



POLITECNICO MILANO 1863

Scuola di Architettura, Urbanistica e Ingegneria delle Costruzioni
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

*Rinforzo NSM di travi lignee: verifica del comportamento
meccanico di un adesivo poliuretano*

Relatore: Prof. Ing. Marco Andrea PISANI

Tesi di Laurea Magistrale di:

Alessandro CAGNONI

Matricola n. 946259

Anno Accademico 2020-2021

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto tutta la mia famiglia che c'è sempre stata durante tutti questi anni. Grazie a mio papà che "non ha mai chiuso i rubinetti", a mia mamma per "avermi trattato come un principino" e a mio fratello che "tra una colazione e l'altra" è stato il primo a leggere il presente elaborato.

Ringrazio il professor Marco Andrea Pisani, relatore di questa tesi, per la disponibilità e l'attenzione dimostrate durante la scrittura dell'elaborato. Desidero inoltre esprimere la mia gratitudine a tutto il personale del Laboratorio Prove Materiali per l'aiuto fornitomi nella preparazione e nell'esecuzione delle prove, oltre che per i suggerimenti e i consigli che sono stati in grado di darmi.

Sono grato a tutti i miei amici, quelli di vecchia data e quelli nuovi, che sono stati in grado di alleggerire questi anni di studio. Vorrei ringraziare in modo particolare Luca F. con cui ho affrontato tutte le difficoltà del periodo universitario. Un grazie speciale anche ai "Poli Positivi" e tutti gli amici conosciuti durante i numerosi progetti affrontati.

Gli ultimi ringraziamenti, ma non per questo meno importanti, vanno a tutti i coinquilini con cui ho condiviso la maggior parte del tempo trascorso durante questi splendidi anni. Un grazie speciale a Riccardo B. per tutte le risate che sei stato in grado di farmi fare, compagno di "merende" e persona dal cuore d'oro.

Alessandro

ABSTRACT

La NSM, acronimo di "Near-Surface Mounted", è una moderna tecnica di consolidamento strutturale che consiste nell'inserire dei profili di rinforzo, in acciaio o in FRP (Fiber Reinforced Polymer), all'interno di scanalature ricavate sulle superfici degli elementi da rafforzare. La NSM presenta diversi vantaggi, tra cui la possibilità di consolidare elementi in legno senza alterarne l'aspetto estetico. Trattandosi di una tecnica relativamente recente, sono ancora numerosi i dubbi irrisolti come, ad esempio, l'efficacia del collegamento tra i differenti materiali.

Lo scopo del presente elaborato è quello di indagare il fenomeno dell'aderenza che si instaura tra il legno, la colla e il rinforzo. Per fare ciò, è stata condotta una campagna sperimentale basata su prove di estrazione (pull out) effettuate con il metodo del taglio diretto (direct shear test). I provini testati sono in legno di larice rinforzati mediante lamine vincolate per mezzo di un adesivo poliuretano bicomponente. Le prove sono state eseguite variando la lunghezza d'incollaggio e il materiale del profilo di rinforzo; in particolare, sono state impiegate lamine in CFRP e in acciaio inox con lunghezza di ancoraggio pari a 30 mm, 100 mm e 150 mm.

Dalla campagna sperimentale è stato possibile ottenere una serie di informazioni e dati utili alla determinazione del comportamento della regione incollata. Nello specifico, è stato possibile determinare la modalità di rottura dei campioni, la relazione forza-scorrimento, le forze di legame medie, il comportamento lungo la lamina e lungo sezioni perpendicolari ad essa. Infine, è stato possibile trarre delle considerazioni riguardanti la scelta dei materiali e delle modalità di analisi dati tramite DIC a beneficio delle prove da svolgere in futuro per proseguire le indagini sul tema.

INDICE DEI CONTENUTI

<i>Capitolo 1</i> INTRODUZIONE.....	11
<i>Capitolo 2</i> LEGNO	13
2.1 Il legno in natura.....	15
2.1.1 Struttura degli alberi	15
2.1.2 Difetti.....	17
2.1.3 Specie legnose	19
2.2 Caratteristiche	26
2.2.1 Proprietà fisiche	26
2.2.2 Legno e umidità	30
2.2.3 Caratteristiche meccaniche.....	34
2.2.4 Durabilità e degrado	50
2.2.5 Comportamento al fuoco.....	55
<i>Capitolo 3</i> MATERIALI COMPOSITI E FRP.....	61
3.1 Caratteristiche FRP.....	64
3.2 Fibre	67
3.2.1 Fibre di vetro	68
3.2.2 Fibre di carbonio	70
3.2.3 Fibre aramidiche.....	72
3.2.4 Fibre di boro	74
3.2.5 Altre fibre	75
3.3 Matrici	77
3.3.1 Matrici reticolate (termoindurenti)	77
3.3.2 Matrici non reticolate (termoplastiche)	79

3.4 Adesivi	81
3.4.1 Adesivi epossidici.....	83
3.4.2 Adesivi poliuretanic.....	84
<i>Capitolo 4 PROFILI DI RINFORZO IN FRP</i>	86
4.1 Modalità di produzione	87
4.1.1 La pultrusione	88
4.2 Caratteristiche delle barre	91
4.2.1 Proprietà fisiche	93
4.2.2 Caratteristiche meccaniche.....	95
4.2.3 Prestazioni a lungo termine	103
<i>Capitolo 5 TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO</i>	106
5.1 Consolidamento di solai	108
5.1.1 Rinforzo con legno.....	108
5.1.2 Rinforzo con soletta in c.a.....	110
5.2 Consolidamento di travi.....	112
5.2.1 Placcaggio con tavole in legno.....	112
5.2.2 Rinforzo con elementi metallici	113
5.2.3 Rinforzo con elementi in CFRP.....	115
5.2.4 Sostituzione o rimozione parziale degli elementi danneggiati.....	117
5.3 Near Surface Mounted	119
5.3.1 Calcolo della capacità portante.....	123
5.3.2 Fattori che influenzano l'efficacia dell'incollaggio	128
5.3.3 Prestazioni a lungo termine	133
<i>Capitolo 6 STATO DELL'ARTE</i>	137

6.1 Studio analitico sulla tecnica NSM.....	139
6.2 Studio sperimentale sulla tecnica NSM.....	146
6.2.1 Materiali e caratteristiche geometriche.....	146
6.2.2 Preparazione dei provini	149
6.2.3 Risultati ottenuti	151
<i>Capitolo 7 PROGRAMMA SPERIMENTALE</i>	161
7.1 Caratteristiche degli elementi e dei materiali.....	164
7.1.1 Legno	164
7.1.2 Rinforzo.....	165
7.1.3 Adesivo	166
7.2 Preparazione dei provini	168
7.2.1 Serie DS_C_30	168
7.2.2 Serie DS_C_100	172
7.2.3 Serie DS_C_150	173
7.3 Setup di prova.....	176
7.3.1 DIC e post processing	178
7.4 File ottenuti dalle analisi.....	188
<i>Capitolo 8 RISULTATI OTTENUTI</i>	195
8.1 DS_C_30.....	196
8.1.1 DS_C_30_1	197
8.1.2 DS_C_30_2	204
8.1.3 DS_C_30_3	211
8.1.4 DS_C_30_4.....	219
8.1.5 Riepilogo e considerazioni	225
8.2 DS_C_100	230

8.2.1 DS_C_100_1	231
8.2.2 DS_C_100_2	233
8.2.3 DS_C_100_3	234
8.2.4 DS_C_100_4	236
8.2.5 Riepilogo e considerazioni	238
8.3 DS_C_150	241
8.3.1 DS_C_150_1	242
8.3.2 DS_C_150_2	250
8.3.3 DS_C_150_3	256
8.3.4 DS_C_150_4	262
8.3.5 Riepilogo e considerazioni	269
<i>Capitolo 9</i> PROGRAMMA SPERIMENTALE CON LAMINE IN ACCIAIO.....	273
9.1 Caratteristiche delle lamine in acciaio	274
9.2 Preparazione dei provini	276
9.3 Risultati ottenuti	279
9.3.1 DS_S_100_1	280
9.3.2 DS_S_100_2	288
9.3.3 DS_S_100_3	294
9.3.4 DS_S_100_4	301
9.3.5 Riepilogo e considerazioni	307
<i>Capitolo 10</i> DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	311
<i>Capitolo 11</i> CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	318
11.1 Conclusioni	318
11.2 Sviluppi per il futuro.....	321
APPENDICE.....	322

Script Matlab curva carico-scorrimento	322
Script Matlab comportamento lungo la lamina	323
Script Matlab il comportamento lungo la sezione	324
BIBLIOGRAFIA	328

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Il legno, grazie alla sua abbondanza e alla facilità di approvvigionamento, è storicamente uno dei materiali più utilizzati nel settore delle costruzioni. Fino ai primi anni del ventesimo secolo, gli edifici sono stati costruiti prevalentemente con strutture di tipo misto in cui il legno era un elemento chiave per la realizzazione delle travi, dei solai e delle coperture. Tale materiale veniva scelto, oltre che per la facilità nella lavorazione, per le sue ottime proprietà quali la leggerezza, la resistenza meccanica e la stabilità di fronte all'attacco del fuoco.

Degli edifici esistenti, numerosi sono ancora costituiti da elementi lignei soprattutto in Italia dove il patrimonio edilizio è da considerarsi "vecchio". Infatti, sulla totalità di un 12,2 milioni di immobili residenziali, un quarto è costituito da fabbricati costruiti prima del 1946 e addirittura il 43% risulta costruito prima del 1970 [1]. Considerando che la vita utile media di un edificio è di 50 anni, appare evidente come molto spesso sia necessario intervenire sulle costruzioni esistenti al fine di garantire livelli prestazionali superiori o uguali ai limiti di accettazione. Il consolidamento strutturale è quindi una tematica di primaria importanza all'interno del panorama edilizio esistente.

Gli interventi di consolidamento si basano sull'esigenza di aumentare le prestazioni di uno o più elementi della struttura portante di una costruzione. La soluzione più drastica è certamente la sostituzione dei componenti non idonei con elementi più prestazionali, ma tale strada non è sempre percorribile. Un esempio sono gli interventi che devono essere effettuati su edifici soggetti a vincoli architettonici e dei beni culturali. Spesso quindi è necessario ricorrere a metodi alternativi di rafforzamento che non comportino la sostituzione dell'elemento esistente. A tale scopo, una delle tecniche attualmente più

innovative e promettenti è quella denominata “Near-Surface Mounted” (NSM) che consiste nell’inserire profili di rinforzo all’interno di scanature ricavate sulle superfici degli elementi da consolidare. I componenti di rinforzo possono essere in acciaio oppure in materiale polimerico fibrorinforzato (FRP), quest’ultimi di recente introduzione nel settore edile e tutt’oggi oggetto di studio e ricerca scientifica.

Lo scopo del presente elaborato è quello di indagare l’efficienza e l’affidabilità della tecnica NSM per il rafforzamento di elementi in legno, concentrandosi nello specifico sull’efficacia del giunto incollato mediante resina poliuretanica. L’unione tra i diversi materiali è infatti il punto chiave che determina la fattibilità dell’intervento ed è l’aspetto che desta attualmente maggiori perplessità in merito alla tecnologia NSM. Nella prima parte dell’elaborato vengono descritte le caratteristiche dei materiali coinvolti nell’operazione di consolidamento. Inizialmente sono riportate le caratteristiche del legno e l’influenza che hanno i fattori esterni sulle sue proprietà. Successivamente vengono riportati i materiali compositi approfondendo in modo particolare quelli polimerici fibrorinforzati. Infine, sono descritte le caratteristiche dei profili in FRP più diffusi commercialmente. Segue il capitolo relativo alle più diffuse tecniche di consolidamento degli elementi in legno. In questo paragrafo viene inoltre approfondita la tecnica NSM, della quale viene trattata la letteratura scientifica esistente, la normativa di riferimento, i fattori che influenzano l’efficacia dell’incollaggio e le prestazioni a lungo termine. Successivamente è riportato il capitolo relativo allo stato dell’arte nel quale vengono descritti i lavori svolti in precedenza presso al Politecnico di Milano. Infine, nell’ultima parte, viene descritta la campagna di prove sperimentali condotta presso il Laboratori Prove Materiali del Politecnico di Milano e i risultati ottenuti sia per quanto riguarda l’utilizzo di lamine di rinforzo in CFRP che quelle in acciaio.

Capitolo 2

LEGNO

Il legno è un materiale naturale che in botanica viene definito come “il complesso di elementi istologici che si trova nei fusti, nei rami e nelle radici delle piante vascolari” [2]. L’evoluzione di questo materiale nasce dalla necessità delle piante di esporre quante più parti verdi possibili ai raggi solari, ottimizzando così il processo fondamentale per la vita sulla terra: la fotosintesi clorofilliana¹. Il bisogno di aumentare la superficie di verde esposta ha comportato la crescita in altezza degli alberi che si sono adattati sviluppando un tessuto di sostegno che è per l’appunto il legno.

Trattasi dunque di un materiale naturale utilizzato fin dai tempi antichi nei più disparati impieghi possibili, dal settore nautico a quello delle costruzioni passando, ad esempio, per quello musicale e, in epoca moderna, nell’ editoriale. Grazie alla sua abbondanza e alla facilità di approvvigionamento, il legno è diventato, insieme alla pietra, uno dei materiali più utilizzati nel settore delle costruzioni, complici anche le sue ottime proprietà come la leggerezza, la resistenza meccanica e la stabilità di fronte all’attacco del fuoco.

Sebbene questo materiale sia stato progressivamente sostituito dall’acciaio e dal calcestruzzo a partire dal XX secolo nel settore edile, negli ultimi anni, complice l’avanzare del tema della sostenibilità, si è assistito a sempre più numerosi progetti che utilizzano legname come materiale da costruzione. Infatti, essendo composto per il 50% da carbonio, il legno è l’unico tra i materiali attualmente disponibili ad avere un bilancio netto in termini di emissioni di anidride carbonica equivalente, ovvero è in grado di immagazzinare più carbonio di

¹ $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + E_{\text{solare}} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$

quanto ne viene emesso per le operazioni di raccolta, trasformazione, trasporto e montaggio.

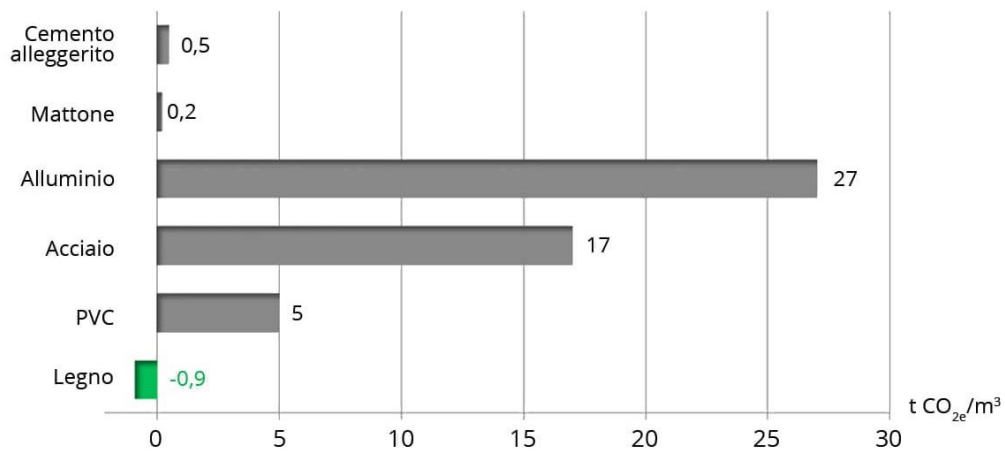


Figura 2.1 - Emissioni nette di CO₂ compreso l'effetto Carbon Sink [3]

Trattandosi di un materiale le cui caratteristiche variano fortemente non solo da specie a specie di albero ma anche da fusto a fusto, la progettazione delle strutture lignee non può prescindere dalle conoscenze di base della tecnologia del legno.

2.1 IL LEGNO IN NATURA

2.1.1 STRUTTURA DEGLI ALBERI

Il tronco di un albero assolve a diverse funzioni: non solo supporta la corona (nella quale avviene la produzione del nutrimento e dei semi), ma consente anche la risalita fino alle foglie delle soluzioni minerali assorbite dalle radici e la discesa della linfa, nonché la conservazione del nutrimento [4].

Considerando una sezione trasversale, ottenuta ortogonalmente all'asse longitudinale del fusto, è possibile notare la presenza di una serie di cerchi concentrici che rappresentano il ciclo annuale della vita dell'albero. Tale sezione, oltre a consentire di individuare ogni singolo anello di accrescimento, consente di identificare delle zone omogenee, nello specifico partendo dal cuore della pianta troviamo (Figura 2.2):

- **Midollo (1):** parte centrale del tronco, generalmente poco differenziabile dal durame che lo contiene. È formata da un tessuto tenero attorno al quale avviene la prima crescita della pianta. Nel corso degli anni può sparire lasciando un foro che riduce l'area resistente;
- **Durame (2):** porzione più interna del tronco, che rispetto all'alburno è più scura, pesante e secca ed è formata da cellule morte da molti anni, dure e compatte, che non trasportano più liquidi. È la parte del tronco più pregiata perché essendo la porzione più vecchia della pianta, impregnata di resine fenoliche, è la più stabile e meno soggetta ad attacchi di parassiti. Nonostante le cellule siano morte, assolve ancora alla funzione di sostegno ed è importante per la rigidità e la stabilità dell'albero;
- **Alburno (3):** chiamata anche corteccia interna, è la parte esterna del durame. Di colore chiaro, è formato da cellule vive che trasportano la linfa grezza, soluzione di acqua e sali minerali, dalle radici alla chioma. Lo spostamento della linfa avviene per capillarità o, nel caso di alberi di

notevole altezza, per aspirazione. Oltre alla funzione di trasporto, svolge la funzione di immagazzinamento dell'acqua, ciò rende l'alburno poco durevole alle alterazioni biologiche indotte da funghi e insetti. Nonostante ciò, le caratteristiche meccaniche sono simili a quelle del durame. Con il passare degli anni, ad ogni inizio inverno, l'alburno viene assorbito in parte dal durame;

- **Cambio (4):** parte non visibile ad occhio nudo che è in grado di produrre le cellule del legno; queste possono essere generate sia verso l'interno (alburno) che verso l'esterno (libro);
- **Libro (5):** strato tenero, umido e spugnoso che contiene i vasi che conducono il nutrimento sintetizzato (la linfa) dalle foglie ad ogni parte dell'albero;
- **Corteccia (6):** è la parte visiva di un albero ed è composta da un tessuto fisiologicamente morto che serve come protezione dagli insetti nocivi e dagli agenti atmosferici. Consente inoltre gli scambi gassosi necessari alla vita della pianta stessa.

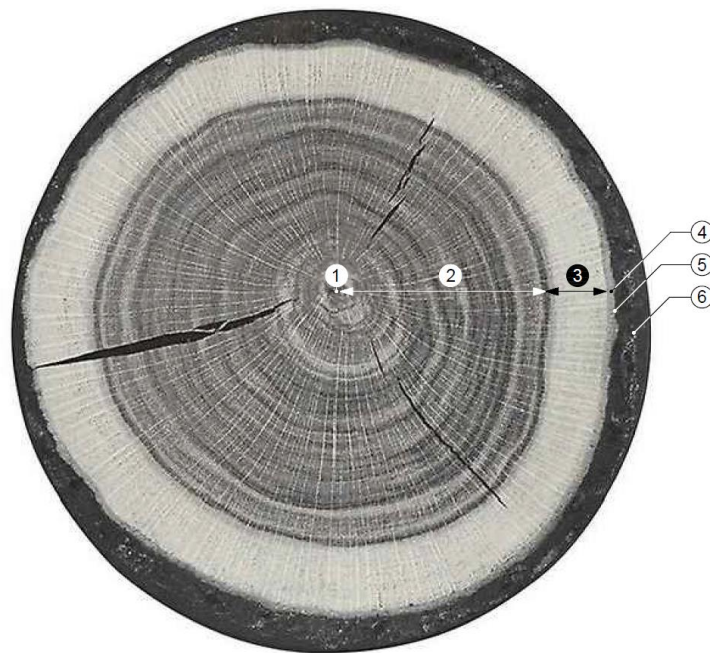


Figura 2.2 - Sezione di un tronco

2.1.2 DIFETTI

I difetti del legno sono delle singolarità morfologiche, generalmente corrispondenti ad esigenze funzionali della pianta, che causano la divergenza dalla normale costituzione anatomica. Tali imperfezioni possono avere svariate origini e determinano situazioni tecnologicamente indesiderabili. I principali difetti che si possono riscontrare sono:

- **Nodi:** imperfezioni locali che derivano dall'intersezione dei rami con il fusto degli alberi. Il processo di formazione dei rami è analogo a quello del fusto ed avviene per opera del cambio, ovvero lo strato di cellule vive poste al di sotto della corteccia. Lo stato di salute dei rami comporta la formazione di diversi tipi di nodo ed in particolare esistono: i *nodi sani aderenti* quando i rami sono vivi e sono raccordati, anello per anello, con i corrispettivi incrementi del fusto; i *nodi sani cadenti* quando i rami sono morti e spezzandosi lasciano dei mozziconi che vengono inglobati dall'accrescimento del fusto; infine si hanno i nodi neri e i nodi marci quando i rami hanno subito degli attacchi fungini più o meno gravi;



Figura 2.3 - Nodo sano aderente, nodo sano cadente e nodo marcio

- **Legno di reazione:** irregolarità che si verifica quando il fusto è sottoposto a particolari e prolungate sollecitazioni trasversali. Si tratta di un tessuto attivo anomalo mediante il quale l'albero modifica attivamente la sua forma. La crescita eccentrica della sezione trasversale tende a ripristinare la posizione originaria delle componenti dell'albero che hanno subito una

deviazione rispetto alla posizione normale [5]. Può essere di due tipologie: il legno di compressione (conifere) oppure di trazione (latifoglie).

Il legno di compressione si presenta nella zona compressa, ovvero quella sottovento, ed è formato da cellule aventi le pareti più spesse e con maggior contenuto di lignina rispetto alle cellule normali. Questo difetto può pregiudicare la resistenza a trazione e flessione del legno e può essere riconosciuto dalla colorazione bruno rossastra che assume la zona interessata da questa anomalia.

Il legno di trazione compare nella zona tesa, ovvero quella sopravvento, e causa la formazione all'interno delle cellule di un secondo strato della parete cellulare. Il legno di trazione presenta caratteristiche meccaniche scadenti e maggiori valori di ritiro longitudinali e può essere riconosciuto dal colore bianco niveo brillante che assume la zona interessata;

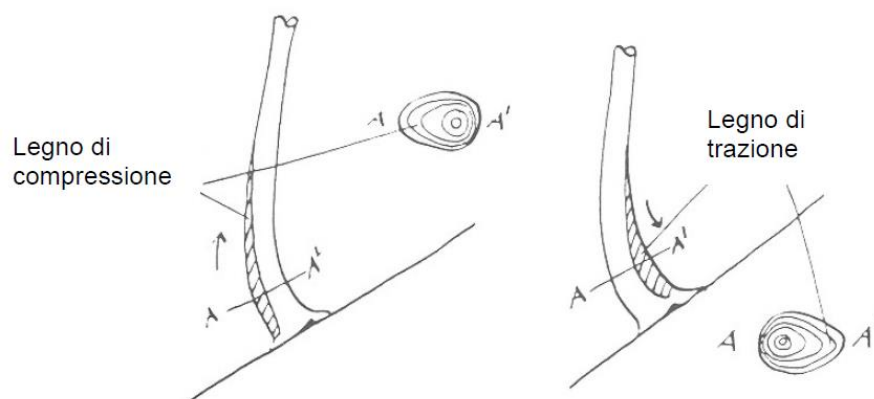


Figura 2.4 - Formazione del legno di reazione nelle conifere (sinistra) e nelle latifoglie (destra) [5]

- **Cipollatura:** distacco parziale o totale tra due anelli annuali che si verifica a causa di temperature anomale o da importanti sollecitazioni flessionali. Il materiale affetto da questo difetto è danneggiato in maniera grave ed è dunque caratterizzato da scadenti proprietà meccaniche;
- **Tasche di resina o di gomma:** cavità formatesi per separazione di due anelli annuali nelle quali i canali secretori danneggiati riversano resina.

Nel caso delle latifoglie si parla di tasche di gomma mentre per le conifere vengono dette tasche di resina;

- **Cuore fragile:** gli alti valori di sollecitazione di compressione longitudinale nella zona interna del fusto possono determinare la crisi per schiacciamento del materiale. Tale difetto non è facilmente individuabile ma è in grado di compromettere fortemente le caratteristiche meccaniche a flessione e a trazione del materiale [6];
- **Callo cicatriziale:** massa di cellule causata dal rimargino dei tessuti danneggiati a seguito di lesioni esterne. Poiché la generazione di nuove cellule legnose può avvenire solamente nella zona cambiale, non si assiste alla riparazione vera e propria delle lesioni ma al ricoprimento delle zone colpite. Il materiale rimane fratturato e ciò comporta la sensibile riduzione della resistenza meccanica dello stesso. Se nel momento del rimargino dei tessuti danneggiati è presente un corpo estraneo o un pezzo di corteccia, si assiste all'**inclusione di corpi estranei** all'interno del fusto;
- **Fessure da ritiro:** chiamate anche cretti, queste lesioni sono causate dall'anisotropia dei ritiri, vedasi capitolo 2.2.2 - Legno e umidità.

2.1.3 SPECIE LEGNOSE

Le essenze legnose conosciute in tutto il globo sono circa 30.000, ma solamente alcune centinaia rivestono un ruolo importante per fini commerciali [7]. Questa estrema variabilità di specie deriva, ancora una volta, dalla capacità degli alberi di adattarsi alle condizioni ambientali che si trovano ad affrontare, come, ad esempio, il freddo secco della tundra o il caldo umido dell'equatore.

La molteplicità delle essenze legnose rende impossibile giungere ad una classificazione universale delle specie arboree, ma in base alla modalità riproduttiva distinguiamo:

- **Conifere:** il nome deriva dal greco *conifer* che significa “portatore di coni” ed infatti le foglie degli alberi appartenenti a questa specie sono a forma di ago, eccezion fatta per il larice. Questa particolare conformazione delle foglie deriva da mutazioni naturali che hanno permesso alle rispettive piante di sopravvivere negli ambienti più freddi; la forma stretta e allungata permette di ridurre la traspirazione, rallentando gli scambi gassosi in uscita. Altra caratteristica delle foglie è il colore verde scuro che permette di assorbire il massimo dell’energia solare, permettendo la sopravvivenza alle alte latitudini e nella fitta ombra della foresta. Le conifere sviluppano i rami anche dal basso conferendo la tipica forma piena e a punta. Il legname presenta una struttura semplice basata su un solo tipo di cellule allungate disposte secondo la direzione del tronco. Appartengono a questa categoria: pino, douglasia, abete, larice, sequoia e cedro [8].
- **Latifoglie:** erroneamente chiamate con il nome di angiosperme, gli alberi appartenenti a questa famiglia hanno le foglie larghe che permette loro di vivere in ambienti temperati e altitudini moderate. Le latifoglie sviluppano i rami partendo da una certa altezza conferendo la forma tipica dell’ombrello e il tronco presenta una forma regolare cilindrica. Il legname è caratterizzato da una struttura piuttosto complessa basata su due tipi di cellule: quelle allungate, disposte lungo la direzione del fusto, e quelle vascolari che trasportano la linfa. Fanno parte di questa classe: acero, betulla, faggio, ebano, castagno, quercia, frassino, ciliegio, tiglio, mogano, noce, palissandro, pioppo, robinia, teak, olmo e salice [8].

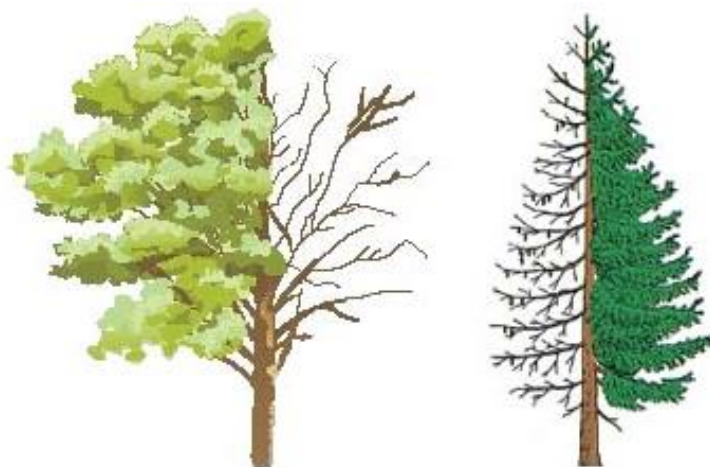


Figura 2.5 - Esempio di una latifolia (sinistra) e di una conifera (destra)

Un'ulteriore classificazione può essere fatta in base alle proprietà, in particolare, in funzione del grado di durezza. Si distinguono:

- **Essenze dolci o tenere:** legni facilmente lavorabili ma sensibili agli urti e ai graffi. Si ottengono generalmente dalle conifere e sono caratterizzati dal colore chiaro e dalla consistenza porosa. Queste essenze crescono più in fretta rispetto ai legni duri, perciò hanno delle venature più regolari.
- **Essenze forti o dure:** sono i legni considerati più “nobili” poiché presentano un'elevata compattezza e resistenza alle sollecitazioni. Si ottengono generalmente dalle latifoglie e sono caratterizzati dal colore scuro e da un'importante massa volumica, data dal fatto che crescendo in zone con maggiore siccità la quantità di pori presenti all'interno del legno è limitata.

ESSENZE UTILIZZATE IN AMBITO STRUTTURALE

Dopo aver categorizzato le principali essenze legnose, risulta utile entrare nel merito delle principali specie arboree utilizzate in ambito strutturale sul suolo italiano; a tale scopo si cita la norma “UNI 11035-2:2010 Legno strutturale – classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica”, dove vengono riportati i valori caratteristici per le differenti tipologie di legno

strutturale e, nello specifico, vengono approfonditi: l'abete, il larice, la douglasia, il castagno, la quercia caducifoglie e il pioppo.

- **Abete:** in Italia è diffuso sull'arco alpino e in alcune zone dell'appennino tosco-emiliano. Si presenta in due varianti, l'abete rosso e l'abete bianco, che non differiscono nelle proprietà e nella resistenza meccanica; le due tipologie si differenziano principalmente per la tonalità violacea che assume l'abete bianco nella zona del fusto prossima al midollo. Gli alberi appartenenti a questa specie possono raggiungere un'altezza di 60 metri con un fusto di diametro pari a 2 metri. Il legno presenta una tessitura media con una fibratura regolare e dritta ed è caratterizzato da un peso medio di 900 kg/m^3 allo stato fresco che si riduce a 450 kg/m^3 nel caso di legno essiccato. Presenta discrete caratteristiche meccaniche avendo una resistenza di 38 MPa a compressione e 71 MPa a flessione. I principali difetti che possono riscontrarsi sono la presenza di tasche di resina, la difformità nello spessore degli anelli di accrescimento che causa cipollature, l'alterazione della fibratura nel caso in cui l'albero sia stato esposto a forti raffiche ventose e la presenza di legno di compressione nel caso di fusti soggetti a carichi da neve. È un legno scadente dal punto di vista della durabilità poiché facilmente attaccabile dagli insetti e dai funghi ma risulta facile da lavorare e non presenta difficoltà nell'essiccazione e nell'incollaggio.
- **Larice:** diffuso nelle alpi dove cresce anche a quote superiori ai 2500 metri s.l.m. Il fusto, avente la forma tipica a cilindro, può arrivare a 40 metri di altezza e a 1 metro di diametro. Il legno presenta una tessitura medio-fine con una fibratura spesso irregolare ed è contraddistinto da un peso di 860 kg/m^3 allo stato fresco e da 650 kg/m^3 allo stato essiccato. Presenta buone caratteristiche meccaniche poiché dotato di una resistenza a compressione

pari a 51 MPa e flessione di 92 MPa. Le anomalie e le deformazioni sono abbastanza frequenti e causano l'imbarcamento e la svergolatura delle tavole. La resina all'interno di questa specie arborea è abbondante e talvolta causa la formazione di tasche di resina intercluse nel legno. È una specie legnosa dotata di durabilità discreta che raramente viene attaccata da insetti ma spesso è soggetta all'attacco dei funghi. La possibile presenza di resina rende complicata la lavorazione ma ciò non influenza l'incollaggio che risulta essere buono.

- **Douglasia:** pianta di importazione americana, oggi diffusa per lo più in Toscana e in Calabria. Gli alberi di questa specie hanno un'altezza media di 50 metri ed alcuni esemplari possono arrivare persino a 100 metri. Il legno presenta una tessitura media-fine con fibratura dritta e regolare. Il loro peso è di 700 kg/m³ allo stato fresco e 550 kg/m³ per il legno essiccato e presenta buone caratteristiche meccaniche avendo una resistenza a compressione di 48 MPa e a flessione di 87 MPa. I difetti principali che possono riscontrarsi sono la deviazione elicoidale della fibratura, la presenza di tasche di resina e la formazione di legno di compressione. La douglasia ha una durabilità buona poiché resiste discretamente all'attacco di insetti e di funghi, ma non solo, è facile da lavorare, da essiccare e l'incollaggio è discreto.
- **Castagno:** pianta pregiata diffusa su tutto il territorio italiano con prevalenza nelle zone collinari e montuose fino ai 1200 metri s.l.m. Il fusto può arrivare a 30 metri di altezza con un diametro di 8 metri, quest'ultimo è dovuto alla grande longevità di quest'albero. La tessitura del legno è da definirsi grossolana e la fibratura è influenzata dall'ambiente. Il peso di quest'essenza è di 1000 kg/m³ allo stato fresco e di 580 kg/m³ allo stato essiccato; presenta una buona resistenza a compressione, pari a 50 MP, e

flessione, uguale a 105 MPa. Essendo una pianta condizionata dall'ambiente circostante, sono numerosi i difetti presenti, in particolare si riscontrano la presenza di cipollature e malformazioni della tessitura. Ha una buona durabilità ed è resistente ai funghi e agli insetti. La lavorazione del legno, così come l'incollaggio, sono agevoli ma l'essiccazione risulta essere piuttosto lenta ed irregolare.

- **Querce caducifoglie:** specie diffusa su tutto il territorio italiano con prevalenza al centro-sud. Il fusto è regolare e dritto con un'altezza di 40 metri e un diametro di 1,5 metri. La tessitura è grossolana con fibratura dritta ma poco regolare. Si può definire un legno robusto in quanto il peso di quest'essenza è di 1080 kg/m³ da fresco e di 780 kg/m³ da essiccato avente un'ottima resistenza meccanica di 60 MPa a compressione e 110 MPa a flessione. Il suo maggior difetto è riscontrabile nei profondi spacchi che si evidenziano all'atto del taglio e durante stagionatura e successive lavorazioni, causati dalle elevate tensioni interne. Il legno di quercia è resistente all'umidità e all'alterazione delle spore fungine, ma la sua difficoltà di impregnazione lo espone all'attacco di coleotteri lictidi. È facilmente lavorabile e incollabile ma necessita di un'essiccazione lenta.
- **Pioppo:** specie diffusa principalmente nella pianura padana. Il fusto di quest'albero ha un'altezza che può toccare i 30 metri con un diametro che può superare i 2,5 metri. Il legno ha una tessitura medio-grossolana con fibratura generalmente dritta ed un peso di 760 kg/m³ allo stato verde e 340 kg/m³ allo stato essiccato ed è caratterizzato da una discreta resistenza meccanica, pari a 31 MPa a compressione e 55 MPa a flessione. I difetti principali che si possono riscontrare sono cretti da gelo, legno di tensione e lesioni alla base dei fusti. Ha una durabilità scadente soprattutto nei confronti degli attacchi fungini e di insetti, quest'ultimi causano

perforazioni importanti che riducono l'area resistente del materiale. In presenza di tasche d'acqua risulta difficile l'essiccazione e la lavorazione. L'incollaggio non presenta problemi.

2.2 CARATTERISTICHE

A livello macroscopico il legno può essere equiparato a un materiale composito costituito da fibre (cellulosa) immerse in una matrice di sostanze polimeriche (lignina). Sono inoltre presenti in quantità limitata altre essenze di diversa natura a struttura micromolecolare. Facendo un'analogia con il calcestruzzo armato, si può dire che la cellulosa svolge la funzione delle armature conferendo rigidità e resistenza alla trazione, mentre la lignina quella del calcestruzzo, fornendo plasticità ed elasticità.

2.2.1 PROPRIETÀ FISICHE

Il legno è un materiale anisotropo, cioè caratterizzato da comportamenti differenti in base alla direzione considerata. In particolare, per un albero possiamo individuare tre direzioni anatomiche:

- **Longitudinale (L)**, corrispondente all'asse del tronco;
- **Radiale (R)**, parallelo ai raggi midollari;
- **Tangenziale (T)**, perpendicolare ai raggi midollari.

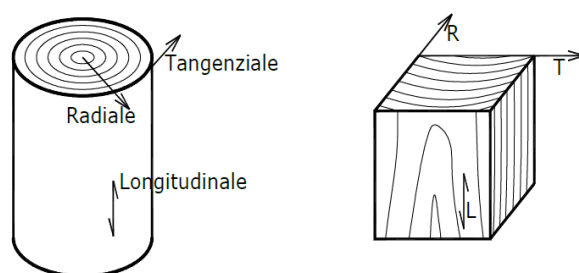


Figura 2.6 - Direzioni anatomiche del legno [9]

Le caratteristiche nelle direzioni anatomiche R e T variano da punto a punto all'interno del tronco; tuttavia, le differenze principali riguardo al comportamento fisico e meccanico sono tra la direzione longitudinale e le altre due. Infatti, nella progettazione vengono considerate: la direzione parallela alle fibre legnose (pedice 0), avente angolo di inclinazione nullo rispetto all'asse del

tronco e quella ortogonale (pedice 90), avente angolo di inclinazione di 90 gradi rispetto all'asse longitudinale.

DENSITÀ ANIDRA E MASSA VOLUMICA

Poiché il legno è un materiale poroso in grado di riempirsi di acqua, è conveniente introdurre due parametri che permettono di distinguerlo in base alla condizione di umidità ed al netto del contenuto di acqua: la massa volumica e la densità anidra.

$$\text{Massa volumica: } \rho_u = \frac{M_u}{V_u} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{Densità anidra: } \rho_0 = \frac{M_0}{V_0} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Dove:

- M_u = massa con umidità del legno u [kg];
- V_u = volume con umidità del legno u [m³];
- M_0 = massa con umidità nulla [kg];
- V_0 = volume con umidità nulla [m³].

La massa volumica è variabile sia tra le varie specie legnose che all'interno di una specie stessa. Ciò è dovuto alle differenti condizioni di crescita ed alle diverse posizioni all'interno del tronco.

Per quanto riguarda invece la densità anidra, è utile far notare che non è influenzata dal comportamento igroscopico e quindi può essere considerata una costante del materiale per le singole specie legnose.

Specie legnosa	Massa volumica ρ_{15}	Densità anidra ρ_0
Abete rosso	330 ÷ 470 ÷ 680	300 ÷ 430 ÷ 640
Abete bianco	350 ÷ 450 ÷ 750	320 ÷ 410 ÷ 710
Pino	330 ÷ 520 ÷ 890	300 ÷ 490 ÷ 860
Larice	440 ÷ 590 ÷ 850	400 ÷ 550 ÷ 820
Douglas	350 ÷ 510 ÷ 730	320 ÷ 470 ÷ 730
Faggio	540 ÷ 720 ÷ 910	490 ÷ 680 ÷ 880
Quercia	430 ÷ 690 ÷ 960	390 ÷ 650 ÷ 930
Frassino	450 ÷ 690 ÷ 860	410 ÷ 650 ÷ 820
Robinia	580 ÷ 770 ÷ 900	540 ÷ 730 ÷ 870
Castagno	630	590

Tabella 2.1 - Densità anidra e massa volumica delle più importanti specie legnose appartenenti alle conifere e alle latifoglie [5]

PROPRIETÀ TERMICHE

A causa della sua elevata porosità, il legno è un cattivo conduttore di calore ma presenta buone caratteristiche termiche avendo una conducibilità termica λ (misurata con contenuto di umidità pari al 20%) oscillante tra lo 0,10 W/mK e lo 0,20 W/mK in funzione della specie legnosa considerata, valori di un ordine di grandezza inferiore a quelli del calcestruzzo caratterizzato da un λ di 1,6 W/mK.

Specie legnosa	λ [W/mK]
Abete	0,122
Pino	0,135
Larice	0,156
Frassino	0,146
Rovere	0,185
Mogano	0,175
Okumè	0,117

Tabella 2.2 - Conducibilità termica delle principali specie legnose

In commercio esistono diversi prodotti isolanti derivanti dal legno, in particolare quelli più conosciuti sono i pannelli in sughero ($\lambda = 0,041 \text{ W/mK}$) e i pannelli in fibra di legno ($\lambda = 0,036 \text{ W/mK}$).

Altro aspetto da considerare è quello relativo alla dilatazione termica, definita come:

$$\alpha_T = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \left[\frac{1}{K} \right]$$

Dove:

- Δl = Variazione di lunghezza [m];
- l_0 = Lunghezza di partenza [m];
- ΔT = Differenza di temperatura [K].

Questa proprietà è poco rilevante rispetto ai fenomeni di ritiro e rigonfiamento poiché ad aumento di temperatura corrisponde una perdita di acqua con conseguente ritiro volumetrico (vedasi paragrafo 2.2.2. Legno e umidità). Le variazioni dimensionali dovute al ritiro sono dieci volte superiori a quelle dovute alle dilatazioni termiche; dunque, quest'ultime, possono essere trascurate nelle costruzioni aventi elementi strutturali in legno.

Di seguito si riportano, a titolo esemplificativo, i valori caratteristici del coefficiente di dilatazione termica, longitudinale e trasversale, delle più comuni essenze legnose.

Essenza	Longitudinale	Trasversale
Abete rosso	5,41	34,1
Pino	3,65	63,6
Rovere	4,92	54,4
Castagno	6,49	32,5

Tabella 2.3 - Coefficienti di dilatazione termica delle più comuni essenze legnose [10]

PROPRIETÀ ACUSTICHE

La velocità di trasmissione del suono attraverso il legno è molto bassa, questa proprietà rende il materiale un buon isolante acustico. La velocità di propagazione dipende dalla direzione considerata; infatti parallelamente alla fibra raggiunge una velocità pari a 4000-6000 m/s, mentre nella direzione perpendicolare la velocità è pari a 400 m/s [11].

PROPRIETÀ ELETTRICHE

Per comprendere il comportamento del legno in relazione all'elettricità, è doveroso introdurre la conducibilità elettrica G definita come:

$$G = \frac{1}{R} [S]$$

Dove:

- R = resistenza elettrica [Ω].

Nel caso del legno, la resistenza elettrica è influenzata da [5]:

- **Umidità:** Il legno allo stato anidro è un buon isolante, ma all'aumentare del contenuto di umidità diminuisce la resistenza elettrica raggiungendo asintoticamente il valore dell'acqua;
- **Temperatura:** con l'aumentare dei gradi, diminuisce notevolmente la resistenza elettrica;
- **Massa volumica, struttura del legno e specie legnosa:** poiché il contenuto delle diverse sostanze contenute negli alberi varia da specie a specie, anche la resistenza elettrica cambia al variare di quest'ultime;
- **Direzione della fibratura:** la resistenza elettrica del legno perpendicolare alla fibratura è doppia rispetto a quella parallela ad essa.

