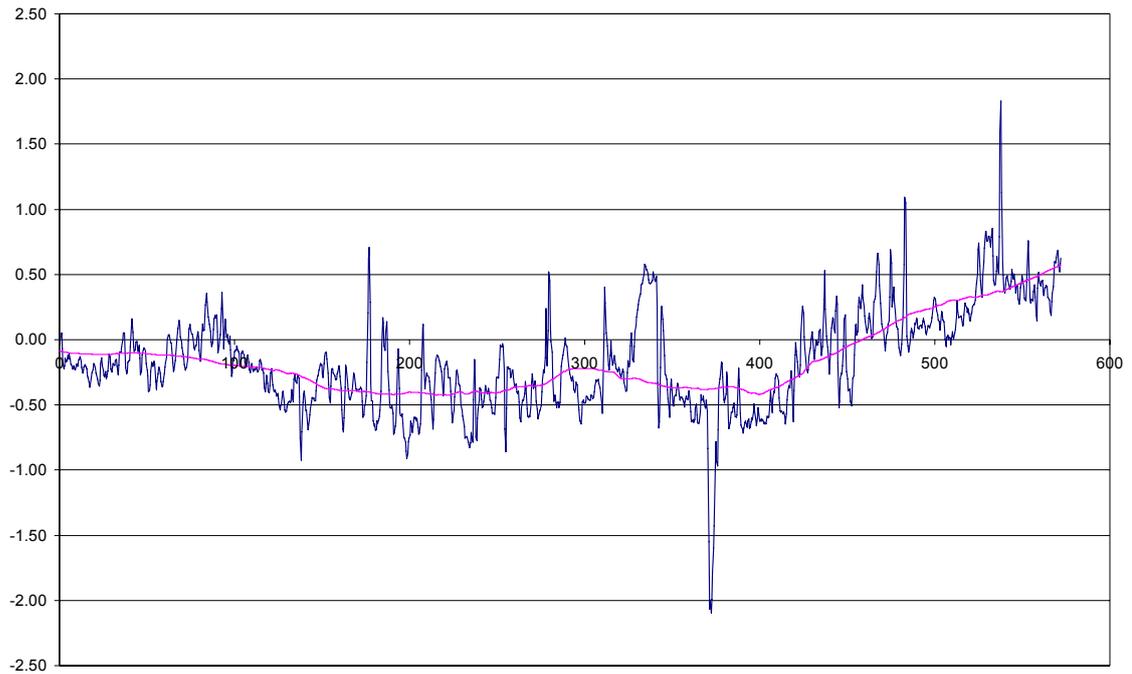


Grafico 4.2 Profilo R19A 2° prova

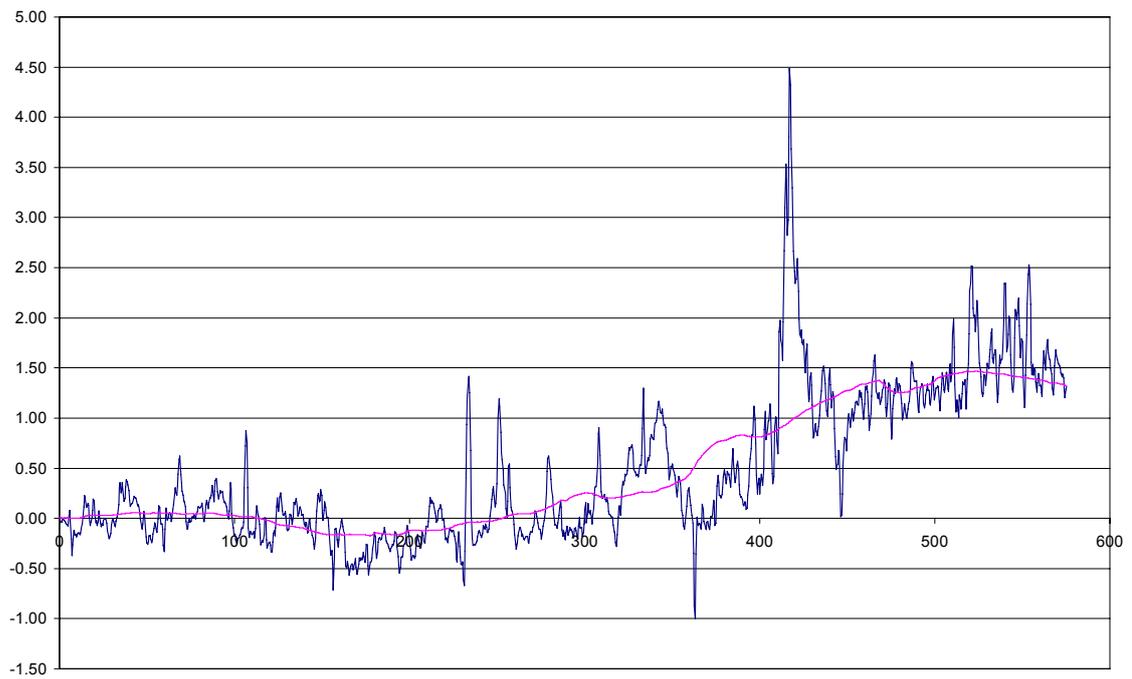


Grafico 4.3 Profilo R19A 3° prova

Nei grafici si nota una spezzata di colore blu, questa linea rappresenta la rugosità della superficie nella rispettiva traiettoria.

La precisione del profilografo evidenzia un difetto dei provini, le superfici su cui sono stati incollati i rinforzi non sono piane, questo difetto può ridurre la resistenza alla delaminazione che il provino può sviluppare.

Per valutare correttamente la rugosità della superficie del prisma, bisogna depurare i dati, il metodo analitico utilizzato per valutare l'entità di questo difetto è la "media mobile", rappresentata dalla curva di colore ciano, consiste nel calcolare il valore medio di ogni distanza Y_n misurata dal laser con le 120 misure precedenti e le 120 misure successive.

Il numero di valori inseriti nella media mobile è stato deciso in modo tale da impedire che la macro e la microrugosità non influissero sui risultati della media.

Per calcolare la media mobile, è stata utilizzata la seguente formula:

$$Y_{Mn} = \frac{\sum_{i=n-120}^{n+120} Y_i}{141} \quad (4.1)$$

dove Y_n è la n-esima misura eseguita dal laser, Y_{Mn} è il n-esimo valore della media mobile e n sono il numero di misurazioni eseguite dal profilografo.

Calcolata la media mobile, si sono ricavati i valori depurati del profilografo Y_{Dn} con la seguente equazione:

$$Y_{Dn} = Y_n - Y_{Mn} \quad (4.2)$$

I valori depurati dall'irregolarità del provino sono descritti nei seguenti grafici.