2.2.2 LEGNO E UMIDITÀ

L'elevata porosità rende il legno un materiale igroscopico in grado di assorbire e cedere grossi quantitativi di acqua, tendendo a portarsi in equilibrio con il

contesto circostante in funzione del tasso di umidità ambientale. Per comprenderne il comportamento, è utile introdurre la definizione di umidità del legno μ (espressa in percentuale):

$$\mu = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Dove:

m = massa del legno [kg];

m_0 = massa anidra (dopo essiccazione artificiale a 103° fino a peso costante) [kg].

L'acqua presente all'interno dei lumi cellulari si presenta nelle seguenti forme:

- **Acqua di costituzione:** fa parte della parete cellulare stessa. Essendo a livello microscopico, non ha rilevanza tecnologica in ambito dell'ingegneria edile/civile;
- **Acqua di saturazione:** bagna le pareti cellulari e si riscontra per tassi di umidità del legno compresi tra lo 0% e il 30%;
- **Acqua libera:** contenuta nel lume cellulare e si riscontra per tassi di umidità del legno superiori al 30%.

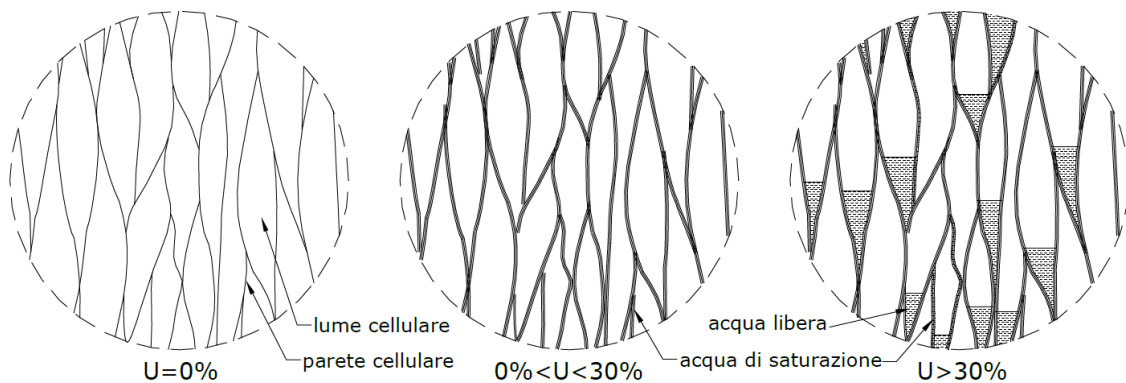


Figura 2.7 - Tipologie di acqua contenute nei lumi cellulari al variare del tasso di umidità [9]

L'igroscopicità influenza il volume del legno che può quindi dilatarsi e restringersi portando rispettivamente a una diminuzione volumetrica (ritiro) e a un aumento volumetrico (rigonfiamento). Questi parametri possono essere espressi come:

$$\text{Ritiro volumetrico: } \beta_v = \frac{V_f - V_0}{V_f} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

$$\text{Rigonfiamento volumetrico: } \alpha_v = \frac{V_f - V_0}{V_0} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

Dove:

- V_f = Volume finale dopo variazione dimensionale [m^3];
- V_0 = Volume iniziale [m^3].

È importante osservare che il fenomeno del ritiro e rigonfiamento avviene solo quando l'umidità oscilla dallo 0% ed il punto di saturazione delle pareti cellulari ($\mu = 30\%$); per valori superiori ad $\mu = 30\%$ il legno non si ritira e non si rigonfia [9].

È doveroso anche porre all'attenzione il fatto che al momento del taglio di un albero, il legno, denominato "legno verde", presenta una percentuale di umidità compresa tra il 60% e il 200%. Tale condizione comporta delle grosse variazioni dimensionali; risulta dunque necessario effettuare, prima di qualsiasi utilizzo, un processo di stagionatura che ha come obiettivo quello di portare il legno ad una umidità prossima al 12%, valore di equilibrio in un ambiente con umidità relativa del 65% e temperatura di 25°C.

L'umidità del legno ne influenza anche le caratteristiche meccaniche, in particolare gli elementi ben stagionati possiedono una resistenza meccanica superiore a quelli che contengono elevate percentuali di acqua.

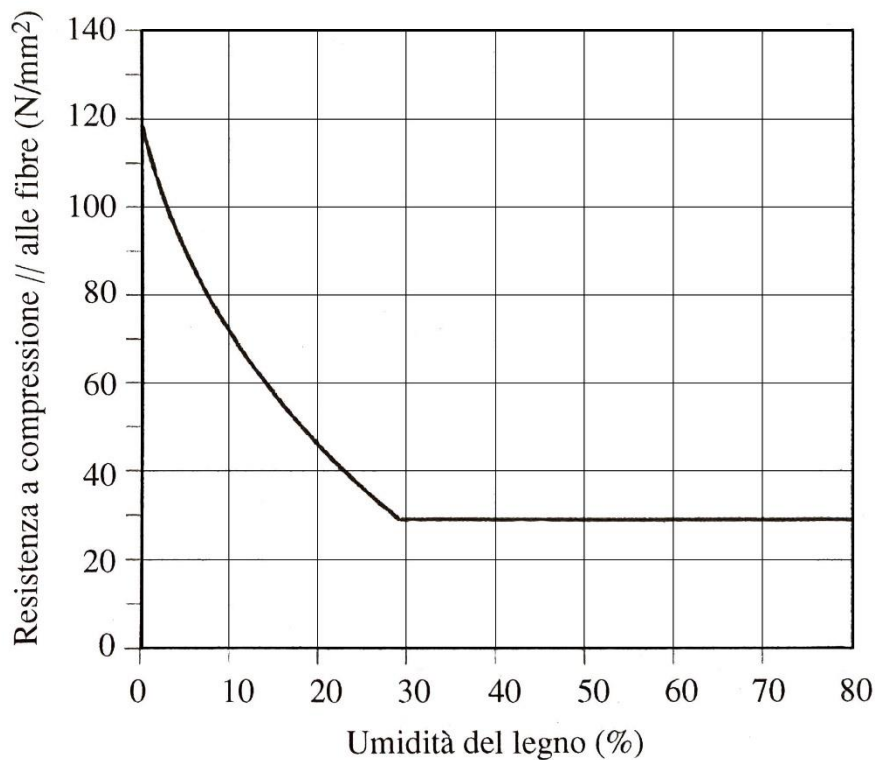


Figura 2.8 - Relazione tra resistenza a compressione parallela alla fibratura e umidità del legno (conifera)
[3]

Limitare la presenza di acqua all'interno del legno è necessario anche per evitare l'attacco biotico di funghi; infatti, se la percentuale di umidità è inferiore al 20% il rischio di attacco è nullo, in caso contrario può verificarsi l'inizio del degrado del materiale.

FESSURE DA RITIRO

Come riportato nel paragrafo 2.2.1 - Proprietà fisiche, anche per fenomeni di ritiro e rigonfiamento il legno presenta comportamento anisotropo. Questa caratteristica incide fortemente sulla formazione di lesioni, in particolare modo per quelle che si formano durante la stagionatura; infatti, poiché il ritiro tangenziale è circa il doppio di quello radiale, si assiste all'apertura di fessure principali che vanno dal midollo fino alla corteccia.

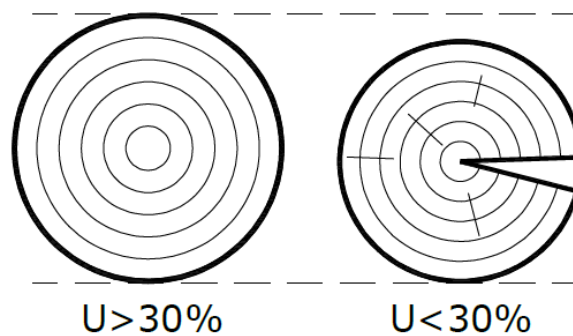


Figura 2.9 - Fessura da ritiro dovuta all'anisotropia [9]

Solamente le sezioni ricavate “fuori cuore”, ovvero quelle ottenute senza includere il centro del tronco, non presentano la formazione delle fessure principali da ritiro ma subiscono comunque delle distorsioni e conseguenti lesioni secondarie di dimensioni inferiori rispetto a quelle principali.



Figura 2.10 - Distorsioni in funzione dei differenti tagli [12]

Le fessure, sia quelle principali che quelle secondarie, incidono meccanicamente sulla resistenza al taglio, ma non influenzando gli altri parametri come, ad esempio, la resistenza alla trazione e alla flessione. Durante la fase di progettazione bisognerà tener conto di tale fenomeno utilizzando un'area resistente opportunamente ridotta.

2.2.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE

Le prestazioni meccaniche del legno sono strettamente connesse all'origine e alle funzioni che svolge in natura. Il fusto di un albero può essere schematizzato come

una mensola a cui è demandato il compito di sostenere carichi verticali, derivanti dal peso dell'apparato fogliare e della neve, e carichi trasversali, originati generalmente dall'azione del vento. Per sostenere tali sollecitazioni, una forma strutturalmente efficiente è quella tubolare in cui il peso proprio, a parità di sezione resistente rispetto ad altre geometrie, è ridotto al minimo. Questa forma è adottata dalle piante, in particolar modo a livello delle cellule, le quali sono dotate di pareti aventi la funzione portante e un lume cellulare vuoto al proprio interno. Ciò garantisce elevati valori di resistenza con bassi pesi propri; infatti, sebbene la massa volumica delle pareti cellulari sia di circa 1400 kg/m^3 , la massa volumica del legno assume sempre valori minori, compresi tra i 150 kg/m^3 della balsa e gli oltre 1000 kg/m^3 di alcune latifoglie.

L'organizzazione cellulare appena descritta è all'origine della marcata anisotropia delle proprietà meccaniche del materiale. Il legno risulta più resistente e più rigido per sollecitazioni orientate lungo la direzione dell'asse delle fibre, e questo risulta comprensibile se si considera che tali sollecitazioni sono quelle che deve sopportare la pianta in piedi, e per le quali è stato "progettato" il materiale. Al contrario, il legno è molto meno efficiente per sollecitazioni ortogonali alla direzione delle fibre, soprattutto per tensioni di trazione [6].

Arrivati a questo punto, risulta fondamentale introdurre la distinzione tra legno netto e strutturale; il primo è privo di elementi fisiologici della pianta come, ed esempio, nodi, fratture, deviazioni della fibratura che sono invece normali negli elementi lignei in dimensione d'uso.

LEGNO NETTO

Le prove di resistenza meccanica vengono generalmente effettuate su provini esenti da difetti, ciò consente di schematizzare il legno come materiale ortotropo rispetto ai piani indicati in Figura 2.11.

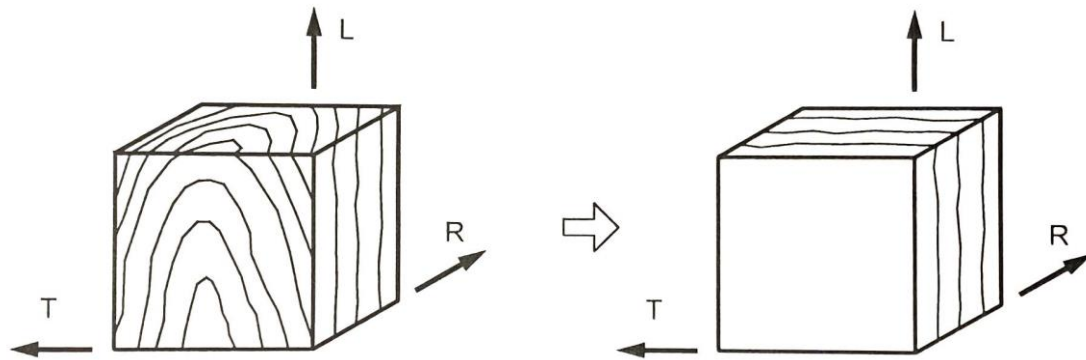


Figura 2.11 - Ipotesi semplificative per il materiale: assi di riferimento L, R e T [6]

Tale ipotesi semplifica la scrittura della matrice di rigidezza poiché un materiale ortotropo può essere descritto con 9 costanti indipendenti al posto delle 21 necessarie per i materiali anisotropi. Di seguito è riportata la legge di Hooke di un materiale ortotropo:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LL}}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R}; \quad \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}; \quad \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}$$

Moduli di Poisson	Conifere	Latifoglie
VLR	0,37	0,37
VL _T	0,42	0,50
VRT	0,47	0,67
VTR	0,35	0,33
VRL	0,041	0,044
VTL	0,033	0,027

Tabella 2.4 - Moduli di Poisson indicativi del legno di latifoglia e di conifera

Nonostante le molte variazioni tra i moduli, i seguenti rapporti possono ritenersi accettabili per la gran parte delle specie legnose [6]:

$$E_L : E_R : E_T \cong 20 : 1,6 : 1$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \cong 10 : 9,4 : 1$$

$$E_L : G_{LR} \cong 14 : 1$$

Osservando attentamente quanto sopra riportato, si può notare come i valori nelle direzioni R e T siano dello stesso ordine di grandezza e molto simili tra loro. Ciò permette di introdurre un'ulteriore ipotesi semplificativa che consente di considerare le due direzioni anatomiche R e T come un'unica direzione "trasversale", ovvero quella caratterizzata dal pedice 90.

Materiale	Modulo E (GPa)			Modulo G (GPa)		
	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
Douglasia	14,50	0,96	0,09	0,83	0,76	0,08
Abete rosso	11,71	0,83	4,94	0,70	0,66	0,07
Larice	14,13	1,05	0,69	0,84	0,78	0,09
Pioppo	10,76	0,76	0,33	0,59	0,42	0,13
Pino	11,52	1,00	0,65	0,81	0,75	0,09
Faggio	13,06	1,31	0,68	1,01	0,75	0,25
Quercia	13,82	1,28	0,66	0,99	0,74	0,25
Betulla	15,25	1,26	0,64	0,97	0,72	0,24
Balsa	3,30	0,27	0,08	0,21	0,14	0,03

Tabella 2.5 - Moduli elastici indicativi di differenti specie legnose

Oltre ad avere un comportamento differente per sollecitazioni applicate in senso longitudinale od ortogonale allo sviluppo delle fibre, il legno reagisce diversamente anche ad azioni di trazione e compressione.

Nel caso di sforzi assiali di **trazione**, il materiale è caratterizzato da una proporzionalità diretta tra le deformazioni e i carichi applicati, con pendenza costante fino al raggiungimento della rottura fragile, traducibile nella già citata legge di Hooke:

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon$$

L'inclinazione dell'angolo di applicazione dei carichi rispetto all'andamento della fibratura causa notevoli differenze sull'entità dei carichi di rottura.

A livello atomico, le catene di cellulosa, unite a formare lunghi fasci di microfibrille, tendono a resistere allo sforzo di **trazione parallela** allungandosi, mentre la lignina assume il compito di ostacolare il processo di trasmissione dell'energia di frattura da una fibra all'altra: si può osservare, quindi, la rottura delle pareti delle cellule oppure la separazione dei tessuti a livello della lamella mediana [11].

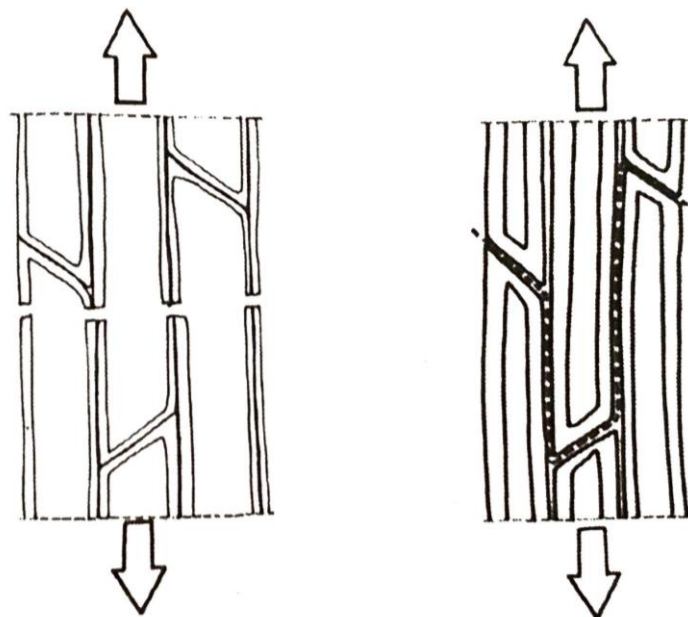


Figura 2.12 - Modalità di rottura del legno, a livello anatomico, per trazione parallela alla fibratura [6]

Per quanto concerne invece alla **trazione ortogonale** alle fibre, il legno presenta un comportamento estremamente fragile a causa delle rotture che si verificano a livello intralaminare o delle pareti.

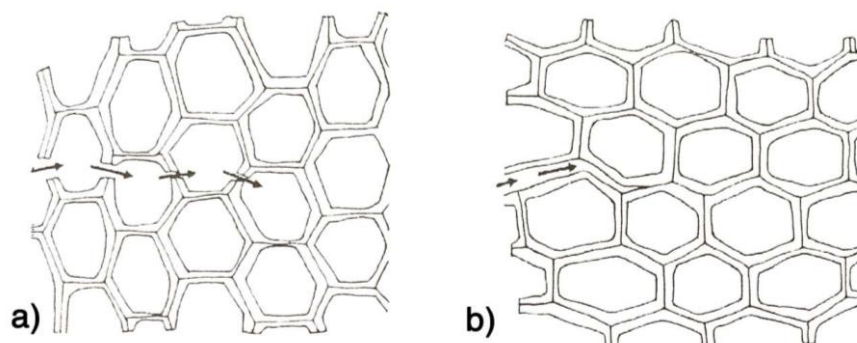


Figura 2.13 - Modalità di rottura a livello anatomico del legno per trazione ortogonale alla fibratura: a) frattura delle pareti cellulari; b) frattura per delaminazione tra fibre adiacenti [6]

Nel caso di sforzi assiali di **compressione parallela** alla fibratura, il legno è caratterizzato da un comportamento duttile, ovvero dopo un primo ramo elastico, il materiale giunge a snervamento. Il materiale snervato non è in grado di sostenere localmente ulteriori incrementi di sforzo che tendono a ridistribuirsi nelle zone circostanti. Ciò implica che la rottura del materiale non sia catastrofica di tipo fragile, ma sia duttile preceduta da deformazione plastica. Questo comportamento è esprimibile analiticamente con plateau lungo e decrescente fino a rottura, momento in cui a livello atomico si assiste al collasso delle fibre che a causa della loro struttura allungata, si instabilizzano ripiegandosi su sé stesse formando dei corrugamenti locali delle pareti cellulari.

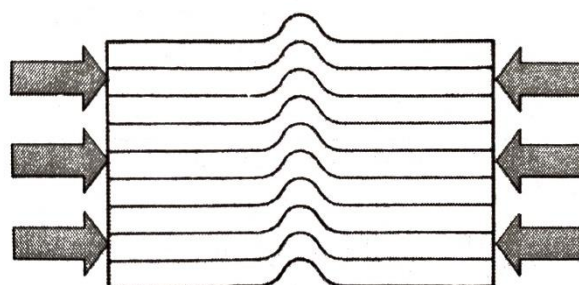


Figura 2.14 - Forma di collasso per compressione parallela alla fibratura associata all'instabilizzazione delle fibre e/o al corrugamento locale delle pareti [6]

Quando il legno è sollecitato con sforzi di **compressione ortogonali** allo sviluppo delle fibre, la forma di collasso che si osserva è per schiacciamento laterale delle cellule legnose; una volta che quest'ultime raggiungono il limite, si instabilizzano lateralmente causando così la chiusura del lume cellulare. Come per la compressione parallela, anche in questo caso il collasso localizzato non comporta la crisi dell'intera sezione.

Detto ciò, il comportamento del legno netto sollecitato nella direzione principale delle fibre può essere schematizzato secondo la legge costitutiva riportata nella Figura 2.15 in cui la resistenza ultima a trazione f_t risulta essere maggiore di quella a compressione f_c .

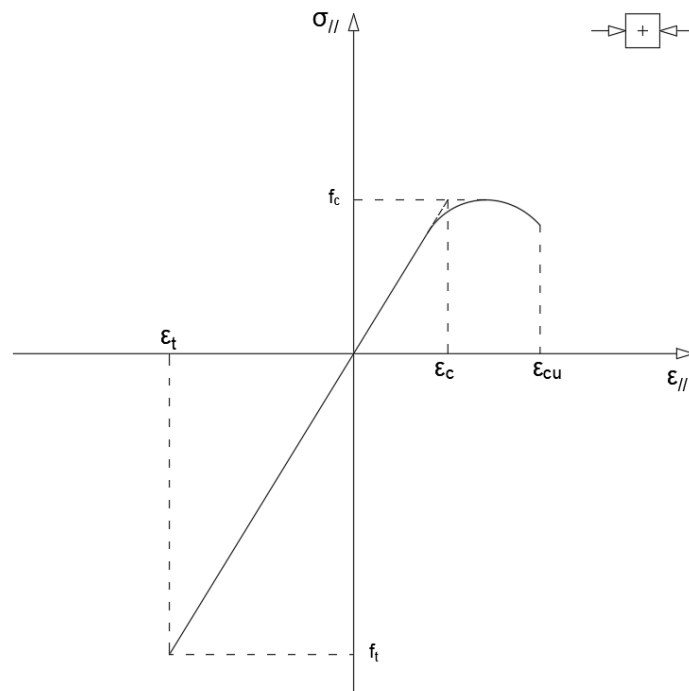


Figura 2.15 - Legge costitutiva del legno netto

Per quanto riguarda invece il **taglio**, le modalità di rottura che si possono osservare sono:

- **Taglio ortogonale:** Le cellule legnose tendono ad essere sollecitate perpendicolarmente al loro asse;

- **Taglio parallelo:** questa modalità di rottura determina lo slittamento fra le fibre parallelamente al loro asse longitudinale;
- **Rolling shear:** Le azioni sollecitanti di taglio sono ortogonali alla direzione della fibratura, ma in un piano parallelo ad esse. Ciò causa la separazione delle fibre per rotazione di una sull'altra.

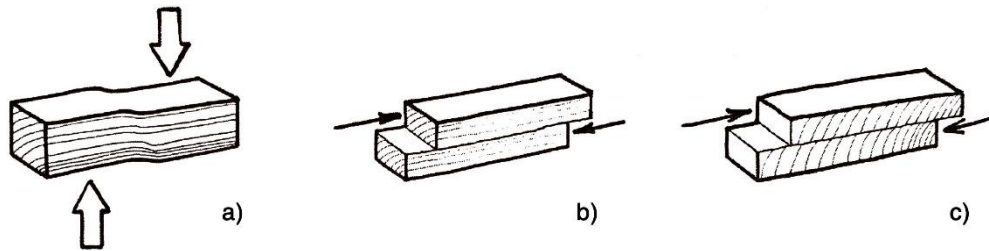


Figura 2.16 – a) Taglio perpendicolare b) taglio parallelo c) rolling shear[6]

Designazione Sec. UNI	Trazione	Compressione		Flessione	Taglio	M. elastico
	$f_{\sigma//}$ [Mpa]	$f_{\sigma//}$ [Mpa]	$f_{\sigma\perp}$ [Mpa]	$f_{t//}$ [Mpa]	$f_{\tau//}$ [Mpa]	$E_{t//}$ [Mpa]
Abete bianco	78,50	37,25	5,40	66,70	4,90	11760
Abete rosso	81,35	38,20	5,40	72,50	5,88	11760
Larice	88	49	7,40	98,10	8,33	11250
Pino silvestre	88	44	6,85	90,02	7,35	11250
Pino silano	80	41	6,85	83,30	7,35	11760
Abete di Douglas	88	46	6,40	77,40	7,35	11760
Pino palustre	88	49	7,85	93,10	8,33	12740
Acero	98	49	7,85	107,80	7,84	9800
Carpino bianco	127	68,60	8,30	132,30	8,82	15680
Castagno	93	49	6,86	98	8,33	9800
Faggio	116,50	67,70	8,30	113,70	8,82	14700
Frassino	137	49,60	8,30	117,60	9,31	12740
Noce	93	63,70	8,30	98	6,86	10780
Olmo	83	56	3,90	83,30	6,86	10290
Ontano nero	83	39,20	5,90	73,50	4,41	8330
Pioppo euroamericano	64	33,30	2,95	58,80	3,43	7840
Pioppo nero	78,50	39,20	3,45	73,50	3,92	8330
Robinia	122,50	68,60	11,80	132,30	10,80	12740
Rovere e Farnia	88	56,80	8,80	107,80	9,80	12740

Tabella 2.6 - Resistenze caratteristiche per le varie essenze (legno netto)

LEGNO STRUTTURALE E LEGGI COSTITUTIVE

I difetti citati nel paragrafo 2.1.2 incidono significativamente sulla resistenza del materiale; in particolare, confrontando i valori della Tabella 2.6 e quelli di Tabella 2.7 (pagina 49), ci si rende subito conto della notevole discrepanza esistente. Una attenta lettura comparativa di queste tabelle permette di osservare come i difetti presenti nel legno strutturale possono dimezzarne la resistenza a compressione, mentre la riduzione della resistenza a trazione è in generale molto più marcata [4]. La presenza di nodi riduce la sezione resistente tesa mentre non diminuisce la resistenza a compressione anzi, nel caso di nodi aderenti e sani, questi possono essere considerati come rinforzi localizzati poiché presentano valori di rigidezza e di resistenza superiori a quelli del legno sollecitato ortogonalmente alle fibre. Non sono solamente i difetti ad incidere sulla resistenza meccanica del legno in dimensioni d'uso; altri parametri che ne influenzano le caratteristiche meccaniche sono:

- **La specie legnosa;**
- **La massa volumica;**
- **L'umidità del legno:** un elevato contenuto d'acqua comporta la saturazione delle fibre con peggioramento delle proprietà meccaniche;
- **La velocità e la durata di applicazione dei carichi:** trattandosi di un materiale viscoso, il legno è caratterizzato da deformazioni differite nel tempo (creep), ovvero un elemento che sollecitato da azioni costanti assume valori di deformazioni che progrediscono nel tempo [13].

Dunque, nel caso di legno strutturale la legge costitutiva assume la forma della curva in rosso riportata nella Figura 2.17 in cui la resistenza ultima a compressione risulta essere uguale alla resistenza ultima a trazione, con l'unica differenza che nel primo caso si ha un comportamento duttile mentre nel secondo caso fragile.

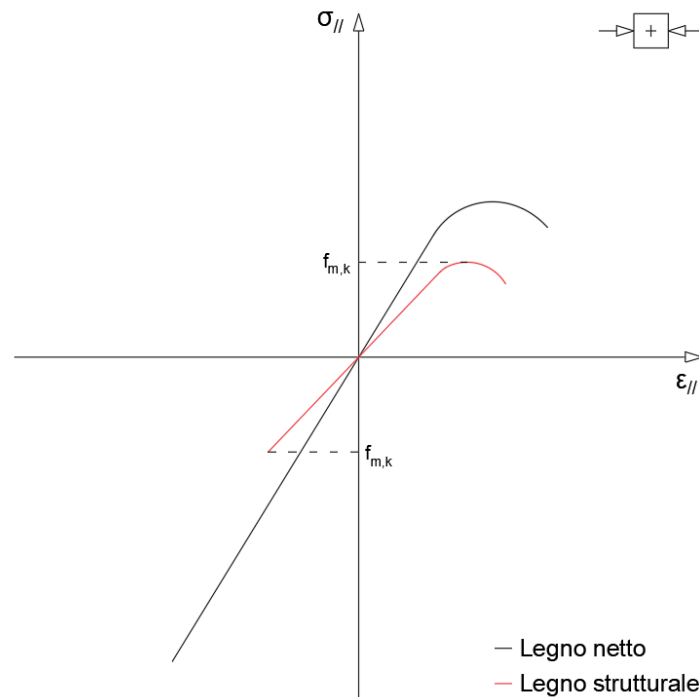


Figura 2.17 - Comparazione della legge costitutiva del legno netto e di quello strutturale

Ad oggi, esistono molteplici modelli matematici che cercano di descrivere il comportamento del legno e differiscono l'un con l'altro in base al grado di approssimazione.

Il comportamento non lineare del legno fu segnalato già nel 1841 da Joseph Colthurst, seguito da Neely che nel 1898 propose un modello bilineare elastoplastico molto semplice, che limita il diagramma a un triangolo-rettangolo. Nonostante l'eccessiva semplificazione, questo modello è tutt'ora ampiamente utilizzato [14].

Le equazioni che descrivono la legge costitutiva secondo Neely sono:

$$\begin{cases} \sigma = E_w \cdot \varepsilon & \text{per } \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_t \\ \sigma = f_c & \text{per } \varepsilon < \varepsilon_c \end{cases}$$

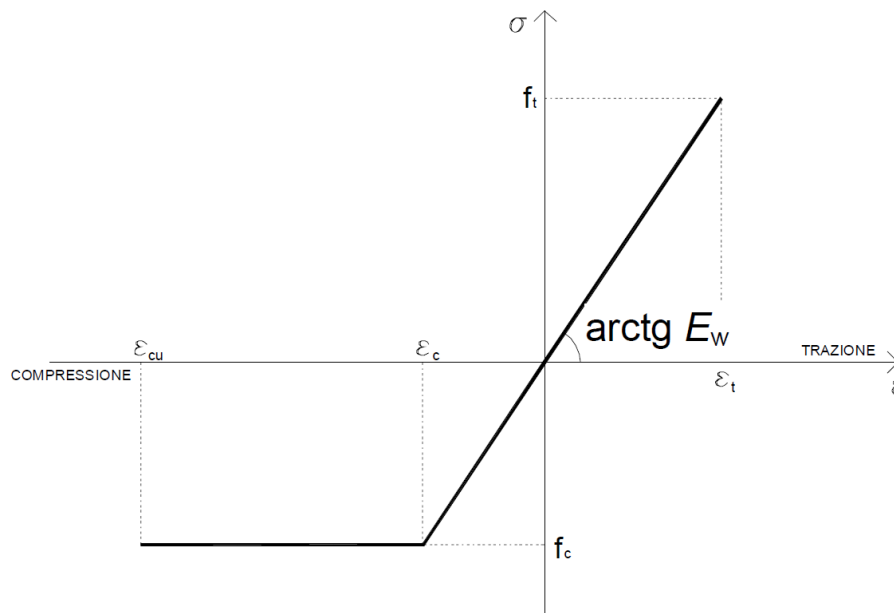


Figura 2.18 - Modello di Neely [13]

Un modello alternativo che tiene in considerazione il comportamento duttile del materiale fu sviluppato da O'Halloran nel 1973. Tra quelli riportati, fornisce la migliore descrizione del comportamento reale del legno a fronte di una relativa maggiore complessità del ramo a compressione, la cui definizione richiede l'assegnazione dei due parametri $A > 0$ e $n > 0$ [15].

Le equazioni che governano tale modello sono:

$$\begin{cases} \sigma = E_w \cdot \epsilon & \text{per } 0 < \epsilon < \epsilon_t \\ \sigma = A \cdot |\epsilon|^n + E_w \cdot \epsilon & \text{per } \epsilon_{cu} < \epsilon < 0 \end{cases}$$

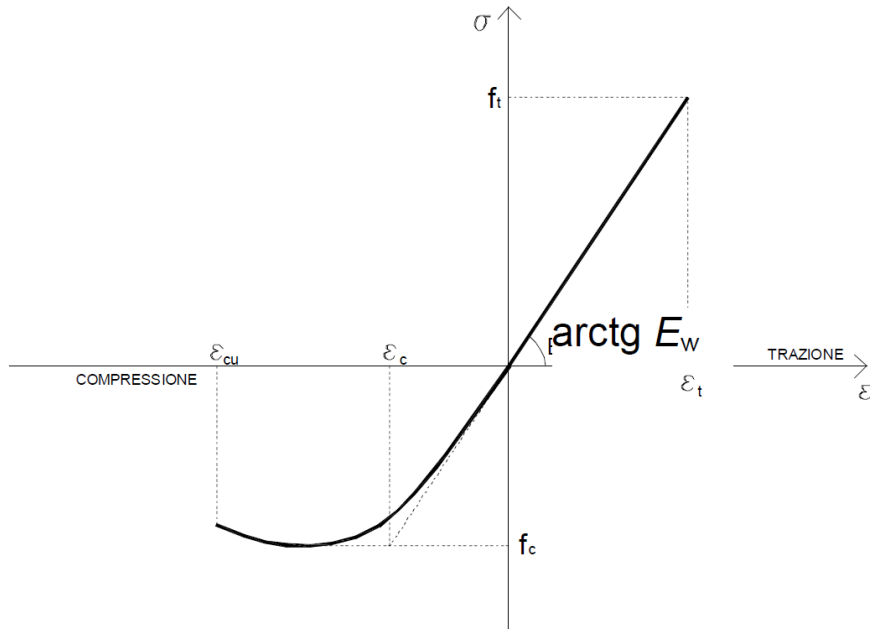


Figura 2.19 - Modello di O'Halloran [13]

Un modello alternativo che semplifica quello precedente, senza tuttavia perdere i vantaggi del considerare il materiale duttile, è quello sviluppato da Bazan nel 1980 che propone un modello bilineare con pendenza del ramo di softening di un certo valore m del modulo elastico E del legno:

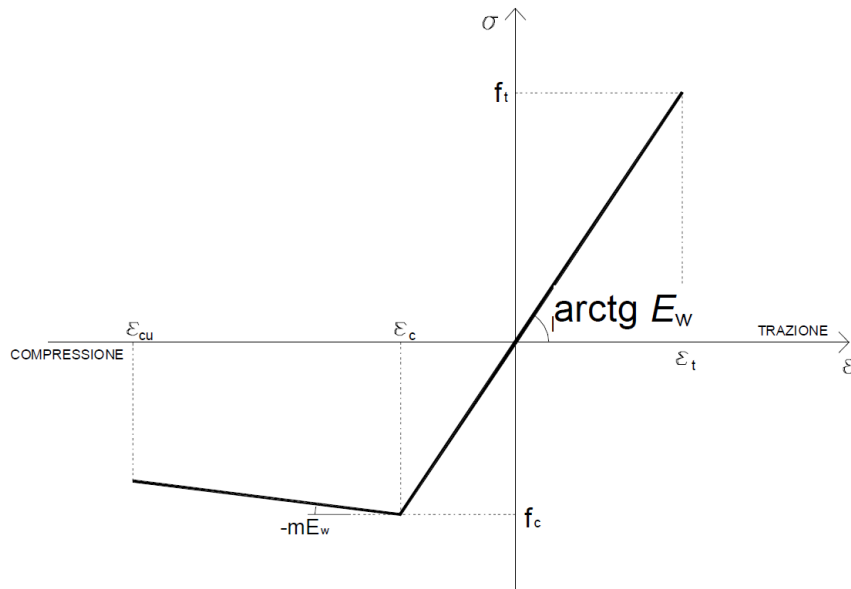


Figura 2.20 - Modello di Bazan [13]

Le equazioni che governano il modello secondo Bazan sono:

$$\begin{cases} \sigma = E_w \cdot \varepsilon & \text{per } \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_t \\ \sigma_c = f_c + m \cdot E_w (\varepsilon - \varepsilon_c) & \text{per } \varepsilon < \varepsilon_c \end{cases}$$

Con il coefficiente m definito come:

$$m = \frac{f_c - f_{cu}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_c}$$

Dove:

- f_c = resistenza a compressione al limite plastico [MPa];
- f_{cu} = resistenza ultima a compressione [MPa];
- ε_c = deformazione di compressione al limite plastico;
- ε_{cu} = deformazione ultima a compressione.

Da esperimenti precedenti, il valore di questo parametro risulta essere compreso tra lo 0,16 e lo 0,23 [16][17].

CLASSIFICAZIONE DEL LEGNAME STRUTTURALE

Nella progettazione strutturale è di fondamentale importanza classificare i materiali in base alla loro resistenza meccanica. Per la classificazione si utilizza un approccio statistico che, grazie generalmente a prove distruttive standardizzate, consente di ricavare il valore medio e lo scarto quadratico medio; ciò permette successivamente di calcolare i valori caratteristici delle diverse proprietà meccaniche. Tale approccio è utilizzato anche per la classificazione del legno netto ma, come si è visto, le prestazioni di un elemento strutturale ligneo sono fortemente condizionate dalla presenza e posizione dei difetti.

Per impiegare razionalmente il legname strutturale è quindi necessario classificare ciascun segato assegnandolo a un gruppo predefinito. Questi gruppi vengono detti categorie o classi di resistenza. Le caratteristiche di resistenza non possono essere determinate direttamente sui singoli segati, per cui occorre eseguire una valutazione indiretta, mediante esame visivo oppure mediante l'utilizzo di appositi metodi non-distruttivi [4].

La classificazione a vista si basa sulla classificazione visiva delle caratteristiche del segato; in particolare si valutano l'ampiezza degli anelli di accrescimento, la massa volumica e la tipologia, posizione, frequenza e dimensione dei difetti. Questo metodo di classificazione richiede personale esperto e qualificato e comporta tendenzialmente la sottostima delle caratteristiche dei segati migliori. Per il legname strutturale italiano le norme UNI 11035:2010 fissano le regole da adottare per effettuare la classificazione a vista. A livello europeo esiste la norma EN 338:2016, che stabilisce anch'essa un sistema di classi di resistenza di utilizzo generale.

Per quanto riguarda invece **la classificazione a macchina**, essa si basa su correlazioni semi-empiriche fra la resistenza di ciascun segato e un suo parametro non-distruttivo, solitamente il modulo elastico, misurato automaticamente tramite un'apposita macchina classificatrice. L'utilizzo di questo tipo di classificazione è più affidabile rispetto a quella a vista ma tale affidabilità è valida solamente per i segati appartenenti a specie su cui è stata svolta un'ampia sperimentazione e per le quali sono quindi conosciute le regolazioni della macchina. La normativa di riferimento è la UNI EN 14051-3:2018 che specifica i requisiti per il controllo di produzione in fabbrica del legno strutturale con sezione rettangolare.

Appare evidente che per interventi di consolidamento, la classificazione a vista risulta essere l'unico metodo adatto ad essere impiegato in cantiere per valutare lo stato di conservazione e quindi anche le caratteristiche meccaniche delle opere lignee presenti, nonché a verificare la quantità di nuovi segati prima della loro posa in opera, se del caso [4].

Proprietà [MPa]	Abete	Pino larici	Larice	Douglasia	Altre conifere	Casta gno	Quercia	Pioppo	Altre lat.
Corrispondenza con le classi di resistenza UNI338	C24 C18	C22 C40	C22 C14 C18	C35 C22		D24			
Categorie resistenti	S2 S3	S1 S2	S3 S2	S1 S2/S3	S1 S2 S3	S	S	S	S
Flessione $f_{m,k}$	25 18	22 40	23 15	22 35	22 26	28	42	26	27
Trazione parallela alla fibratura $f_{t,0,k}$	15 11	24 13	14 9	21 13	16 13	17	25	16	16
Trazione perpendicolare alla fibratura $f_{t,90,k}$	0,4 0,4	0,4 0,4	0,4 0,4	0,4 0,40	0,4 0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressione parallela alla fibratura $f_{c,0,k}$	21 18	20 26	20 17	20 25	22 20	22	27	22	22
Compressione perpendicolare alla fibratura $f_{c,90,k}$	2,6 2,6	3,2 3,0	3,6 3,0	3,2 2,9	3,7 3,7	7,3	11	6,3	7,7
Taglio $f_{v,k}$	4,0 3,4	4,0 3,8	3,8 3,0	4,0 3,8	4,0 3,8	4,0	4,0	2,7	4,0
Modulo di elasticità medio parallelo alla fibratura $E_{0,mean}$	11800 10500	12000 15000	12500 10000	13000 15800	12300 10500	12500	12000	8000	11500
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura $E_{0,05}$	7900 7000	8000 10000	8400 7400	11000 8700	8200 7000	10500	10100	6700	9700
Modulo di elasticità perpendicolare alla fibratura $E_{90,mean}$	390 350	400 500	370 420	530 430	410 350	830	800	530	770
Modulo di taglio $G_{,mean}$	740 660	750 940	690 780	810 990	770 660	780	750	500	720

Tabella 2.7 - Valori caratteristici per i legnami considerati nella classificazione a vista [15]

2.2.4 DURABILITÀ E DEGRADO

Il legno è un materiale biodegradabile ed essendo costituito prevalentemente da sostanze organiche è soggetto sia ad attacchi ambientali (abiotici) sia ad attacchi distruttivi da parte di organismi viventi che lo utilizzano come nutrimento o abitazione (biotici).

La durabilità degli elementi, e in particolar modo delle strutture in legno, è influenzata da molteplici fattori come, ad esempio, le misure progettuali attuate, le condizioni ambientali e le specie legnose impiegate.

Per progettare al meglio la durabilità degli elementi lignei è utile riferirsi alla norma europea EN 335 che introduce cinque classi di rischio che permettono di categorizzare il legno in funzione delle condizioni ambientali con cui dovrà coesistere, ma non solo; ad ogni classe è assegnato il possibile attacco biologico rilevante che potrebbe verificarsi:

- **Classe d'uso 1:** i prodotti in legno sono collocati all'interno della costruzione, non esposti alle condizioni climatiche o a bagnamento;
- **Classe d'uso 2:** gli elementi lignei sono protetti e non esposti alle condizioni climatiche, in particolare alla pioggia, ma possono occasionalmente bagnarsi;
- **Classe d'uso 3:** i prodotti in legno non rimangono bagnati per lunghi periodi e la pioggia non si accumula;
- **Classe d'uso 4:** gli elementi lignei sono a contatto diretto con il terreno e/o acqua dolce;
- **Classe d'uso 5:** i prodotti in legno sono permanentemente o regolarmente sommersi da acqua salata.

Inoltre, la norma consiglia la specie legnosa più adatta da utilizzare in ognuna delle tre categorie di servizio definite dall'Eurocodice 5.

Classe di servizio in accordo con Eurocodice 5	Classi d'uso in accordo con EN 335:2012
Classe di servizio 1	Classe d'uso 1
Classe di servizio 2	Classe d'uso 1, Classe d'uso 2 se i componenti sono in una situazione dove potrebbero essere bagnati occasionalmente
Classe di servizio 3	Classe d'uso 2, Classe d'uso 3 o superiore se usati esternamente

Tabella 2.8 - Classi di servizio e le corrispondenti classi d'uso [18]

ATTACCHI BIOTICI

I funghi, a differenza delle piante verdi, sono organismi vegetali privi di clorofilla e non possono quindi trasformare l'anidride carbonica dell'aria in sostanze adatte per il loro metabolismo; per sopravvivere assumono ed utilizzano la clorofilla già elaborata dagli altri organismi vegetali in grado di produrla. Si diffondono nell'aria attraverso le spore che, depositandosi su elementi lignei con umidità sufficiente, germinano e danno luogo al micelio. Le ife, filamenti che disposti uno sull'altro formano il micelio, si propagano nel legno degradandone i componenti per ottenere le sostanze nutritive. La germinazione delle spore però avviene solamente in determinate condizioni, in particolare l'umidità del legno deve essere compresa tra il 20% e il 70% (il legno immerso in acqua non è soggetto ad attacchi fungini) e la temperatura deve essere maggiore di 5° C, quando quest'ultima supera i 18° C il rischio di attacco aumenta notevolmente. Trascorso un certo lasso di tempo dal primo deposito delle spore, dal micelio si sviluppa un elemento riproduttivo, il carpoforo, su cui si sviluppano le spore che vengono poi rilasciate nell'atmosfera, provvedendo così alla propagazione.

Esistono due tipologie di funghi: i cromogeni e quelli da carie. **I funghi cromogeni** si insediano nel legno molto umido e ne impartiscono una colorazione blu nerastra. Penetrano in profondità dove si nutrono di sostanze facilmente assimilabili che si trovano nell'alburno senza attaccare la parete cellulare del legno; ciò consente al legno di mantenere le proprie caratteristiche meccaniche.

I funghi da carie invece demoliscono i costituenti principali della parete cellulare del legno provocando modificazioni del colore e delle proprietà chimiche, fisiche e meccaniche. L'attacco di questa specie fungina può portare ad una perdita di massa del legno fino all'80%, riducendo così la sezione resistente e la relativa resistenza meccanica.

Per quanto riguarda invece **gli insetti**, alcuni di essi utilizzano il legno come elemento nutritivo, denominati lignivori, altri come abitazione o per ricovero delle uova, chiamati lignicoli, ma entrambe le specie causano importanti danni agli elementi lignei provocandone anche, nei casi estremi, il collasso.

Appartengono alla categoria degli **insetti lignivori** le termiti, diffuse in Italia nel Centro-Sud, che si distinguono in due categorie principali: le termiti sotterranee e quelle del legno secco. Ambedue le specie producono danni gravissimi non individuabili dall'esterno, che rimangono nascosti fino al momento del collasso. Fanno parte della classe degli **insetti lignicoli** i coleotteri, animali che durante il loro ciclo vitale subiscono una metamorfosi completa, cioè dall'uovo fuoriesce la larva che vive e si accresce, anche per diversi anni, all'interno del legno trasformandosi poi in insetto completo. Completata la trasformazione, l'insetto fuoriesce dal legno attraverso un foro di sfarfallamento; i fori individuabili dall'esterno sono dunque di uscita e non di entrata e pertanto la loro quantità non fornisce indicazioni sull'età dell'attacco in corso. I coleotteri generalmente attaccano l'alburno essendo questo ricco di sostanze estrattive a loro gradite

come gli amidi e gli zuccheri. Trascorso però un lasso di tempo dell'ordine degli 80-100 anni, le sostanze estrattive tendono a trasformarsi rendendo il materiale non più gradito agli insetti. Pertanto, le strutture antiche non presentano attacchi di insetti in corso ma l'eventuale presenza di fori indica un attacco pregresso.

Alcune specie di insetti lignicoli, come ad esempio le vespe del legno, non attaccano elementi in opera ma bensì le piante in natura. Può però capitare che lo sviluppo della larva si completi solamente dopo l'abbattimento del fusto e l'insetto perfetto fuoriesca una volta collocato in opera l'elemento.

Gli insetti in generale si adattano alle differenti condizioni ambientali e di umidità del legno ma la presenza di adesivi strutturali e impregnanti tende a scoraggiarne l'attacco.

Da citare infine l'esistenza di una sinergia tra l'attacco di funghi e quello degli insetti: può accadere che l'insetto scelga il legno già attaccato da funghi oppure che i fori di sfarfallamento e le gallerie praticate dagli insetti possano costituire vie d'accesso privilegiate per la deposizione delle spore dei funghi.

Classe d'uso	Funghi Cromogeni	Funghi da Carie	Coleotteri	Termiti	Teredine
1	-	-	U ²	L ³	-
2	U	U	U	L	-
3	U	U	U	L	-
4	U	U	U	L	-
5	U	U	U	L	U

Tabella 2.9 - Classi d'uso e relativo attacco biologico per i prodotti in legno [18]

² U = diffusi sull'intero territorio europeo

³ L = diffusi in zone localizzate del territorio europeo

ATTACCHI ABIOTICI

Gli attacchi abiotici possono essere dovuti ad agenti atmosferici, ad agenti chimici e al fuoco, quest'ultimo trattato nel paragrafo 2.2.5 - Comportamento al fuoco.

L'esposizione agli agenti atmosferici non compromette di per sé in maniera grave le funzioni strutturali dei manufatti lignei se adeguatamente progettati, in genere si assiste, per l'appunto, solamente ad un leggero degrado superficiale con una variazione di colorazione verso il giallastro o il bluastro. Però l'esposizione prolungata alla radiazione solare, combinata con l'elevata umidità e alle condizioni climatiche avverse, può dar luogo ad un complesso di fenomeni di invecchiamento per fotolisi; in particolare, le onde ad alte frequenze (raggi UV) sono in grado di demolire la struttura sia della lignina che quella della cellulosa. Un aspetto da tenere in particolare attenzione è la variazione ciclica di temperatura e umidità dell'aria che causano, nelle zone superficiali degli elementi in legno, valori di umidità variabili nel tempo. Questo comporta la disomogeneità nella distribuzione dell'umidità con conseguenti dilatazioni differenziali dovute a fenomeni di ritiro e rigonfiamento che causano fessure più o meno profonde. La presenza di lesioni favorisce la penetrazione dell'acqua rendendo così il legno impregnato. Tale condizione è, come precedentemente visto, il terreno ideale per la proliferazione di funghi e muffe.

Per concludere, va fatta una menzione all'attacco delle superfici lignee da parte di agenti chimici. Poiché il legno è formato da cellule costituite da una soluzione debolmente acida, ne consegue un'elevata resistenza al contatto con le sostanze chimiche; va prestata attenzione, invece, quando è a stretto contatto con agenti alcalini oppure quando l'ambiente stesso risulta alcalino. In questi casi, può avvenire la demolizione della lignina delle emicellulose. Particolare attenzione deve quindi essere posta quando il legno entra in contatto con il calcestruzzo armato e in generale con tutti i prodotti cementizi.

2.2.5 COMPORTAMENTO AL FUOCO

Il legno è un materiale combustibile poiché è composto per quasi il 50% da carbonio ma le strutture lignee, contrariamente a quanto di pensi, possiedono un comportamento uguale, se non addirittura migliore, rispetto a quelle tradizionali realizzate con altri materiali. A determinare l'ottimo comportamento del legno di fronte all'attacco del fuoco concorrono due fattori: la stabilità dimensionale con la relativa invariabilità delle caratteristiche meccaniche durante la prima fase dell'incendio e la formazione di uno strato protettivo di legno carbonizzato attorno al cuore della sezione durante le successive fasi.

A differenza però dei materiali da costruzione tradizionali come il calcestruzzo, l'acciaio e i materiali lapidei, il legno partecipa attivamente alla propagazione dell'incendio (a patto che la sua umidità sia inferiore al 65%). Il grado di partecipazione all'incendio è dato dal potenziale energetico del materiale, ovvero la quantità di calore che si può sviluppare dalla sua combustione, parametro strettamente legato al potere calorifico. Per il legno derivante dalle latifoglie, il potere calorifico è compreso tra i 4062 kcal/kg del carpino bianco e i 4805 kcal/kg della betulla, mentre per quello ottenuto dalle conifere, esso è compreso tra i 4290 kcal/kg dell'abete rosso e i 5066 kcal/kg del pino silvestre. Tali valori tengono in considerazione solamente il legno netto, ma il potenziale energetico reale dipende anche dal contenuto di acqua e di altre sostanze incombustibili. Ciò rende difficile assegnare valori precisi ad ogni specie legnosa, ma una buona semplificazione è quella di considerare dei valori medi pari a 3500 kcal/kg per le latifoglie e 3790 kcal/kg per le conifere.

FASI DEL DEGRADO TERMICO

Nelle prime fasi dell'incendio il materiale assorbe calore per convezione e irraggiamento e in quelle successive brucia e si trasforma in carico d'incendio, nello specifico:

- **T_{ambiente} → 100 °C.** Con l'aumentare della temperatura si ha una progressiva perdita di acqua contenuta all'interno del legno. La diminuzione del tasso di umidità comporta un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del materiale che compensano gli effetti negativi dati dal degrado termico. I processi avvenuti in questa fase sono di tipo reversibile;
- **100 °C < T < 120 °C.** Inizio del degrado dovuto alla plastificazione della lignina;
- **120 °C < T < 170 °C.** Si assiste al fenomeno della pirolisi a cui è associata la progressiva decomposizione chimica del materiale in una frazione gassosa ed un residuo solido più o meno carbonizzato;
- **170 °C < T < 300 °C.** Inizia la combustione dei prodotti della pirolisi con successiva produzione di vapore acqueo, di anidride carbonica e di modesti quantitativi di altri gas, tra cui l'ossido di carbonio che è infiammabile;
- **T > 300 °C.** Le reazioni chimiche, che fino a questo momento erano state di tipo endotermico, diventano esotermiche con notevole produzione di calore e gas altamente infiammabili.

Il processo di combustione del legno procede lentamente dalla superficie esposta al fuoco verso l'interno della sezione con velocità determinata e finita. La massa degradata dal fuoco, ovvero il carbone, forma una pellicola protettiva che rallenta il processo di combustione degli strati più interni. La velocità di carbonizzazione dipende da molteplici fattori, fra cui il tipo di essenza legnosa, l'umidità del materiale, le dimensioni della sezione e i trattamenti ricevuti, ma non solo; giocano un ruolo fondamentale anche alcuni aspetti ambientali come la temperatura raggiunta dall'incendio e la ventilazione presente.

In un elemento ligneo sottoposto a combustione si possono dunque individuare tra zone distinte (Figura 2.21): una zona esterna carbonizzata, una zona intermedia in cui avvengono le reazioni di dissociazione delle macromolecole e una zona interna inalterata nella quale non si è ancora raggiunta la temperatura di degradazione termica. Questa porzione di legno non ancora carbonizzato rimane efficiente dal punto di vista meccanico anche se la temperatura aumenta, mentre la rottura meccanica dell'elemento avviene solo quando una parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente ridotta da non riuscire più ad assolvere alla sua funzione portante [19].

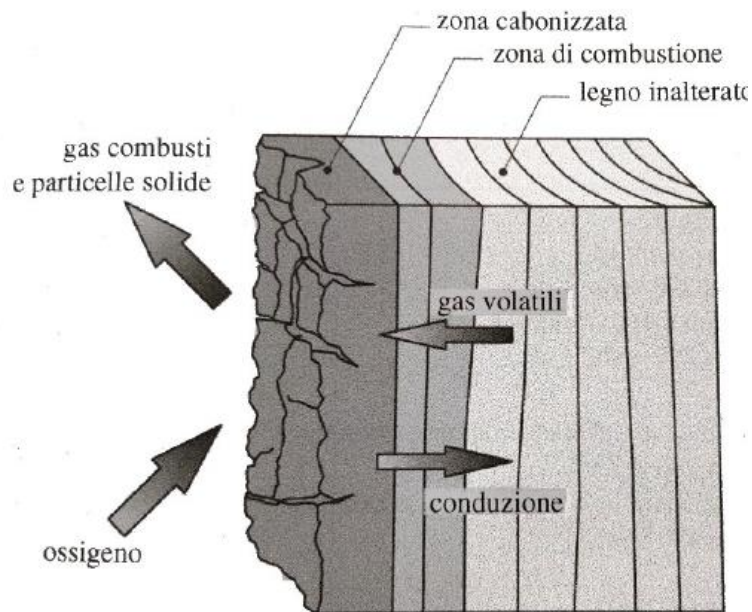


Figura 2.21 - Presentazione schematica delle trasformazioni subite dal legno durante un incendio [4]

Pertanto, la perdita dell'efficienza di una struttura in legno avviene per riduzione della sezione e non per decadimento delle caratteristiche meccaniche. È fondamentale quindi calcolare il tempo che può resistere un elemento soggetto all'azione del fuoco; in quest'ottica aiuta il Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 3 agosto 2015). Questa norma introduce il concetto di resistenza al fuoco di un generico componente: per quanto concerne un elemento strutturale lineare, come per esempio le travi e i pilastri, esso viene classificato per mezzo del parametro

R (stabilità) che valuta l'attitudine di un elemento a conservare la resistenza meccanica nonostante la presenza del fuoco e del calore. La stabilità R è misurata in minuti primi e corrisponde al tempo che trascorre dall'inizio dell'incendio sino al crollo della struttura.

In accordo con il Codice, esistono tre differenti tipologie di approccio per la valutazione della resistenza al fuoco di un elemento strutturale in legno: attraverso prove sperimentali, confronti tabellari e calcoli analitici. Approfondendo gli ultimi, sono previsti due metodi di calcolo:

- **Metodo della sezione efficace:** dalla geometria viene detratta la parte carbonizzata e la parte di transitorio termico. Si considera solo la parte efficace della sezione che conserva inalterate le caratteristiche meccaniche.
- **Metodo della sezione ridotta:** viene detratta solamente la parte carbonizzata della sezione, ma le caratteristiche meccaniche del materiale vengono ridotte tramite opportuni coefficienti.

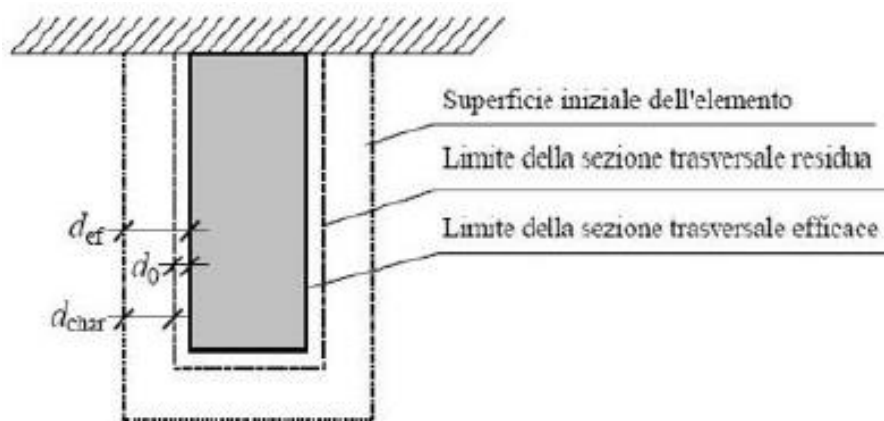


Figura 2.22 - Schematizzazione dei metodi di valutazione della resistenza al fuoco di una sezione lignea [11]

Per quanto concerne il **metodo della sezione efficace**, la sezione residua viene calcolata riducendo la geometria iniziale, per fare ciò si utilizza la distanza d_{eff} da applicare ad ogni lato esposto al fuoco:

$$d_{eff} = d_{char} + d_0 = \beta_n \cdot t_{fi,req} + k_0 \cdot d_0$$

Dove:

- d_{eff} = profondità della sezione trasversale efficace [mm];
- d_{char} = profondità della parte carbonizzata [mm];
- β_n = velocità di carbonizzazione del legno [mm/minuti];
- $t_{\text{fi,req}}$ = tempo di resistenza richiesto [minuti];
- k_0 = coefficiente dipendente dal tempo di esposizione al fuoco t , compreso tra 0 ($t_0 = 0$ minuti) e 1 ($t = 20$ minuti) e assunto costante e pari a $t > 20$ minuti;
- d_0 = strato iniziale di carbonizzazione pari a 7 mm;

Per le resistenze e i moduli di elasticità di progetto della sezione efficace, nonché per la resistenza dei collegamenti valgono le seguenti equazioni [6]:

$$f_{d,fi} = k_{\text{mod},fi} \frac{f_k k_{fi}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$S_{d,fi} = k_{\text{mod},fi} \frac{S_{05} k_{fi}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$R_{d,fi} = \eta \frac{R_k k_{fi}}{\gamma_{M,fi}}$$

Dove:

- f_k = valore caratteristico (frattile 5%) di una resistenza a temperatura normale;
- S_k = valore caratteristico (frattile 5%) di un modulo di elasticità (E o G) a temperatura normale;
- R_k = valore caratteristico (frattile 5%) della resistenza di un collegamento a temperatura normale;
- k_{fi} = coefficiente che consente di passare dai valori caratteristici a temperature ambiente (frattile 5%) a quelli corrispondenti al frattile 20%. Questo vale 1,25 per legno massiccio e 1,15 per legno lamellare.
- $\gamma_{M,fi}$ = coefficiente parziale di sicurezza di incendio pari a 1;

- $k_{\text{mod},fi}$ = fattore di moltiplicazione delle proprietà meccaniche con valore unitario, che sostituisce il parametro k_{mod} a temperatura ambiente;
- η = fattore di riduzione della portata in funzione del tempo di esposizione al fuoco t .

Per quanto riguarda invece il **metodo della sezione residua**, la sezione trasversale residua dell'elemento tiene conto della sola profondità di carbonizzazione d_{char} . Le resistenze e i moduli elastici di progetto della sezione si adottano i medesimi riportati nel metodo della sezione efficace con differenti valori dei coefficienti:

Resistenza a trazione e modulo elastico:
$$k_{\text{mod},fi} = 1,0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r}$$

Resistenza a flessione:
$$k_{\text{mod},fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \cdot \frac{p}{A_r}$$

Resistenza a compressione:
$$k_{\text{mod},fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{p}{A_r}$$

Dove p è il perimetro della sezione [mm] e A_r è l'area di tale sezione residua [mm²]. Da notare è il fatto che il coefficiente $k_{\text{mod},fi}$ è dipendente dal tempo di esposizione al fuoco a causa della variabilità del rapporto p/A_r .

Capitolo 3

MATERIALI COMPOSITI E FRP

Si definisce materiale composito un sistema eterogeneo costituito da due o più fasi, le cui proprietà e prestazioni sono progettate in modo tale da essere superiori a quelle dei materiali costituenti che agiscono indipendentemente. La definizione appena data non fornisce limitazioni sulla natura dei compositi; risulta quindi evidente che è possibile ricollegare a questa classe anche il calcestruzzo (costituito da cemento e inerti), il legno (formato da cellulosa e lignina), anche una parete in muratura (costituita da mattoni e malta) o una trave in calcestruzzo armato (composta da calcestruzzo e barre in acciaio). Questi sono solo alcuni esempi di materiali compositi, ma in generale si può affermare che una dei due componenti del sistema è discontinuo, più rigido, più resistente ed è chiamato rinforzo, mentre l'altro è meno rigido, più debole, continuo ed è denominato matrice.



Figura 3.1 - Esempi di materiali compositi: calcestruzzo, legno, parete in muratura e trave in calcestruzzo armato

I singoli componenti sono sempre chiaramente distinguibili all'interno della struttura del materiale alla scala da 1 a 100 μm , differenziando così i compositi dalle miscele di diverse sostanze chimiche, dalle soluzioni solide (leghe metalliche o polimeriche) o dai materiali omogenei [19].

I compositi rinforzati più utilizzati nel campo delle applicazioni strutturali sono quelli aventi una matrice polimerica rinforzata con fibre ingegnerizzate sintetiche

(come vetro, carbonio o arammide), che vengono denominati usualmente come FRP (Fiber Reinforced Polymers). Gli FRP sono utilizzati in quasi ogni tipo di ingegneria strutturale avanzata ed il loro campo di applicazione spazia dal settore aerospaziale a quello nautico, passando da quello automobilistico. L'utilizzo di questa classe di compositi continua ad aumentare ed è in espansione verso settori del tutto nuovi come quello dell'ingegneria edile-civile. Ad oggi sono tra i materiali più utilizzati negli interventi di miglioramento strutturale degli edifici esistenti. Per esempio, gli interventi eseguiti nella provincia dell'Aquila in seguito al violento sisma del 2009 hanno previsto l'utilizzo di FRP nel 58% dei casi [20].

Le fibre sono per lo più ricavate da materiali ad elevata resistenza e forniscono le caratteristiche meccaniche del composito mentre la matrice risulta necessaria per tramettere le azioni tra le fibre stesse e dare la forma all'oggetto. Per ottenere un composito ad elevata resistenza meccanica è necessario garantire una buona adesione tra la matrice e il rinforzo che può essere promossa mediante l'impiego di un terzo componente denominato appretto. Quest'ultimo viene applicato sulla superficie delle fibre per renderla compatibile con quella della matrice. Questo trattamento crea una zona intermedia, chiamata interfase, fondamentale per la corretta trasmissione degli sforzi tra i differenti componenti.

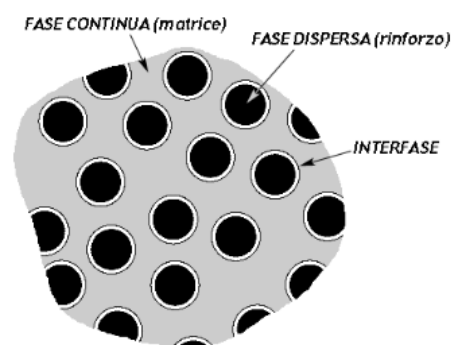


Figura 3.2 – Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito [20]

Un'altra categoria di materiali compositi è quella degli FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) che sono caratterizzati da una matrice inorganica, a base di

cemento o di calce, e da fibre continue. Vengono utilizzati anch'essi in interventi di consolidamento, in particolare nelle strutture murarie poiché sono affini alla malta cementizia del supporto. I vantaggi derivanti dall'utilizzo degli FRCM rispetto agli FRP sono: la traspirabilità, la possibilità di applicazione sulle superfici umide, l'esposizione a temperature relativamente elevate, la facilità di applicazione e la resistenza ai raggi solari. Di contro, questi compositi hanno resistenze meccaniche inferiori.

Poiché lo scopo di questo elaborato è quello di approfondire interventi di consolidamento di strutture lignee, di seguito vengono presi in considerazione solamente gli FRP, lasciando al lettore la decisione di esaminare autonomamente gli FRCM.

3.1 CARATTERISTICHE FRP

Il vantaggio più importante nell'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati rispetto ad altri materiali è il basso peso proprio dei prodotti finali dovuto alla loro bassa densità. Oltre a questo, è significativo il fatto che essi possiedono una resistenza specifica (resistenza/densità) e un modulo specifico (modulo elastico/densità) che possono arrivare ad essere rispettivamente il quadruplo e il doppio rispetto ai materiali tradizionali. Ciò significa che, a parità di rigidità, una struttura in materiale FRP può arrivare a pesare circa la metà di una realizzata con materiale da costruzione tradizionale.

Rispetto ad altri materiali compositi, dove le caratteristiche meccaniche del prodotto finale sono intermedie tra quelle del legante e quelle del rinforzo, negli FRP i valori di rigidità e resistenza delle fibre sono notevolmente superiori a quelli della matrice (di quasi due ordini di grandezza). Pertanto, risulta evidente che il contributo del legante ai fini delle caratteristiche meccaniche del composito è sostanzialmente irrilevante [11].

Le caratteristiche meccaniche possono essere ricavate mediante le seguenti formule:

$$E_{FRP} = V_{FIBRA} \cdot E_{FIBRA} + (1 - V_{FIBRA}) \cdot E_{MATRICE}$$

$$f_{FRP} \cong V_{FIBRA} \cdot f_{FIBRA} + (1 - V_{FIBRA}) \cdot f_{MATRICE}$$

Dove:

- E = modulo elastico [GPa];
- V_{FIBRA} = frazione in volume delle fibre rispetto al volume totale del composito [1];
- f = tensione di rottura [MPa].

Il comportamento degli FRP è influenzato, oltre dalle caratteristiche proprie delle differenti fasi, da diversi fattori, primo fra tutti la geometria del prodotto finale.

Si possono distinguere compositi monostrato, chiamati lamine, che sono in generale dei materiali anisotropi molto resistenti nella direzione principale della disposizione delle fibre, oppure multistrato, chiamati laminati, che sono invece materiali costituiti da strati sovrapposti tra loro. Il principale vantaggio di quest'ultimi è rappresentato dalla massima libertà nella disposizione delle fibre in base alla necessità. Esiste anche una particolare classe di compositi multistrato, detti laminati ibridi, in cui le singole lamine sono formate da fibre di natura differente o da materiali diversi.

Un altro elemento che incide sul comportamento degli FRP è la disposizione delle fibre. I materiali appartenenti a questa classe sono generalmente anisotropi e reagiscono in maniera differente in base all'angolo di inclinazione delle sollecitazioni. Il comportamento migliore si ottiene quando si applica una forza secondo la direzione parallela allo sviluppo delle fibre mentre quello peggiore si verifica nel caso opposto, ovvero per sollecitazioni ortogonali.

Un ulteriore fattore che determina il comportamento di un composito fibrorinforzato è la concentrazione delle fibre, questa è definibile come:

$$\chi_f = \frac{V_f}{V_f + V_m} \leq 1$$

Dove:

- χ_f = frazione in volume delle fibre rispetto al volume totale [1];
- V_f = volume delle fibre [m³];
- V_m = volume della matrice [m³].

Nel calcolo della concentrazione di solito viene trascurata la quantità di interfase in quanto il suo volume è trascurabile rispetto ai volumi delle due fasi.

Materiali con elevata percentuale χ_f possiedono un'ottima resistenza meccanica ma di contro sono estremamente fragili. È evidente che la concentrazione di fibre deve essere studiata caso per caso in funzione della tipologia di applicazione e dei materiali costituenti le differenti fasi.

	Modulo di elasticità normale E	Resistenza a trazione σ_T	Deformazio ne a rottura ϵ_T	Coefficiente dilatazione termica α	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	[%]	[$10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]	[g/cm ³]
Fibre di vetro E	70 - 80	2000 - 3500	3,5 - 4,5	5,0 - 5,4	2,5 - 2,6
Fibre di vetro S	85 - 90	3500 - 4800	4,5 - 5,5	1,6 - 2,9	2,46 - 2,49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 - 760	2400 - 3400	0,5 - 0,8	-1,45	1,85 - 1,9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 - 280	4100 - 5100	1,6 - 1,73	-0,6 - -0,9	1,75
Fibre arammidiche	62 - 180	3600 - 3800	1,90 - 5,5	-2	1,44 - 1,47
Matrice polimerica	2,7 - 3,6	40 - 82	1,4 - 5,2	30 - 54	1,10 - 1,25
Acciaio da costruzione	206	350 - 600	20 - 30	10,4	7,8

Tabella 3.1 - Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione (valori indicativi) [15]

3.2 FIBRE

Come accennato in precedenza, le fibre sono la componente che conferisce rigidità e resistenza agli FRP. Sono costituite da uno o più filamenti riuniti in modo ordinato. Per filamento si intende un elemento di forma allungata che rispetti il rapporto di 10:1 tra la minima lunghezza e la massima dimensione trasversale e che abbia una dimensione massima trasversale inferiore a un millimetro. Ma perché il rinforzo degli FRP è caratterizzato da elementi di forma allungata? La risposta è che le ridotte dimensioni trasversali riducono l'entità dei difetti presenti, aumentando così la resistenza rispetto a quella del corrispondente materiale in massa⁴.

Le fibre sono dunque costituite da filamenti continui molto sottili difficili da manipolare singolarmente. Per tale motivo esse sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono (Figura 3.3):

- **Filamento** (monofilament): elemento base avente diametro di circa 10 μm di diametro;
- **Cavo di filatura** (tow): è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- **Filo o filato** (spun yarn): filo formato da fibre ritorte;
- **Filo assemblato** (roving): fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

⁴ Il limite teorico massimo di resistenza in assenza di difetti può essere calcolato in prima approssimazione in base alla forza dei legami interatomici derivanti dalla curva del potenziale di Lennard-Jones ed è pari a circa $E/10$ [21].

Combinando insieme alcune centinaia di tows o yarns si ottiene la lamina, in cui i tows o gli yarns possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto [4].

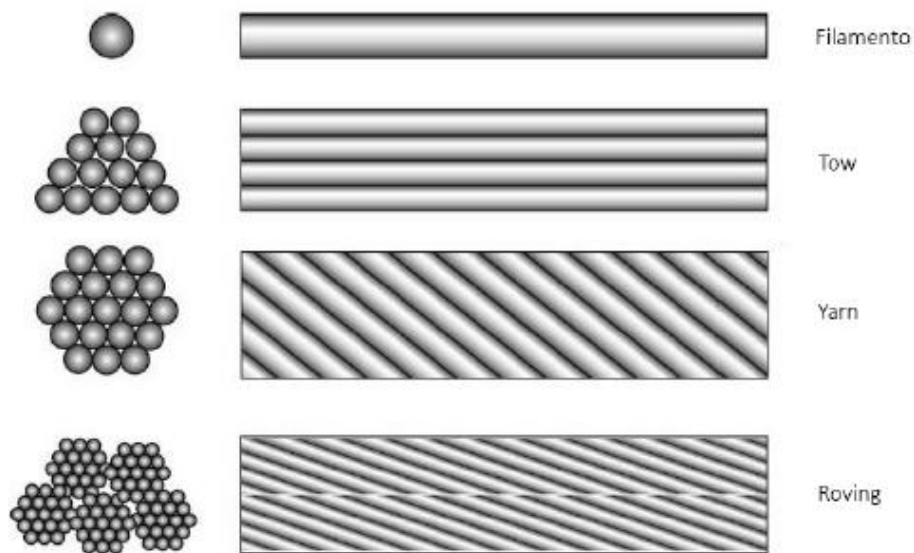


Figura 3.3 - Forme più comuni di fili [4]

3.2.1 FIBRE DI VETRO

Le fibre di vetro vengono utilizzate per la produzione di compositi (denominati GFRP, acronimo di Glass Fiber Reinforced Polymers) dotati di prestazioni medio alte, adatti quindi per applicazioni strutturali. Contrariamente al vetro monolitico, i filati non possiedono la caratteristica di essere fragili e poco resistenti poiché, grazie alla loro forma, sono ridotti drasticamente i difetti della cristallizzazione che causano microfratture e zone di concentrazione degli sforzi. La fibra di vetro è un materiale dimensionalmente molto stabile anche per esposizione ad alte temperature. La sua deformazione a rottura è tra le più elevate e il comportamento meccanico è elastico lineare fino alla rottura, che avviene con modalità di tipo fragile. Queste fibre non assorbono l'umidità e non cambiano lo stato fisico o la composizione chimica se esposte all'acqua, inoltre, essendo inorganiche, sono molto resistenti sia alla combustione che al calore.

Esse sono composte principalmente da silice in struttura tetraedrica (SiO_4) a cui vengono aggiunti, in diverse proporzioni, ossidi di alluminio (Al_2O_3) ed altri ioni metallici per facilitare le operazioni di lavorazione o per migliorare specifiche proprietà. La produzione di queste fibre avviene con un processo di filatura da fuso: viene fuso il vetro all'interno di un forno a una temperatura di circa $1260\text{ }^\circ\text{C}$ e successivamente colato in recipienti in lega di platino, dotati inferiormente di fori, da cui esce sottoforma di fili sottili. I singoli filamenti sono raffreddati, stirati e successivamente combinati in fili multifilamento che vengono avvolti su bobine con velocità fino a oltre 60 m/s . Il filo così prodotto viene poi assoggettato a lavorazioni successive, necessarie per convertirlo in idonei prodotti commerciali a seconda dell'applicazione.

La formulazione più conosciuta si identifica come Vetro E che possiede buone caratteristiche fisico-chimico; recentemente però è stata introdotta una sua evoluzione, denominata Vetro ECR, caratterizzata dalla migliore resistenza alla corrosione, da più elevati valori meccanici e da un'ottima resistenza termica. Un'altra variante è quella del Vetro S basata su una formulazione priva di boro e di alcali che conferisce alle fibre significative migliorie rispetto al vetro E ed ECR: elevate prestazioni meccaniche, ottima resistenza all'urto, buona resistenza alla fatica e marcata resistenza alla corrosione e all'invecchiamento. Infine, è da riportare anche dell'esistenza del Vetro AR (Alkali Resistant) che è stato sviluppato appositamente come rinforzo di conglomerati cementizi.

	Vetro E	Vetro ECR	Vetro S	Vetro AR
Peso specifico [g/cm ³]	2,63 – 2,64	2,66	2,45	2,68
Resistenza a trazione [MPa]	3815 - 3830	4050	4955	3700
Modulo di elasticità [GPa]	78 - 79	82	88	77
Allungamento a rottura [%]	4,8	4,9	5,5	-
Coefficiente di dilatazione termica [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	5	6	5,5	-

Tabella 3.2 - Caratteristiche delle fibre di vetro [22]

Le fibre di vetro esibiscono un modulo di elasticità inferiore a quello delle fibre di carbonio ($E_{C, alta\ resistenza} \cong 260$ GPa) o a quello delle fibre aramidiche ($E_A \cong 120$ GPa) ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, ovvero si danneggiano facilmente per sfregamento relativo durante la manipolazione. Inoltre; esse presentano una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso, una modesta resistenza a fatica (fenomeni attenuato per le fibre di Vetro S) e sono soggette a problemi di adesione specialmente in ambiente umido.

3.2.2 FIBRE DI CARBONIO

Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni (CFRP, acronimo di Carbon Fiber Reinforced Polymers) e si distinguono per il loro alto modulo di elasticità normale e per la loro elevata resistenza. Strutture interamente realizzate in CFRP sono di difficile realizzazione in quanto questo composito è caratterizzato da un comportamento a rottura intrinsecamente fragile contraddistinto da un assorbimento di energia relativamente modesto, nonostante le tensioni di rottura siano molto elevate.

La struttura atomica delle fibre di carbonio è simile, ma non del tutto uguale, a quella della grafite con gli atomi di carbonio organizzati in strutture essenzialmente planari, tenute insieme da forze trasversali di interazione del tipo Van der Waals, di gran lunga più deboli rispetto a quelle che agiscono tra gli atomi di carbonio nel piano (legami covalenti). Per tale motivo il loro modulo di elasticità normale e la loro resistenza sono estremamente elevati nelle direzioni contenute nei suddetti piani, mentre risultano notevolmente inferiori nella direzione trasversale (comportamento anisotropo) [20].

La produzione delle fibre in questione si basa essenzialmente sulla pirolisi, ovvero la decomposizione termica in assenza di ossigeno, di sostanze organiche, denominate precursori (generalmente a base di poliacrilonitrile, il cui acronimo è PAN). Nella prima fase, ovvero quella della stabilizzazione, le fibre PAN vengono dapprima stirate per allineare il reticolo all'interno di ogni fibra parallelamente all'asse della stessa e successivamente vengono ossidate in aria per 24 ore a temperatura compresa tra i 200 °C e i 220 °C mantenendole in tensione affinché la struttura molecolare subisca l'orientazione preferenziale. Nella fase seguente, ovvero quella della carbonizzazione, le fibre vengono riscaldate in atmosfera inerte a una temperatura compresa tra i 1000 e i 1500 °C in modo da eliminare le impurità. È durante questa condizione che si creano nuove strutture molecolari che aumentano notevolmente la resistenza a trazione del materiale.

Esistono due tipologie principali di fibre di carbonio ossia quelle ad alta resistenza e quelle ad alto modulo; entrambe sono formate con il procedimento produttivo appena descritto, ma nel caso di quelle ad alto modulo è necessaria una fase ulteriore, chiamata di grafitizzazione, in cui il materiale viene sottoposto ad una temperatura di circa 1800 °C in atmosfera inerte per consentire alla

struttura delle fibre di svilupparsi ulteriormente. Ciò aumenta significativamente il modulo elastico a discapito di una riduzione di resistenza a trazione.

	Fibre di carbonio (alto modulo)	Fibre di carbonio (alta resistenza)
Peso specifico [g/cm ³]	1,85 – 1,90	1,75
Resistenza a trazione [MPa]	2400 - 3400	4100 - 5100
Modulo di elasticità [GPa]	390 - 760	240 – 280
Allungamento a rottura [%]	0,5 – 0,8	1,60 – 1,73
Coefficiente di dilatazione termica [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	-1,45	-0,6 - -0,9

Tabella 3.3 - Proprietà meccaniche delle fibre di carbonio [4]

Le fibre di carbonio, oltre a possedere elevata resistenza meccanica e bassa densità, sono dotate di buona capacità di isolamento termico, resistenza a variazioni di temperatura, buone proprietà ignifughe e resistenza agli agenti chimici. Sono soggette a deterioramento se vengono a contatto con metalli e ossidi metallici a temperature superiori ai 600 °C.

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

3.2.3 FIBRE ARAMMIDICHE

Anche queste fibre vengono utilizzate per la produzione di compositi (AFRP, Aramid Fiber Reinforced Polymers), in particolare quelli estremamente tenaci. Le fibre aramidiche sono di natura organica costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata. Esse sono caratterizzata dall'elevata tenacità ma possono degradarsi se esposte per periodi prolungati alla luce del sole, perdendo fino al 50% della resistenza a trazione; risultano inoltre essere sensibili all'umidità. Per quanto riguarda le proprietà meccaniche,

possiedono una resistenza a compressione che è circa 1/8 di quella a trazione, la resistenza a fatica flessionale è buona e sono dotate di comportamento viscoso (creep) molto peggiore rispetto alle fibre di vetro a causa della particolare morfologia a elica della fibra stessa. Studi effettuati utilizzando barre da precompressione in fibre aramidiche hanno infatti mostrato che la perdita di precompressione a 28 gg è già del 12,8% (simile a quella dell'acciaio a 100 anni) e arriva al 40% dopo 100 anni [4]. Questo comportamento fortemente viscoso non consente a tali fibre l'applicazione nel campo delle costruzioni civili in Europa. La tecnologia di produzione delle fibre aramidiche si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero in soluzione con successivo raffreddamento veloce (quenching) ed essiccamento. La sintesi del polimero viene effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni fortemente acide. È possibile sottoporre le fibre così prodotte ad un trattamento di orientazione a caldo per avvolgimento su bobine rotanti ad elevata velocità (post-spinning), allo scopo di migliorarne le caratteristiche meccaniche [20].

	Fibre aramidiche
Peso specifico [g/cm ³]	1,44 – 1,47
Resistenza a trazione [MPa]	3600 – 3800
Modulo di elasticità [GPa]	62 – 180
Allungamento a rottura [%]	1,9 – 5,5
Coefficiente di dilatazione termica [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	-2

Tabella 3.4 - Proprietà meccaniche delle fibre aramidiche [4]

Le fibre aramidiche possiedono modulo di elasticità in direzione normale e resistenza a trazione intermedi tra i valori delle fibre di vetro e di quelle di carbonio.

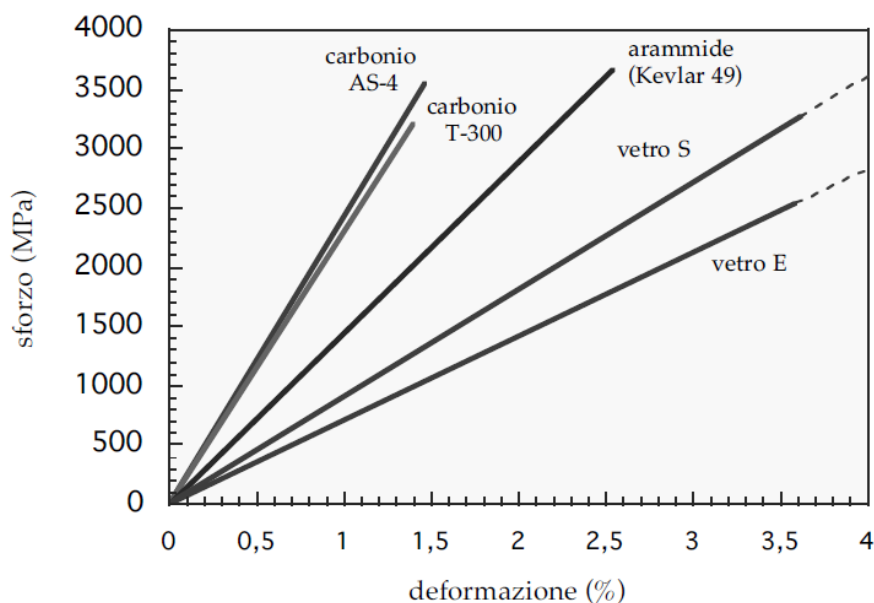


Figura 3.4 - Comportamento a trazione monoassiale delle fibre di rinforzo [21]

3.2.4 FIBRE DI BORO

Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si collocano, per caratteristiche compressive, in diretta concorrenza con le fibre di carbonio. Analogamente a quest'ultime, si distinguono per l'alto modulo e l'elevata resistenza, soprattutto a compressione; infatti, tra le fibre di rinforzo disponibili, il boro è l'unico ad avere eccezionale resistenza a compressione e flessione. Oltre a ciò, presentano buona resistenza agli acidi e agli alcali, ottima resistenza ai solventi organici, ai raggi ultravioletti e ai microrganismi.

Le fibre di boro possiedono una resistenza a compressione maggiore del 50% rispetto a quella di trazione. Questa caratteristica, che è la regola nel campo dei materiali da costruzione tradizionali, che mostrano sempre una resistenza a compressione uguale o maggiore rispetto a quella a trazione ma è l'unica nel campo delle fibre di rinforzo, è dovuta essenzialmente al loro grande diametro e alla loro microstruttura monocristallina [21].

Tuttavia la tecnologia delle fibre di boro è molto costosa, fattore che, insieme alla sua elevata densità, ne hanno determinato un sostanziale abbandono, trovando

applicazione quasi esclusivamente in nicchie ristrette come quella dei compositi in grado di resistere a temperature elevatissime.

Le fibre di boro sono ottenute per deposizione chimica in fase vapore su un filamento conduttivo, solitamente costituito da tungsteno o carbonio. Esistono due tipi di processi: il primo si basa sulla decomposizione termica dell'idruro di boro e il secondo sulla riduzione di un alogenuro di boro con idrogeno [21].

Fibre di boro	
Peso specifico [g/cm ³]	2,8
Resistenza a trazione [MPa]	3500
Modulo di elasticità [GPa]	240
Allungamento a rottura [%]	1,5
Coefficiente di dilatazione termica [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	5

Tabella 3.5 - Proprietà meccaniche delle fibre di boro [21]

3.2.5 ALTRE FIBRE

In commercio esistono una grandissima quantità di fibre oltre quelle già riportate e, tra le più importanti, troviamo quelle a base di **basalto** che hanno trovato numerose applicazioni in sostituzione delle fibre di vetro, soprattutto laddove sia richiesta un'elevata resistenza al fuoco. Il buon comportamento al fuoco del basalto deriva dalla presenza di micropori nella struttura molecolare che limitano la convezione dell'aria e l'irraggiamento. Il basalto è un materiale naturale che si trova nelle rocce vulcaniche originate da lava raffreddata rapidamente ed è costituito principalmente da due minerali principali: la silice (SiO₂) e l'allumina (Al₂O₃). Il processo di fabbricazione delle fibre in questione è molto simile a quella delle fibre di vetro, ma il minor consumo di energia e l'assenza di additivi, necessari per aumentare l'adesione tra le fibre e la matrice, lo rende più economico. Inoltre, tra le due tipologie di fibre non si notano grandi differenze in termini di proprietà meccaniche, stabilità chimica e resistenza agli agenti atmosferici, agli ambienti alcalini e all'esposizione agli acidi. Gli FRP a base di

fibre di basalto si denotano usualmente con l'acronimo BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer).

Le fibre finora esaminate vengono utilizzate prevalentemente in compositi a matrice polimerica che hanno come limitazione la temperatura massima di esercizio. Al di sopra di temperature dell'ordine di alcune centinaia di gradi centigradi, infatti, tutte le matrici polimeriche per compositi perdono le loro caratteristiche meccaniche e/o si degradano chimicamente. L'esigenza di migliorare la resistenza ad elevate temperature di esercizio ha portato allo sviluppo di **fibre ceramiche** che, oltre ad essere stabili alle alte temperature, resistono ottimamente all'ossidazione e alla corrosione. Inoltre, esse sono dotate di un modulo elastico compreso tra i 150 e i 700 GPa, di una resistenza a trazione che può arrivare fino a 4000 MPa e una di una resistenza a compressione migliore rispetto alle fibre di carbonio e aramidiche.