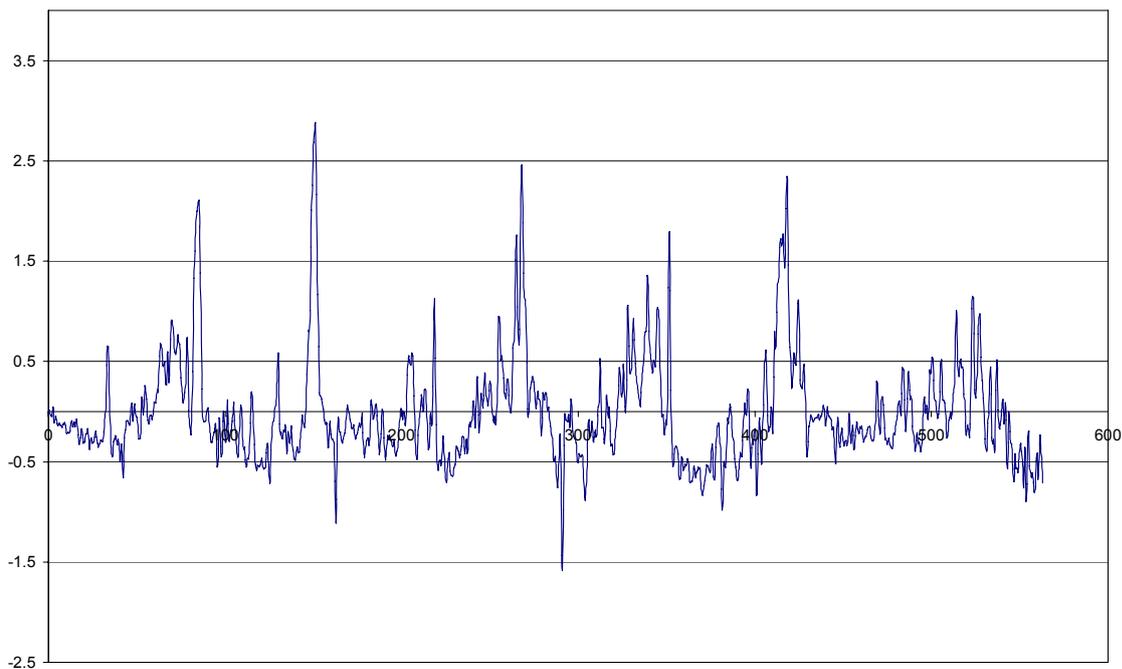


Grafico 4.4 Profilo R19A 1° prova depurata

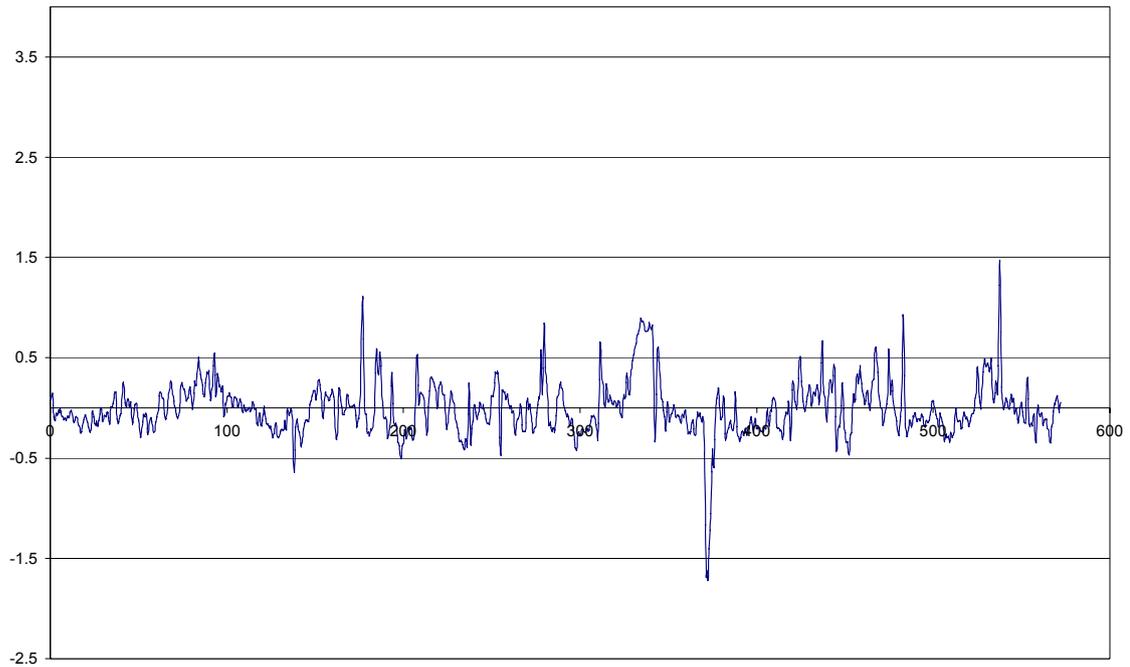


Grafico 4.5 Profilo R19A 2° prova depurata

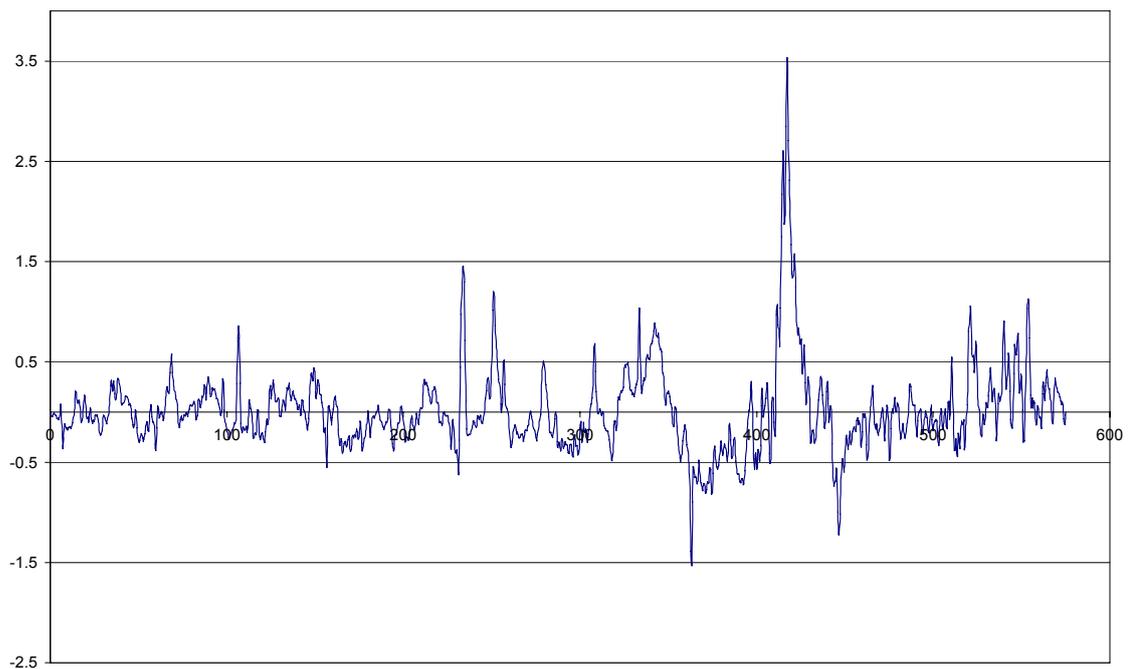


Grafico 4.6 Profilo R19A 3° prova depurata

In questi grafici si riesce a notare la microrugosità del cls, individuata dalle increspature inferiori a 0.5 mm, mentre le increspature superiori, vengono considerate macrorugosità. Nel cls, le macrorugosità sono dovute principalmente a bollicine d'aria rimaste tra il cls e la cassamatta per il getto, oppure a vuoti dovuti al di piccoli inerti.

Confrontando le varie prove eseguite non si nota una evidente differenza tra le rugosità delle superfici dei vari prismi, si rimanda lo studio successivamente.