3.3 MATRICI

Nei compositi fibrorinforzati la matrice riveste il ruolo fondamentale di far collaborare tra loro le diverse fibre presenti; inoltre, svolge i compiti di trasferire e ridistribuire le sollecitazioni, di dare la forma all'elemento e di proteggere le fibre dagli attacchi ambientali e da abrasioni meccaniche.

Come suggerisce il nome, negli FRP le matrici sono polimeri sintetici, caratterizzati dal fatto di essere composti da una successione di gruppi molecolari, denominati unità ripetitive, che formano lunghe catene simili a fili flessibili. I gruppi molecolari sono composti da molecole relativamente semplici, dette monomeri, che reagiscono tra loro.

I polimeri sintetici possono essere classificati in due categorie principali: i **termoplastici**, che formano le cosiddette matrici non reticolari, e i **termoindurenti**, che sono la base delle matrici reticolate.

Nel settore dei materiali compositi, i polimeri sintetici sono generalmente chiamati "resine sintetiche" o anche semplicemente "resine".

3.3.1 MATRICI RETICOLATE (TERMOINDURENTI)

I polimeri termoindurenti presentano catene unite stabilmente da legami covalenti che generano un reticolo tridimensionale di interazioni chimiche forti. Hanno il vantaggio di essere caratterizzati da una bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre, da ottime proprietà adesive, da una buona resistenza agli agenti chimici e dall'assenza di una temperatura di fusione. Gli svantaggi principali sono invece rappresentati dalla modesta tenacità a frattura, dalla sensibilità all'umidità e dall'infusibilità, caratteristica quest'ultima che non ne permette il riciclo, poiché l'unico effetto che si ottiene riscaldandoli è quello di indurirli progressivamente fino allo stato di solido vetroso. Oltre a questi svantaggi, i polimeri in questione presentano un'ulteriore limitazione data dalla temperatura massima in esercizio; infatti,

superata una determinata temperatura, denominata di transizione vetrosa T_g , il materiale cambia significativamente il comportamento passando da uno stato vetroso ad uno stato gommoso e ciò causa l'abbattimento delle caratteristiche meccaniche.

Le matrici reticolate sono ottenute tramite una reazione chimica in situ, durante la quale un pre-polimero e un indurente vengono miscelati e, reagendo chimicamente tra loro, portano alla formazione di un polimero. La maggior parte dei componenti strutturali sono realizzati con tre sole resine reticolate: poliestere, vinilestere ed epossidiche.

Le **resine poliestere** sono le matrici per compositi più utilizzate a causa del loro basso costo. Sono composte da una soluzione di poliestere (soluto) e stirene (solvente) che funge da agente reticolante. La percentuale di stirene può essere superiore a quella strettamente necessaria dal punto di vista stechiometrico e viene di solito stabilita in base alla viscosità desiderata per agevolare il processo di impregnazione delle fibre.

Le **resine vinilestere** sono simili nella loro struttura molecolare a quelle poliestere ma a differenza di quest'ultime presentano una maggiore tenacità. Grazie alla loro flessibilità, sono favorite le deformazioni plastiche necessarie all'assorbimento di energia meccanica durante gli urti.

Le **resine epossidiche** sono più performanti rispetto alle precedenti: presentano elevate proprietà meccaniche, buona resistenza agli agenti ambientali e sono in grado di sviluppare un'ottima adesione con le fibre di rinforzo. Per questo motivo sono molto impiegate nei materiali compositi ad elevate prestazioni strutturali e sono una scelta quasi obbligata per fibre di carbonio, aramidiche e di boro. Queste resine sono molto versatili e trovano impiego anche come adesivi, isolanti elettrici, sigillanti, vernici e rivestimenti di pavimentazioni.

La loro struttura molecolare è simile al vinilestere e per ottenerla è necessario miscelare i due costituenti rispettando il rapporto stechiometrico.

	Modulo di elasticità E [GPa]	Resistenza a trazione σ_r [MPa]	Deformazione a rottura ϵ_r [%]	Densità ρ [g/cm ³]	T _g [°C]
Poliestere, vinilestere	2,1 – 4,4	4,1 – 90	< 2,4	1,20	75 - 200
Epossidiche	2,4	27 - 90	3 – 5,8	1,25	60 - 150

Tabella 3.6 - Proprietà meccaniche dei polimeri termoindurenti [4]

3.3.2 MATRICI NON RETICOLATE (TERMOPLASTICHE)

I polimeri termoplastici sono caratterizzati dal fatto che le singole catene polimeriche si scambiano solamente interazioni deboli, di tipo Van der Waals, per cui il materiale può essere reso liquido per semplice riscaldamento. Le matrici reticolate presentano prestazioni meccaniche peggiori rispetto a quelle non reticolate a causa della maggiore complessità e lentezza delle reazioni di reticolazione. I due principali vantaggi delle resine termoplastiche per la fabbricazione dei compositi sono l'intrinseca maggiore tenacità e resistenza agli urti e la possibilità di rimodellare il materiale semplicemente riscaldandolo per un numero teoricamente illimitato di cicli, semplificando così anche il riciclo dei componenti a fine vita. Inoltre, esse presentano una migliore durabilità in ambienti aggressivi e hanno una durata di stoccaggio molto maggiore rispetto alle resine termoindurenti in quando non sono costituite da sistemi reattivi.

I materiali termoplastici più comunemente usati nei compositi sono tradizionalmente suddivisi in tecnopolimeri e termoplastici per elevate temperature; questa classificazione si basa principalmente sulla temperatura massima di esercizio, che a sua volta dipende dai valori delle temperature di transizione vetrosa (T_g) e di fusione (T_m) [21].

	Modulo di elasticità E [GPa]	Resistenza a trazione σ_r [MPa]	Deformazione a rottura ϵ_r [%]	Densità ρ [g/cm³]
Polietilene LDPE	0,17 – 0,28	8,3 – 31	100 – 650	0,92
Polipropilene PP	1,14 – 1,55	31 – 41	100 – 650	0,90 – 0,91
Polistirene PS	2,28 – 3,28	36 – 52	1,2 – 2,5	1,05
Polivinilcloruro PVC	2,41 – 4,14	41 – 52	40 – 80	1,30 – 1,58
ABS	0,90 – 2,90	29 – 52	3 – 100	1,07

Tabella 3.7 - Proprietà meccaniche dei polimeri termoplastici [4]

3.4 ADESIVI

Risulta doveroso dedicare un capitolo all'approfondimento degli adesivi poiché sono l'unica tipologia di collegamento possibile tra le lamine in CFRP e il legno dell'elemento che necessita dell'intervento di consolidamento. I vantaggi delle giunzioni adesive rispetto a quelle meccaniche sono: la possibilità di unire materiali diversi, come per l'appunto carbonio e legno, una maggior rigidità, la distribuzione dei carichi più uniforme, l'assenza di fori che causano danneggiamenti locali dei materiali e una migliore resistenza a fatica. Ovviamente esistono anche delle limitazioni, che consistono nella sensibilità alle condizioni ambientali e all'esposizione alle alte temperature.

In generale, si può dunque definire "adesivo" un materiale in grado di realizzare un collegamento tra almeno due superfici e di trasmettere forze di entità anche rilevante (collegamento strutturale), ciò è possibile grazie ad uno o più dei seguenti meccanismi di adesione [20]:

- **Legame di tipo fisico:** coinvolge i legami chimici secondari (forze di Van der Waals, legami ionici e legami idrogeno) tra le molecole dell'adesivo e dell'aderendo;
- **Legame chimico-covalente:** coinvolge i legami chimici primari tra le molecole del substrato e dell'adesivo;
- **Fenomeni diffusivi o interdiffusivi:** in seguito alla diffusione o interdiffusione degli atomi o delle molecole attraverso l'interfaccia, si instaura un'unione tra le due superfici;
- **Aggrappaggio meccanico:** il legame sfrutta la resistenza allo scorrimento reciproco tra superfici localmente compenstrate.

Una prima classificazione può essere fatta in base alla loro natura: possono essere di tipo naturale o sintetico. I primi sono derivanti da resine vegetali, dalla caseina, da bitumi o asfalti naturali mentre i secondi possono essere a base di formaldeide,

resine acriliche, resine epossidiche o poliuretatiche. I più adatti per collegamenti strutturali sono gli adesivi sintetici; in particolare, per i materiali compositi, i più idonei sono quelli a base di resine epossidiche.

Gli adesivi si possono considerare come meccanicamente isotropi; nello specifico, essi sono generalmente materiali termoindurenti a comportamento visco-elastico. Il relativo legame costitutivo tensione-deformazione dipende dalla chimica dell'adesivo e dalla sua formulazione finale, ciò permette di distinguere tra colle duttili e fragili.

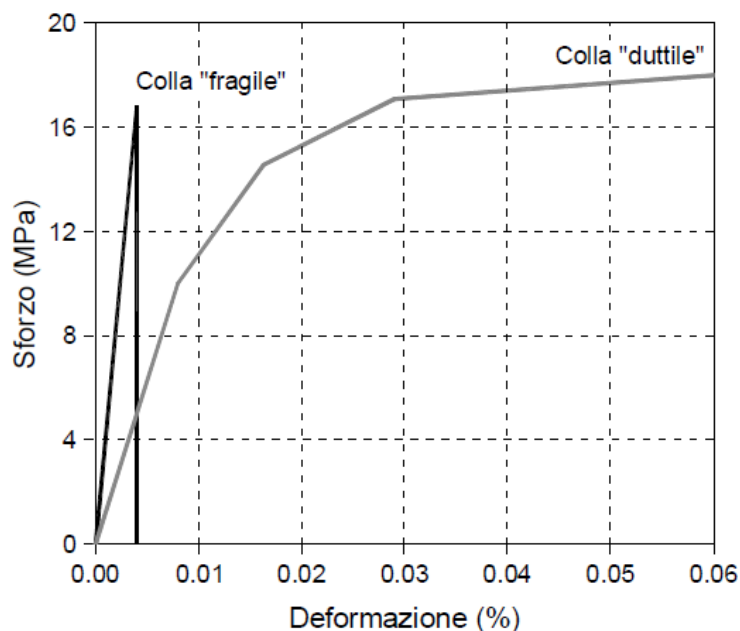


Figura 3.5 - Diagramma tensione-deformazione di una colla [13]

Oltre agli aspetti meccanici, è importante riportare anche le possibili tipologie di fratture delle giunzioni incollate:

- **Frattura coesiva:** avviene all'interno di uno dei materiali che costituiscono il giunto ed è il tipo di frattura che si osserva nelle condizioni considerate ideali;
- **Frattura adesiva:** avviene all'interfaccia tra adesivo e aderendo quando la resistenza dell'interfaccia è inferiore di quella coesiva dell'aderendo. Le superfici di frattura sono solitamente lisce;

- **Frattura mista:** modalità mista tra quella coesiva e quella adesiva.

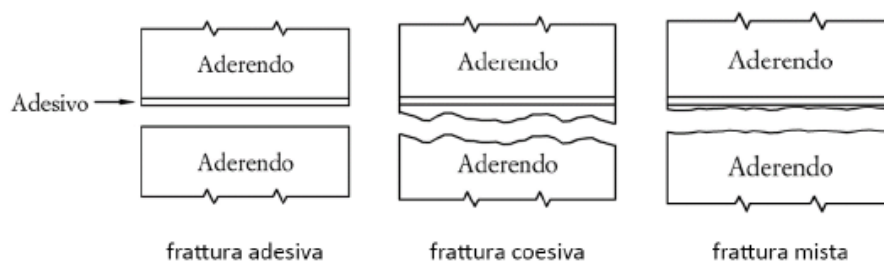


Figura 3.6 - Tipologie di frattura [4]

3.4.1 ADESIVI EPOSSIDICI

Gli adesivi epossidici hanno fatto la loro prima comparsa nell'ambito strutturale intorno alla seconda metà del '900. Sono basati su un polimero costituito da un gruppo chimico epossidico. Questi adesivi sono noti come "adesivi rigidi" per via della loro elevata rigidità da cui ne segue un'elevata resistenza ai carichi a uno scarso allungamento a rottura. Possono essere di due tipologie principali:

- **Adesivi bicomponente:** composti da due costituenti che miscelandosi tra loro, in un preciso rapporto stechiometrico, danno luogo alla formazione del polimero finale secondo il processo di poliaddizione. È opportuno ricordare che il tempo a disposizione dal momento della miscelazione all'indurimento non è elevato, perciò risulta importante andare a valutare la frazione di tempo a disposizione sia per la lavorazione dell'adesivo prima che esso inizi ad indurirsi (pot-life), sia il tempo a disposizione tra l'applicazione dello stesso adesivo e il momento in cui inizia a svolgere la sua azione di collegamento (open-time) [4]. Questi adesivi possiedono elevata resistenza (fino a 30 - 40 MPa a trazione), moderato allungamento a rottura (all'incirca il 10%) e ottima resistenza agli agenti chimici e fisici ma, di contro, tendono ad assorbire l'umidità e richiedono manodopera specializzata per il loro utilizzo;
- **Adesivi monocomponente:** sono costituiti da un componente che contiene già al suo interno l'indurente ma per attivarne la funzione è

necessario applicare calore. Questa caratteristica è la causa dello scarso utilizzo degli adesivi epossidici monocomponente in ambito del consolidamento strutturale nonostante presentino una maggiore resistenza (fino a 35-45 MPa a trazione) rispetto ai bicomponenti. I monocomponenti possiedono un limitato allungamento a rottura (inferiore al 10%), buona resistenza agli agenti chimici e fisici ma, all'opposto, tendono ad assorbire l'umidità e gli olii del legno.

È riduttivo pensare di assegnare dei valori definiti alle caratteristiche degli adesivi epossidici poiché il loro comportamento in esercizio viene influenzato da molteplici fattori, tra i quali la temperatura di esposizione prima e dopo la fase di presa, il tempo trascorso tra l'applicazione e l'indurimento, gli additivi aggiunti alla miscela, la temperatura in esercizio del giunto e il contatto, ciclico o per breve durata, con acqua e umidità. Risulta necessario analizzare caso per caso per scegliere il prodotto migliore in base alle esigenze.

3.4.2 ADESIVI POLIURETANICI

Gli adesivi poliuretanicici sono ottenuti partendo da polimeri di uretano e sono noti come "adesivi elastici" per via della loro straordinaria elasticità ed allungamento a rottura che può arrivare fino al 600%. Esistono inoltre degli speciali adesivi molto rigidi che riescono ad avere una resistenza a trazione fino ai 25 MPa. Ne esistono essenzialmente di tre tipologie:

- **Adesivi bicomponente:** possono essere rigidi oppure elastici; i primi hanno una resistenza a trazione approssimativa di 8 MPa con deformazione a rottura del 600% mentre i secondi possiedono la resistenza a trazione fino ai 25 MPa con allungamento a rottura del 50%;
- **Adesivi monocomponente induriti tramite calore:** fanno parte di questa classe i poliuretanicici rigidi e per attivarli è necessario esporli ad un fonte di calore con una temperatura compresa tra i 100 e i 200 °C. Possiedono

caratteristiche simili ai materiali termoindurenti, ovvero elevata resistenza agli sforzi normali che arriva fino a 15 MPa, elevata rigidità e resistenza a fatica ma possiedono un allungamento massimo a rottura del 20%;

- **Adesivi monocomponenti induriti tramite umidità:** gli adesivi appartenenti a questa categoria sono estremamente elastici e possono arrivare ad un allungamento massimo a rottura del 600% con una resistenza massima di circa 8 MPa per sforzi normali, necessitano però di un primer come promotore di adesione al supporto.

Gli adesivi poliuretanici hanno il pregio di riempire gli spazi vuoti della superficie dell'aderendo, adattandosi ad un'ampia gamma di materiali, possiedono una modalità di rottura di tipo coesivo, sono resistenti all'acqua e non si restringono durante la fase di indurimento. Di contro però sono meno resistenti delle resine epossidiche, risultano sensibili ai raggi ultravioletti, sono costosi e hanno una durata della vita limitata.

Capitolo 4

PROFILI DI RINFORZO IN FRP

I materiali compositi polimerici sono un'invenzione moderna sviluppata a partire dal XX secolo; in particolare, nel 1942 fu fabbricata una barca interamente costituita di vetroresina. Successivamente, nei primi anni '60, grazie all'introduzione delle prime fibre di boro e di carbonio ad alta resistenza, è iniziata l'applicazione dei compositi avanzati come componenti aeronautici militari. In seguito, a partire dagli anni '70, il campo di utilizzo di questi materiali si è ulteriormente ampliato verso settori del tutto nuovi come, ad esempio, quello automobilistico e quello per articoli sportivi [23].

Oggi questi prodotti vengono adoperati sempre di più anche nel settore edile/civile. In quest'ambito, gli elementi in FRP possono essere raggruppati in una delle seguenti categorie caratterizzate da diversa geometria:

- I profili (a sezione aperta o chiusa);
- Le barre (circolari o rettangolari);
- Le strisce.

I prodotti in FRP, come visto nel Capitolo 3, possono essere realizzati secondo combinazioni pressoché infinite di fibre e matrici. Oltre alla tipologia dei due costituenti, in un composito possono variare la quantità di fibre rispetto al volume totale, l'orientamento delle stesse, la presenza di eventuali additivi e la tipologia di finitura superficiale dell'elemento da realizzare. Tutti questi parametri, combinati con le dimensioni e la geometria, incidono sulle proprietà e sulle caratteristiche dell'elemento in composito. Data la moltitudine di variabili, appare evidente che non sia semplice giungere ad una classificazione univoca; di conseguenza, in questo capitolo vengono approfondite le caratteristiche delle principali tipologie di barre attualmente disponibili sul mercato.

4.1 MODALITÀ DI PRODUZIONE

Sono passati settant'anni dalla prima barca in vetroresina e l'industria dei materiali compositi polimerici ha compiuto passi da gigante. Oggi esistono numerose tecniche di produzione che consentono di ottenere prodotti aventi forma, dimensioni e caratteristiche diverse in base ad ogni esigenza. In linea generale si può affermare che per la creazione di materiali polimerici fibrorinforzati è necessario utilizzare sempre degli stampi in grado di impartire la forma finale all'elemento da fabbricare.

Le differenti tecnologie produttive esistenti possono essere raggruppate in tre principali categorie: a stampo aperto, a stampo chiuso e per colata di un impasto premiscelato (quest'ultima è utilizzata generalmente per la produzione di componenti non strutturali).

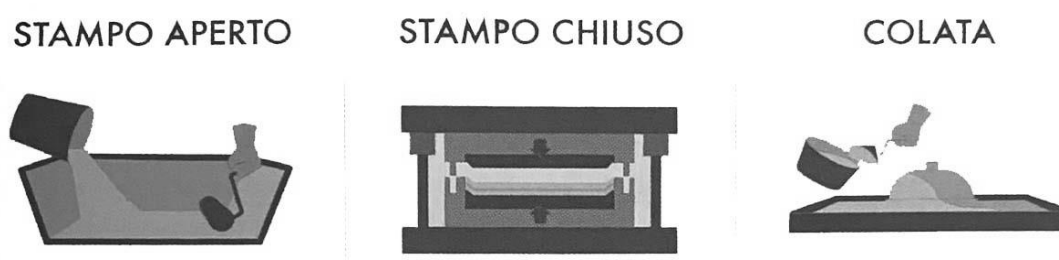


Figura 4.1 - Categorie principali delle tecnologie produttive di materiali compositi in FRP [21]

Ciascuna delle tecnologie produttive può essere schematizzata secondo una sequenza di operazioni fondamentali comuni a tutte:

- Il controllo della dispersione, concentrazione e orientamento delle fibre;
- L'impregnazione delle fibre con la resina;
- La formatura del componente in uno stampo;
- La solidificazione della matrice per il mantenimento della forma.

Tra le diverse tecniche produttive esistenti, la scelta di quella ideale deriva principalmente dalla dimensione dei campioni da realizzare. Per profili di medio-piccola grandezza è preferibile utilizzare un sistema a stampo chiuso, mentre per componenti di grosse dimensioni è preferibile una tecnologia

produttiva a stampo aperto. La dimensione non è però l'unica discriminante poiché giocano un ruolo importante anche la forma dell'oggetto, la velocità di produzione e il costo degli investimenti in attrezzature [21].

Esula dallo scopo di questo elaborato approfondire ciascuno dei metodi produttivi esistenti per la creazione di elementi in FRP; risulta però doveroso approfondire la pultrusione, processo industriale utilizzato per la formazione delle barre.

4.1.1 LA PULTRUSIONE

Il nome deriva dalla combinazione tra "pull" (tirare) e "extrusion" (estrudere), termini che indicano le caratteristiche principali del processo produttivo. Infatti, esso è basato sull'applicazione di una forza di tiro alle fibre che sono così costrette a passare prima attraverso una vasca contenente la resina necessaria per l'impregnazione e poi per uno stampo riscaldato dove avviene la formatura dell'elemento finale.

Questa tecnologia ricade tra quelle appartenenti alla categoria a "stampo chiuso" ed è tra i primi processi produttivi sviluppati per i materiali compositi fibrorinforzati con fibre continue [21]. A differenza di altri sistemi per la formazione di elementi compositi polimerici, la pultrusione è caratterizzata da una produzione continua, automatizzata, con elevato volume produttivo e a basso impatto manifatturiero. Grazie a ciò, è la tecnologia produttiva che offre il miglior rapporto produttività/costi totali. La limitazione di questo processo risiede nel fatto che gli elementi da formare devono avere una sezione costante. Detto ciò, possono essere creati un'ampia gamma di prodotti che includono le barre, i laminati, i profili a sezione aperta (I, H, L, ecc.) e quelli a sezione chiusa (come ad esempio i tubolari).

Entrando nello specifico della linea di produzione, si possono distinguere:

1. Una serie di bobine impilate su cantre;

2. Le guide necessarie per la preformatura;
3. Il sistema di impregnazione delle fibre;
4. Lo stampo per la formatura e l'indurimento;
5. Il sistema di tiraggio;
6. Il sistema di taglio.

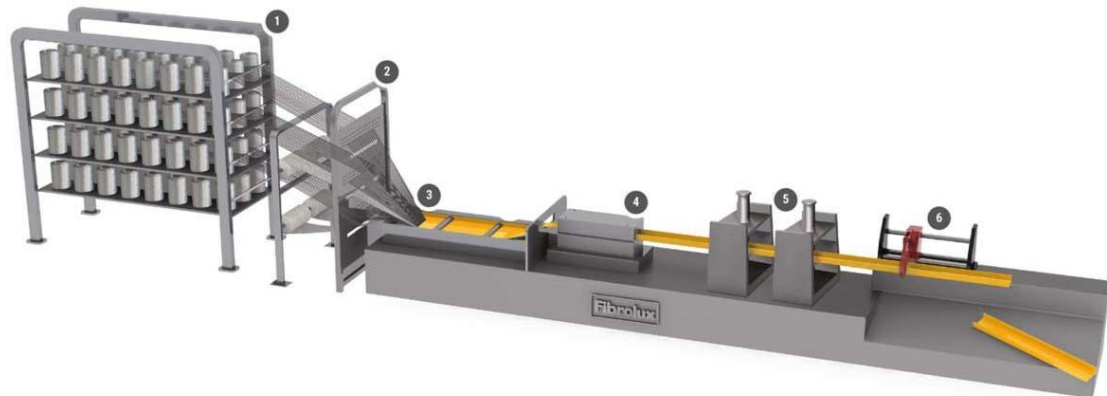


Figura 4.2 - Schema di un impianto di pultrusione a vasca aperta [24]

Le fibre di rinforzo vengono approvvigionate sotto forma di bobine di fili continui monodirezionali e successivamente posizionate su apposite scaffalature, denominate cantre. Dagli scaffali, le fibre vengono fatte passare attraverso appositi occhielli in ceramica in grado di evitarne il contatto diretto. A questo punto si procede con l'impregnazione delle stesse.

Nella pultrusione tradizionale si utilizza, come sistema di impregnazione, una vasca aperta contenente la matrice in cui passano le fibre di rinforzo. Il problema principale di questo sistema risiede nell'evaporazione di solventi contenuti nella resina con conseguenze negative per l'ambiente e la salute dell'uomo. Nelle moderne macchine, a discapito di costi di produzione più alti, si utilizzano camere d'iniezione in grado di impregnare le fibre mediante un sistema a pressione. Ciò garantisce una migliore uniformità di impregnazione e la riduzione di evaporazione di solventi [25].

Una volta impregnate, le fibre passano attraverso una serie di stampi, riscaldati mediante olio caldo o elettricità, in grado di imprimere la forma necessaria

all'elemento da realizzare. Il primo di essi ha il compito di fornire la preforma all'elemento ed eliminare la resina in eccesso, quest'ultima rimandata al sistema di impregnazione. Il passaggio all'interno degli stampi riscaldati consente, oltre che fornire la forma all'elemento da realizzare, la polimerizzazione del composto, processo nel quale la resina passa progressivamente dallo stato liquido a quello solido passando per uno intermedio di gel.

Il prodotto in uscita passa poi attraverso dispositivi di postformatura in grado di compensare le piccole imperfezioni derivanti dalle fasi precedenti.

Nella parte terminale dell'impianto è posizionato il sistema di tiro, costituito da una coppia di cingoli contro-rotanti, e quello di taglio, dotato di una sega circolare montata su un supporto mobile [26].

4.2 CARATTERISTICHE DELLE BARRE

Le linee guida ACI 440.1R-06 [27] definiscono le barre in FRP come “un materiale composito snello a sviluppo longitudinale [...] costituito principalmente da fibre unidirezionali longitudinali legate mediante resina polimerica. La barra può avere una sezione trasversale di *forma variabile* (comunemente circolare o rettangolare) e può avere una superficie deformata o ruvida [...]”. La definizione appena riportata consente di considerare le lamine e le barre circolari appartenenti alla stessa categoria.

Le barre di FRP sono caratterizzate da un assetto unidirezionale delle fibre, generalmente presenti con una frazione volumetrica compresa tra il 50% e il 70%. [28]. Presentano, al pari del legno, un comportamento anisotropo ovvero sono caratterizzate da comportamenti differenti in base alla direzione considerata. Nello specifico, possono essere considerate come un materiale ortotropo in cui la proprietà sono differenti tra lo sviluppo longitudinale (L) e quello trasversale (T).

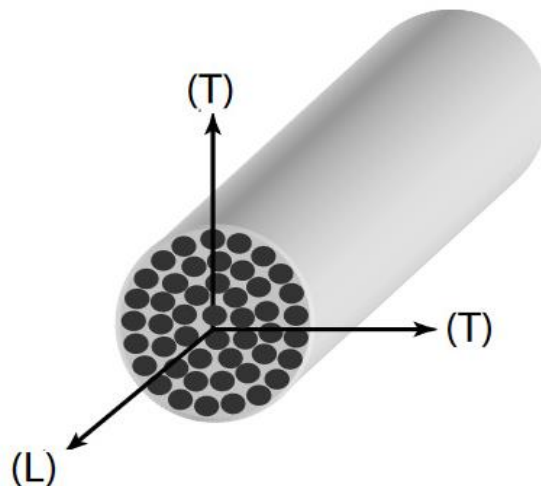


Figura 4.3 – Assi principali di una barra unidirezionale composta in FRP: direzione longitudinale (L) e trasversale (T) [29]

Commercialmente sono disponibili con fibre di vetro, carbonio e aramidiche all'interno di una matrice polimerica, tipicamente in vinilestere o resina epossidica. Hanno un diametro nominale compreso tra i 6mm e 36 mm e lunghezza compresa tra i 10 e i 14 m [25].



Figura 4.4 - Confronto tra una barra in acciaio e diverse in FRP

Le barre a sezione circolare possono essere caratterizzate da una diversa geometria superficie: elicoidale, dentata, intrecciata oppure, al pari di quelle in acciaio, nervata. Inoltre, ogni barra di ciascuna categoria può essere rivestita con sabbia oppure essere liscia.



Figura 4.5 - Differenti tipologie superficiale delle barre in FRP. Dall'alto al basso si trovano barre: lisce, elicoidali, dentate, intrecciate e sabbiate [30]

Le barre a sezione rettangolare sono indeformate superficialmente ma possono anch'esse essere lisce oppure sabbiate.



Figura 4.6 - Barre a sezione rettangolare in CFRP: sabbiate (a) e lisce (b) [11]

4.2.1 PROPRIETÀ FISICHE

DENSITÀ

Le barre hanno una densità che oscilla tra 1,25 (GFRP) e i 2,10 g/cm³ (AFRP), rispettivamente un sesto e un quarto rispetto a quella dell'acciaio. I loro pesi ridotti consentono di abbassare i costi di trasporto agevolandone, inoltre, la movimentazione in sito [27]. Questo si traduce in lavorazioni più sicure e veloci in grado di migliorare in maniera considerevole le condizioni lavorative all'interno di un cantiere.

Acciaio	GFRP	CFRP	AFRP
7,90	1,25 – 2,10	1,50 – 1,60	1,25 – 1,40

Tabella 4.1 - Densità tipiche delle barre di rinforzo [g/cm³] [27]

PROPRIETÀ TERMICHE

Trattandosi di un materiale ortotropo, il coefficiente di dilatazione termica α delle barre in FRP è differente nella direzione considerata e dipende dal tipo di fibra, dalla tipologia di resina utilizzata come matrice e dalla frazione volumetrica dei due componenti. Lungo lo sviluppo longitudinale esso tende ad assumere il valore caratteristico delle fibre mentre nella direzione trasversale quello della matrice. Di seguito si riporta la tabella relativa ai valori caratteristici del coefficiente di dilatazione termica per barre contenenti fibre in percentuali comprese tra il 50 e il 70% del volume.

Direzione	Acciaio	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinale α_L	11,7	6,0 – 10,0	-9,0 – 0,0	-6,0 – -2,0
Trasversale α_T	11,7	21,0 – 23,0	74,0 – 104,0	60,0 – 80,0

Tabella 4.2 - Coefficiente di dilatazione termica delle barre di rinforzo [27]

Dalla tabella si nota come, lungo lo sviluppo longitudinale, il coefficiente di dilatazione termica delle barre in fibra di vetro sia dello stesso ordine di grandezza di quelle in acciaio. Altro dato rilevante è il valore negativo delle barre

in carbonio e in arammide; ciò significa che all'aumentare della temperatura diminuisce la lunghezza della barra. Tale fenomeno è da tenere particolarmente in considerazione sapendo che il legno ha un comportamento opposto, ovvero si dilata all'aumentare della temperatura. Questa differenza tra i materiali può causare, in caso di elevate temperature, delle tensioni all'interfaccia tra i due. Per quanto concerne la direzione trasversale, si osserva come le barre in materiale composito abbiano un coefficiente di dilatazione termica di quasi un ordine di grandezza superiore rispetto a quelle in acciaio.

ALTRE PROPRIETÀ

I polimeri sono materiali non corrosivi resistenti agli agenti chimici e, di conseguenza, sono l'ideale per le strutture che potrebbero incorrere in problemi di corrosione come, ad esempio, ponti, strutture costiere e muri controterra [31]. Al contrario dell'armatura tradizionale, infatti, le barre in FRP sono inalterabili all'attacco dei cloruri. Questa proprietà le rende particolarmente adatte per la realizzazione di impalcati di ponti stradali in zone molto fredde (per esempio, il Canada) dove è frequente lo spargimento di Sali disgelanti [14]. Grazie alla loro trasparenza elettromagnetica, l'armatura in FRP può, inoltre, essere impiegata come rinforzo di elementi esposti a correnti vaganti o nella realizzazione di sale ospedaliere, per evitare interferenze con le diverse attrezzature [28].

4.2.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE

MODULO ELASTICO

Come si vedrà di seguito, il comportamento delle barre in FRP differisce nel caso in cui lo sforzo sia di compressione oppure di trazione. Questa differenza, dovuta all'instabilizzarsi delle fibre, influenza non solo il carico massimo sopportato ma anche il modulo elastico. In accordo con la letteratura, il modulo elastico a compressione è inferiore rispetto a quello a trazione, in particolare è circa l'80% nelle barre in GFRP e l'85% in quelle in CFRP. Da riportare l'eccezione delle barre in AFRP che mostrano moduli elastici identici nelle due direzioni di sforzo assiale [27]. Di seguito si riporta la tabella con il confronto tra i valori caratteristici del modulo elastico a trazione delle barre in FRP e di quelle in acciaio.

	Acciaio	GFRP	CFRP	AFRP
Modulo elastico [GPa]	200	35 - 51	120 - 580	41 - 125

Figura 4.7 - Confronto tra i valori del modulo elastico delle barre in acciaio e quelle in FRP (aventi frazione volumetrica compresa tra lo 0,5 e lo 0,7) [26]

Le barre costituite da fibre di vetro e quelle in aramidiche sono caratterizzate da un modulo elastico estremamente inferiore rispetto a quello dell'acciaio. Ciò significa che, per esempio, gli elementi in calcestruzzo armati con barre in GFRP e AFRP sono estremamente meno rigidi rispetto a quelli contenenti armatura in acciaio.

RESISTENZA A TRAZIONE

Nel caso di sforzi di trazione, le barre in FRP sono caratterizzate da una proporzionalità diretta tra le deformazioni e i carichi applicati, con pendenza della curva costante fino al raggiungimento della rottura fragile. A differenza dell'acciaio, è assente il tratto plastico che precede la rottura. Il comportamento può quindi essere espresso con la legge di Hooke:

$$\sigma_t = E_t \cdot \varepsilon_t$$

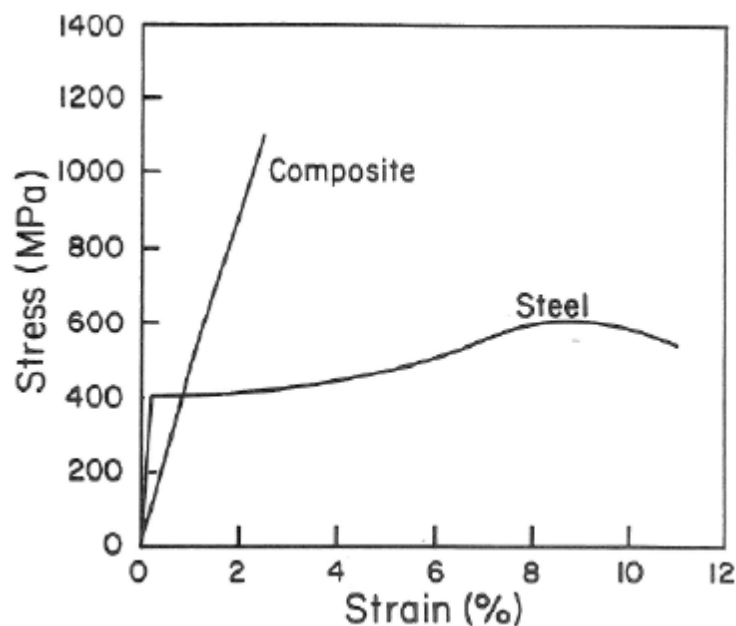


Figura 4.8 - Confronto tra il legame sforzo - deformazione degli FRP e dell'acciaio [11]

Al raggiungimento del carico massimo, le fibre si contraggono improvvisamente causando così la compressione della matrice per effetto dinamico. Quest'ultima reagisce espandendosi trasversalmente e rompendosi di conseguenza. Il collasso è dunque da imputare alla matrice che, non riuscendo a resistere agli sforzi di trazione agenti, non è in grado di confinare le fibre che si scollano e si aprono a ventaglio.



Figura 4.9 - Rottura di un profilo in GFRP (Prova eseguita presso il laboratorio prove materiali del Politecnico di Milano)

La resistenza ultima e la rigidezza di un elemento in composito dipendono da diversi fattori, tra cui la frazione volumetrica delle fibre, la tipologia del processo produttivo, la qualità della produzione e il grado di polimerizzazione. Inoltre, a differenza dell'acciaio, la resistenza a trazione delle barre in FRP può variare in funzione del diametro [27]. Questo fenomeno deriva dall'imperfetto scambio di sforzi tangenziali all'interfaccia fibra-matrice che causa stati di sollecitazione differenti tra le fibre centrali e quelle esterne della sezione. Tale comportamento viene accentuato nelle barre di diametro maggiore in quanto aumenta la distanza tra le fibre del centro e quelle di superficie.

Altra differenza con l'acciaio è la possibilità di piegare le barre una volta concluso il processo produttivo. In particolare, gli elementi prodotti con una matrice termoindurente, come visto nel capitolo 3.3.1, non possono essere modellati mediante semplice aumento della temperatura. È dunque necessario produrre barre piegate direttamente in stabilimento. Oltre a necessitare di un processo

produttivo relativamente complicato, le sezioni piegate presentano una resistenza a trazione ridotta del 40-50% rispetto a quelle indeformate a causa della concentrazione di stress in corrispondenza delle pieghe. Di seguito si riportano i valori tipici della resistenza a trazione e dell'allungamento delle diverse barre in FRP (aventi frazione volumetrica delle fibre compresa tra lo 0,5 e lo 0,7) confrontati con quelli dell'acciaio.

	Acciaio	GFRP	CFRP	AFRP
Tensione di rottura [MPa]	483 - 690	483 -1600	600 - 3690	1720 - 2540
Deformazione a rottura [%]	6,0 - 12,0	1,2 - 3,1	0,5 - 1,7	1,9 - 4,4
Tensione di snervamento [MPa]	276 - 517	/	/	/
Deformazione allo snervamento [%]	0,14 - 0,25	/	/	/

Figura 4.10 – Confronto tra i valori tipici delle barre in acciaio e quelle in FRP (aventi frazione volumetrica compresa tra lo 0,5 e lo 0,7) [27]

RESISTENZA A COMPRESSIONE

Nel caso di sforzi di compressione le barre in FRP sono caratterizzate da una proporzionalità diretta tra le deformazioni e i carichi applicati, con pendenza della curva costante fino al raggiungimento della rottura fragile. Il comportamento può quindi essere espresso con la legge di Hooke:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c$$

Le barre in FRP possiedono una resistenza alla compressione inferiore rispetto a quella di trazione e la rottura può avvenire a causa di uno dei seguenti fenomeni:

- Frattura per trazione trasversale (dovuta agli sforzi generati dall'effetto Poisson);
- Microinstabilità delle fibre;

- Rottura a taglio delle fibre.

La tipologia di rottura dipende dalla tipologia di fibre, dalla frazione volumetrica di quest'ultime e dal tipo di resina utilizzata come di matrice. In generale, si è osservato che ad una resistenza a trazione maggiore è associato un comportamento a compressione migliore ad eccezione delle barre in AFRP [27].



Figura 4.11 - Modalità di rottura a compressione di una barra in FRP [11]

Attualmente non esiste un metodo standardizzato per caratterizzare il comportamento a compressione delle barre in FRP. Le diverse norme e raccomandazioni segnalano la necessità di riferirsi ai valori dichiarati da produttore, il quale deve allegare una descrizione dei test effettuati per determinare il comportamento a compressione del prodotto da lui fornito.

LEGGE COSTITUTIVA

Avendo appena descritto il modulo elastico, il comportamento a trazione e quello a compressione, è a questo punto possibile introdurre la legge costitutiva dei materiali compositi fibrorinforzati definita dalle seguenti espressioni:

$$\sigma_t = E_t \cdot \varepsilon_t$$

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c$$

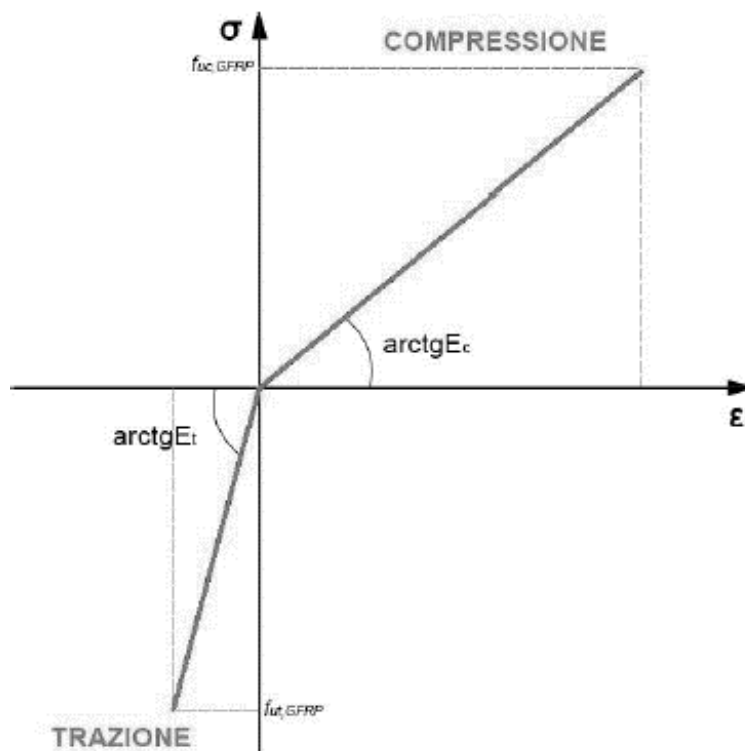


Figura 4.12 – Legge costitutiva GFRP [14]

COMPORAMENTO A TAGLIO

Le barre in composito sono relativamente deboli se sollecitate da un'azione di taglio interlaminare dove la resina della matrice giace tra le diverse fibre. Tale comportamento può essere migliorato orientando alcune fibre con un angolo diverso rispetto all'andamento longitudinale dell'elemento. Come nel caso della compressione, non esiste ancora un metodo di prova standardizzato per determinare il comportamento a taglio delle barre [27].

FORZA DI LEGAME E INFLUENZA DEI TRATTAMENTI SUPERFICIALI

Come accennato in precedenza, le barre in FRP possono essere caratterizzate da diverse finiture superficiali che hanno lo scopo, in linea teorica, di impedire lo scorrimento rispetto ai materiali limitrofi. A differenza però dell'acciaio, non esiste una tipologia di superficie standardizzata per gli elementi polimerici fibrorinforzati, così come non esiste nemmeno una teoria consolidata in grado di definire il comportamento all'interfaccia tra i diversi materiali. Nel corso degli ultimi decenni, diversi studi si sono susseguiti con lo scopo di analizzare l'effetto della finitura superficiale sulla forza di legame generata tra elementi composti fibrorinforzati e calcestruzzo. Sebbene non sia lo scopo di questo elaborato analizzare il comportamento all'interfaccia tra il calcestruzzo e gli elementi in FRP, in mancanza di studi specifici sull'argomento, di seguito si riporta lo studio effettuato da *Sandor et György* [32] in modo da fornire al lettore un'idea generale sull'effetto dato dalle differenti finiture superficiali.

Nella ricerca in questione è stata effettuata un'estensiva campagna sperimentale con lo scopo di indagare quanto le caratteristiche superficiali delle barre in FRP siano in grado di influenzare il legame che si instaura all'interfaccia con il calcestruzzo. Nello specifico sono state utilizzate barre costituite da fibre di carbonio (CFRP), vetro (GFRP) e basalto (BFRP) aventi diverse finiture superficiali:

- Rivestite con la sabbia;
- Avvolte elicoidalmente;
- Avvolte elicoidalmente e rivestite con la sabbia;
- Dentate;
- Nervate.