4.2 Resistenze caratteristiche del cls dei provini

Dalle prove precedenti, è evidente che la delaminazione è strettamente correlata alle caratteristiche intrinseche del cls dei provini, più in particolare il livello di maturazione che il cls ha raggiunto al momento della prova.

Per valutare l'effetto che il condizionamento ha avuto sulla maturazione del cls dei provini, è necessario conoscere in dettaglio le caratteristiche che il cemento ha raggiunto, quindi è necessario determinare la resistenza caratteristica a compressione (f_{ck}), la resistenza caratteristica a trazione (f_{ctm}) e il modulo elastico secante (E) dei calcestruzzi dei provini.

Si è fatto riferimento alle norme UNI, le prove sono state svolte presso i laboratori del Politecnico di Milano, per l'esecuzione delle prove è stato necessario eseguire dei carotaggi sui prismi.



Figura 4.4 Carote per le prove di resistenza

Nella norma UNI EN 12390-1 vengono descritte le dimensioni e le tolleranze che devono avere le carote per le prove, da ogni prisma sono stati ricavate 4 provini cilindrici su cui verranno eseguite le prove di resistenza.

4.2.1 Resistenze a compressione

Questa prova serve per determinare la capacità del calcestruzzo a sopportare sforzi di compressione, per questa prova si è fatto riferimento alle norme UNI EN 12390-3 e UNI EN 12390-4 che descrivono le modalità e le caratteristiche necessarie per le macchine di prova.

Il provino viene posizionato al centro del piatto inferiore della pressa su una delle due facce circolari rettificata in precedenza, successivamente si abbassa il piatto superiore fino a contatto.

La prova consiste nel caricare i provini fino alla rottura, si registra il carico massimo sopportato dal provino e si calcola la resistenza alla compressione del calcestruzzo.

Di seguito vengono mostrate alcune foto delle carote dopo la prova a compressione, si notano le diverse modalità di crisi dei provini.



Figura 4.5 Rottura delle carote per compressione



Figura 4.6 Rottura delle carote per compressione

4.2.2 Resistenza a trazione indiretta (prova brasiliana)

Questa prova serve per determinare la resistenza a trazione dei provini in cls, per questa prova si è fatto riferimento alla norma UNI EN 12390-6.

Il provino cilindrico è sottoposto ad una forza di compressione applicata ad una zona ristretta per tutta la lunghezza del cilindro. La risultante forza di trazione ortogonale provoca la rottura del provino per trazione.

Occorre centrare il provino sulla macchina di prova, per mantenere il provino centrato è stato utilizzato un dispositivo di centratura.

E' necessario per una buona riuscita della prova, assicurarsi che il piatto superiore sia parallelo al piatto inferiore durante il carico.

La resistenza a trazione indiretta è data dalla formula:

$$f_{ct} = \frac{2 F}{\pi L D} \quad (4.3)$$

dove:

f_{ct} è la resistenza alla trazione indiretta, in megapascal per millimetro quadrato;

F è il carico massimo, in newton;

L è la lunghezza della linea di contatto del provino, in millimetri;

D è la dimensione nominale della sezione, in millimetri.

Di seguito vengono mostrate alcune foto della macchina di prova e dei provini dopo l'esecuzione della prova, la rottura tipica in questo caso è una frattura lungo lasse di applicazione del carico.



Figura 4.7 Macchina di prova



Figura 4.8 Rottura delle carote per trazione indiretta

4.2.3 Determinazione del modulo elastico secante

Questa prova serve per determinare il modulo elastico secante fra due tensioni dopo un certo numero di cicli di carico (ripetute fino a stabilizzazione).

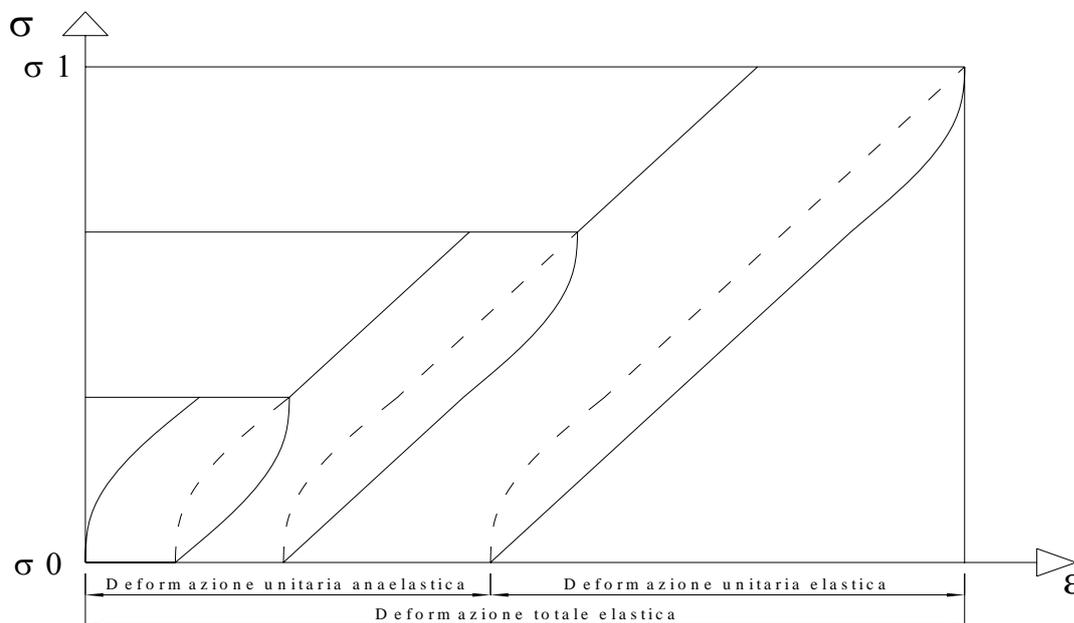
Per la prova si è fatto riferimento alla norma UNI 6556, è stata utilizzata una pressa per l'applicazione del carico e due estensimetri incollati diametralmente opposti per misurare le relative deformazioni.

Per le proprietà del materiale in esame e per le modalità di prova è opportuno partire da una tensione di base diversa da zero.

La tensione massima di prova σ_1 deve essere pari a 1/3 circa della resistenza a compressione del cls, mentre la tensione di partenza σ_0 deve essere circa pari a 1/10 della tensione di rottura del cls.

L'intervallo tra le due tensioni è stato poi diviso in tre parti, in modo da consentire la lettura delle deformazioni a tensioni intermedie.

Durante la prova si eseguono una serie di cicli di carico-scarico fino a stabilizzazione delle letture estensimetriche.



Per la valutazione del modulo viene presa la deformazione media ε_M , il modulo elastico è stato determinato con la seguente equazione:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_M} \quad (4.4)$$

4.2.4 Risultati

Nella tabella 4.2 vengono elencati i risultati delle prove descritte in questo paragrafo, le prove sono state svolte presso i laboratori del Politecnico di Milano, non è stato possibile eseguire le prove su tutti i prismi, verranno svolte successivamente.

Sono stati provati i prismi rinforzati con lamine da 5 cm.

Provino	Dimensioni		Massa	Prova	Carico compr.	Forza compr.	Carico trazione	Forza trazione	Modulo elastico
R12-1	99	198	3492	compressione	324	41.2			
R12-2	99	197	3477	compressione	366	46.6			
R12-3	99	196	3445	brasiliana			77.52	2.19	
R12-4	99	196	3440	Mod El. + Comp	374	48.6			31118
R13-1	99	197	3522	compressione	515	65.6			
R13-2	99	196	3474	compressione	479	61			
R13-3	99	196	3469	brasiliana	----	"===="	"===="	"===="	"===="
R13-4	99	196	3487	Mod El. + Bras			137.7	4.43	33878
R15-1	99	195	3422	compressione	290	37.67			
R15-2	99	195	3441	Mod El.	296	38.45			29108
R15-3	99	195	3439	compressione	294	38.19			
R15-4	99	195	3429	Splitting			86.98	2.87	
R16-1	99	188	3428	compressione	230	29.88			
R16-2	99	195	3444	Mod El.	318	41.31			29743
R16-3	99	195	3432	compressione	222	28.84			
R16-4	99	195	3457	Splitting			91.43	3.02	
R17-1	99	195	3478	compressione	354	45.99			
R17-2	99	195	3466	Mod El.	338	43.90			28372
R17-3	99	194	3450	compressione	320	41.57			
R17-4	99	195	3453	Splitting			94.57	3.12	
R18-1	99	195	3413	compressione	296	37.7			
R18-2	99	196	3449	brasiliana			73.59	2.37	
R18-3	99	196	3447	Mod e + Comp	328	42.6			30822
R18-4	99	196	3439	compressione(*)	274	34.9	(*)		
R19-1	99	197	3476	compressione	293	37.3			
R19-2	99	196	3467	compressione	294	37.3			
R19-3	99	196	3456	brasiliana			82.61	2.66	
R19-4	99	196	3445	Mod el + comp	372	48.3			31410
R20-1	99	195	3482	compressione	318	41.31			
R20-2	99	195	3490	Mod El.	400	51.96			34140
R20-3	99	195	3498	compressione	422	54.82			
R20-4	99	195	3482	Splitting			99.45	3.28	
R21-1	99	195	3470	compressione	406	52.74			
R21-2	99	195	3457	Mod El.	378	49.10			31838
R21-3	99	195	3484	compressione	332	43.13			
R21-4	99	195	3449	Splitting			105.14	3.47	

Tabella 4.2 Risultati prove sui provini cilindrici

Il simbolo (*) indica che nel provino era presente un perno in acciaio e un foro passante, residuo del sistema di ancoraggio posteriore delle prove di delaminazione.

Gli sforzi riportati nella tabella 4.2 sono stati calcolati dividendo il carico per l'area dei provini, questi non sono le resistenze caratteristiche dei cls, per ottenere queste ultime è necessario dividere gli sforzi per i relativi coefficienti di sicurezza previsti da normativa.

Nella tabella 4.3 vengono riportate le resistenze medie a compressione (f_{ck}), le resistenze a trazione (f_{ctm}) e i moduli elastici (E) dei quattro prismi.

Provino	Condizionamento	f_{ck} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E (MPa)
R12	NS 1 mese	39.47	2.05	31118
R13	NS 2 mesi	59.3	4.43	33878
R15	ΔT 133 cicli	34.1	2.87	29108
R16	ΔT 409 cicli	29.34	3.02	29743
R17	Aria dal 15-09-06	39.82	3.12	28327
R18	Incondizionato	28.4	1.9	30822
R19	Incondizionato	36.97	2.66	31410
R20	$\Delta T+NS$ 125cicli, 15gg	45.36	3.28	34140
R21	$\Delta T+NS$ 250cicli, 1mese	44.32	3.47	31838

Tabella 4.3 Resistenze caratteristiche dei prismi

Da questi risultati si nota un importante effetto, i prismi condizionati in nebbie saline sviluppano resistenze superiori a quelle di riferimento, il motivo è dovuto all'elevata umidità presente nella cella di condizionamento che ha accelerato il processo di maturazione dei prismi.

Questo fenomeno, a parità di giorni di invecchiamento del cls, ha permesso di sviluppare resistenze maggiori di quelle che si avrebbero per un processo di maturazione normale.

I cicli gelo-disgelo, come si prevedeva, hanno ridotto le resistenze del cls, il motivo è dovuto alla variazione di volume che l'acqua presente nel materiale sviluppa nelle transizioni tra solido-liquido, questa variazione di volume provoca delle microfessure all'interno della struttura del cls che ne riducono le proprietà meccaniche.

Capitolo 5

Analisi dei risultati

Questo capitolo riassume tutti i risultati delle prove descritte nei capitoli precedenti.

I risultati sono suddivisi in paragrafi, all'interno dei quali vengono confrontati i diversi aspetti emersi dalla sperimentazione, in modo tale da cogliere le particolarità di ogni condizionamento sui due tipi di rinforzo.

5.1 Grafici carico-spostamento

Questo paragrafo presenta tutti i grafici carico-spostamento ottenuti dalle diverse prove di delaminazione; su ogni prisma sono state eseguite due prove, quindi i risultati sono stati mediati in modo da avere un comportamento tipico del rinforzo per il tipo di condizionamento.

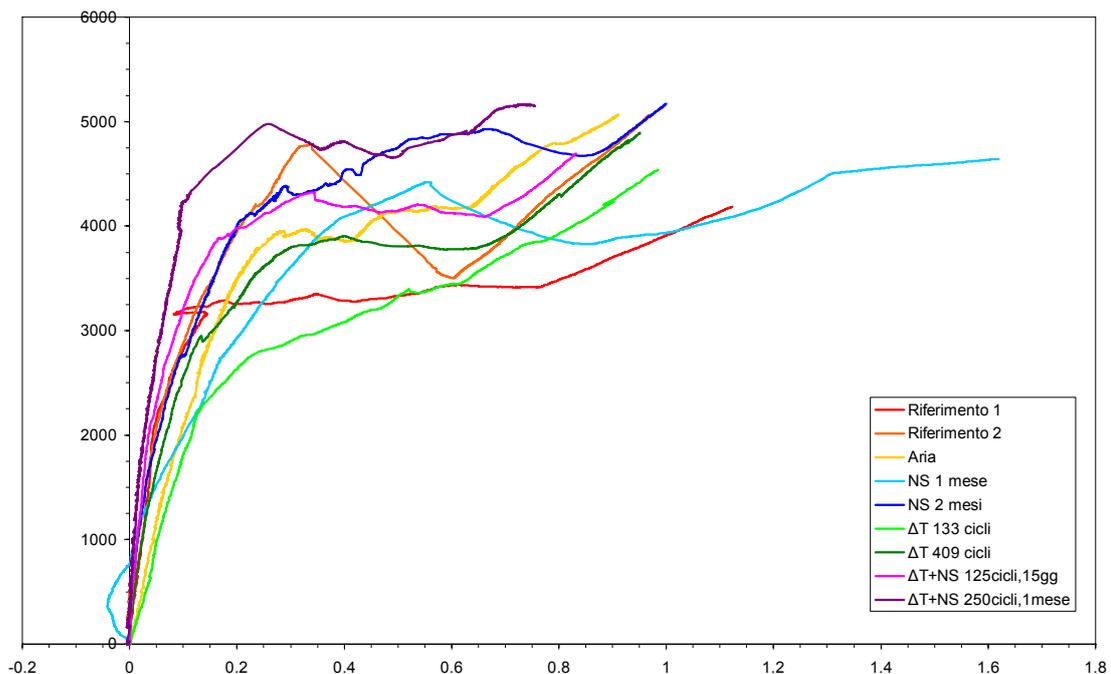


Grafico 5.1 Grafico carico-spostamento dei provini con lamine

Il grafico 5.1 presenta tutti i risultati delle prove sui provini rinforzati con lamine; quasi tutte le prove hanno avuto un inizio di delaminazione entro 0.2 mm di spostamento, il tratto quasi rettilineo che determina la fine della delaminazione si è sviluppato quasi per tutte le prove intorno a 0.7 mm, fatta eccezione per il provino condizionato con 1 mese di nebbie saline che sviluppa la delaminazione con uno spostamento quasi doppi rispetto alle altre prove.