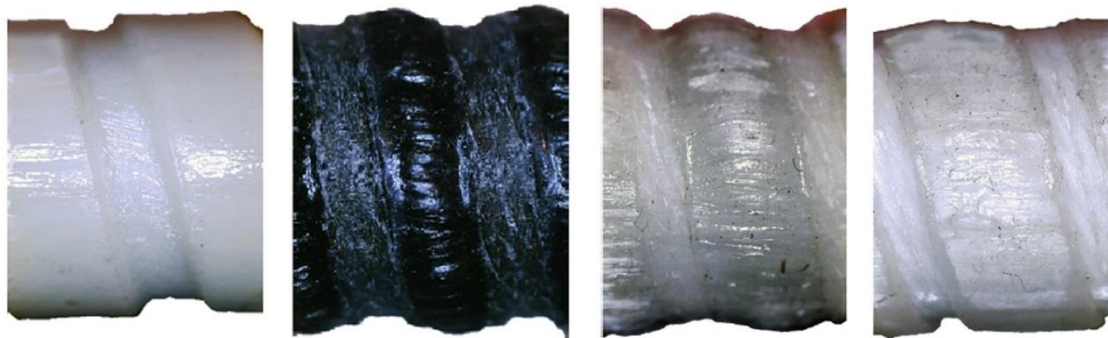


Figura 4.13 - Dettaglio delle deformazioni superficiali delle barre in FRP. Da sinistra a destra: GFRP dentato, BFRP nervato, GFRP nervato e GFRP nervato [32]

I risultati ottenuti mostrano come la forza di legame possa variare di molto per ciascuna delle categorie superficiali. Ad esempio, nelle barre ricoperte di sabbia il loro comportamento all'interfaccia dipende dal tipo, dalla qualità e quantità dei grani (Figura 4.14). Un altro esempio è quello che riguarda le sezioni nervate in cui la forza di legame è in funzione della geometria delle zigrinature (nella Figura 4.13, si nota la differenza di zigrinatura nelle ultime due immagini).



Figura 4.14 - Dettaglio di alcune barre non deformate superficialmente e sabbiate.

È inoltre evidenziato come i valori di adesione più elevati sono stati raggiunti dalle barre sabbiate, mentre quelli peggiori sono stati registrati nelle sezioni dentate. Il valore di scorrimento più alto è stato osservato per le barre avvolte elicoidalmente mentre quello più basso per le sezioni sabbiate.

Le barre nervate, nonostante non siano quelle con valori di adesioni maggiori, offrono migliori vantaggi rispetto alle altre in quanto caratterizzate da un'eccellente rigidità di adesione, un'elevata forza di adesione e un comportamento duttile dopo il picco di carico.

Infine, un altro aspetto da tenere in considerazione nel comportamento all'interfaccia tra i diversi materiali è la dimensione delle barre. Sezioni dalle grosse dimensioni hanno mostrato un comportamento migliore rispetto a quelle di diametro inferiore.

4.2.3 PRESTAZIONI A LUNGO TERMINE

L'umidità ambientale è solamente uno tra i possibili fattori che possono pregiudicare le prestazioni meccaniche degli elementi compositi fibrorinforzati. Il contatto con l'acqua è però particolarmente pericoloso in quanto il deterioramento delle barre in FRP inizia quando ioni liberi di idrossido (OH) si diffondono all'interno della matrice dell'elemento. Le resine più soggette a questo fenomeno sono quelle appartenente al gruppo delle "estere" come, ad esempio, le poliestere e le vinilestere. All'opposto, risentono meno del fenomeno dell'idrolisi le matrici non contenenti all'interno della loro struttura molecolare gruppi esteri, come le resine epossidiche [31].

Oltre a ciò, giocano un ruolo chiave anche la temperatura e la presenza di agenti chimici come il cloruro di sodio NaCl (sale) e, in generale, tutte quelle sostanze ad elevata basicità (calcestruzzo). Poiché la maggior parte degli FRP è costituito da matrici termoindurenti, la temperatura gioca un ruolo chiave in quanto, se superata la temperatura di transizione vetrosa della resina, si assiste ad un repentino deterioramento delle prestazioni meccaniche del composto. Altro aspetto da tenere in considerazione è l'alcalinità dell'ambiente a contatto con gli FRP, in particolar modo per quanto riguarda le barre in GFRP.

Rispetto ad altre tipologie di fibre, quelle a base di vetro risentono fortemente dell'alcalinità dell'ambiente, come dimostrato dalla ricerca condotta da *Porter ML et Barnes BA al. 1997* [33]. Nello studio sono state testate fibre in GFRP e CFRP sottoposte a condizioni di degrado accelerato (tre mesi in ambiente a temperatura costante di 60°C e pH compreso tra 12,5 e 13). I risultati ottenuti hanno

evidenziato come le fibre in GFRP siano suscettibili agli ambienti alcalini perdendo tra il 55 e il 73% della loro resistenza a trazione. Per quanto concerne invece il carbonio, le fibre testate non hanno risentito dalle condizioni di degrado. Tali conclusioni sono state confermate successivamente in diversi studi tra i quali, per esempio, quello condotto da *Yi Chen et Al.* [34] e recentemente quello di *F. Aydin et S. Arslan* [31]. In quest'ultimo, sono stati eseguiti una serie di test per valutare l'influenza dei fattori ambientali sul comportamento delle barre in FRP. Nello specifico, la ricerca si è basata sull'esecuzione di una serie di prove di trazione per valutare la durabilità delle performance di diverse tipologie di barre in FRP soggette a cinque differenti condizioni ambientali. Le prove sono state pensate in modo da simulare gli effetti dovuti alla presenza di umidità, di sostanze alcaline, dell'acqua di mare, di aria calda e di quella fredda. Sono state utilizzate barre in fibre di carbonio, di vetro e aramidiche accomunate dalla stessa matrice a base di poliestere. I risultati dei test hanno evidenziato come la presenza di acqua sia in grado di alterare le proprietà delle barre in GFRP, la temperatura di quelle in CFRP e nessuna delle condizioni ambientali alteri significativamente il comportamento di quelle in CFRP. Di seguito vengono riportati i grafici sforzo - deformazione ottenuti dalle prove.

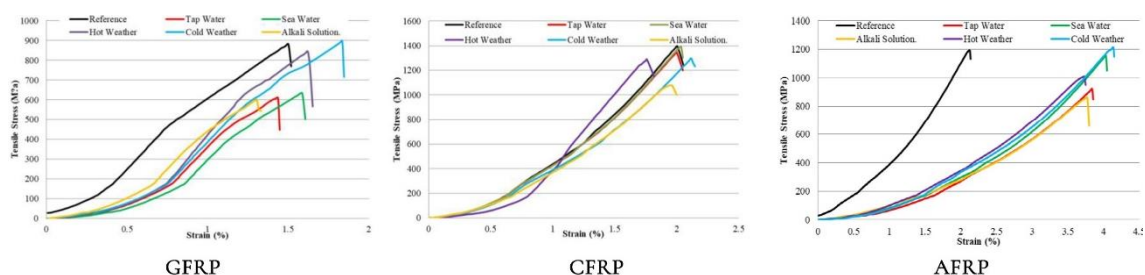


Figura 4.15 - Grafici sforzo - deformazione per barre in GFRP, CFRP e AFRP nelle diverse condizioni ambientali [31]

Le barre a base di fibre di vetro (GFRP) hanno mostrato una notevole variabilità delle prestazioni in funzione delle condizioni ambientali a cui sono soggette. In tutti i casi si è osservato alla riduzione della rigidità, con una diminuzione del

modulo elastico compresa tra il 20 e il 40%. La temperatura dell'aria non influenza la resistenza ultima, cosa non vera per quanto riguarda il contatto con l'umidità, l'acqua salata e le soluzioni alcaline, condizioni che hanno causato una riduzione della resistenza ultima di circa il 40%.

Le barre a base di fibre di carbonio (CFRP) non risentono significativamente delle condizioni ambientali a cui sono esposte; infatti, la rigidezza e il modulo elastico rimangono pressoché invariati. Unica eccezione è nel caso della presenza di soluzioni alcaline che hanno ridotto la capacità resistente del 20%.

Le barre a base di fibre aramidiche (AFRP) sono caratterizzate dalla medesima resistenza e rigidezza nelle differenti condizioni dei test. Rispetto al campione di riferimento testato in ambiente standardizzato, si è assistito ad una notevole riduzione della rigidezza con una diminuzione del modulo elastico compresa tra il 40 e il 60%. Nel caso di presenza di aria calda, di umidità e di soluzioni alcaline è diminuita, oltre alla rigidezza, anche la resistenza ultima con percentuali comprese tra il 15 e il 25%. Nel caso di aria fredda, si è osservato un aumento dell'1% della resistenza ultima. Di seguito vengono riportati i dati numerici ottenuti.

Condizioni	AFRP		CFRP		GFRP	
	R. trazione media [MPa]	R. trazione residua [%]	R. trazione media [MPa]	R. trazione residua [%]	R. trazione media [MPa]	R. trazione residua [%]
Standard	1191	100	1394	100	881	100
Umidità	921	77	1346	96	653	74
Acqua salata	1157	97	1392	99	633	71
Sol. alcalina	860	72	1078	77	601	68
60°C	1009	84	1288	92	844	95
-37°C	1212	101	1297	93	898	101

Figura 4.16 - Risultati dell'esperimento [31]

Capitolo 5

TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO

Gli interventi di consolidamento si basano sull'esigenza di aumentare le prestazioni di uno o più elementi della struttura portante di una costruzione. Tale necessità nasce dal mutamento delle condizioni di esercizio; in particolare, possono verificarsi aumenti dei carichi agenti, generalmente dovuti alla modifica della destinazione d'uso dell'edificio, oppure la diminuzione della capacità portante degli elementi resistenti. Quest'ultima può dipendere da molteplici fattori quali attacchi biotici, da parte di funghi o insetti, oppure abiotici, da parte di acqua e fuoco. Qualunque sia la causa che ha portato alla necessità dell'intervento, bisogna rispettare il presupposto che ogni attività da compiere sia eseguita nello spirito di conservazione dell'opera originaria. Infatti, un'attività di consolidamento viene eseguita solamente dopo che è stata scartata l'ipotesi "zero", ovvero quella che prevede la rimozione e sostituzione degli elementi in favore di componenti più performanti.

Accantonata l'idea di sostituzione degli elementi, risulta utile riferirsi ad una sequenza logica di attività che consentono la corretta progettazione ed esecuzione dell'intervento.

Si procede in primo luogo con la valutazione preventiva dello stato di fatto il cui scopo è quello di definire il comportamento statico dell'edificio, lo stato di conservazione delle singole membrature e la loro completa caratterizzazione; aiuta in quest'ottica fare una valutazione del contesto storico entro cui è inserita la struttura da analizzare che permette di ottenere informazioni relative ai metodi costruttivi, all'essenze legnose disponibili e i trattamenti tipici del periodo di costruzione dell'edificio in questione.

Successivamente si determinano i requisiti per l'applicabilità del rinforzo, la cui condizione fondamentale è l'accessibilità. La situazione ideale risulta essere quella in cui l'elemento viene temporaneamente rimosso anche se, in generale, un intervento di consolidamento può essere eseguito in presenza di una qualsiasi condizione di carico; da notare che, se il rinforzo viene applicato senza procedere allo scarico preventivo della struttura, esso può ritenersi efficace per i soli ulteriori carichi aggiunti e non produce alcuno sgravio nei confronti delle sollecitazioni preesistenti [15]. Altro aspetto importante è quello relativo allo stato di conservazione poiché, per esempio nel caso del legno, il materiale ammalorato non è in grado di trasmettere gli sforzi al rinforzo rendendo vano l'intervento. Ultimate le fasi valutative, si conclude la sequenza con la scelta della tecnica più idonea.

Nel caso di elementi lignei, ogni intervento deve fare in modo di non mettere in crisi il materiale e quindi è consigliabile [4]:

- Utilizzare materiali che non inducano nel tempo degrado di tipo meccanico o biologico nel legno;
- Consentire la ventilazione delle tesate soprattutto per le travi che si appoggiano direttamente sui muri esterni, evitando di affogarle nella muratura;
- Favorire la ventilazione, per quanto possibile, anche della parte superiore della trave in quanto è la zona in cui è più facile il ristagno e la condensa d'acqua.

Le tecniche di rinforzo di travi più usuali sono l'incollaggio di una tavola in legno sul bordo teso, il rafforzamento con elementi metallici e in rinforzo tramite l'utilizzo di lamine, barre o tessuti in materiale composito; mentre per i solai sono noti il rafforzamento con elementi lignei e il rinforzo con una soletta in calcestruzzo armato.

5.1 CONSOLIDAMENTO DI SOLAI

La progettazione di sistemi strutturali, in particolar modo dei solai, deve rispettare i criteri di resistenza e quelli di rigidezza. Ciò significa che le strutture devono essere resistenti e poco deformabili, quindi abbastanza rigide sia per evitare danneggiamenti alle sovrastrutture (come pavimenti, partizioni verticali, ecc.) sia per migliorare il comfort abitativo limitando, per esempio, le vibrazioni dovute al calpestio e migliorando così anche l'insonorizzazione.

Inoltre, le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni richiedono che i solai svolgano la funzione di diaframmi rigidi, elementi in grado di assolvere la funzione di ripartizione delle azioni orizzontali tra le pareti strutturali e di vincolo nei confronti delle azioni fuori del piano delle pareti [35]. Per espletare tale funzione, devono essere sufficientemente rigidi e ben collegati alle pareti resistenti a taglio.

Nella maggior parte degli edifici esistenti, i vecchi solai in legno non sono in grado di rispondere ai requisiti normativi ed è quindi necessario intervenire con operazioni di consolidamento aventi lo scopo di aumentarne la resistenza e la rigidezza.

5.1.1 RINFORZO CON LEGNO

La tecnica in questione è basata essenzialmente sull'aggiungere un nuovo strato di rinforzo in legno orientato ortogonalmente al solaio già esistente (Figura 5.1). A livello esecutivo, la tecnica consiste, come intervento iniziale, la messa a nudo dell'assito presente sopra le travi; successivamente si procede con la preparazione dei supporti, prevedendo un'adeguata pulizia e piallatura delle superfici se necessario ed infine si termina inchiodando le nuove tavole al solaio esistente. Quest'ultime, prima di essere utilizzate, dovranno essere stoccate e lasciate riposare nel luogo dell'intervento in modo da garantire che all'atto della posa possiedano la stessa umidità dell'assito presente [4].

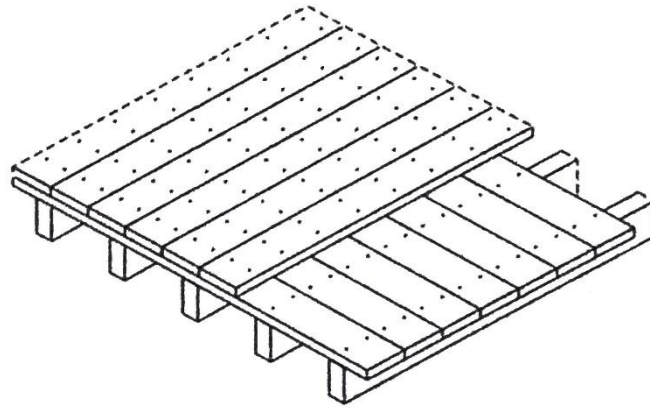


Figura 5.1 - Rinforzo di solaio in legno tramite la sovrapposizione di nuove tavole a quelle esistenti [4]

Quanto appena descritto consente di aumentare la resistenza e la rigidità del solaio, ma non lo rende idoneo a svolgere la funzione di diaframma rigido. Per consentire ciò, è necessario connetterlo con la muratura portante: una soluzione è quella di utilizzare appositi elementi in acciaio connessi per mezzo di bulloni passanti alla vecchia trave di solaio (Figura 5.2). Tali profili potranno poi essere inseriti in appositi scassi eseguiti sulla muratura portante e resi solidali tramite la realizzazione di un riempimento in calcestruzzo [4].

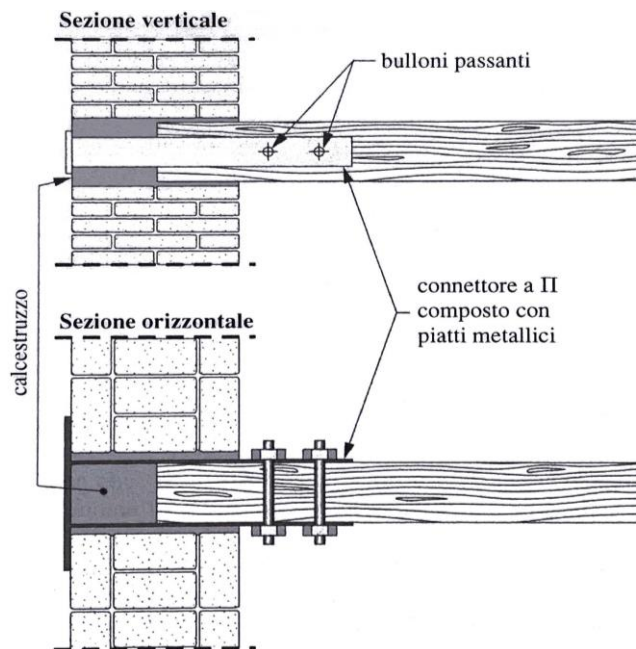


Figura 5.2 - Esempio di elementi in acciaio per il rinforzo del collegamento dei solai alla muratura [4]

5.1.2 RINFORZO CON SOLETTA IN C.A.

L'intervento consiste nel sovrapporre alla struttura esistente una cappa in calcestruzzo armato resa solidale al legno e ai muri di supporto in modo da realizzare il comportamento a diaframma dell'intera soletta. Questo tipo di accorgimento permette di considerare tale soluzione alla stregua di una mista acciaio-calcestruzzo: per effetto dei carichi verticali il calcestruzzo armato lavora prevalentemente a compressione mentre il legno a trazione, in maniera analoga alle lamiere in acciaio. È bene ricordare però che il taglio viene sopportato dalla sola sezione lignea per cui, se da un lato la cappa migliora il comportamento a flessione, dall'altro il suo peso impone un incremento dell'azione tagliente. Tale intervento, quindi, può essere eseguito solamente quando sono presenti pareti sufficientemente resistenti. Inoltre, anche le travi in legno devono essere abbastanza forti per garantire il corretto trasferimento dei carichi.

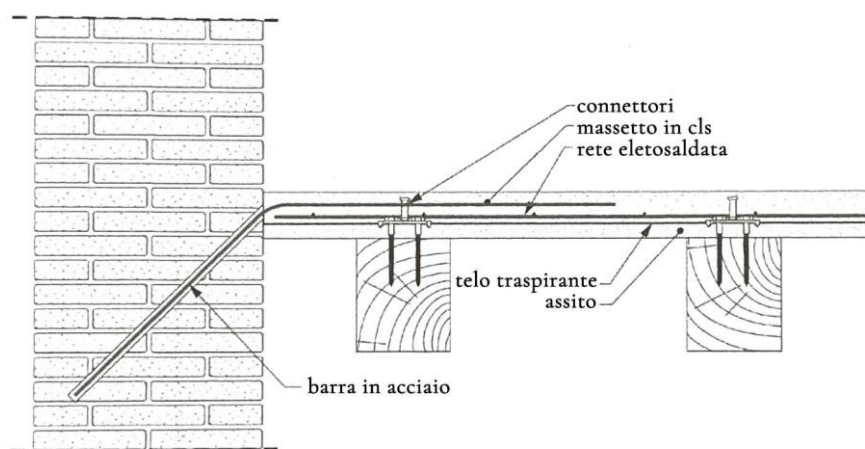


Figura 5.3 - Connessione del solaio in direzione perpendicolare allo sviluppo delle travi [4]

Appurato che gli elementi portanti sono in grado di resistere correttamente al nuovo tipo di sollecitazione, il passo successivo consiste nella scelta dei connettori necessari per garantire monolitismo tra calcestruzzo e legno: i connettori a piolo e ramponi sono un ottimo esempio di soluzione, ma non sono gli unici presenti sul mercato.

Infine, risulta fondamentale collegare la nuova soletta ai muri esistenti secondo vincoli bilateri. Per fare ciò è possibile annegare delle barre in acciaio nel getto in calcestruzzo e vincolare le stesse alla parete per mezzo di iniezioni di malta cementizia. Le barre dovranno avere sufficiente lunghezza per evitare che si sfilino dalla posizione desiderata.

Esecutivamente, l'intervento inizia con la messa a nudo dell'assito esistente e successiva pulitura dello stesso. Si procede con la posa di un telo in materiale impermeabile per impedire che il legno entri a contatto diretto con il getto in calcestruzzo, evitando così fenomeni di degrado legati alla umidità e all'alcalinità dell'impasto. Si posiziona l'eventuale materassino in materiale isolante e si procede con la messa in opera dei connettori e delle barre necessarie a vincolare il solaio alla parete. Infine, dopo avere disposto la rete elettrosaldata, si procede con il puntellamento del solaio e successivo getto del calcestruzzo.

5.2 CONSOLIDAMENTO DI TRAVI

5.2.1 PLACCAGGIO CON TAVOLE IN LEGNO

Come suggerisce il titolo del capitolo, questa tecnica consiste nell'aggiungere delle tavole in legno alla sezione già esistente della trave, disposte a piacimento tra intradosso, estradosso ed i lati. Si tratta di una tecnica relativamente semplice che nasce da una considerazione spontanea: se la trave è sana, ma non riesce a sopportare i carichi agenti, significa che l'area resistente è troppo piccola e quindi deve essere aumentata. Ingrandire la sezione resistente comporta un miglioramento di tutte le caratteristiche dell'elemento e non solo della resistenza a flessione.

I vantaggi di questa tecnica consistono nell'invariabilità dell'aspetto estetico, nel miglioramento, oltre che della resistenza meccanica, anche della resistenza al fuoco ed infine la possibilità di operare in sito senza la necessità di smontare la trave (in questo caso è possibile applicare il rinforzo solamente nella zona di intradosso).

Per la corretta riuscita di un intervento di questo tipo, bisogna però rispettare alcuni criteri fondamentali:

- È opportuno utilizzare tavole aventi essenza uguale, o il più simile possibile, a quella dell'elemento esistente per evitare la creazione di stati tensionali di sforzo dovuti a comportamenti differenziali per variazioni di umidità e temperatura;
- È necessario stoccare gli assi di rinforzo nello stesso ambiente in cui si tratterà la trave; ciò permette di eliminare eventuali sforzi tangenziali parassiti nella zona di interfaccia tra vecchio e nuovo;
- Per un corretto incollaggio tra le superficie degli elementi è opportuno utilizzare colle di tipo epossidico o poliuretano, quest'ultime preferibili poiché dotate di modulo elastico simile a quello del legno.

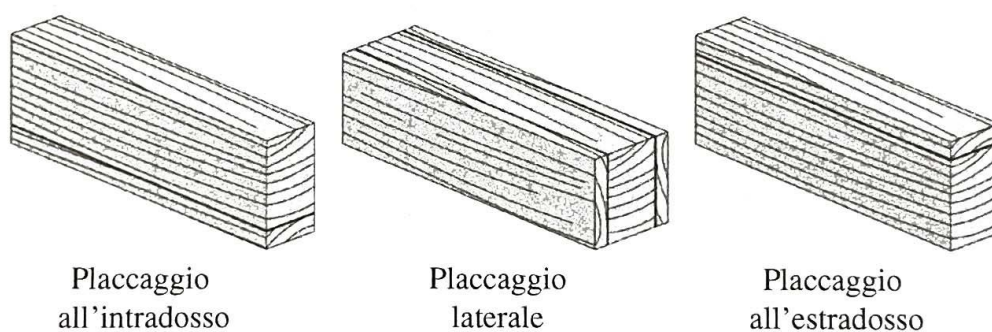


Figura 5.4 - Vari tipi di placcaggio con tavole di legno [4]

La prima delle fasi esecutive di questa tecnica consiste nello smontare la trave. Successivamente si preparano le superfici che entreranno a contatto con il rinforzo: questa procedura è fondamentale per garantire una corretta interfaccia in grado di trasmettere gli sforzi. Le superfici da trattare vengono dapprima piallate, in modo da regolarizzarle, e poi pulite per far sì che i residui rimasti vengano eliminati. In seguito, si applicano le tavole di rinforzo mediante la colla scelta e, se necessario, ad avvenuta maturazione di quest'ultima, si applicano i collegamenti meccanici quali chiodi, spinotti, bulloni in grado anche loro di trasmettere le tensioni agenti. Infine, l'elemento rinforzato può essere rimontato nella posizione originale.

5.2.2 RINFORZO CON ELEMENTI METALLICI

L'acciaio, sotto forma di lamine, può essere utilizzato per placcare le travi da consolidare aumentandone la resistenza a flessione. Questa pratica però è in contrasto con il principio di conservazione dell'opera originaria poiché altera l'aspetto estetico degli elementi da rinforzare.

L'acciaio è quindi un ottimo materiale da utilizzare nel caso di rinforzo delle estremità degli elementi lignei, ovvero quelle parti non visibili soggette a grossi sforzi di taglio e a contatto diretto con le pareti, spesso in muratura. Le tecniche di intervento sono numerose e differenti tra loro. L'operazione più frequente è

quella che fa uso di scarpe in acciaio formate dall'unione di lamierini metallici zincati dallo spessore di 2-4 mm, che possono avere svariate geometrie a seconda dell'esigenza. Questi elementi sono collegati alle parti in legno mediante connettori meccanici. È sconsigliato utilizzare come collegamento gli adesivi poiché non permettono alle testate di respirare correttamente.

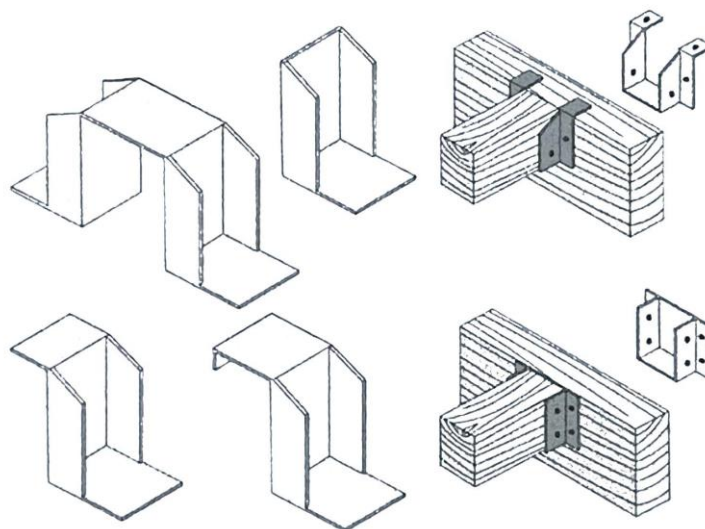


Figura 5.5 - Esempi di scarpe metalliche [4]

Un'altra tipologia di intervento è quella che prevede la posa di un profilo metallico all'intradosso della trave migliorandone il comportamento a flessione. Questo intervento, oltre ad essere invasivo, altera l'aspetto estetico finale, ma è l'ideale quando si necessita di grossi incrementi di resistenza e/o rigidità. Oltre ad essere di difficile realizzazione pratica, questa operazione deve essere progettata nel minimo dettaglio poiché lo stato tensionale degli elementi varia in base alle ipotesi progettuali; nello specifico, bisogna tenere in considerazione il tipo di unione tra gli elementi e il tipo di precarico applicato al profilo in acciaio. Inoltre, è necessario progettare i collegamenti in modo che siano in grado di assecondare le differenti variazioni volumetriche dei materiali, essendo il legno sensibile ai cambi termo-igrometrici mentre l'acciaio solamente a quelli termici.

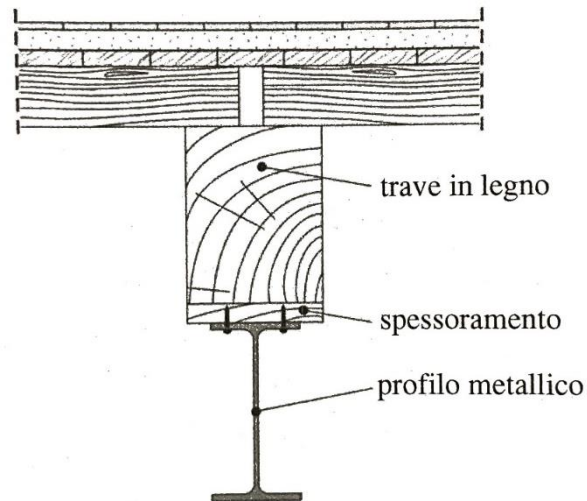


Figura 5.6 - Rinforzo a flessione con un profilo in acciaio posto all'intradosso della trave [4]

Un'altra tipologia di rinforzo che altera l'aspetto estetico è quella dei tiranti e dei trefoli in acciaio. Si tratta di elementi visibili, di facile applicazione e rimozione, poiché sono posizionati esternamente agli elementi lignei e collegati a questi mediante giunzioni di tipo meccanico. Il naturale movimento delle strutture in legno, gli effetti delle variazioni termiche e il comportamento reologico del materiale possono produrre nel tempo un rilassamento degli stessi tiranti, che devono quindi essere periodicamente ispezionati ed eventualmente rimessi in tensione [11].

5.2.3 RINFORZO CON ELEMENTI IN CFRP

L'uso dei materiali compositi nell'ingegneria civile, in particolar modo per le strutture lignee, si è sviluppato solamente negli ultimi decenni e, per questo motivo, solleva ancora qualche dubbio in tema di efficacia a lungo termine.

Le tecniche di rinforzo che utilizzano materiali compositi consentono di non smontare la sovrastante struttura, nello spirito della conservazione del patrimonio edilizio storico. Esistono numerose tipologie di intervento in base alle necessità, dagli interventi più invasivi come il placcaggio a quelli meno invasivi come la Near-Surface Mounted, ma il connubio legno-FRP offre diversi vantaggi, come la leggerezza di entrambi i materiali, la facilità di messa in opera e l'assenza

della necessità di smontare la trave. Tutto ciò comporta evidenti risparmi di tempo e manodopera ma, di contro, sono presenti alcuni svantaggi, primo fra tutti il fatto che vi siano grosse differenze di comportamento tra i due materiali, specialmente per quanto concerne variazioni termo-igrometriche. Ma uno dei problemi maggiori che si rileva nel placcaggio con FRP di travi in legno, è rappresentato dall'unione di due materiali molto diversi per quanto riguarda caratteristiche meccaniche e comportamento in relazione all'umidità e al calore. Inoltre, non è possibile adottare connettori meccanici a causa della fragilità a taglio dell'FRP e, di conseguenza, l'unica unione possibile è quella che prevede l'utilizzo di adesivi, nella fattispecie quelli epossidici poiché risultano i migliori da questo punto di vista in quanto chimicamente compatibili con il legno e in grado di assecondarne gli spostamenti relativi dovuti a variazioni di umidità.

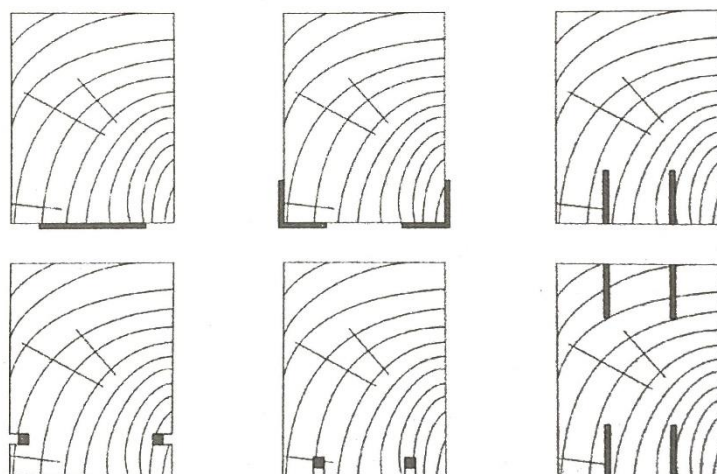


Figura 5.7 - Esempi di posizioni e di forme dell'FRP per il rinforzo di una trave in legno [4]

Risulta evidente che per un'ottima riuscita dell'intervento è necessario procedere con una buona messa in opera per non vanificare l'intervento di rinforzo; in particolare, bisogna fare sì che il collante bagni adeguatamente e uniformemente la superficie della trave, che deve essere in buono stato (con superfici regolari e non danneggiate) e pulita da polvere, olii e strati di vernice. Nonostante ciò, può verificarsi il fenomeno della delaminazione che potrebbe compromettere

l'efficacia dell'intervento. La delaminazione, ovvero il distacco del rinforzo dalla trave, può verificarsi a seguito di [4]:

- Crisi locale del legno, a causa della presenza di difetti o nodi soprattutto nella zona tesa;
- Irregolarità dell'interfaccia, legata alla non planarità della superficie lignea che induce uno stato tensionale perpendicolare al piano di incollaggio, tendendo così a staccare il rinforzo;
- Incendio, avendo gli adesivi epossidici una temperatura di transizione vetrosa al di sotto di 70°C;
- Umidità del legno, che può causare rigonfiamenti e conseguente distacco dell'adesivo.

5.2.4 SOSTITUZIONE O RIMOZIONE PARZIALE DEGLI ELEMENTI DANNEGGIATI

Nel caso in cui non sia possibile recuperare, nella sua interezza o in parte, la trave in legno a causa di un degrado avanzato, conviene sostituire l'elemento con uno nuovo. Prima della posa della nuova sezione, è bene che siano analizzate le cause che hanno portato alla necessità di intervenire per fare in modo che non si ripresentino in futuro. È buona norma sostituire la trave ammalorata con una avente la stessa essenza e le stesse dimensioni e, se ciò non è possibile, utilizzarne una in legno lamellare con dimensioni simili a quella originale.

Talvolta può capitare che il legno sia danneggiato solamente in corrispondenza delle testate, ovvero quelle parti a contatto diretto con una parete. In questo caso è possibile sostituire solamente la parte danneggiata con una protesi in legno lamellare, in betoncino epossidico oppure in metallo. Nello specifico, per quanto riguarda la protesi in legno lamellare, le parti ammalorate vengono fresate in modo da ottenere una testa scalinata che possa fungere da base per l'incollaggio delle nuove lamelle. Per quanto riguarda invece quelle con betoncino epossidico,

le parti danneggiate vengono tagliate e successivamente si eseguono dei fori in cui vengono inserite delle barre d'armatura. Quest'ultime sono da un lato fissate al legno mediante una resina epossidica e dall'altro annegate nel getto di betoncino. Infine, nel caso di protesi metallica, dopo aver tagliato la parte ammalorata, il profilo di rinforzo viene inserito in un intaglio eseguito nella parte rimanente della trave. La protesi viene fissata mediante connettori meccanici e successivamente ricoperta con tavole in legno per ripristinare l'aspetto originario.

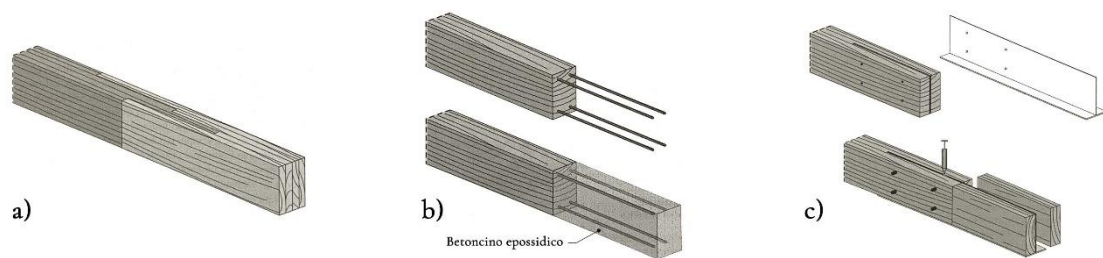


Figura 5.8 - Ripristino di una trave con l'uso di legno lamellare (a) , betoncino epossidico (b) e protesi metallica (c) [4]

5.3 NEAR SURFACE MOUNTED

La Near Surface Mounted, abbreviata con l'acronimo NSM, è una tecnica che consiste nell'inserire i profili di rinforzo all'interno di scanalature ricavate sulle superfici degli elementi da consolidare (Figura 5.9). Rispetto al semplice placcaggio con tessuti o lamine poltruse in FRP, intervento denominato EBR (External Bonded Reinforcement), la NSM presenta diversi vantaggi: tra cui la minore tendenza alla delaminazione del rinforzo, la possibilità di rafforzare anche travi non perfettamente squadrate, la minore esposizione dei profili di rinforzo agli agenti esterni, quali fenomeni atmosferici, incendi e atti vandalici, e la quasi invariabilità dell'aspetto estetico delle travi originali.

Questa tecnica è stata sviluppata in Europa nei primi anni '50 con lo scopo di rinforzare strutture in calcestruzzo armato. Uno dei primi interventi fu nel 1948 quando un ponte, situato in Svezia, necessò di un intervento di rinforzo in seguito ad un eccessivo assestamento della gabbia di armatura durante la fase di costruzione [36]. Da allora sono stati fatti numerosi studi sull'efficacia della NSM e si può affermare che, per il consolidamento di elementi in CA, si è ormai giunti ad una teoria consolidata. Ciò non è vero però per quanto concerne il rafforzamento di elementi in legno poiché, ad oggi, rimangono aperte diverse questioni come, ad esempio, l'efficacia dell'incollaggio.

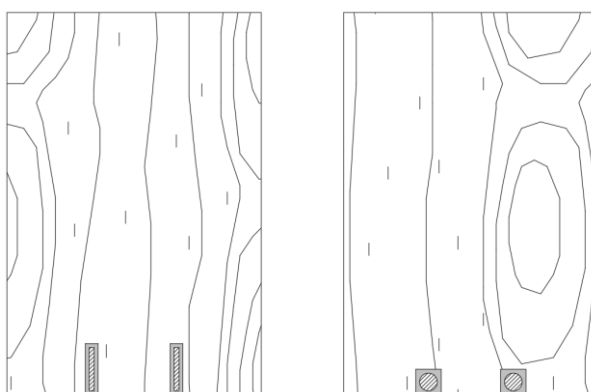


Figura 5.9 - Tecnica NSM con l'utilizzo di lamine e barre

Con la NSM si possono utilizzare anche profili in acciaio, ma solitamente si ricorre a materiali compositi poiché quest'ultimi garantiscono un ottimo rapporto peso/rigidità e peso/resistenza, una migliore resistenza alla corrosione e una maggiore facilità e velocità di installazione dovuta alla minore densità. Inoltre, gli FRP presentano buone caratteristiche in relazione al comportamento a lungo termine e alle alte temperature [37].

Esistono in commercio diverse tipologie di rinforzo aventi geometria e finitura superficiale differenti. Per quanto riguarda le sezioni, i profili possono essere circolari, rettangolari o quadrati; la finitura superficiale può essere liscia, nervata, sabbiata o a forma di spirale.

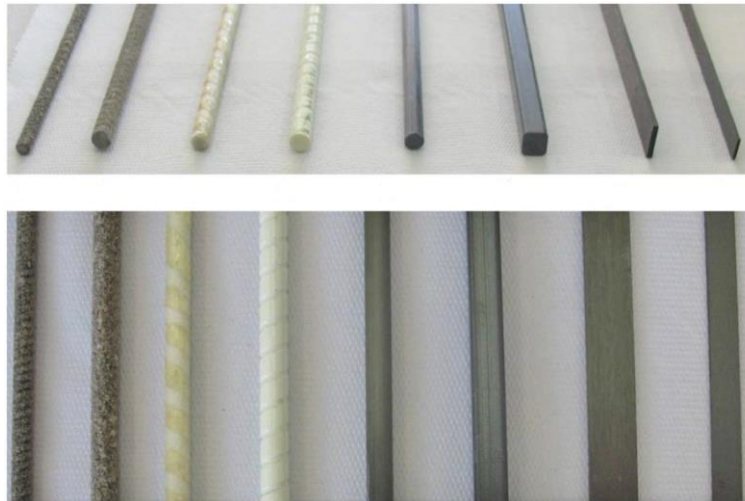


Figura 5.10 - Diverse tipologie di profili in FRP [38]

Nonostante i dubbi ancora irrisolti, i test fino ad oggi condotti consentono di affermare che la NSM-FRP è in grado di aumentare la resistenza degli elementi in legno. *Gentile et al.* [16] mettono in evidenza come l'utilizzo di barre in GFRP consenta di migliorare la resistenza ultima di una trave. In particolare, dopo una serie di test eseguiti con barre di diametro differente, si è assistito ad un incremento della resistenza compreso tra il 18 e il 46%. *Borri et al.* [39] mostrano come l'utilizzo di barre in CFRP sia un'alternativa valida a quelle in vetro: nello studio proposto si è osservato ad un incremento della capacità portante delle

travi del 52%. Nei test invece eseguiti da *Weidong Lu et al.* [40] si sono utilizzate lamine in carbonio al posto dei profili circolari. Anche in questo caso, i risultati ottenuti indicano un incremento della capacità portante e della rigidità delle travi in legno; nel particolare, l'aumento di resistenza a flessione è compreso tra il 34,2% e il 52,3% mentre quello della rigidità è racchiuso tra l'8% e il 28,5%. Ma non solo, alcune travi hanno inoltre mostrato un comportamento pseudo duttile con collasso nella zona compressa, contrariamente agli elementi non rinforzati che sono caratterizzati da un comportamento elasto-fragile con crisi nella zona tesa. Ciò permette di affermare che il comportamento a compressione del legno può essere migliorato utilizzando la tecnica NSM-CFRP con rinforzi posti nella zona tesa della trave. Tale asserzione viene confermata anche dagli studi [16], [41] in cui gli autori affermano che è possibile ridurre gli effetti delle imperfezioni locali cambiando così la modalità di crisi della trave, passando da una rottura nella zona tesa a una nell'area compressa.



Figura 5.11 - Modalità di rottura di una trave non rinforzata e di rinforzata con collasso nella zona compressa [40]

Il punto chiave per la corretta riuscita dell'intervento è l'unione tra il rinforzo e il legno; attualmente però non sono presenti teorie consolidate per la determinazione della resistenza del giunto incollato e non esiste nemmeno una prassi per la corretta esecuzione dello stesso. Un importante studio in quest'ottica è stato condotto da *Josè Sena-Cruz et al.* [37]. Nella pubblicazione sono stati

eseguiti una serie di test con lo scopo di esaminare l'influenza di due variabili principali, la lunghezza di ancoraggio e il tipo di configurazione della prova. I risultati hanno messo in evidenza che:

- La forza massima applicata F_{\max} aumenta fino ad una certa lunghezza di ancoraggio L_b , oltre ad essa la forza rimane pressoché costante;
- Il parametro di efficienza F_{\max}/F_u aumenta anch'esso fino al raggiungimento di L_b ;
- La tensione massima di rottura dell'incollaggio decresce all'aumentare della lunghezza di ancoraggio. Inoltre, lungo l'asse della lamina di rinforzo, lo stato tensionale non è costante.

Tali conclusioni sono confermate anche da *Marco Corradi et al.* [42]. Nello studio in questione sono state eseguite una serie di prove con lo scopo di investigare, oltre all'influenza della lunghezza di ancoraggio, il comportamento dei giunti incollati al variare del tipo di essenza legnosa. I risultati ottenuti hanno evidenziato tre possibili modalità di rottura: lo sfilamento del rinforzo dalla colla epossidica, la rottura per taglio del legno e la rottura a trazione delle barre in CFRP. La prima tipologia di frattura è la più frequente e si è verificata soprattutto per lunghezze di ancoraggio corte, la seconda si è riscontrata prevalentemente nei provini in legno dolce mentre la terza si è verificata nel caso di elevate lunghezze di ancoraggio.