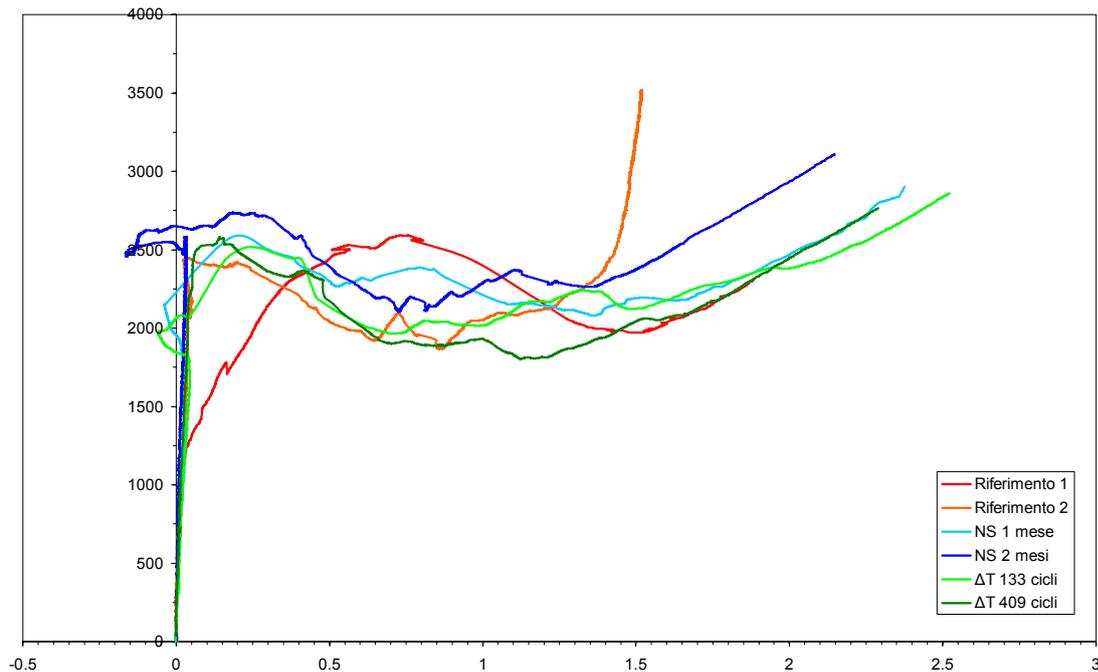


Grafico 5.2 Grafico carico-spostamento dei provini con tessuti

Il grafico 5.2 presenta tutti i risultati delle prove sui provini rinforzati con tessuti.

I tessuti, rispetto alle lamine, presentano uno scorrimento durante la delaminazione maggiore rispetto alle lamine, mentre la rigidità del tratto iniziale è molto più grande. Tale rigidità risulta, inoltre poco modificata dai diversi condizionamenti a cui sono stati sottoposti i provini.

Quasi tutte le prove con tessuti, al momento della delaminazione presentano dei valori negativi, questo fenomeno è dovuto al contrasto dell'LVDT T1 che, al momento della delaminazione, ruota leggermente, come descritto nel capitolo 3.

Sia nei provini con lamine che quelli con tessuti, si nota come i prismi che hanno subito il condizionamento in nebbie saline sviluppino un carico di delaminazione maggiore di tutti gli altri.

5.2 Grafici forza-età di maturazione

In questo paragrafo vengono confrontate le forze massime di delaminazione dei vari provini in funzione dei giorni di maturazione del cls dei prismi all'atto della prova.

Come nel precedente paragrafo, per una maggiore chiarezza, sono state distinte le prove su lamine da quelle su tessuti.

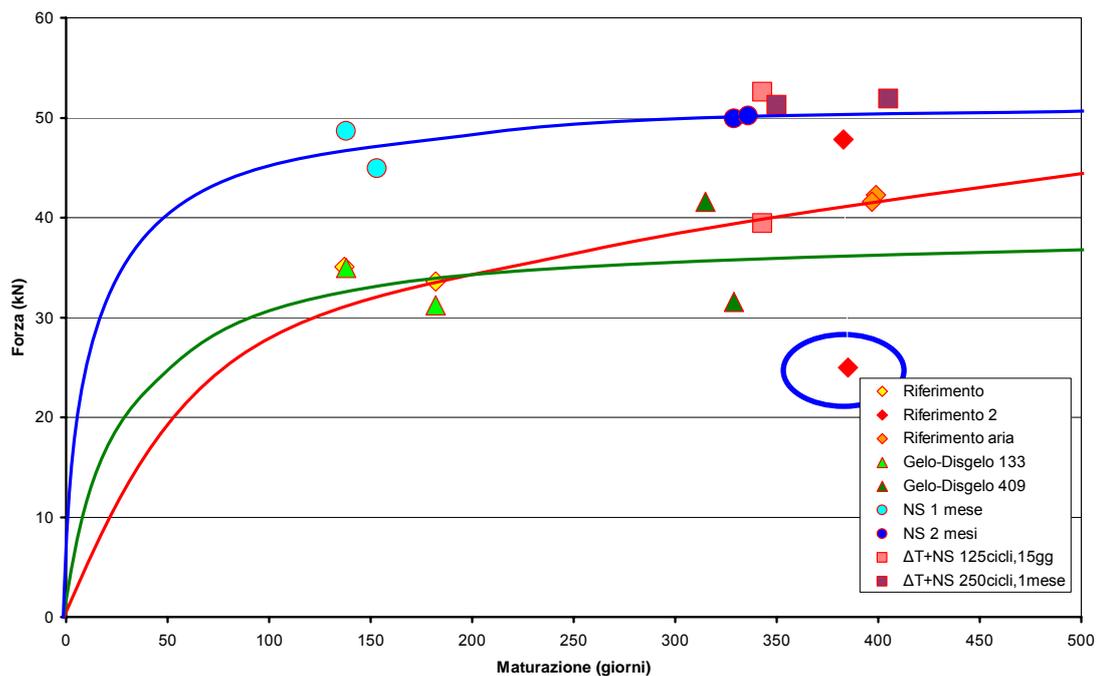


Grafico 5.3 Grafico forza-giorni di maturazione per provini con lamine

Il grafico 5.3 presenta le forze massime in funzione dell'età di stagionatura del cls al momento della prova per i provini rinforzati con lamine; a partire dai risultati sperimentali, sono state tracciate tre curve che interpretano la crescita del carico di delaminazione in funzione della maturazione, in caso di provini non condizionati (linea rossa), condizionati con nebbie saline (linea blu) e condizionati con cicli di gelo disgelo (linea verde).