Figura 5.12 - Modalità di rottura riscontrate rispettivamente per sfilamento del rinforzo, per rottura a taglio del legno e per rottura a trazione del rinforzo [42]

Oltre alle possibili modalità di rottura, la pubblicazione mette in evidenza che le differenze tra le due tipologie legnose sono molto piccole in termini di massima forza applicata F_{max} , lunghezza di ancoraggio L_b e tensione tangenziale τ .

Infine, lo studio sottolinea come la distribuzione dello stato di sforzo lungo le barre sia approssimativamente lineare per basse condizioni di carico, ma all'aumentare della forza applicata, la distribuzione assume un comportamento non lineare. Ciò potrebbe essere causato da un cambiamento della modalità di adesione: per basse sollecitazioni il meccanismo di adesione primario risulta essere di tipo chimico ma, all'aumentare del carico, diventa di tipo meccanico.

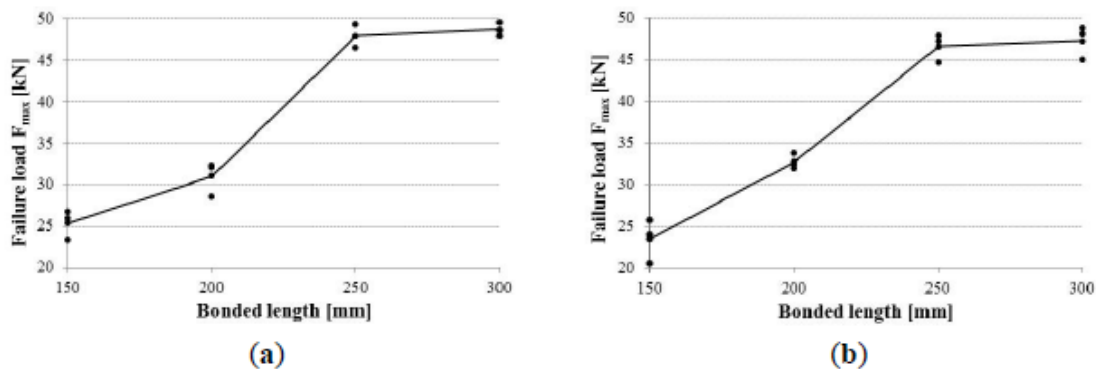


Figura 5.13 - Forza massima in relazione alla lunghezza di ancoraggio per legno di castagno (a) e per legno di abete (b) [29]

5.3.1 CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE

Per il calcolo della capacità portante di una sezione lignea rinforzata con FRP sollecitata a pressoflessione retta, si riportano le istruzioni fornite dal CNR nel documento "DT201-2005 - Istruzioni per interventi di consolidamento statico di strutture lignee mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati".

Nel caso di interventi riguardanti elementi in legno inflessi, il rinforzo esercita la sua azione principalmente nelle condizioni ultime; ciò implica che la progettazione deve essere eseguita principalmente allo Stato Limite Ultimo, limitando alla verifica tensionale per quanto riguarda lo Stato Limite di Esercizio.

Il dimensionamento del rinforzo è eseguito in modo che il punto rappresentativo sul piano (N,M) della sollecitazione di progetto sia interno al dominio di resistenza della sezione, ovvero per ogni punto deve valere la relazione:

$$M_{sd} \leq M_{Rd} (N_{sd})$$

Dove:

- M_{sd} = momento sollecitante di progetto [kNm];
- M_{Rd} = momento resistente di progetto [kNm];
- N_{sd} = sforzo normale sollecitante di progetto [kN].

Per la determinazione del dominio di resistenza della sezione vengono assunte le seguenti ipotesi:

- Conservazione della planarità delle sezioni rette;
- Perfetta aderenza tra legno e FRP;
- Legame costitutivo del legno teso, in direzione delle fibre, elastico lineare sino a rottura;
- Legame costitutivo del legno compresso, in direzione delle fibre, elastoplastico;
- Legame costitutivo dell'FRP elastico lineare fino a rottura;
- Crisi dell'elemento inflesso causata sempre dal raggiungimento delle deformazioni ultime del materiale legno, in zona compressa o in zona tesa.

Le possibili condizioni di crisi della sezione corrispondono al raggiungimento di una delle seguenti situazioni (Figura 5.14):

1. Dilatazione ultima del legno con sezione interamente tesa;
2. Dilatazione ultima del legno con zona compressa in fase elastica;
3. Dilatazione ultima del legno teso con zona compressa in fase plastica;
4. Deformazione ultima a compressione con rinforzo teso;
5. Deformazione ultima a compressione al lembo superiore con rinforzo compresso.

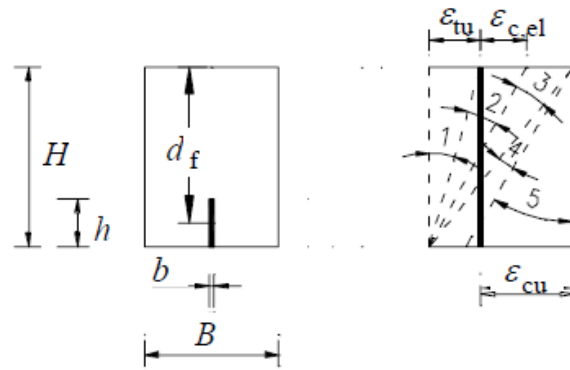


Figura 5.14 - Regioni limite [15]

Assumendo:

- N = rapporto tra lo sforzo normale N_{sd} e la quantità $B \cdot H \cdot f_{cu}$ [1];
- M = rapporto tra il momento M_{Rd} e la quantità $B \cdot H^2 \cdot f_{cu}$ [1];
- ζ = rapporto tra la distanza dell'asse neutro dalle fibre superiori (y) e l'altezza della sezione trasversale (H) [1].

e imponendo:

- ε_s = deformazione longitudinale delle fibre del lembo superiore [1];
- ε_{tu} = dilatazione ultima del legno [1];
- ε_i = deformazione longitudinale delle fibre al lembo inferiore [1];
- η = rapporto tra la resistenza ultima a trazione e quella ultima a compressione del legno [1];
- q_{frp} = rapporto tra la sezione trasversale del legno e quella del rinforzo [1];
- n = rapporto tra il modulo di elasticità normale a trazione del rinforzo di FRP e il modulo di elasticità normale a trazione del legno [1];
- p_{frp} = rapporto tra la distanza del rinforzo dalle fibre superiori e l'altezza della sezione trasversale della trave [1];
- $\varepsilon_{c,el}$ = deformazione del legno compresso al limite elastico [1];
- ε_{cu} = deformazione ultima del legno compresso [1];
- k = rapporto tra la deformazione ultima e la deformazione al limite elastico a compressione [1].

È possibile scrivere le espressioni di N e M che governano le cinque regioni limite individuate nella Figura 5.14:

- **Zona 1:** raggiungimento della dilatazione ultima del legno con sezione interamente tesa (trazione con piccola eccentricità):

$$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{tu} \quad (\text{fibre superiori})$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \quad (\text{fibre inferiori})$$

$$-\infty \leq \zeta \leq 0 \quad (\text{posizione dell'asse neutro})$$

$$N_1(\zeta) = \frac{\eta}{2} \cdot \left(2 \cdot \zeta - 1 + \frac{2 \cdot \rho_{fip}}{1 - \zeta} \cdot \eta \cdot (\zeta - p_{fip}) \right)$$

$$M_1(\zeta) = \frac{\eta}{2 \cdot (1 - \zeta)} \cdot \zeta^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \cdot \zeta \right) + \eta \cdot \frac{1 - \zeta}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1 - \zeta}{3} \right) + \eta \cdot \frac{n}{1 - \zeta} \cdot (p_{fip} - \zeta) \cdot \rho_{fip} \left(p_{fip} - \frac{1}{2} \right)$$

- **Zona 2:** raggiungimento della dilatazione ultima de legno con zona compressa in fase elastica (trazione con grande eccentricità):

$$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{c,el} \quad (\text{fibre superiori})$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \quad (\text{fibre inferiori})$$

$$0 \leq \zeta \leq \frac{1}{1 + \eta} \quad (\text{posizione dell'asse neutro})$$

$$N_2(\zeta) = \frac{\eta}{2} \cdot \left(2 \cdot \zeta - 1 + \frac{2 \cdot \rho_{fip}}{1 - \zeta} \cdot \eta \cdot (\zeta - p_{fip}) \right)$$

$$M_2(\zeta) = \frac{\eta}{2 \cdot (1 - \zeta)} \cdot \zeta^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \cdot \zeta \right) + \eta \cdot \frac{1 - \zeta}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1 - \zeta}{3} \right) + \eta \cdot \frac{n}{1 - \zeta} \cdot (p_{fip} - \zeta) \cdot \rho_{fip} \left(p_{fip} - \frac{1}{2} \right)$$

- **Zona 3:** raggiungimento della dilatazione ultima del legno teso con zona compressa in fase plastica:

$$\varepsilon_{c,el} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{cu} \quad (\text{fibre superiori})$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \quad (\text{fibre inferiori})$$

$$\frac{1}{1+\eta} \leq \zeta \leq \frac{k}{k+\eta} \quad (\text{posizione dell'asse neutro})$$

$$N_3(\zeta) = \frac{\eta}{2} \cdot \left(\frac{1}{\eta^2} \cdot (\zeta - 1) + \zeta \cdot \left(\frac{2}{\eta} + 1 \right) - 1 + \frac{2 \cdot \rho_{frp}}{1-\zeta} \cdot n \cdot (\zeta - p_{frp}) \right)$$

$$M_3(\zeta) = \frac{1-\zeta}{2 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{1}{2} - \zeta + \frac{2 \cdot (1-\zeta)}{3 \cdot \eta} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(\zeta - \frac{1-\zeta}{\eta} \right) \cdot \left(1 - \zeta + \frac{1-\zeta}{\eta} \right) + \\ + \eta \cdot \frac{1-\zeta}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1-\zeta}{3} \right) + n \cdot \eta \cdot \left(\frac{p_{frp} - \zeta}{1-\zeta} \right) \cdot \rho_{frp} \cdot \left(p_{frp} - \frac{1}{2} \right)$$

- **Zona 4:** raggiungimento della deformazione ultima a compressione con rinforzo teso:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \quad (\text{fibre superiori})$$

$$\varepsilon_{cu} \cdot \frac{1 - p_{frp}}{p_{frp}} \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{tu} \quad (\text{fibre inferiori})$$

$$\frac{k}{k+\eta} \leq \zeta \leq p_{frp} \quad (\text{posizione dell'asse neutro})$$

$$N_4(\zeta) = \zeta \cdot k \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2 \cdot k^2} - \frac{1}{2 \cdot \zeta^2} + \frac{1}{\zeta} - \frac{1}{2} \right) + \rho_{frp} \cdot k \cdot n \cdot \left(1 - \frac{p_{frp}}{\zeta} \right)$$

$$M_4(\zeta) = \frac{\zeta}{2 \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{2} - \zeta + \frac{2 \cdot \zeta}{3 \cdot k} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{k} \right) \cdot \left(1 - \zeta + \frac{\zeta}{k} \right) \cdot \zeta + \\ + \frac{k}{6 \cdot \zeta} \cdot (1-\zeta)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \zeta \right) + n \cdot \frac{\rho_{frp} \cdot k}{\zeta} \cdot (p_{frp} - \zeta) \cdot \left(p_{frp} - \frac{1}{2} \right)$$

- **Zona 5:** raggiungimento della deformazione ultima a compressione al lembo superiore con rinforzo compresso:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \quad (\text{fibre superiori})$$

$$0 \leq \varepsilon_i < \varepsilon_{cu} \cdot \frac{1 - p_{frp}}{p_{frp}} \quad (\text{fibre inferiori})$$

$$p_{frp} \leq \zeta \leq \frac{k}{k-1} \quad (\text{posizione dell'asse neutro})$$

$$N_s(\zeta) = \zeta \cdot k \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2 \cdot k^2} - \frac{1}{2 \cdot \zeta^2} + \frac{1}{\zeta} - \frac{1}{2} \right)$$
$$M_s(\zeta) = \frac{\zeta}{2 \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{2} - \zeta + \frac{2 \cdot \zeta}{3 \cdot k} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{k} \right) \cdot \left(1 - \zeta + \frac{\zeta}{k} \right) \cdot \zeta + \frac{k}{6 \cdot \zeta} \cdot (1 - \zeta)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \zeta \right)$$

5.3.2 FATTORI CHE INFLUENZANO L'EFFICACIA DELL'INCOLLAGGIO

Le norme di riferimento per la progettazione strutturale, come le NTC o l'Eurocodice, non offrono nessuna indicazione specifica sui giunti incollati; inoltre, non forniscono informazioni sulla natura dell'adesivo da utilizzare o sulle caratteristiche che deve avere. Risulta quindi utile approfondire le cause che possono incidere sull'efficacia e sulla durabilità dell'adesivo, in particolare quelle citate di seguito sono quelle presenti nell'elaborato di tesi di Stefano Lopez [43].

CARATTERISTICHE DEL LEGNO: RUGOSITÀ, POROSITÀ E BAGNABILITÀ

La rugosità, chiamata anche scabrezza, è l'insieme delle irregolarità superficiali con passo relativamente piccolo, dovute al processo di lavorazione di un dispositivo meccanico, alla disomogeneità del materiale e alla eventuale presenza di vibrazioni [44]. Tale caratteristica incide fortemente sulla resistenza del giunto poiché all'aumentare della rugosità aumenta la superficie disponibile per instaurare legami chimici tra il legno e la colla, con conseguente miglioramento della forza di legame tra i due materiali. Appare evidente che trattare la superficie del legno prima dell'applicazione dell'adesivo consente di migliorare il comportamento del giunto. In cantiere, l'intervento migliore in termini di semplicità e tempo di esecuzione è la smerigliatura: operazione che consiste nel carteggiare la superficie da trattare con carta abrasiva. La carteggiatura dovrà necessariamente essere eseguita poco prima della posa della colla in modo tale da evitare il fenomeno di ossidazione del legno.

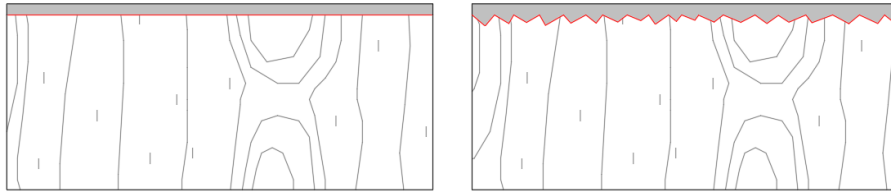


Figura 5.15 - Differenza di superficie tra una superficie liscia e una rugosa

Al parametro della rugosità è strettamente correlata **la densità** del legno; infatti, all'aumentare di quest'ultima diminuisce il valore medio di scabrezza e quindi la superficie utile disponibile. Inoltre, i legni duri hanno la tendenza a non assorbire la colla a causa dell'elevata compattezza delle loro fibre.

Infine, **la bagnabilità** di una superficie è la misura della sua attrazione, come materiale solido, verso un liquido. Essa è influenzata dall'energia superficiale, dalla chimica e dalla struttura della superficie ed è in relazione con l'angolo di contatto formato dalle tensioni interfacciali che competono alle superfici di separazione. La condizione migliore si ha per angoli teorici di 0° , mentre per quelli di 180° la superficie viene considerata non bagnabile. Analogamente all'efficacia del collegamento, la bagnabilità è inversamente proporzionale al tempo trascorso dal taglio o da eventuali trattamenti superficiali; inoltre, essa dipende dall'età del legno: legnami giovani, poiché dotati di maggiore porosità, hanno una maggiore capacità di assorbimento rispetto a quelli di età maggiore.



Figura 5.16 - Bagnabilità dell'adesivo in funzione dell'angolo di contatto [43]

ETÀ SUPERFICIALE DEL LEGNO

In precedenza, si è accennato al fatto che il processo di carteggiatura deve essere eseguito poco prima della posa della colla; ciò è dovuto al fatto che le superfici del legno, subito dopo essere state alterate, attraversano un processo di

disattivazione. Esso può essere causato da fenomeni esterni, come quelli ossidativi e quelli derivanti dalla pirolisi, o da fenomeni interni (auto-contaminazione). L'auto-contaminazione è un processo naturale di migrazione e risalita verso la superficie delle sostanze estrattive contenute nel legno; quest'ultime, essendo idrofobe, diminuiscono la bagnabilità del legno riducendo così la resistenza dell'unione tra i due materiali.

TASSO DI ACIDITÀ (PH) DEL LEGNO

Prove sperimentali hanno dimostrato che, al fine di ottenere una buona adesione, risulta necessario che il pH dell'essenza legnosa sia il più simile possibile a quello dell'adesivo. Il pH del legno dipende dalla quantità e dalla tipologia di estrattivi presenti ed è quindi dipendente dalla specie arborea. In generale, i legni duri sono quelli aventi maggiori estrattivi e dunque meno inclini ad assorbire la colla. Il pH superficiale del legno può essere inferiore rispetto a quello misurato all'interno della sezione, ciò avviene quando la superficie viene trattata mediante processi meccanici quali, esempio, l'abrasione e il taglio.

TRATTAMENTI SUPERFICIALI DEL LEGNO

Esistono numerosi trattamenti superficiali da applicare al legno in grado di aumentare il potere adesivo della colla. I più comuni sono:

- Utilizzo di **scarica effetto corona**: lo scopo di questa tecnica è quello di ottenere un'attivazione superficiale del legno. Ciò comporta l'aumento dell'energia libera superficiale con la diretta conseguenza della creazione di collegamenti adesivi più solidi. Alla base di tale trattamento vi è l'attivazione ossidativa della superficie mediante applicazione di una scarica elettrica ad altra frequenza e voltaggio;
- Applicazione di **promotori di adesione**: questa procedura risulta particolarmente efficace quando si utilizzano resine epossidiche. Nel caso di impiego di altre tipologie di adesivo, l'unione risulta più efficace se la

colla è a contatto diretto con il legno. Un promotore di adesione per resine epossidiche è l'HRM, acronimo di Hydroxymethylated Resorcinol. Questo materiale è in grado di creare legami chimici sia con l'adesivo che con la cellulosa del legno. In particolare, i legami che si instaurano sono di tipo covalente con la resina epossidica e di tipo idrogeno con la cellulosa del legno. Altre tipologie di promotori di adesione sono quelli a base di silani, che vengono però utilizzati per lo più come agenti accoppianti per collegare metalli, vetri, compositi avanzati, plastiche e materiali ceramici.

- **Trattamenti a fiamma:** il principio base di questa tecnica è l'utilizzo di una fiamma, contenente ioni eccitati, in grado di ossidare la superficie organica del legno; nello specifico, la combustione produce una reazione esotermica in grado di polarizzare il legno aumentandone la bagnabilità. Questa procedura non è ancora largamente diffusa poiché i risultati fino ad oggi ottenuti hanno mostrato che la sua efficacia dipende dalla tipologia di essenza legnosa: il pino, per esempio, non trae giovamento dall'utilizzo di questa tecnica a differenza della quercia che può aumentare la propria bagnabilità superficiale fino al 59%.

CARATTERISTICHE AMBIENTALI: UMIDITÀ E TEMPERATURA

Umidità e temperatura sono due fattori chiave che possono causare il prematuro invecchiamento del giunto incollato con conseguente perdita di resistenza.

L'**umidità** può incidere negativamente sull'efficienza del giunto. L'esposizione ad ambienti particolarmente umidi può determinare perdite di resistenza dell'unione a causa di due motivi principali:

- Gli elementi in legno tendono a gonfiarsi e restringersi al variare del tasso di umidità; tali deformazioni, però, non trovano corrispondenza nel comportamento dell'adesivo. Deformazioni differenziali tra i due

materiali causano inevitabili sforzi che si accumulano sulla linea di legame provocando la frattura dell'interfaccia.

- L'acqua è in grado di modificare le caratteristiche molecolari di alcune colle, in particolare di quelle epossidiche e poliuretatiche, con conseguente riduzione delle proprietà meccaniche.

Per mitigare l'effetto dato dalla variazione di umidità, è possibile applicare sulla superficie legnosa un primer, contenente melamina, in grado di ridurre il rigonfiamento del legno.

La temperatura gioca un ruolo fondamentale sulla resistenza dell'unione poiché, a temperature relativamente basse, gli adesivi perdono in parte o completamente la loro capacità resistente. Le colle possono ammorbidirsi già a partire da temperature superiori ai 40 °C con riduzione della resistenza a taglio del 40% a 60 °C e del 70% a 90°C [43]. In caso di incendio, in cui si raggiungono facilmente temperature superiori ai 300 °C, l'adesivo perde completamente la sua capacità resistente. Da questo punto di vista, la NSM risulta molto più efficace della EBR poiché il rinforzo e la colla sono inclusi nella sezione e non risultano esposti direttamente a fonti da calore.

VISCOSITÀ DELLA RESINA ED EVENTUALE PRESENZA DI BOLLE

Come detto in precedenza, è essenziale che la colla sia in grado di penetrare e di aderire completamente alla superficie legnosa ma, poiché gli interventi di consolidamento sono effettuati su elementi lignei vecchi, ciò non risulta sempre possibile. Infatti, nonostante operazioni di fresatura e trattamenti superficiali vari, il legno vecchio presenta una struttura superficiale non omogenea ed è facilmente piena di difetti, fessure e micro-fessure. Per questi motivi, è essenziale che l'adesivo sia molto fluido in modo da riuscire a penetrare nelle differenti fessure disponibili. Inoltre, la colla deve essere uniforme e priva di bolle poiché

la presenza di quest'ultime comporterebbe la concentrazione di stati tensionali e punti deboli.

QUANTITÀ DI COLLA

La quantità ottimale di colla da applicare dipende caso per caso ed è influenzata dagli altri fattori precedentemente esposti come la bagnabilità, la densità e la penetrabilità del supporto. Sperimentalmente si è osservato che all'aumentare dello spessore di colla, si ha una diminuzione della probabilità di delaminazione. In linea generale, la buona prassi per l'applicazione dell'adesivo prevede che esso sia applicato sul supporto in modo regolare con uno spessore compreso tra 1 mm e 2 mm.

5.3.3 PRESTAZIONI A LUNGO TERMINE

Tra i dubbi ancora irrisolti della NSM applicata ad elementi in legno vi è quello relativo alle prestazioni a lungo termine. In particolare, non è ancora noto il comportamento viscoelastico del legno e lo scorrimento viscoso degli FRP di una trave sottoposta a carichi permanenti. In letteratura, non sono molte le ricerche effettuate a tal proposito, ma un contributo significativo è stato fornito da *Qingfeng Xu et al.* [45]. Nello studio in questione, si sono effettuati una serie di test su provini di dimensioni reali, con lo scopo di indagare il comportamento a lungo termine del rinforzo di travi con NSM-CFRP.

Si è analizzato il comportamento di 3 travi in legno di douglasia, poste sotto carichi permanenti per 1200 giorni:

- La prima (B1), caratterizzata dalle dimensioni $0,1 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 3,2 \text{ m}$, non è stata rinforzata;
- La seconda (B2), caratterizzata dalle dimensioni $0,1 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 3,5 \text{ m}$, è stata rinforzata con una barra $\phi 8$ in CFRP posta nella parte inferiore della sezione;

- La terza (B3), caratterizzata dalle dimensioni 0,1 m · 0,2 m · 3,5 m, è stata rinforzata con una con una barra $\phi 8$ in CFRP posta nella parte inferiore della sezione e con strisce ad U in CFRP (Figura 5.17).

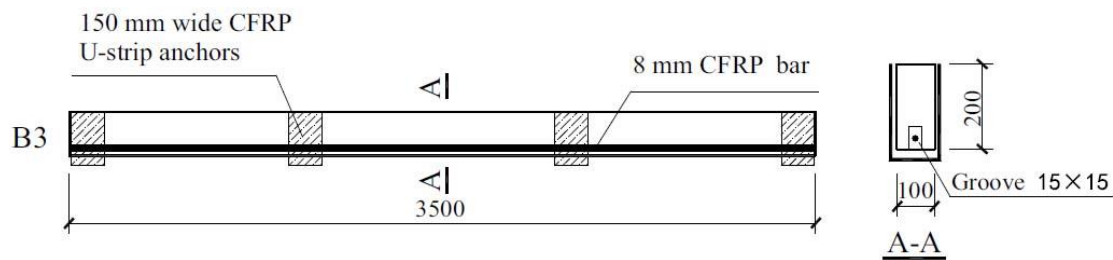


Figura 5.17 - Trave B3 [45]

Il setup di prova ha previsto l'applicazione di carichi permanenti per l'intera durata della prova, con intensità pari al 50% della resistenza ultima di ogni singola trave. Oltre a misurare gli spostamenti e gli sforzi, sono stati rilevati la temperatura e l'umidità ambientale per cercare di capire l'influenza di quest'ultimi sul comportamento della sezione nel lungo periodo.

I risultati ottenuti hanno mostrato un'iniziale deformazione lineare ai carichi applicati; ciò significa che tutte le sezioni sono rimaste in campo elastico. Nel lungo periodo, tutte le sezioni hanno mostrato un incremento significativo di deformazione durante i primi cento giorni. Trascorso questo lasso di tempo, le deformazioni hanno continuato a manifestarsi, ma la loro intensità si è ridotta in maniera graduale assumendo un comportamento asintotico.

La Figura 5.18 mostra come tutti i provini siano caratterizzati dallo stesso andamento nel tempo del coefficiente viscoso. Ciò significa che, al netto della variazione del modulo elastico delle sezioni, tutte le travi sono caratterizzate dallo stesso comportamento. Il coefficiente del provino B2 è inferiore rispetto a quello del B1 e ciò è indice del fatto che il rinforzo è effettivamente in grado di limitare le deformazioni viscosi. D'altra parte, il provino B3 ha mostrato un coefficiente del tutto simile al B1, fatto questo che potrebbe essere attribuito alla presenza di nodi al centro della campata, i quali hanno ridotto il modulo elastico

del legno riducendo l'effetto benefico fornito dal rinforzo, ma ulteriori studi devono confermare tale ipotesi.

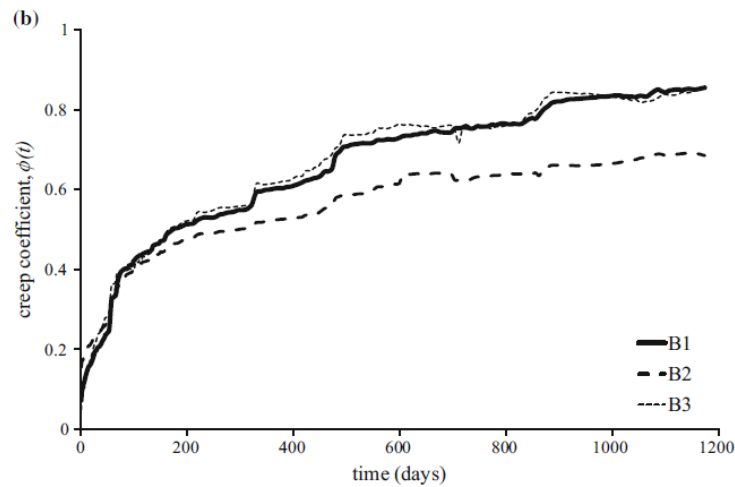


Figura 5.18 - Andamento nel tempo del coefficiente viscoso [45]

I test hanno inoltre mostrato come la deformazione viscosa è influenzata dalla temperatura e dal tasso di umidità ambientale. Come si nota dalla Figura 5.19, l'andamento delle deformazioni è del tutto simile alla variazione dei due parametri ambientali.

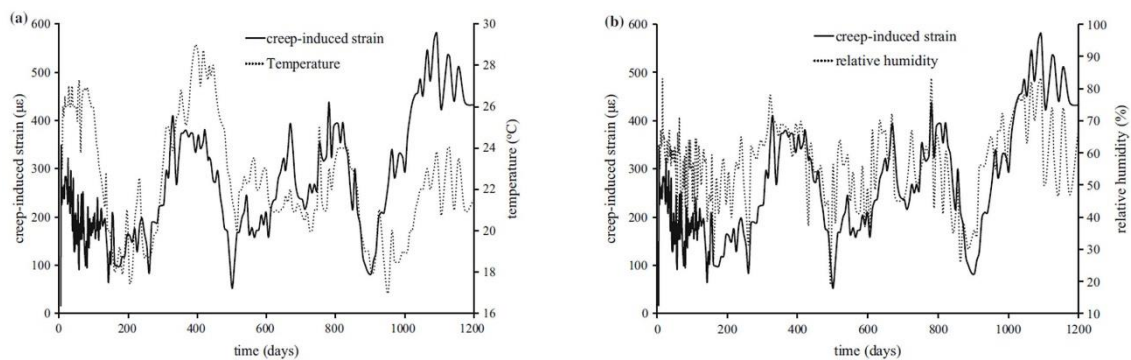


Figura 5.19 - Variazione della deformazione viscosa al variare della temperatura (a) e dell'umidità (b) [45]

Infine, nello studio proposto, viene riportato un modello numerico sviluppato mediante un software ad elementi finiti, per simulare le deformazioni istantanee e quelle a lungo termine. Come si può notare dalla Figura 5.20, il modello è in grado di predire, con un certo margine di errore, il comportamento a lungo termine di una trave rinforzata con la tecnica NSM e barre in CFRP.

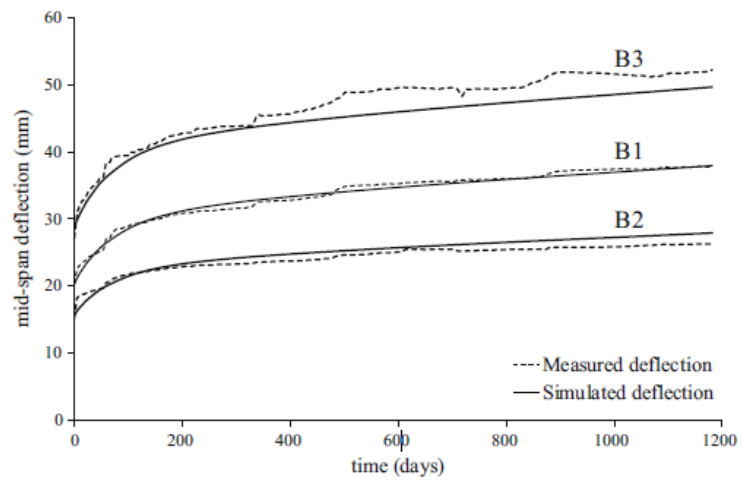


Figura 5.20 - Confronto tra le curve di deformazione viscosa simulata e misurata

Capitolo 6

STATO DELL'ARTE

Il tema del rinforzo di elementi lignei ha visto, nel corso degli anni, il susseguirsi di diversi elaborati aventi lo scopo di approfondire un argomento estremamente attuale ma che risulta povero dal punto di vista bibliografico.

Al Politecnico di Milano, presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, il professor Pisani, coadiuvato dal professor D'Antino, sta approfondendo tale tematica concentrandosi sul rinforzo di componenti in legno mediante materiali fibrorinforzati.

I primi elaborati di tesi sviluppati si sono concentrati sullo studio dell'efficacia dei sistemi di incollaggio, in particolare il primo lavoro svolto, nell'anno accademico 2014-2015, è quello dell' Ing. Daniela Antelmi riguardante "l'indagine sui sistemi di incollaggio nel consolidamento di travi lignee" [13]. L'elaborato si pone come obiettivo quello di approfondire l'efficacia di un'operazione di rifacimento delle testate ammalorate di travi lignee con protesi in legno lamellare. Per studiare la tematica sono stati eseguiti una serie di test aventi lo scopo di confrontare la capacità resistente di tavole integre con tavole in legno lamellare assemblate per mezzo di un adesivo poliuretano. I risultati ottenuti però non sono stati soddisfacenti, non solo a causa della loro marcata eterogeneità, ma anche dal fatto che la resistenza delle sezioni consolidate risultava essere sempre inferiore alla resistenza delle travi integre.

Fallite le prove, il passo successivo è stato quello di analizzare le possibili cause che potessero aver influenzato i risultati dei test. A tale proposito è seguito l'elaborato di tesi dell' Ing. Stefano Lopez denominato "Indagine sull'efficacia dell'incollaggio nelle protesi in lamellare di travi lignee" [43] relativo all'anno accademico 2015-2016. Grazie ad una approfondita ricerca bibliografica, sono

stati messi in luce i principali fattori che posso pregiudicare il collegamento tra la colla e il legno, riportati nel capitolo 5.3.2 di questo elaborato.

Segue poi, nell'anno accademico 2016-2017, l'elaborato di tesi dell' Ing. Andrea Pisacane dal titolo "Indagine sull'efficienza dell'incollaggio nel consolidamento strutturale di travi in legno" [46]. L'elaborato persegue l'obbiettivo, come suggerisce il titolo, di approfondire lo studio sull'efficacia degli incollaggi tra elementi in legno. Dopo aver scelto la tipologia di adesivo da utilizzare, preferenza ricaduta su una colla poliuretanica, si è proceduto con l'esecuzione una serie di prove a trazione e compressione per verificare la forza di adesione della superficie incollata. La scelta di utilizzare un adesivo poliuretano deriva dal fatto che colle di tipo epossidico hanno una elevata rigidità, fattore questo che implica il rischio di provocare l'insorgere di pericolose fessurazioni nel legno, mentre le resine poliuretano, meno rigide, accomodano le naturali dilatazioni del legno sviluppando un comportamento molto simile a quest'ultimo.

Questo primo blocco di tesi, incentrate sulle protesi in legno e sullo studio degli adesivi, ha permesso di ottenere preziose informazioni per analizzare il comportamento delle sezioni in legno rinforzate tramite la tecnica Near-Surface Mounted. Le tesi sviluppate finora dall' Ing. Grimaldi e dall' Ing. Biondo, riportate di seguito, hanno permesso di studiare questa innovativa tecnica sia dal punto di vista analitico che sperimentale.

6.1 STUDIO ANALITICO SULLA TECNICA NSM

Uno tra i primi tentativi di approfondire il problema del rinforzo di elementi lignei con materiali compositi è stato effettuato dall' Ing. Concetta Grimaldi con la tesi di laurea dell'anno accademico 2018-2019. L'elaborato, dal titolo "Indagine sull'efficacia del rinforzo di membrature lignee eseguito con la tecnica NSM" [14], si pone come obiettivo lo studio del comportamento di membrature lignee rinforzate con la tecnica NSM mediante un software di calcolo automatico denominato "Programma Travi Lignee". Tale programma, compilato per mezzo del software XoJo, è in grado di restituire l'intero processo di carico di una generica sezione lignea sollecitata, permettendo inoltre di identificarne il momento resistente finale.

Nella prima parte dell'elaborato è stata verificata l'affidabilità del programma, per fare ciò si è calcolata la resistenza di una trave circolare in legno tramite il software e si sono poi confrontati i risultati ottenuti con la soluzione analitica. Superato il test, il lavoro è avanzato studiando il problema del consolidamento di una trave circolare secondo varie configurazioni possibili; quest'ultime variano in base all'essenza del legno, al materiale, alla disposizione geometrica del rinforzo, al diametro delle barre necessarie al consolidamento e alla condizione di sollecitazione della trave. In particolare, sono state eseguite un totale di 600 differenti configurazioni ottenute combinando i seguenti dati:

- quattro tipologie di essenze legnose: abete, castagno, larice e rovere;
- tre differenti materiali di rinforzo: CFRP, GFRP e acciaio;
- cinque disposizioni delle armature rispetto alla sezione della trave: una all'intradosso (1I), una all'intradosso e una all'estradosso (1I1E), due all'intradosso (2I), due all'intradosso e una all'estradosso (2I1E), due all'intradosso e due all'estradosso (2I2E);
- cinque diametri delle barre di rinforzo: $\phi 12.5$, $\phi 16$, $\phi 20$, $\phi 25$ e $\phi 30$;

- due stati di sollecitazione: flessione o pressoflessione.

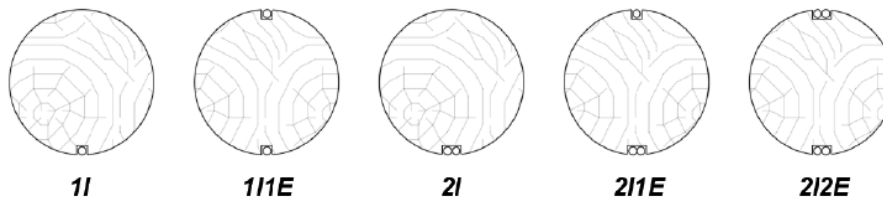


Figura 6.1 - Schematizzazione dei cinque casi di consolidamento NSM [14]

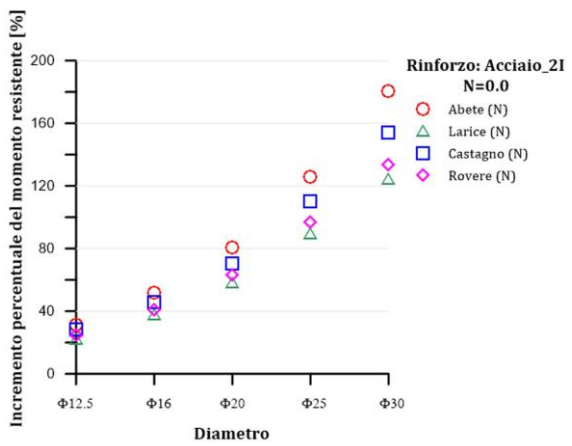
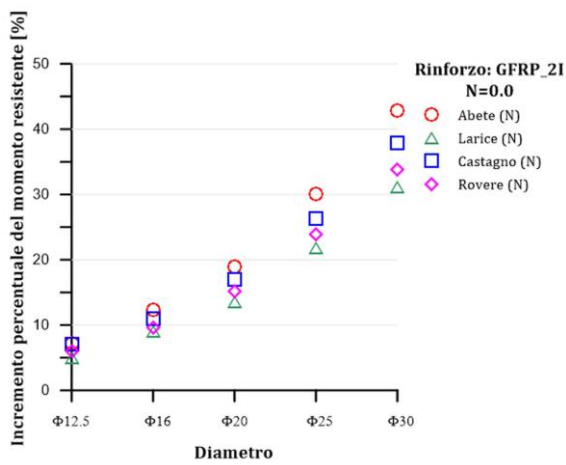
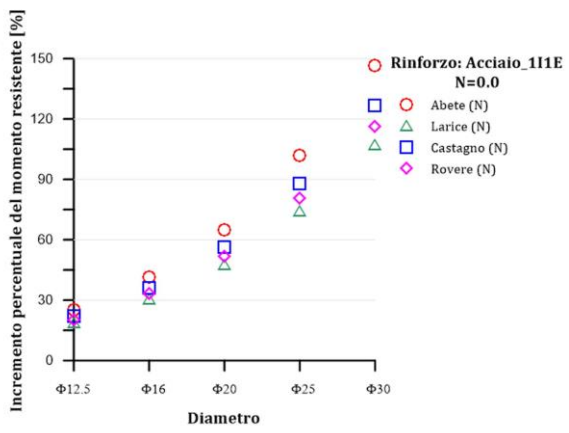
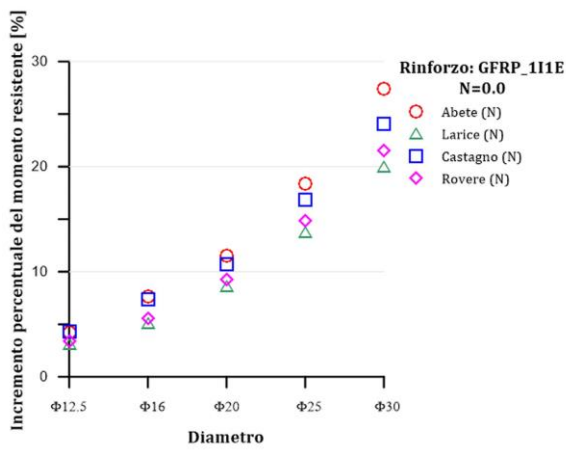
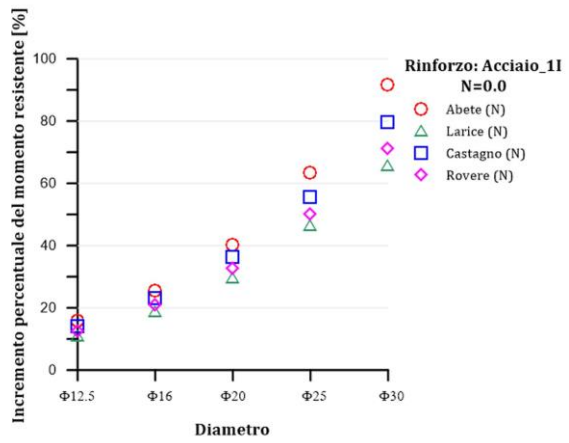
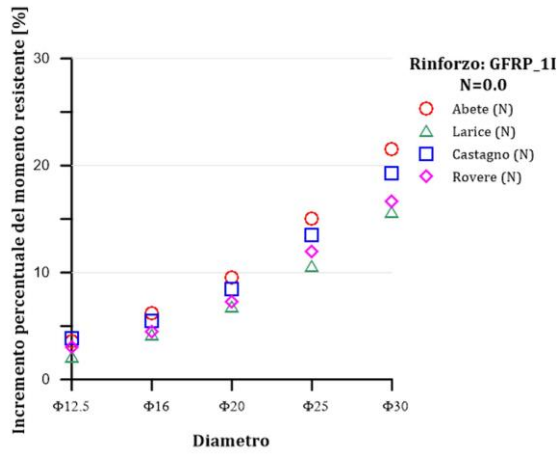
Come previsto, i risultati ottenuti hanno confermato che, dopo un intervento di consolidamento, la capacità resistente delle sezioni aumenta in funzione della tipologia e dell'area del rinforzo applicato.

Per entrambe le condizioni di carico, ovvero con azione assiale nulla e pari a 0,5, si nota come l'abete sia l'essenza legnosa in grado di aumentare maggiormente la propria capacità resistente, sia nel caso di applicazione di barre in acciaio sia di barre in GFRP. Tale affermazione è vera per tutti i diametri utilizzati ed è molto più marcato per barre di grossa sezione ($\phi 25$ e $\phi 30$).

Se l'abete è la tipologia di legno che risente maggiormente di un intervento di rinforzo, quella che ne risente meno è il larice data la sua elevata rigidità di circa 13 GPa.

Si evidenzia inoltre un notevole incremento della resistenza quando il rinforzo viene posizionato all'intradosso della trave, ovvero in corrispondenza del lato teso della sezione. Questa affermazione è giustificata dalla legge costitutiva del legno strutturale che presenta una resistenza a trazione inferiore rispetto a quella di compressione, comportamento contrario al legno netto.

Confrontando, ad esempio, il caso di rinforzo di abete con $\phi 30$ nel caso 1I e 1I1E, la differenza di capacità portante è dell'ordine del 5%, di poco conto se valutata rispetto all'incremento del 25% che si ottiene aggiungendo una sola barra ad una sezione non rinforzata.



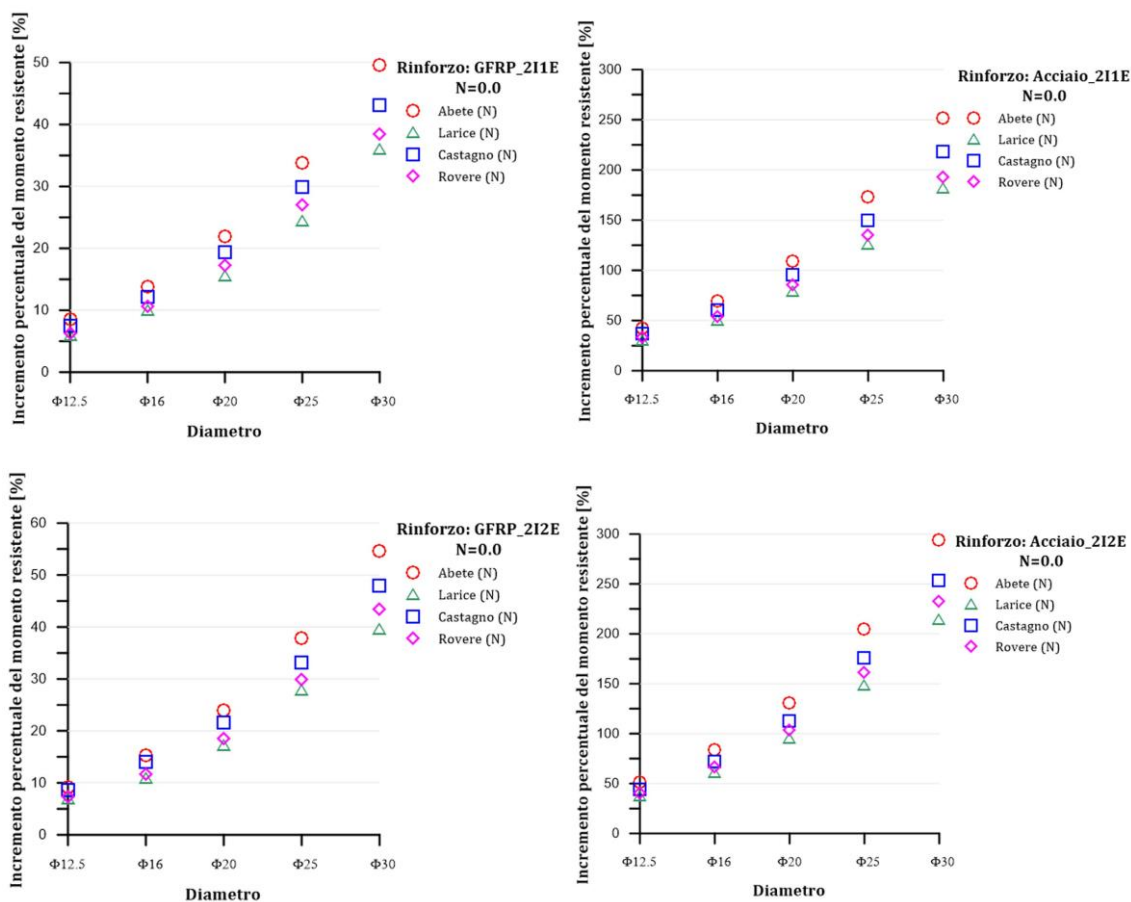
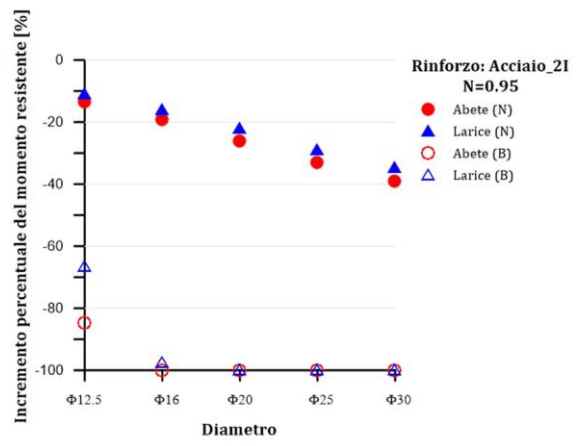
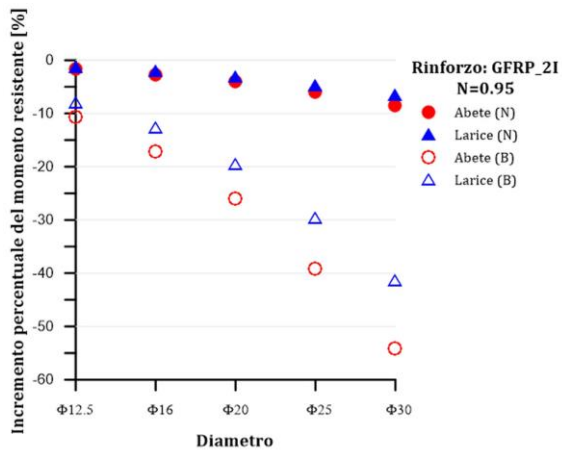
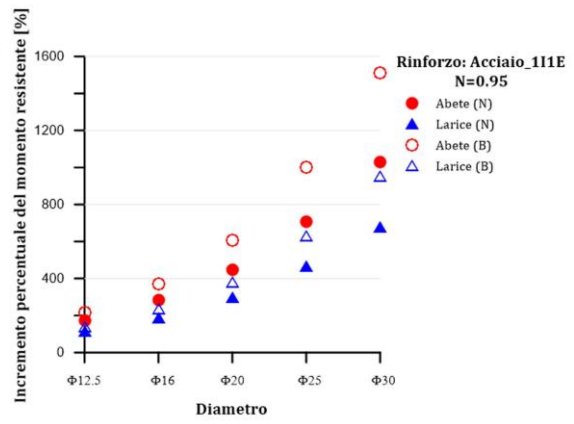
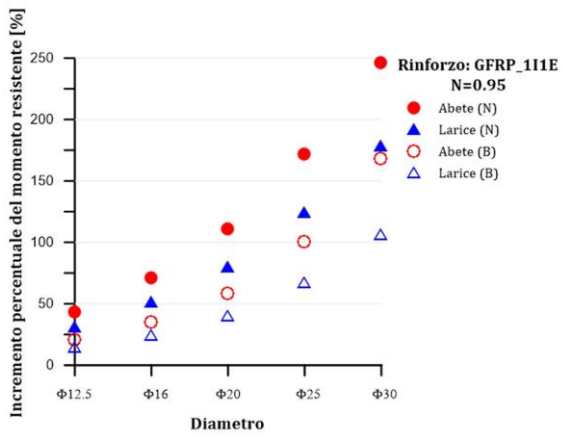
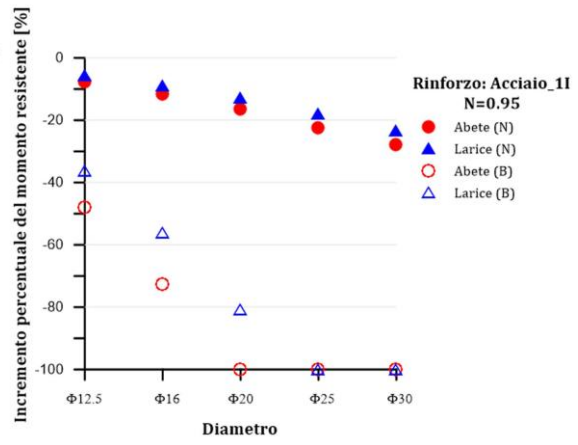
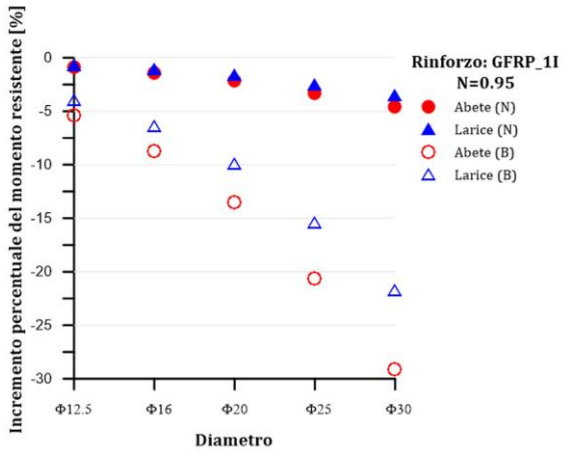


Figura 6.2 - Diagrammi incremento% - diametro per rinforzo GFRP e acciaio per $N = 0$ [4]

Viene inoltre studiato il problema del rinforzo di una sezione pressoinflessa con elevata azione assiale ($N = 0,95$). Nel caso dei rinforzi 1I e 2I si nota una perdita della capacità portante in quanto il rinforzo non è in grado di compensare l'effetto esercitato dall'elevata azione assiale. In termini relativi si assiste ad un'importante perdita resistenza, ma se si approfondisce il problema in termini assoluti, la differenza di capacità portante risulta essere quasi nulla. Viceversa, la capacità portante aumenta nei casi in cui si inseriscono barre in zona compressa, ovvero nei casi 1I1E, 2I1E e 2I2E.

Da notare però che tale condizione di carico è di difficile realizzazione nella realtà in quanto si assiste generalmente a fenomeni di instabilità.



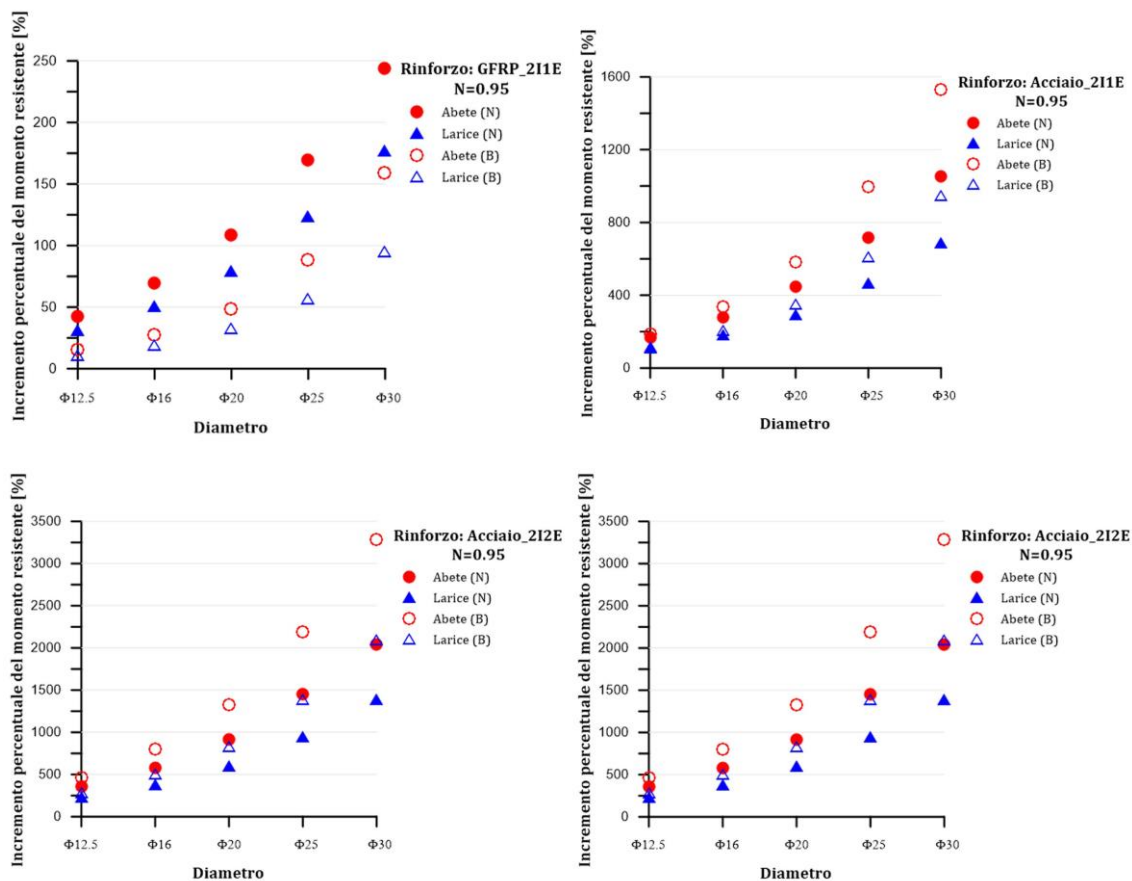


Figura 6.3 - Diagrammi incremento% - diametro per rinforzo GFRP e acciaio per $N = 0,95$ [4]

Come detto in precedenza, l'incremento di capacità resistente di una sezione è in funzione dell'area e del modulo elastico del materiale utilizzato nel consolidamento; pertanto, aumentando il modulo elastico del materiale per il rinforzo, aumenta la percentuale di incremento della capacità portante. Ciò implica che l'utilizzo dell'acciaio, avente modulo elastico $E_s = 200$ GPa, sia consigliato rispetto all'uso del carbonio, $E_c = 150$ GPa, e del vetro, $E_G = 45 - 50$ GPa.

Tale affermazione però è in contrasto con la realtà e la causa è da ricercarsi nel fenomeno dell'aderenza; infatti, con l'aumento del modulo elastico, incrementa anche la tensione di aderenza che deve essere trasferita attraverso il collegamento incollato; per cui, per valori molto elevati, si potrebbe verificare una crisi per "dobonding", ovvero il distacco dell'elemento di rinforzo. Nello specifico, per il

CFRP, la tensione di aderenza risulta essere tre volte quella del GFRP e per l'acciaio il problema si amplifica, in quanto la tensione di aderenza diventa quattro volte quella della vetroresina. Questo è uno dei motivi per cui la scelta del GFRP, oppure del CFRP, come materiale di rinforzo sia ampiamente giustificata.

Oltre alla tipologia di materiale, gioca un ruolo fondamentale anche la geometria delle sezioni del rinforzo. Per sezioni circolari, cioè per le barre, aumentando il diametro, la superficie di contatto cresce linearmente mentre la sollecitazione aumenta con il suo quadrato. Ciò significa che, per esempio, passando da un $\phi 16$ a un $\phi 30$ raddoppia il diametro e la superficie di contatto ma, allo stesso tempo, quadruplica anche l'azione da trasmettere sulla medesima superficie.

Inoltre, sapendo che il cerchio è la figura geometrica che ha il minor rapporto area/perimetro, si deduce che risulta essere più conveniente, a discapito di una piccola riduzione del braccio resistente, utilizzare delle sezioni rettangolari, preferibilmente delle lamine, caratterizzate da uno spessore piccolo ma da un'elevata superficie di contatto.

Le conclusioni di tale scritto hanno permesso di impostare le successive prove.

6.2 STUDIO SPERIMENTALE SULLA TECNICA NSM

Una volta studiato analiticamente il problema, il passo successivo, come suggerito dal metodo scientifico, consiste nel procedere effettuando esperimenti per verificare la validità delle ipotesi. In quest'ottica si inserisce la tesi di laurea dell' Ing. Simone Biondo denominata "Indagine sperimentale sul comportamento di interfaccia in travi lignee consolidate con la tecnica NSM" [11] relativa all'anno accademico 2020-2021. Il fine dell'elaborato è quello di proseguire lo studio sull'impiego di elementi fibrorinforzati per il consolidamento strutturale di travi lignee mediante la tecnica NSM tramite programma sperimentale.

I test sono stati eseguiti per indagare il fenomeno dell'aderenza, in particolare si sono svolte prove di estrazione (pull-out) effettuate con il metodo del taglio diretto (direct shear test o pull-out test, DPT). La configurazione di tali prove prevede che le fibre del rinforzo vengano messe in trazione, mentre il materiale ligneo da rinforzare rimanga vincolato al telaio della cella di carico.

6.2.1 MATERIALI E CARATTERISTICHE GEOMETRICHE

I test sono stati eseguiti utilizzando provini aventi dimensioni 160 mm x 160 mm e altezza 300 mm, composti da legno di larice aventi le seguenti caratteristiche da normativa:

Proprietà		Larice/Nord Italia		Querce caducifoglie/Italia	
		C22	C18		
Corrispondenza con le Classi di resistenza della UNI EN 338					
Categorie resistenti		S1	S2	S3	
S					
Flessione (5-percentile), N/mm ²	$f_{m,k}$		23	18	42
Trazione parallela alla fibratura (5-percentile), N/mm ²	$f_{t,0,k}$		14	11	25
Trazione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), N/mm ²	$f_{t,90,k}$		0,4	0,4	0,6
Compressione parallela alla fibratura (5-percentile), N/mm ²	$f_{c,0,k}$		20	18	27
Compressione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), N/mm ²	$f_{c,90,k}$		3,6	3,6	11
Taglio (5-percentile), N/mm ²	$f_{v,k}$		3,8	3,4	4,0
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (medio), kN/mm ²	$E_{0,mean}$		12,5	11,5	12,0
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (5-percentile), kN/mm ²	$E_{0,05}$		8,4	7,7	10,1
Modulo di elasticità perpendicolare alla fibratura (medio), kN/mm ²	$E_{90,mean}$		0,42	0,38	0,80
Modulo di taglio (medio), kN/mm ²	G_{mean}		0,78	0,72	0,75
Massa volumica (5-percentile), kg/m ³	ρ_k		510	520	760
Massa volumica (media), kg/m ³	ρ_{mean}		610	620	825

Tabella 6.1- Valori caratteristici del legno utilizzato [47]

Come rinforzo si sono utilizzate due tipologie di lamine poltruse in fibra di carbonio ad alta resistenza (FS) diverse tra loro nella finitura superficiale: sabbata [48] oppure liscia [49].

Trattamento superficiale	Larghezza (mm)	Spessore (mm)	Modulo elastico (GPa)	Resistenza a trazione (kN)	Produttore
Sabbiata	16	2	140	2500	Sireg
Liscia	16	1,4	210	3500	Sika

Tabella 6.2 - Caratteristiche meccaniche delle lamine impiegate nelle prove [48], [49]

Per la realizzazione del giunto tra i due materiali è stato impiegato un adesivo strutturale bicomponente poliuretano [50] inserito in scanalature di 4 mm in larghezza e 20 mm in profondità.

Le dimensioni dell'incavo sono tali da permettere l'alloggiamento corretto del rinforzo, ovvero circondato, su tutti i lati, da uno spessore di adesivo di 1 mm per le lamine sabbiate e 1,3 mm per quelle lisce.

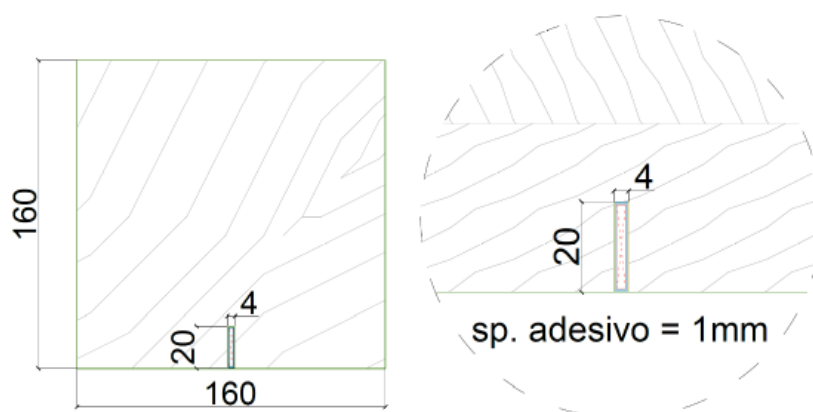


Figura 6.4 - Dimensioni del provino e della scanalatura [11]

Per un corretto incollaggio delle lamine è stato necessario rispettare alcune regole geometriche, in particolare:

- La posizione della loaded end è situata a 50 mm dall'estremità del blocco al fine di evitare una rottura prematura del provino a causa della fessurazione nel legno davanti all'estremità caricata [37];
- Viene lasciata una lunghezza libera di 50 mm tra la free end e il termine del rinforzo per evitare l'insorgere di fenomeni di delaminazione;

- Il rinforzo viene lasciato sporgere rispetto al blocco in legno per una lunghezza di 200 mm per consentire il corretto ancoraggio da parte del morsetto della macchina di trazione.

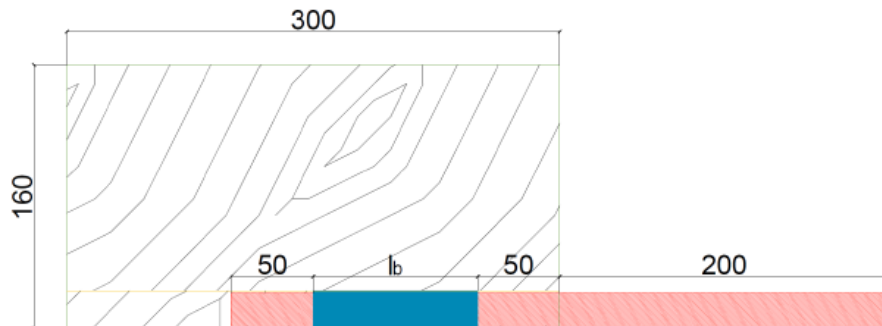


Figura 6.5 - Misure seguite per effettuare l'incollaggio delle lamine [11]

6.2.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI

Il primo passo necessario alla preparazione dei campioni è stato quello di sagomare, per mezzo di un banco sega, i blocchi in legno in modo da ottenere le caratteristiche geometriche desiderate; successivamente si sono state realizzate le scanalature necessarie all'alloggiamento del rinforzo.



Figura 6.6 - Fresatura di una tavola in legno con banco sega [11]

Una volta completate le operazioni di taglio e dopo aver pulito adeguatamente l'incavo, si procede con l'incollaggio delle lamine. Per eseguire correttamente l'operazione viene applicato del nastro adesivo all'interno delle scanalature in

modo che solamente la parte centrale, di lunghezza pari a quella di ancoraggio, risulti essere incollata. A questo punto viene iniettata la colla utilizzando una pistola meccanica in grado di miscelare in rapporto 60:40 i due componenti dell'adesivo poliuretano.



Figura 6.7 - Incollaggio delle lamine ai blocchi in legno [11]

Una volta eseguito l'incollaggio delle lamine, vengono lasciati asciugare i provini per 7-10 giorni, tempo necessario per permettere all'adesivo di sviluppare la sua completa capacità resistente. Sono state poi attaccate, in corrispondenza della dell'estremità libera della lamina, delle placche in vetroresina per consentire la corretta presa della macchina di prova evitando il contatto diretto con la lamina di rinforzo che potrebbe causarne la deformazione o la rottura locale e prematura [27], [51]. Per questa operazione si è utilizzata una resina epossidica bicomponente il cui rapporto di miscelazione è di 2:1.

Infine, i provini sono stati verniciati di bianco e spruzzati con una bomboletta spray nera in modo da creare un pattern casuale di punti (speckle pattern) necessari poi per analizzare i dati relativi alle deformazioni mediante la tecnica Digital Image Correlation (DIC).



Figura 6.8 - Provino completo pronto per la prova [11]

6.2.3 RISULTATI OTTENUTI

Il numero complessivo di provini preparati, e successivamente utilizzati, è pari a 12, suddivisi secondo 3 blocchi principali costituiti da:

- 1) 4 provini con lamine sabbiato aventi lunghezza di ancoraggio di 30 mm (serie DS_CS_30);
- 2) 4 provini con lamine sabbiato aventi lunghezza di ancoraggio di 100 mm (serie DS_CS_100);
- 3) 4 provini con lamine lisce aventi lunghezza di ancoraggio di 100 mm (serie DS_C_100).

La prova di pull-out consente di ricavare diverse informazioni riguardanti la modalità di rottura, il carico massimo applicato e gli spostamenti dei punti all'interno dei differenti materiali. Non è stato però possibile ricavare i dati relativi alle deformazioni in quanto la DIC ha restituito, in tutte le prove, comportamenti nettamente differenti dalle curve teoriche attese.

Oltre ai dati di output direttamente misurabili, è possibile calcolare la forza di legame media presente all'interfaccia incollata nei due differenti materiali: partendo dal carico massimo misurato si applicano le seguenti formule che distinguono la forza di legame media all'interno del legno (w) e della lamina in carbonio (FRP) [37].

$$\tau_{\max,av,FRP} = \frac{F_{\max}}{P_f L_b}$$

$$\tau_{\max,av,w} = \frac{F_{\max}}{P_w L_b}$$

Dove:

- F_{\max} = carico massimo registrato dalla cella di carico [kN];
- P_f = perimetro della sezione trasversale di FRP a contatto con l'adesivo [mm]. Per le lamine sabbiate è pari a 34 mm mentre per quelle lisce equivale a 33,4 mm;
- P_w = perimetro della sezione trasversale della scanalatura a contatto con l'adesivo [mm] pari a 44 mm;
- L_b = lunghezza di ancoraggio.

SERIE DS_CS_30

I provini appartenenti a questa serie sono accumulati dalla medesima modalità di rottura, ovvero quella per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in FRP e l'adesivo.



Figura 6.9 - Modalità di rottura per la serie di provini DS_CS_30 [11]

Come si nota nella figura sopraindicata, all'interno della regione incollata non è presente alcuna traccia dell'adesivo impiegato la cui totalità è infatti rimasta ancorata al blocco in legno. La modalità di rottura si può supporre che sia data dal trattamento superficiale impiegato: i grani della sabbatura sono assenti nella

parte finale della lamina, rimasta liscia e lucida, e sono rimasti nell'adesivo ancora presente all'interno del provino in legno.

Di seguito sono riportati il grafico che relazione la forza applicata con lo scorrimento misurato, rispettivamente sull'asse delle ordinate e su quello delle ascisse, e la tabella riepilogativa dei risultati ottenuti.

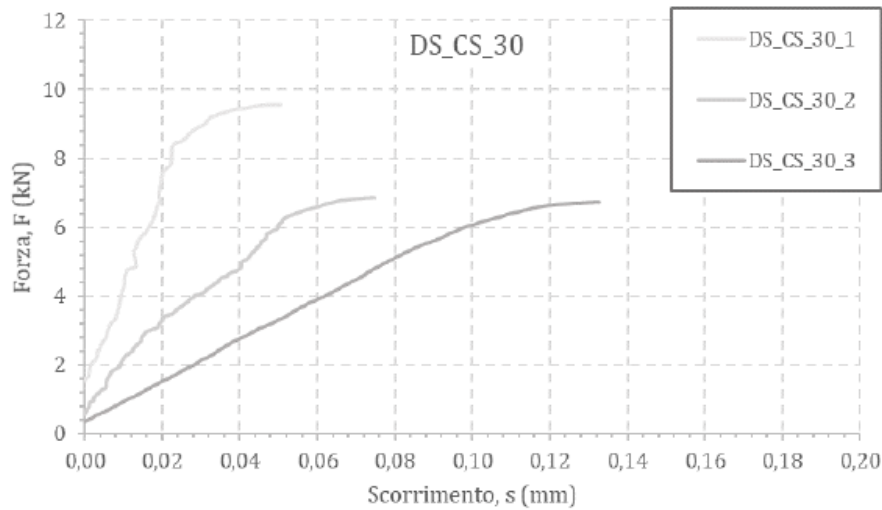


Figura 6.10 - Relazione $F - s$ per la serie di provini DS_CS_30 tramite output della macchina di prova [9]

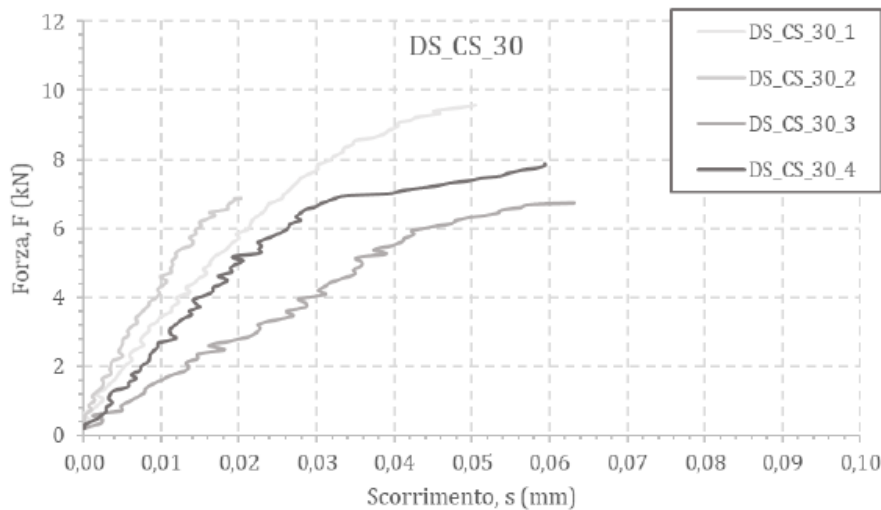


Figura 6.11 - Relazione $F - s$ per la serie DS_CS_30 tramite DIC [9]

Provino	F_{max} [kN]	S_I [mm]	$S_{I,lvdt}$ [mm]	$\tau_{max,av,FRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,W}$ [MPa]	S_{-10} [mm]
DS_CS_30_1	9,56	0,0505	0,0506	9,47	7,23	0,0926
DS_CS_30_2	6,85	0,0197	0,0749	6,80	5,19	0,0558
DS_CS_30_3	6,73	0,0631	0,1330	6,68	5,10	0,0896
DS_CS_30_4	7,95	0,0505	-	7,89	6,02	0,1060

Tabella 6.3 - Principali risultati ottenuti dalla serie DS_CS_30 [11]

SERIE DS_CS_100

Poiché nella prima serie di provini non è stato possibile determinare a priori se la causa di rottura fosse il trattamento superficiale oppure la scarsa lunghezza di ancoraggio, in questo gruppo di campioni è stata aumentata la lunghezza caricata in modo da aumentare la superficie di legame in grado di trasferire gli sforzi.

Nonostante ciò, anche in questa serie l'unica modalità di rottura riscontrata è stata la frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo e l'adesivo. Come si nota nella Figura 6.12, all'interno della regione incollata non è presente alcuna traccia della colla la cui totalità è rimasta all'interno della scanalatura del blocco in legno.



Figura 6.12 - Modalità di rottura per la serie di provini DC_CS_100 [11]

Poiché la modalità di frattura risulta essere del tutto identica al primo blocco di provini, è possibile giungere alla conclusione che la causa di rottura sia da imputare al trattamento superficiale delle lamine: la sabbiatura non è in grado di

trasmettere adeguatamente gli sforzi al rinforzo; ciò ne causa un distacco lasciando la superficie delle lamine liscia e lucida.

Di seguito sono riportati il grafico che mette in relazione la forza applicata con lo scorrimento misurato, rispettivamente sull'asse delle ordinate e su quello delle ascisse, e la tabella riepilogativa dei risultati ottenuti.

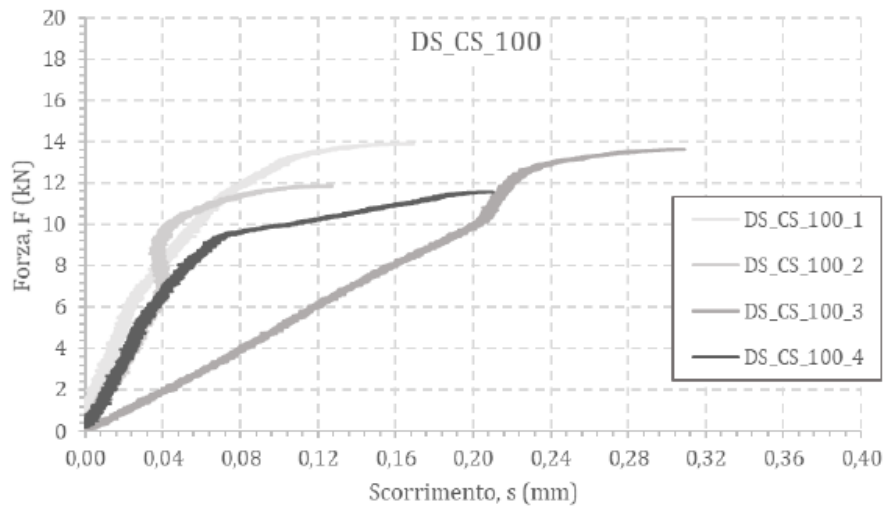


Figura 6.13 - Relazione $F - s$ per la serie di provini DS_CS_100 tramite output della macchina di prova [9]

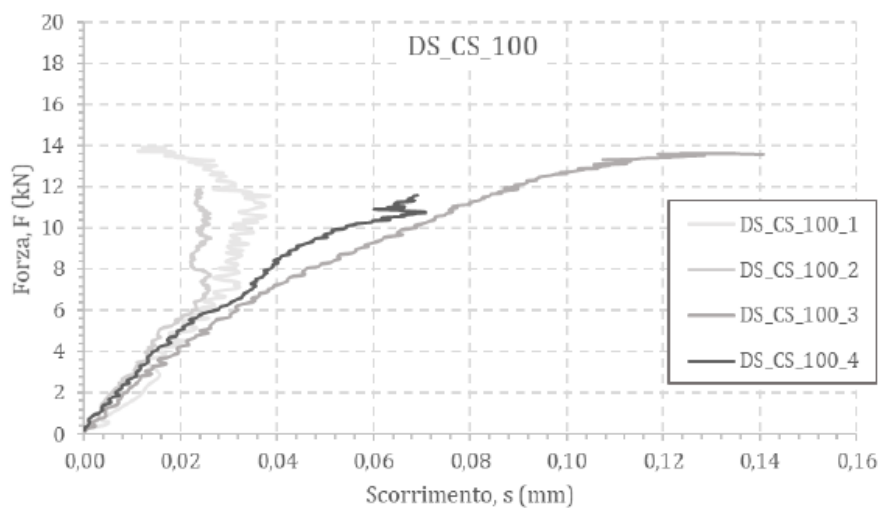


Figura 6.14 - Relazione $F - s$ per la serie DS_CS_100 tramite DIC [9]

Provino	F_{max} [kN]	S_I [mm]	$S_{I,lvdt}$ [mm]	$\tau_{max,av,FRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,W}$ [MPa]	S_{-10} [mm]
DS_CS_100_1	13,89	0,0181	0,166	4,09	3,16	0,281
DS_CS_100_2	11,86	0,0268	0,126	3,49	2,70	0,285
DS_CS_100_3	13,63	0,1390	0,308	4,01	3,10	0,288
DS_CS_100_4	11,56	0,0691	0,206	3,40	2,63	0,264

Tabella 6.4 - Principali risultati ottenuti dalla serie DS_CS_100 [5]

I test, nonostante il cedimento per frattura adesiva, hanno confermato quanto attestato in letteratura: all'aumentare della lunghezza di ancoraggio, fino al raggiungimento della lunghezza effettiva, cresce il carico massimo che il giunto incollato è in grado di sostenere. Infatti, in questa serie di prove si è ottenuto un valor medio di carico pari a 12,74 kN, equivalente a un miglioramento del 63,96% rispetto al valor medio di 7,77 kN della prima serie di provini.

Per quanto riguarda invece gli scorrimenti, non è possibile giungere a delle conclusioni definitive data la marcata eterogeneità dei risultati ottenuti.

SERIE DS_C_100

Nell'ultimo dei tre blocchi di provini è stata utilizzata la medesima lunghezza di ancoraggio della serie precedente in modo da verificare se la frattura adesiva possa essere evitata impiegando un differente trattamento superficiale della lamina. I provini sono dunque caratterizzati dall'impiego di una lamina in CFRP liscia incollata al blocco in legno per una lunghezza di 100 mm.

È inoltre stata sostituita la macchina di prova, per cercare di garantire un setup più rigido ed ottenere, in questo modo, dei risultati più precisi; ipotesi che si è rivelata vera in particolar modo per le curve relative al comportamento lungo la lamina e la sezione. Infatti, per tutti i provini, è possibile osservare un andamento prossimo a quello teorico caratterizzato da una curva leggermente decrescente lungo la superficie incollata.

Nonostante i tentativi per evitare la frattura adesiva, anche in questo caso risulta essere l'unica modalità di rottura riscontrata: all'interno della regione incollata non è presente alcuna traccia dell'adesivo impiegato, rimasto ancorato al blocco in legno.

A differenza dei test precedenti, però, la causa di rottura non è da imputare alle lamine in CFRP, ed in particolar al loro trattamento superficiale, ma alla colla che non è stata in grado di garantire l'adesione con il rinforzo. Di seguito sono riportati il grafico che relaziona la forza applicata con lo scorrimento misurato tramite, rispettivamente sull'asse delle ordinate e su quello delle ascisse, e la tabella riepilogativa dei risultati ottenuti.

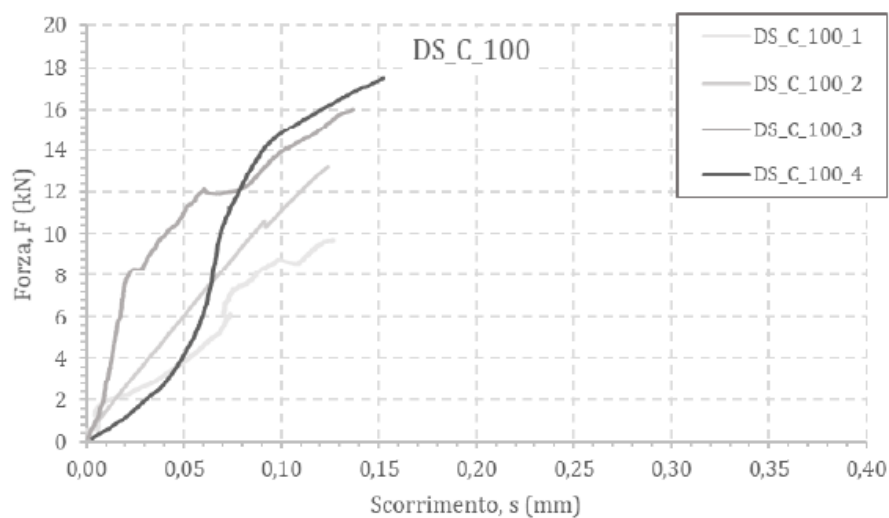


Figura 6.15 - Relazione $F - s$ per la serie di provini DS_C_100 tramite output della macchina di prova [5]

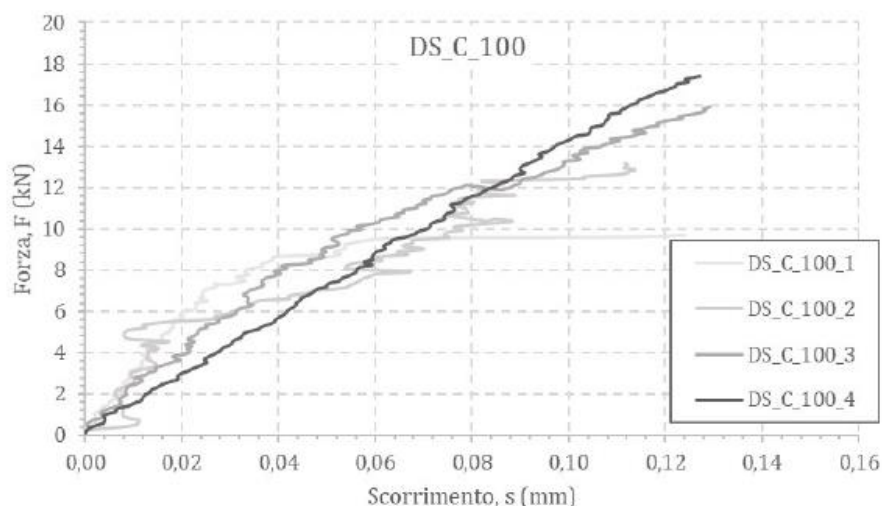


Figura 6.16 - Relazione $F - s$ per la serie DS_C_100 tramite DIC [5]

Provino	F_{max} [kN]	s_l [mm]	$s_{l,lvdt}$ [mm]	$\tau_{max,av,FRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,W}$ [MPa]	S_{-10} [mm]
DS_C_100_1	9,74	0,124	0,126	2,92	2,21	0,173
DS_C_100_2	13,22	0,112	0,124	3,96	3,00	0,236
DS_C_100_3	16,03	0,130	0,137	4,80	3,64	0,172
DS_C_100_4	17,53	0,127	0,152	5,25	3,98	0,213

Tabella 6.5 - Principali risultati ottenuti dalla serie DS_C_100 [5]

L'impiego di lamine lisce ha consentito, a parità di lunghezza di legame, di ottenere carichi superiori rispetto a quelle sabbiate. Difatti, si è registrato un valor medio di 14,13 kN, incremento del 10,91% rispetto alla seconda serie di test.

Anche per gli scorrimenti si assiste all'aumento dei valori registrati, in particolare l' S_{max} per la serie DS_C_100 è pari a 0,125 mm ovvero il doppio rispetto alla DS_CS_100 uguale a 0,063 mm.

SPOSTAMENTI ALL'INTERNO DELLE LAMINE

Dall'analisi del comportamento lungo le lamine, appare chiaro come, per tutti i provini testati, sia presente una differenza sostanziale tra gli spostamenti registrati all'estremo libero e quelli rilevati nella loaded end.

Come si evince dal grafico seguente, gli incrementi di spostamenti avvenuti al di fuori della regione incollata vanno da un minimo di un terzo fino ad arrivare, nel caso del DS_CS_100_1 e DS_CS_100_2, al cambio di un ordine di grandezza.

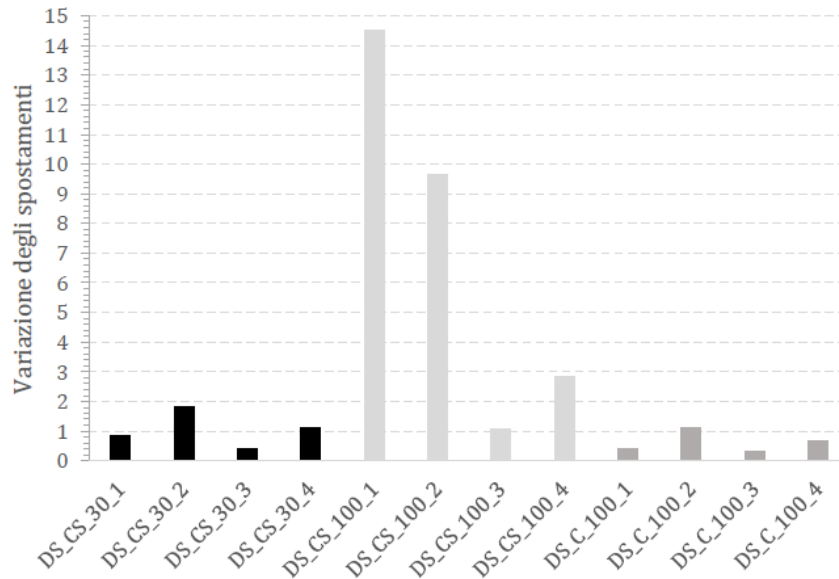


Figura 6.17 - Variazione degli spostamenti lungo la lamina, tra la loaded end (sl) e a 10 m di distanza dalla regione incollata (s-10), per tutti i provini testati [9]

Per quanto riguarda invece gli spostamenti all'interno della regione incollata, per i primi due gruppi di provini è stato registrato un comportamento divergente rispetto a quanto previsto in linea teorica: l'andamento degli spostamenti risulta costante anziché essere di tipo parabolico (Figura 6.18). Solamente nell'ultima serie di prove è stata ottenuta una curva corretta, contraddistinta da un andamento decrescente degli spostamenti all'interno della porzione incollata.