Si nota che i condizionamenti accelerano i processi di maturazione del cls rispetto a provini non condizionati; i cicli di gelo-disgelo, come visto anche dai risultati delle prove a compressione illustrate nel paragrafo 4.2, danneggiano il cls e ne riducono la resistenza, questo si ripercuote sul carico massimo di delaminazione che risulterà sempre più basso di quello di provini non condizionati.

Al contrario le nebbie saline favoriscono la maturazione e permettono di sviluppare resistenze elevate in brevi tempi di maturazione; dall'interpretazione delle curve si può ipotizzare che nel lungo periodo il carico massimo di delaminazione di provini non condizionati possa raggiungere carichi prossimi a provini condizionati da nebbie saline.

Nel grafico un valore un punto dei dati di riferimento è stato cerchiato in blu, quel valore è stato ottenuto dalla prova R19A (vedi paragrafo 3.24), il rinforzo non era stato incollato in maniera corretta, dal risultato è evidente l'influenza della qualità del placcaggio dei rinforzi e di come un difetto possa abbattere le resistenze previste.

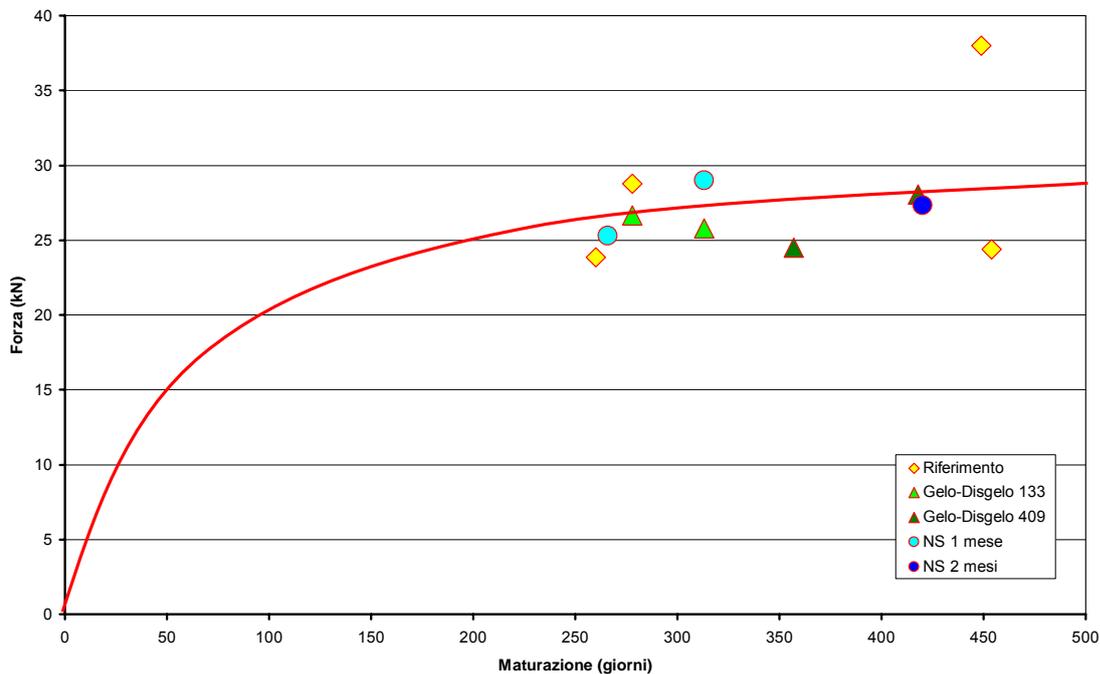


Grafico 5.4 Grafico forza-giorni di maturazione per provini con tessuti

Il grafico 5.4 rappresenta le forze massime in funzione della stagionatura del cls per i provini rinforzati con tessuti; le prove, essendo state eseguite in un periodo ristretto non permettono di fare delle considerazioni analoghe alle precedenti

Si nota che indipendentemente dal tipo di condizionamento, i carichi massimi di delaminazione rimangono concentrati nello stesso range di valori.

Probabilmente, il motivo è dovuto al modo in cui sono stati resinati i tessuti, nel paragrafo 2.2 si era notato che, durante la fase di confezionamento, era stato lasciato un eccesso di resina nei bordi, questo probabilmente ha protetto il cls su cui era stato incollato il tessuto, riducendo gli effetti del condizionamento.

Il grafico 5.5 è un ingrandimento di quello precedente nel quale sono state aggiunte curve analoghe al grafico precedente che aiutano ad interpretare i risultati; con l'età di

maturazione si nota che il carico massimo per i provini non condizionati tende a crescere, mentre il carico per quelli sottoposti a nebbie saline rimangono costanti, anche se superiori ai prismi sottoposti ai cicli di gelo-disgelo.

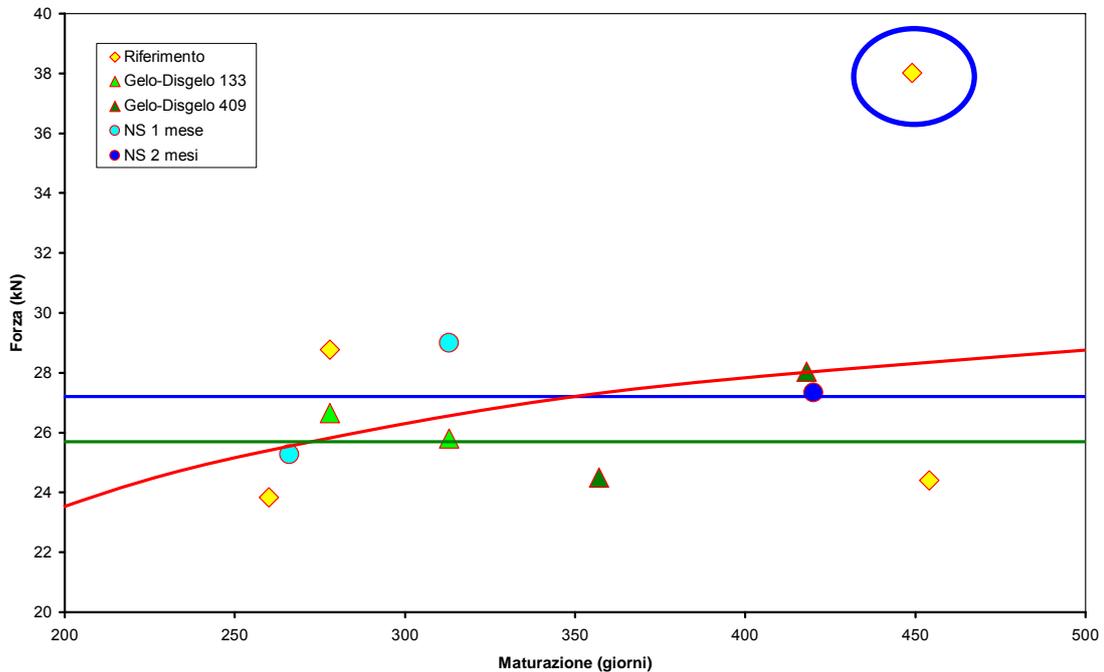


Grafico 5.5 Particolare grafico forza-giorni di maturazione per provini con tessuti

Il carico cerchiato in blu è il risultato della prova R10A (vedi paragrafo 3.10), sul provino non erano state effettuate le incisioni con la smerigliatrice ai lati del tessuto, questo ha comportato un carico massimo molto alto e una delaminazione improvvisa.

5.3 Grafici Tau-Slip

In questo paragrafo vengono confrontate le curve Tau-Slip ottenute interpolando i dati sperimentali con una curva tipo Popovics implementata in un programma di calcolo; il programma ricava tre parametri che determinano la forma della curva dai risultati delle prove con le equazioni descritte nel paragrafo 3.2.

Una caratteristica importante per valutare i risultati è l'energia di frattura, che dipende dal carico a cui si è propagata la delaminazione; graficamente è rappresentata dall'area sottesa dalla curva.

Il grafico 5.6 mette a confronto le curve determinate dalle prove sui prismi placcati con lamine; analogamente a quanto detto in precedenza si nota che i provini condizionati con nebbie saline hanno sviluppato tensioni tangenziali massime e un'energia di frattura superiore rispetto alle altre prove.

Al contrario i provini condizionati con cicli di gelo-disgelo, nonostante abbiano avuto un comportamento iniziale più rigido, hanno sviluppato un'energia di frattura inferiore rispetto alle prove di riferimento.

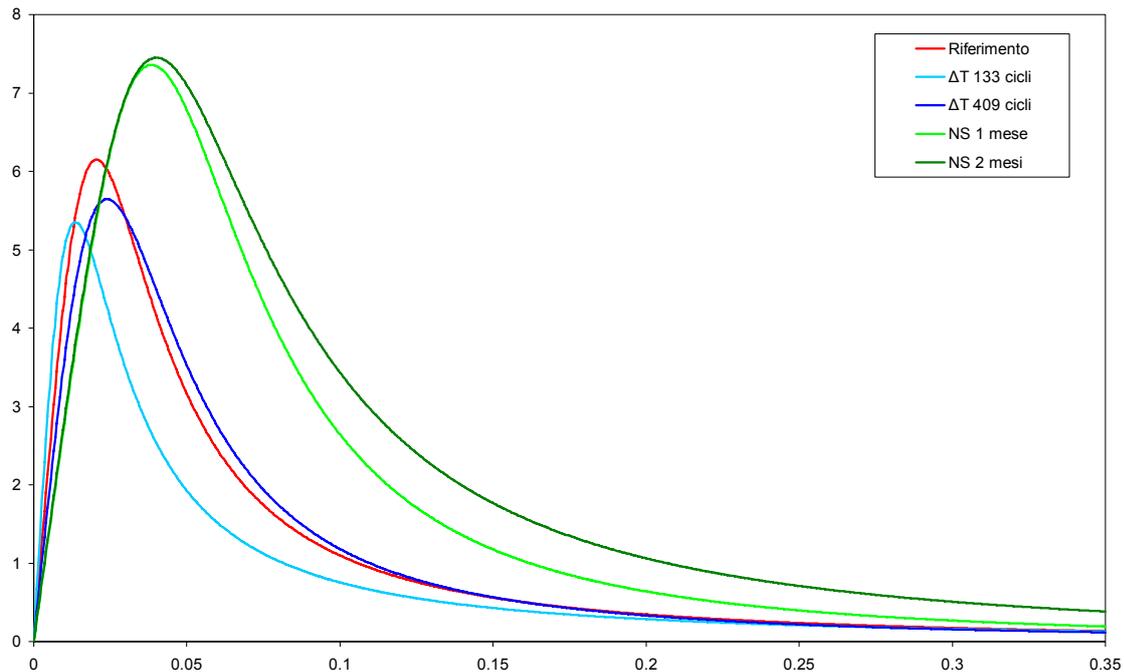


Grafico 5.6 Grafici Tau-Slip dei provini con lamine

Queste prove confermano i risultati descritti nei paragrafi precedenti, in quanto il condizionamento in nebbie saline, favorendo la maturazione del cls, ha aumentato il carico massimo di delaminazione; ciò ha permesso di sviluppare tensioni tangenziali e un'energia di frattura maggiori delle altre prove.

Va ricordato che la curva ottenuta dalla prova sul prisma condizionato per 2 mesi in nebbie saline è stata ottenuta analiticamente, con il vincolo di mantenere l'energia di frattura uguale al valore ottenuto sperimentalmente.

Nel grafico 5.7 vengono confrontate le curve Tau-Slip ottenute dai provini rinforzati con tessuti; si nota che le energie di frattura sviluppate nelle varie prove sono pressoché costanti, questo conferma i risultati descritti nel paragrafo 5.2.

Come detto in precedenza, la resina in eccesso ha ridotto l'effetto del condizionamento del cls uniformando i risultati, ad eccezione del provino condizionato con 409 cicli di

gelo-disgelo, che ha sviluppato una tensione tangenziale e un'energia di frattura inferiore alle altre prove.

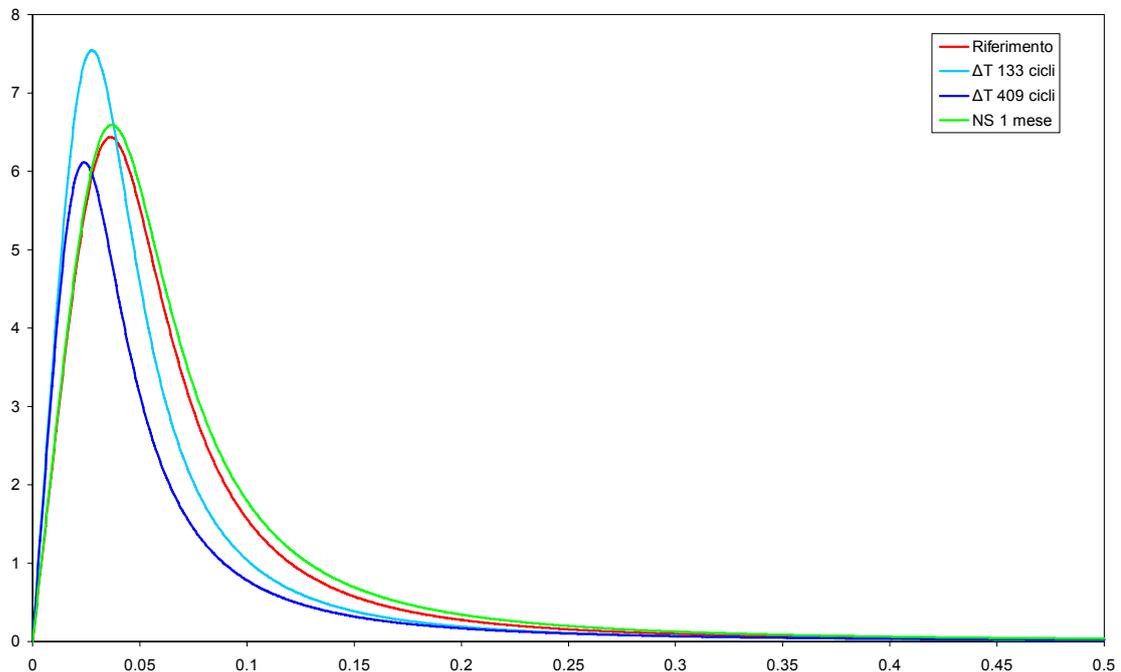


Grafico 5.7 Grafici Tau-Slip dei provini con tessuti

5.4 Valutazione dell'energia di frattura attraverso il CNR DT 200-2004

Le istruzioni del CNR DT 200-2004 indicano una espressione per la valutazione del carico massimo di delaminazione (F_{\max}) e dell'energia di frattura (Γ_f) utilizzando due coefficienti determinati sperimentalmente.

Il carico massimo viene valutato attraverso la seguente equazione:

$$F_{\max} = b_f \sqrt{2 E_f t_f \Gamma_f} \quad (5.1)$$

dove:

b_f è la larghezza della lamina

E_f è il modulo elastico della lamina

t_f è lo spessore della lamina

L'energia di frattura viene valutata con la seguente equazione:

$$\Gamma_f = k_G k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad (5.2)$$

dove:

f_{ck} è la resistenza a compressione del cls,

f_{ctm} è la resistenza a trazione del cls,

k_b è un fattore di tipo geometrico il cui valore è funzione della larghezza della trave rinforzata (b) e di quella del rinforzo (b_f),

k_G è un coefficiente calcolato a partire da un'estesa popolazione di risultati sperimentali disponibili nella bibliografia nazionale ed internazionale, l'analisi statistica dei risultati ha fornito un valore medio pari a 0.064.

Dai risultati sperimentali sono stati ricavati i valori del coefficiente k_G per le varie prove; è stato possibile ricavarli solamente per i provini con lamine, in quanto non sono ancora state eseguite le prove per valutare le resistenze caratteristiche a compressione e a trazione dei provini con i tessuti.

I risultati sono rappresentati nel seguente grafico:

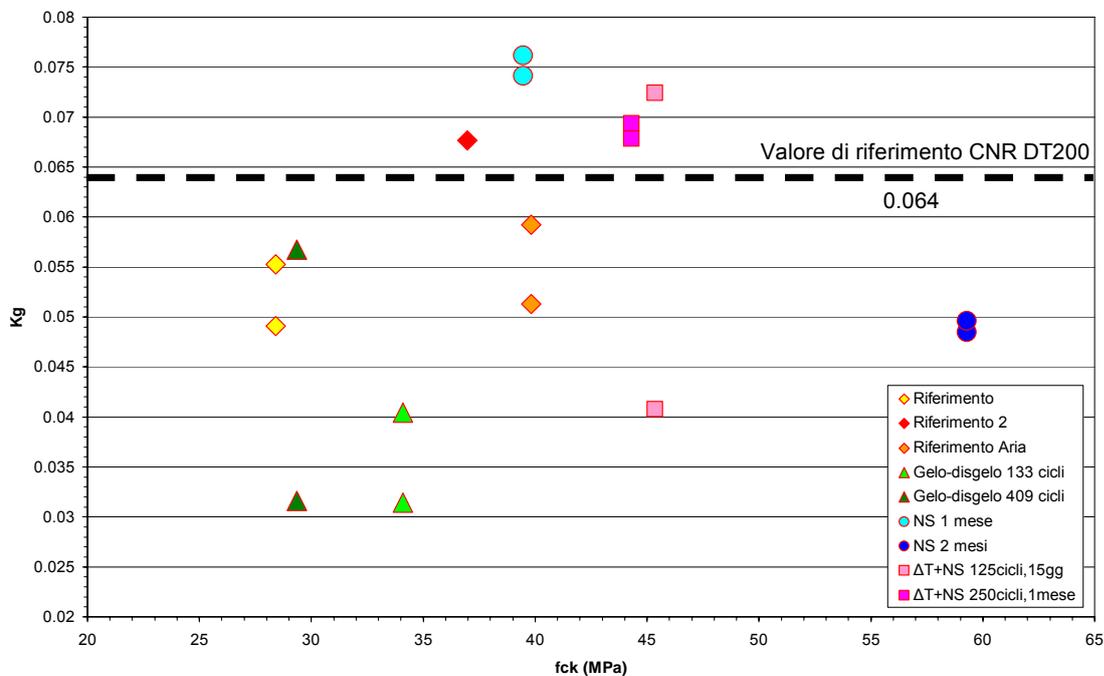


Grafico 5.8 Grafici Kg-fck dei provini con lamine

Si nota che i coefficienti k_G per i provini sottoposti a cicli di gelo-disgelo sono più bassi rispetto al coefficiente dato dal CNR, a conferma dei risultati valutati nei precedenti capitoli.

Inaspettatamente anche i coefficienti valutati per i provini sottoposti a 2 mesi di nebbie saline sono inferiori al valore di riferimento del CNR nonostante abbia sviluppato un carico massimo di delaminazione molto alto.

Bibliografia

ASTM B117, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, 1997.

ASTM C666/ C666M-03, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing".

Bank C., Gentry T.R., Thompson B.P. and Russell J.S., "A Model Specification for FRP Composites for Civil Engineering Structures," Construction and Building Materials, Vol. 17, No. 6-7, pp. 405-437, 2003.

CNR CNR-DT 200/2004: Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati, 2004.

Dejke V., "Durability and service life prediction of GFRP for concrete reinforcement", Report, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, 2001.

Fava G., Mazzotti C., Poggi C., Savoia M.: Durability of FRP-concrete bonding exposed to aggressive environment. FRPCRS-8, Patras, 2007

FIB: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Fib technical report, bulletin n°14, 2001.

Gao B., Kim J.K., Leung C.K.Y.: Experimental study on RC beams with FRP strips bonded with rubber modifier resin. Composites science and technology 64, pp. 2557-2564, 2004.

Karbhari VM., Chin JW., Hunston D., Benmokrane B., Juska T., Morgan R., Lesko JJ., Sorathia U., Reynaud D., "Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure" Journal of Composites for Construction, Vol. 73, 238-247, 2003.

Kumar, B.G., R.P. Singh and T. Nakamura, "Degradation of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation," *Journal of Composite Materials*, Vol. 2713, No. 24, pp. 2713-2733, 2002.

Matta F. "Bond between steel and CFRP laminates for rehabilitation of metallic bridges", graduation thesis, Engineering Faculty, University of Padua, Italy, 2003.

Micelli F., Nanni A. Durability of FRP rods for concrete structures, *Construction and Building Materials*, Volume 18, Issue 7, 1 September 2004, Pages 491-503.

Nelson W. *Accelerated testing: statistical models, test plans and data analyses*. New York: John Wiley and Sons, 1990.

Savoia M., Ferracuti B., Mazzotti C.: Non linear bond-slip for FRP concrete interface. FRPPRCS-6, Singapore, pp. 1-10, 2003.

Savoia M., Ferracuti B., Mazzotti C.: Una legge di interfaccia non lineare per placcaggi con lamine in FRP. XVI congresso AIMETA di meccanica teorica e applicata, 2003.

UNI 6556: Prove sui calcestruzzi, determinazione del modulo elastico secante a compressione, 1976.

UNI EN 12390-1: Prova sul calcestruzzo indurito, forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme, 2002.

UNI EN 12390-2: Prova sul calcestruzzo indurito, confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza, 2002.

UNI EN 12390-3: Prova sul calcestruzzo indurito, resistenza alla compressione dei provini, 2002.

UNI EN 12390-4: Prova sul calcestruzzo indurito, resistenza alla compressione, specifiche per macchine di prova, 2002.

UNI EN 12390-6: Prova sul calcestruzzo indurito, resistenza a trazione indiretta dei provini, 2002.

UNI EN 12390-8: Prova sul calcestruzzo indurito, profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione, 2002.