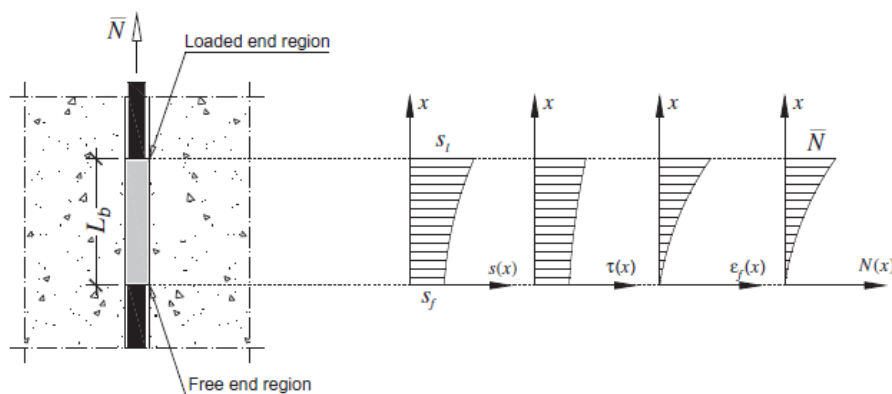


Figura 6.18 – Grandezze nei modelli analitici [37]

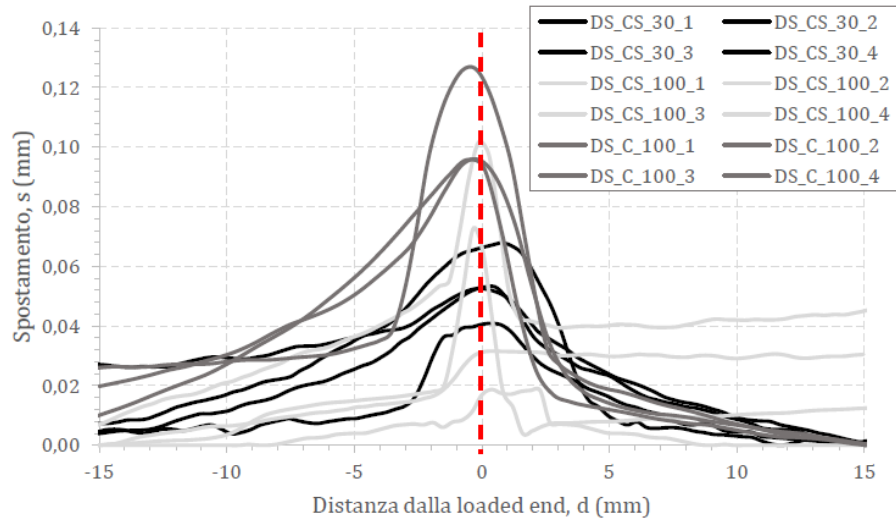


Figura 6.19 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per tutti i provini testati [9]

Capitolo 7

PROGRAMMA SPERIMENTALE

Con l'intento di proseguire lo studio in merito al consolidamento di sezioni lignee mediante tecnica NSM e profili in materiale composito, sono state effettuate una serie di prove sperimentali presso il Laboratorio di Prove Materiali del Politecnico di Milano. Nello specifico, i test sono stati condotti con l'obiettivo di approfondire il fenomeno dell'aderenza che si instaura tra le lamine di rinforzo in CFRP, l'adesivo poliuretano e il legno. L'unione tra i diversi materiali è il punto chiave che determina la fattibilità dell'intervento di consolidamento ed è l'aspetto che desta più perplessità in merito alla tecnica.

Per studiare il fenomeno dell'aderenza, sono state eseguite delle prove di estrazione (pull-out) con il metodo del taglio diretto (direct shear o direct pull-out test, DPT) mediante la macchina MTS 810 con cella di carico da 250 kN. I provini testati sono composti da un elemento ligneo di forma prismatica, di dimensioni 160 mm · 160 mm · 300 mm, a cui è stato incollato il materiale di rinforzo all'interno di una scanalatura effettuata in posizione baricentrica rispetto al lato del provino. Le prove sono state condotte su tre set di campioni differenti tra loro nella lunghezza di ancoraggio (L_b), rispettivamente di 30 mm, 100 mm e 150 mm codificati secondo il seguente criterio:

DS_C_XXX_Y

Dove:

- DS: tipologia di prova eseguita. Nello specifico, si tratta della Direct Shear;
- C: materiale della lamina di rinforzo. In particolare, si tratta di carbonio;
- XXX: lunghezza di ancoraggio [mm];
- Y: numerazione dei provini aventi le stesse caratteristiche.

Il valore minimo della lunghezza di legame è stato scelto in modo da evitare l'insorgenza di effetti collaterali indesiderati dovuti alla superficie di incollaggio troppo limitata. All'opposto, il valore massimo è scaturito dalla necessità di studiare il fenomeno dell'aderenza in presenza di lunghezze di incollaggio superiori ai 100 mm (nell'elaborato di tesi dell'Ing. Simone Biondo i test effettuati avevano previsto tale lunghezza massima). In relazione ad altri test simili, le due lunghezze risultano adeguate alla valutazione del comportamento locale della zona di legame.

I profili di rinforzo sono delle lamine pultruse caratterizzate da una larghezza di 16 mm e uno spessore di 1,6 mm costituite da fibre di carbonio annegate in una matrice epossi-vinilester.

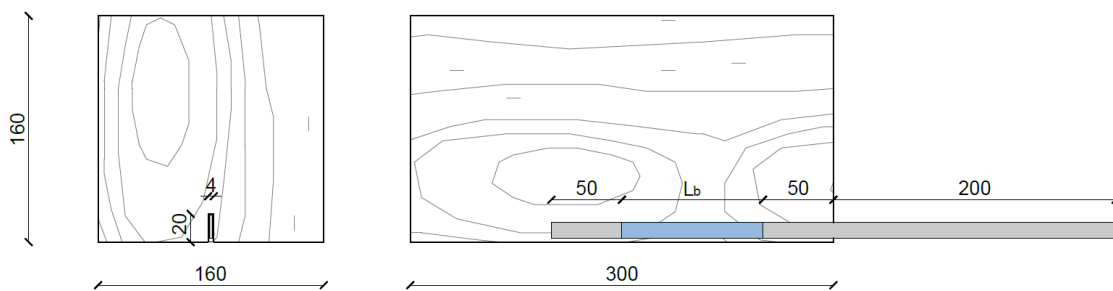


Figura 7.1 - Dimensioni dei provini testati

Nel caso del primo blocco di provini, ovvero quelli aventi lunghezza di ancoraggio pari a 30 mm, si è utilizzata una tecnica di misurazione innovativa denominata Digital Image Correlation (DIC). Questo metodo di misura permette, grazie al confronto di una o più fotografie, di esaminare i campi di spostamento che subiscono i corpi sottoposti a sollecitazioni di qualsiasi genere. Il tentativo si è però dimostrato fallimentare a causa dello spessore limitato delle lamine in carbonio, confermando i problemi presentatisi in precedenza nell'elaborato di tesi dell'Ing. Simone Biondo. Di conseguenza, questo metodo di misura non è stato utilizzato per i campioni appartenenti al secondo blocco.

Tra l'esecuzione dei test relativi al secondo e al terzo blocco di provini, sono state apportate delle migliorie per l'analisi dati tramite DIC. Nello specifico, rispetto al primo set di campioni, è stato aggiornato il software di analisi dati ed è stata utilizzata una bomboletta spray in grado di creare un pattern più fitto di punti neri. Per i motivi appena citati, si è utilizzata la DIC anche per il terzo blocco di provini.

In questo capitolo vengono descritti i materiali utilizzati, le fasi operative eseguite per la preparazione dei campioni, le caratteristiche del setup di prova e i file ottenuti dalle differenti analisi eseguite. Si rimanda al Capitolo 8 per l'approfondimento dei risultati derivanti dalla presente campagna sperimentale.

7.1 CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI E DEI MATERIALI

7.1.1 LEGNO

I blocchi utilizzati nel presente programma sperimentale sono in larice, specie arborea appartenente alle conifere che presenta buone caratteristiche meccaniche (riportate nella Tabella 7.1). Il larice esibisce una tessitura medio-fine con una fibratura irregolare e generalmente presenta anomalie, difetti e tasche di resina. I campioni utilizzati sono però caratterizzati dalla modesta presenza di difetti e dalla completa assenza di tasche di resina.

Per i primi due set di provini, i test sono stati eseguiti utilizzando i medesimi elementi lignei adoperati in precedenza dall' Ing. Simone Biondo (vedasi capitolo 6.2.1). Nello specifico, trattasi di blocchi in legno di larice con dimensioni di base 160 mm · 160 mm e altezza pari a 300 mm, intagliati con una scanalatura di larghezza 4 mm e profondità di circa 20 mm. L'impiego di elementi già usati in precedenza non ha pregiudicato l'esito dei test in quanto le prove precedenti si erano concluse con la frattura adesiva e non per collasso del legno (le lamine di rinforzo sono state collocate in scanalature mai utilizzate in precedenza).

Per il terzo set di provini sono stati utilizzate sezioni in legno mai adoperate in precedenza caratterizzate dalle medesime caratteristiche, meccaniche e geometriche, dei provini appartenenti ai primi due set.

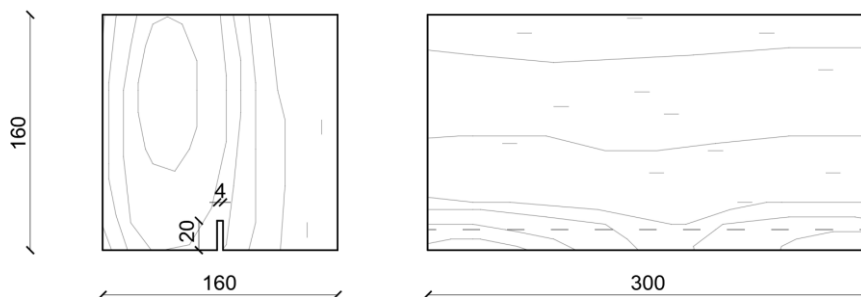


Figura 7.2 - Geometria dei blocchi in legno

Proprietà		Larice/Nord Italia		
Corrispondenza con le classi di resistenza della UNI EN 338		-	C22	C16
Categorie resistenti		S1	S2	S3
Flessione (5-percentile) N/mm ²	$f_{m,k}$	-	23	18
Trazione parallela alla fibratura (5- percentile) N/mm ²	$f_{t,0,k}$	-	14	11
Trazione perpendicolare alla fibratura (5-percentile) N/mm ²	$f_{t,90,k}$	-	0,4	0,4
Compressione parallela alla fibratura (5-percentile) N/mm ²	$f_{c,0,k}$	-	20	18
Compressione perpendicolare alla fibratura (5-percentile) N/mm ²	$f_{c,90,k}$	-	3,6	3,6
Taglio (5-percentile) N/mm ²	$f_{v,k}$	-	3,8	3,4
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (medio) kN/mm ²	$E_{0,mean}$	-	12,5	11,5
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (5-percentile) kN/mm ²	$E_{0,05}$	-	8,4	7,7
Modulo di elasticità perpendicolare alla fibratura (medio) kN/mm ²	$E_{90,mean}$	-	0,42	0,38
Modulo di taglio (medio) kN/mm ²	$G_{90,mean}$	-	0,78	0,72
Massa volumica (5-percentile) kg/m ³	Q_k	-	510	520
Massa volumica (media) kg/m ³	Q_{mean}	-	610	620

Tabella 7.1 - Valori caratteristici della classificazione a vista per i legnami impiegati [47]

7.1.2 RINFORZO

Come rinforzo sono state utilizzate lamine in fibra di carbonio, ottenute mediante processo di pultrusione, impregnate con resina epossivinilestere. Sono caratterizzate da entrambi i lati da una superficie liscia e sono dotate di dimensioni pari a 16 mm per la larghezza e 1,6 mm per lo spessore.

Le lamine, come dichiarato dalla scheda tecnica del produttore [52], hanno un modulo elastico pari a 165 GPa e una tensione di rottura pari a 2800 MPa a cui corrisponde un allungamento del 1,8%.

7.1.3 ADESIVO

Per collegare meccanicamente il legno alla lamina di rinforzo è stato utilizzato un adesivo poliuretano strutturale bicomponente. Nello specifico, è stato adoperato LOLCTITE UK 1651 B25 / LOCTITE UK 5452, adesivo impiegato principalmente per l'incollaggio strutturale di materiali compositi fibrosi.

I due costituenti dell'adesivo da miscelare sono una resina (componente A), contenente composti organici con gruppi idrossili, e un indurente (componente B) a base di isocianati. La miscelazione, da effettuare secondo preciso rapporto stechiometrico 100 : 40, dà luogo ad una reazione chimica esotermica il cui prodotto finale è l'adesivo strutturale bicomponente desiderato. I due composti, venduti in una bicartuccia, possono essere miscelati manualmente oppure mediante l'ausilio di pistole pneumatiche orientate.

L'adesivo deve essere utilizzato solo entro un periodo di tempo limitato (pot-life), trascorso il quale la miscela gelifica diventando inutilizzabile. Il pot-life dipende dalla quantità e dalla temperatura della miscela; nello specifico, al crescere di quest'ultime, diminuisce il tempo disponibile per la lavorazione. Invece, per quanto concerne il tempo necessario al completo sviluppo della reazione chimica, esso varia fortemente in base alla temperatura; infatti, all'aumentare della temperatura ambientale diminuisce il tempo necessario alla polimerizzazione. Durante questa fase è essenziale applicare un'adeguata pressione di contatto e sistemi di fissaggio per mantenere il giunto in posizione. Al fine di migliorare il potere adesivo della colla, il supporto deve essere pulito, asciutto, privo di polvere, olio, grasso e altri contaminanti. È inoltre consigliato trattare la superficie mediante abrasione o sabbiatura [50].

Caratteristiche della miscela (mix A + B)	
Consistenza	Pastosa
Viscosità a 20 °C [mPas]	400.000 – 500.000
Pot-life [min]	20 – 30
Tempo di primo fissaggio [ore]	1 – 2
Tempo di fissaggio finale [giorni]	2 – 3
Trazione a taglio [MPa]	> 20
Transizione vetrosa [°C]	> 70
Temperatura di esercizio [°C]	-40 – 100

Tabella 7.2 - Caratteristiche della miscela [50]

7.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI

In questo capitolo vengono descritte tutte le fasi operative occorse per preparare i provini ad essere successivamente testati. Durante questo stadio sperimentale sono stati realizzati tre blocchi di campioni caratterizzati rispettivamente da una lunghezza di ancoraggio di 30 mm, 100 mm e 150 mm. Le fasi preparatorie dei tre set sono simili tra loro ma non uguali poiché, dopo i risultati fallimentari della prima serie di provini, è stata abbandonata la tecnica di misurazione tramite DIC, successivamente ripresa per il terzo set di campioni.

7.2.1 SERIE DS_C_30

In primis, trattandosi di blocchi in legno già testati in un precedente programma sperimentale, è stato necessario verificare l'integrità delle sezioni. Una volta accertata quest'ultima, è stato possibile procedere con la preparazione dei provini. Per prima cosa sono stati segnati, sulle superfici dei blocchi, i riferimenti relativi alle prescrizioni geometriche da rispettare che prevedono di:

- Interporre una lunghezza di 50 mm tra lo spigolo del blocco e l'inizio della loaded end per evitare una rottura prematura del provino a causa della fessurazione del legno [37];
- Lasciare una lunghezza libera di 50 mm tra la loaded end e il termine della lamina per evitare l'insorgere di fenomeni di delaminazione;
- Far sporgere, all'esterno del blocco, la lamina per una lunghezza di 200 mm per permettere il successivo ancoraggio da parte del morsetto della macchina di prova.

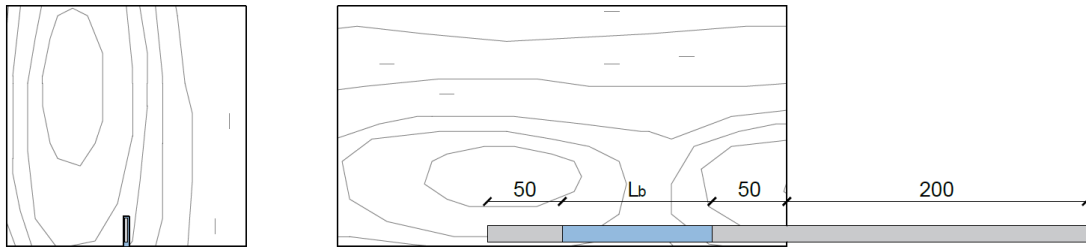


Figura 7.3 - Prescrizioni geometriche



Figura 7.4 – Marcatura dei riferimenti da rispettare

Marcati i riferimenti geometrici da rispettare, è stato applicato del nastro adesivo da imballaggio all'interno della scanalatura al fine di impedire che la colla possa aderire anche alle superfici adiacenti. Tale operazione garantisce che il tratto centrale, di lunghezza pari a L_b , sia l'unico in grado di trasferire le sollecitazioni dalla lamina al legno.



Figura 7.5- Applicazione del nastro adesivo

Il passo successivo è consistito nella preparazione delle lamine in carbonio. Per prima cosa i rinforzi sono stati tagliati, mediante una taglierina da banco, in modo che avessero una lunghezza totale di 330 mm⁵. In seguito, le lamine sono state carteggiate mediante della carta vetrata e poi pulite grazie ad un detergente specifico [53] fornito dal produttore dell'adesivo. L'operazione di carteggiatura permette di irruvidire le superfici aumentandone il coefficiente d'attrito, la pulitura consente l'eliminazione di eventuali residui che potrebbero pregiudicare il corretto incollaggio.

Sono state poi incollate le lamine di rinforzo all'interno delle apposite scanalature. Tale operazione è stata eseguita iniettando, per mezzo di una pistola meccanica, la colla all'interno della fresatura e inserendo poi la lamina all'interno della stessa. Nell'eseguire tale operazione è stata posta particolare attenzione alla posizione della lamina in modo che fosse ben centrata in modo evitando così l'insorgenza di sforzi parassiti dovuti alla non simmetria. Infine, è stata rimossa la resina fuoriuscita per consentire una migliore lettura dei dati tramite DIC.

⁵ Lunghezze derivanti dalle prescrizioni geometriche: 50 mm + 30 mm + 50 mm + 200 mm.

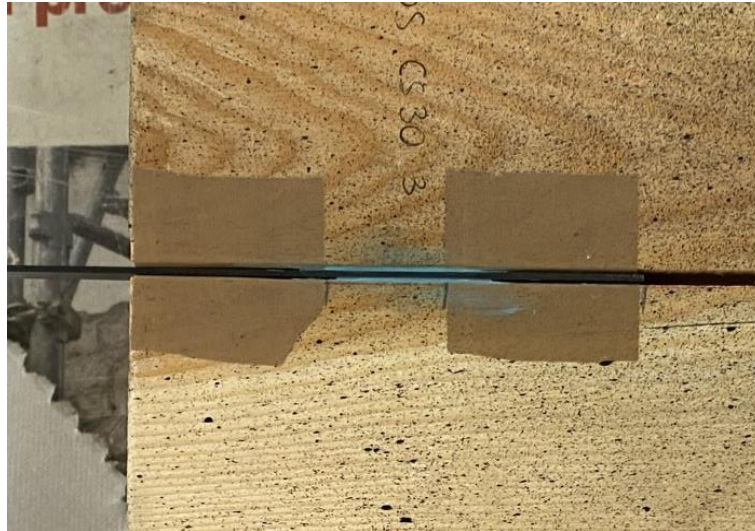


Figura 7.6 - Incollaggio del rinforzo

Trascorsi 7 giorni necessari alla corretta presa della colla e al completo sviluppo della sua capacità resistente, sono state incollate, per mezzo di un adesivo epossidico bicomponente, due piastre in vetroresina agli estremi delle lamine. Queste consentono il corretto serraggio della lamina alla macchina di prova evitando deformazioni e rotture locali [27], [37].

A questo punto è stato possibile procedere con l'ultima fase preparatoria necessaria poi alla lettura dei dati tramite DIC. In primo luogo, è stato rimosso il nastro adesivo e successivamente sono state applicate sulla superficie del campione due mani di vernice bianca per uniformare il colore di base. In seguito, sono stati creati, con l'ausilio di una bomboletta spray, i punti neri necessari a formare lo speckle pattern fondamentale per ricavare gli spostamenti e le deformazioni superficiali del legno tramite DIC.



Figura 7.7 – 2 provini del blocco DS_C_30 ultimati. Da notare le placche in vetroresina all'estremità delle lamine in CFRP e la verniciatura bianca con relativo speckle pattern

7.2.2 SERIE DS_C_100

Per la preparazione del secondo blocco di provini si è seguita la medesima procedura dei campioni precedenti ma con due variazioni.

Il primo cambiamento è stato l'irruvidimento delle superfici del legno all'interno della fresatura. Nello specifico, prima di applicare il nastro adesivo, sono state carteggiate le pareti della scanalatura mediante l'ausilio di carta vetrata. Ciò consente, come visto nel capitolo 5.3.2, l'attivazione delle superfici del legno e il conseguente aumento della relativa bagnabilità. Dopo aver carteggiato la superficie sono stati eliminati i residui depositati all'interno del solco.

L'altra variazione nella preparazione dei provini è stata l'eliminazione della verniciatura e del pattern di punti neri poiché, come si vedrà successivamente nel capitolo dell'analisi dei risultati, la DIC si è rilevata fallimentare nel primo set di campioni.

Detto ciò, i passi seguiti per la preparazione del secondo blocco di provini sono stati:

- Controllo dell'integrità del legno;
- Marcatura dei riferimenti relativi alle prescrizioni geometriche;

- Carteggiatura delle superficie della scanalatura e successiva pulizia;
- Applicazione del nastro adesivo all'interno della fresatura;
- Taglio delle lamine in carbonio (lunghezza totale di 400 mm⁶) e successiva carteggiatura e pulizia;
- Applicazione dell'adesivo ed inserimento nel solco delle lamine;
- Incollaggio delle piastre in vetroresina all'estremità delle lamine.

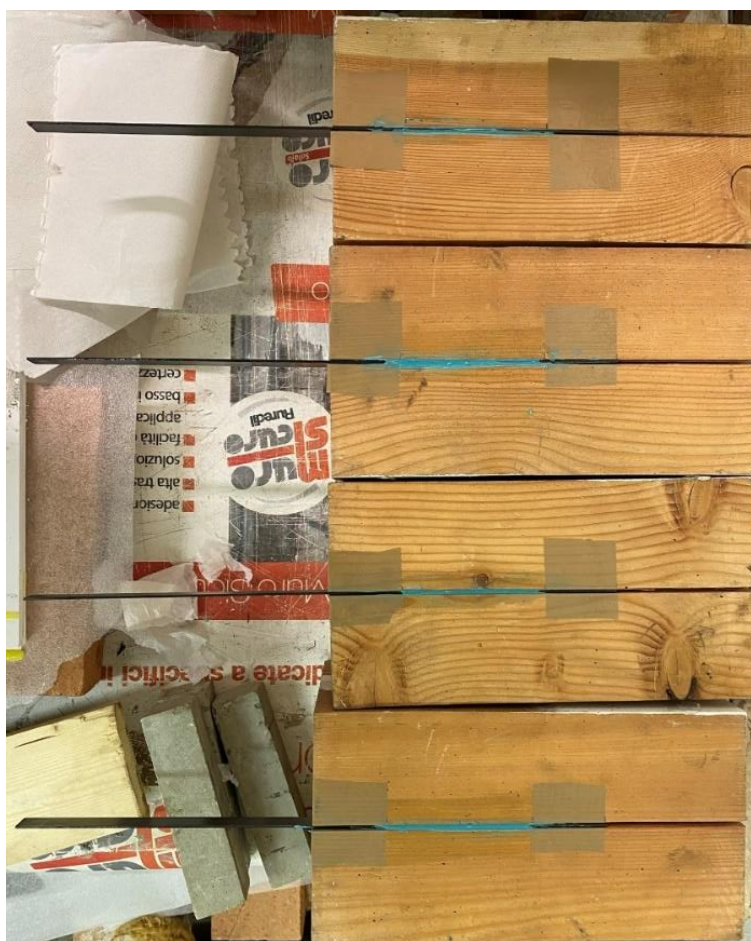


Figura 7.8 - Provini della serie DS_C_100 prima dell'incollaggio delle piastre in vetroresina

7.2.3 SERIE DS_C_150

Trattandosi di blocchi mai utilizzati in precedenza è stato necessario sagomare le scanalature, indispensabili ad ospitare i rinforzi, prima di procedere con i passaggi successivi. Su ogni superficie è stato realizzato un incavo mediante un banco

⁶ Lunghezze derivanti dalle prescrizioni geometriche: 50 mm + 100 mm + 50 mm + 200 mm.

sega, strumento che permette la realizzazione di un taglio dritto, netto e il più possibile parallelo alle fibre, in modo da limitare il danneggiamento delle stesse [11]. Ciascun incavo, collocato in posizione baricentrica, corre per tutta la lunghezza del blocco ligneo ed è caratterizzato da una larghezza di 4 mm e da una profondità di 20 mm. Successivamente lo stesso è stato pulito in modo da rimuovere i frammenti lignei derivanti dall'operazione di taglio.

In seguito, sono stati segnati i riferimenti necessari per rispettare le medesime prescrizioni geometriche da rispettare dei due set di campioni precedenti ed è stato applicato in nastro adesivo da imballaggio necessario ad impedire che la colla possa aderire anche alle superfici adiacenti.

Il passo successivo è stato quello del taglio delle lamine in carbonio per mezzo di una taglierina da banco in modo che avessero una lunghezza totale di 450 mm⁷. (a differenza dei due set precedenti, è stato omissso il passaggio di carteggiatura e pulizia delle lamine). Sono state poi incollate le barre all'interno delle apposite scanalature. Tale operazione è stata eseguita iniettando, per mezzo di una pistola meccanica, la colla all'interno della fresatura e inserendo poi la lamina all'interno della stessa. Conclusa l'operazione è stata rimossa la resina in eccesso strabordata in modo da consentire una migliore lettura dei dati tramite DIC.

Trascorsi 7 giorni necessari alla corretta presa della colla e al completo sviluppo della sua capacità resistente, sono state incollate, per mezzo di un adesivo epossidico bicomponente, due piastre in vetroresina agli estremi delle lamine.

A questo punto è stato possibile procedere con l'ultima fase preparatoria necessaria poi alla lettura dei dati tramite DIC. In primo luogo, è stato rimosso il nastro adesivo e successivamente sono state applicate sulla superficie del campione due mani di vernice bianca per uniformare il colore di base. In seguito, sono stati creati, con l'ausilio di una bomboletta spray, i punti neri necessari a

⁷ Lunghezze derivanti dalle prescrizioni geometriche: 50 mm + 150 mm + 50 mm + 200 mm.

formare lo speckle pattern fondamentale per ricavare gli spostamenti e le deformazioni superficiali del legno.



Figura 7.9 - Provini della serie DS_C_150 prima della verniciatura con la pittura bianca

7.3 SETUP DI PROVA

Per lo svolgimento dei test si è utilizzata la macchina servoidraulica MTS 810 con cella di carico da 250 kN messa a disposizione dal Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano. I test sono stati effettuati in modalità di controllo degli spostamenti ad una velocità di 0,05 mm/min e a una frequenza di acquisizione dati di 5Hz. In queste condizioni la durata media dei test è di circa 20 minuti per i provini del primo e secondo set di campioni e 30 min per il terzo.



Figura 7.10 - Macchina di prova servoidraulica MTS con cella di carico da 250 kN [54]

Per utilizzare la macchina è necessario, per prima cosa, installare un piatto di base (a) che funga da supporto per il provino. Una volta fatto ciò, è possibile posizionare il campione in modo che la lamina sporgente dal blocco sia rivolta verso l'alto (b). Nel posizionare il provino si deve avere l'accortezza che sia dritto con lamina ben centrata rispetto al morsetto di trazione. Verificata la posizione del blocco, si procede bloccando quest'ultimo alla struttura della macchina

mediante una piastra di testa (c). Questa è vincolata a quella di base per mezzo di quattro barre filettate (d) posizionate agli spigoli su cui scorrono altrettanti bulloni. A questo punto è possibile stringere la lamina di rinforzo con la morsa della macchina (e). Si installano successivamente, mediante l'uso di colla a caldo, una piastra a L in alluminio (f) in corrispondenza del punto in cui la lamina fuoriesce dal blocco in legno e i due trasduttori (g) necessari per registrare gli spostamenti. La piastra a L viene utilizzata come contrasto per la lettura dei dati dei due LVDT.

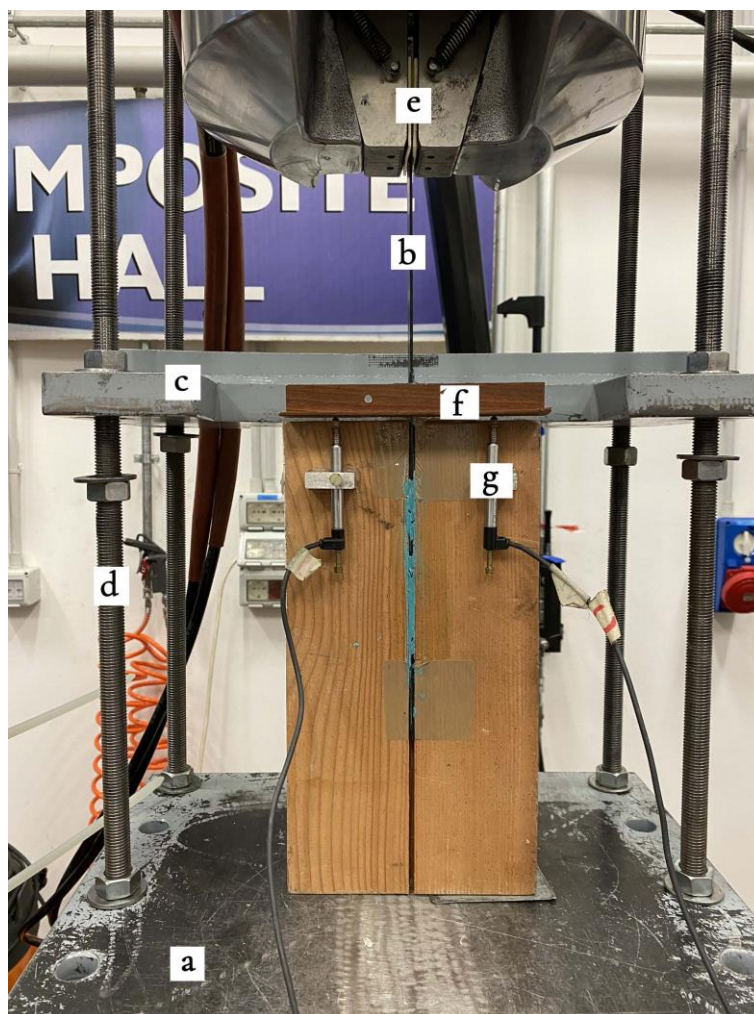


Figura 7.11 - Setup della prova senza DIC

Infine, si installano tutti gli strumenti necessari alla lettura dei dati tramite la Digital Image Correlation (DIC). Questo passaggio è approfondito nel capitolo seguente dedicato interamente alla lettura dei dati tramite correlazione di fotografie.

A questo punto è possibile procedere con l'avvio della prova.

7.3.1 DIC E POST PROCESSING

La DIC, acronimo di Digital Image Correlation, è una tecnica ottica di analisi dati relativamente recente che permette, grazie al confronto di una o più fotografie, di esaminare i campi di spostamento che subiscono i corpi sottoposti a sollecitazioni di qualsiasi genere. Nello specifico, si tratta di una tecnica non distruttiva e senza contatto che permette, tramite la misurazione della variazione di posizione di blocchi di pixel, di calcolare gli spostamenti relativi tra i punti e di conseguenza le deformazioni superficiali dell'elemento da studiare. Gli unici due strumenti necessari sono una macchina fotografica e un computer che, grazie ad uno specifico software di analisi, permette di elaborare i dati ottenuti.

Per tracciare il movimento di ciascun punto della superficie è necessario applicare un motivo a macchie (speckle pattern), in modo tale da ottenere una serie di marcatori che permettono di identificare in modo univoco tutti i punti [55]. Idealmente la misura ottimale è quella che associa ad ogni pixel un punto univoco ma ciò è praticamente impossibile da realizzare. Nella realtà, gli spostamenti vengono determinati considerando il movimento di piccoli blocchi di pixel, denominati subset.

Per il corretto funzionamento è necessario che i blocchi di pixel siano casuali e unici. L'accuratezza della tecnica dipende da diversi fattori tra cui gli algoritmi di interpolazione, la distorsione delle lenti, l'uniformità della distribuzione della luce e la qualità dello speckle pattern [56].

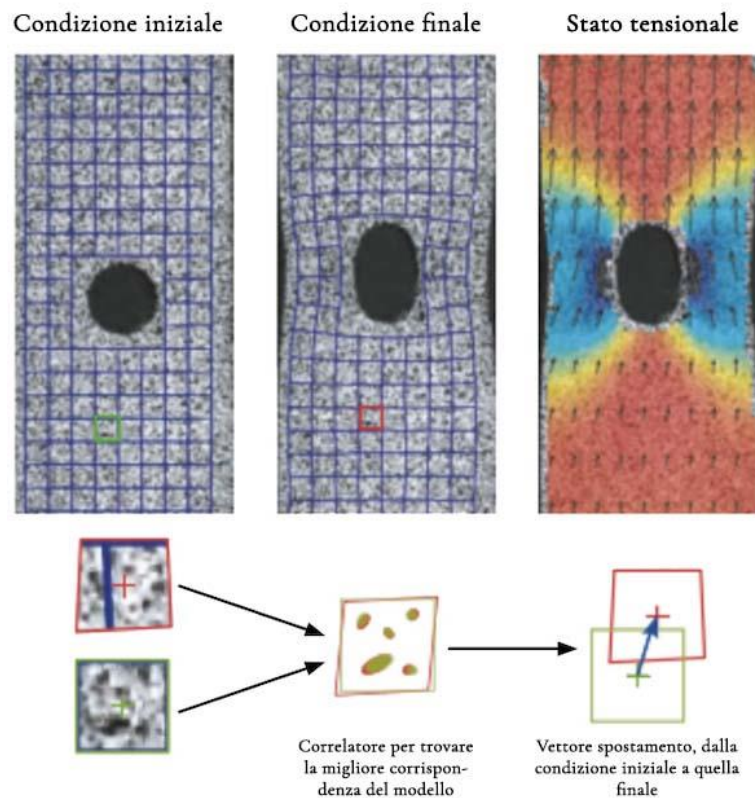


Figura 7.12 - Principio di funzionamento DIC [55]

Rispetto ai metodi convenzionali come, ad esempio, la misurazione con gli estensimetri, la DIC consente di ottenere misure a tutto campo e molto precise poiché viene evitata qualsiasi tipo di interferenza tra lo strumento e il provino. È una tecnica estremamente versatile poiché può essere adattata alle varie dimensioni degli elementi da analizzare, dalle campate dei ponti fino ai pezzi meccanici di precisione. Inoltre, con l'utilizzo simultaneo di due macchine fotografiche, è possibile conoscere le coordinate spaziali di ogni punto e di conseguenza ottenere la mappatura 3D degli spostamenti. Un ulteriore vantaggio derivante dall'utilizzo della DIC è il costo contenuto necessario per la misurazione. Infatti, non sono necessari particolari strumenti se non una macchina fotografica di buona qualità e un computer, mediamente performante, per analizzare i dati ottenuti.

Di contro, però, la tecnica presenta ancora dei punti critici essendo un metodo di misura relativamente recente. Il problema principale consiste nell'incertezza dei valori di deformazione poiché ricavati indirettamente con un'operazione di derivazione rispetto agli spostamenti. Come noto, la differenziazione numerica amplifica gli errori causando risultati meno accurati. Un altro dubbio è relativo alla fase di post processing, in particolare l'interpolazione dell'immagine è ancora uno step critico degli algoritmi DIC. Infine, un'ulteriore problematica riscontrata è quella relativa al posizionamento della fotocamera che, se non adeguatamente allineata all'elemento da analizzare, causa risultati di qualità scadente.

PREPARAZIONE DEL SETUP ED ESECUZIONE DELLA PROVA

Dopo aver visto cos'è la Digital Image Correlation ed averne enunciato il funzionamento base, si procede descrivendo il setup utilizzato durante la campagna di prove sperimentali, le modalità esecutive e le accortezze adottate per ottenere dati di buona qualità.

Oltre alla preparazione del setup, la buona riuscita della misurazione con DIC dipende anche dalla qualità dei provini. Per ottenere campioni adatti allo scopo, in primis si è verificato che la superficie su cui applicare lo speckle pattern fosse sufficientemente regolare e ben pulita. Appurata l'adeguatezza della stessa, sono state applicate due mani di vernice bianca in modo da rendere il colore di base uniforme massimizzando così il contrasto con il colore nero dei puntini del pattern. Infine, come visto in precedenza, i punti neri della trama sono stati realizzati spruzzando con una bomboletta spray la superficie precedentemente verniciata. L'utilizzo della bomboletta consente di creare un motivo casuale, condizione necessaria per il corretto funzionamento della DIC.

Ultimata la fase di preparazione dei campioni, è stata allestita la postazione per la rilevazione dei dati (Figura 7.13). Inizialmente, è stata collocata la macchina

fotografica su un treppiede e posizionata in modo che fosse planare e parallela al provino da analizzare.

La macchina fotografica adoperata durante le prove è una Nikon D7500 dotata di un sensore da 20 Megapixel full frame con filtro anti-aliasing. Il range di ISO che può coprire è tra i 100 e i 51200, con una massima velocità di scatto pari a 1/8000 e con uno scatto continuo che può arrivare a 8 frame al secondo.

Successivamente, il device è stato collegato al computer per mezzo di un cavo USB. Ciò ne ha permesso il controllo da remoto mediante software apposito (nello specifico digiCam Control) con i vantaggi di:

- Evitare contatti accidentali con la macchina fotografica. Spostamenti anche minimi del dispositivo rendendo inutilizzabili i dati ottenuti;
- Scattare fotografie in modalità manuale, impedendo così che automatismi della macchina, come la messa a fuoco, possano cambiare la scala cromatica delle fotografie.

Successivamente è stato installato un faretto per illuminare la superficie del provino. Ciò consente di avere un'illuminazione sufficiente ed uniforme ed evita che ombre accidentali, derivanti dalla luce ambientale, possano alterare alcune fotografie.

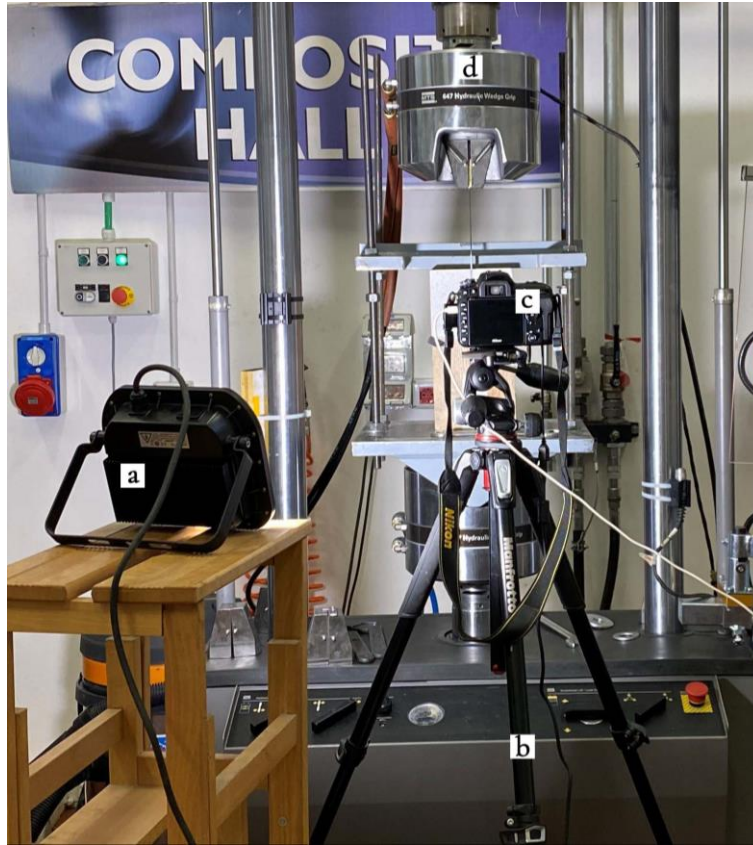


Figura 7.13 - Setup di prova per DIC. a) Faretto per illuminare b) treppiede c) Macchina fotografica d) macchina per la prova

Una volta completato l'allestimento del setup, è stata impostata la frequenza di scatto della macchina fotografica; nello specifico, è stato scelto un lasso temporale tra una foto e l'altra pari a 12 secondi.

Ultimo passaggio fondamentale prima dell'avvio del test è lo scatto di una fotografia che contenga un riferimento, necessario poi per la conversione da pixel a millimetri. Risulta conveniente utilizzare un righello in quanto, per sua stessa natura, è munito di una scala graduata.

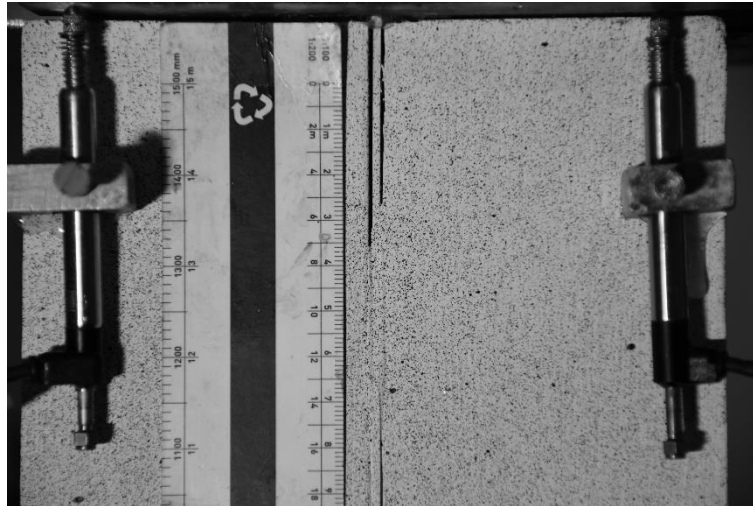


Figura 7.14 – Fotografia contenente un riferimento (righello) utile alla conversione pixel/mm

POST PROCESSING: VIC-2D 2009

Completate le prove meccaniche sui provini, il passo successivo consiste nell'analizzare le fotografie scattate e i dati relativi. A tale scopo è stato utilizzato in primis il programma Vic-2D 2009⁸ e successivamente la sua versione aggiornata denominata Vic-2D 7⁹ rispettivamente per i campioni appartenenti alle serie DS_C_30 e DS_C_150. Questi software, utilizzando algoritmi di correlazione ottimizzati, sono in grado di analizzare le fotografie scattate fornendo risultati relativi agli spostamenti e alle deformazioni dei provini testati. L'uso di questi programmi è relativamente semplice e di seguito sono spiegati i passaggi fondamentali per l'estrapolazione dei dati (di seguito vengono riportati i passaggi effettuati su Vic-2D 2009, risultano però identici nella versione aggiornata del programma).

La prima cosa fondamentale da fare dopo l'avvio del software consiste nel caricare la fotografia contenente il riferimento esterno in modo da impostare il fattore di conversione.

⁸ Programma prodotto dalla software house Correlated Solutions.

⁹ Programma prodotto dalla software house Correlated Solutions.

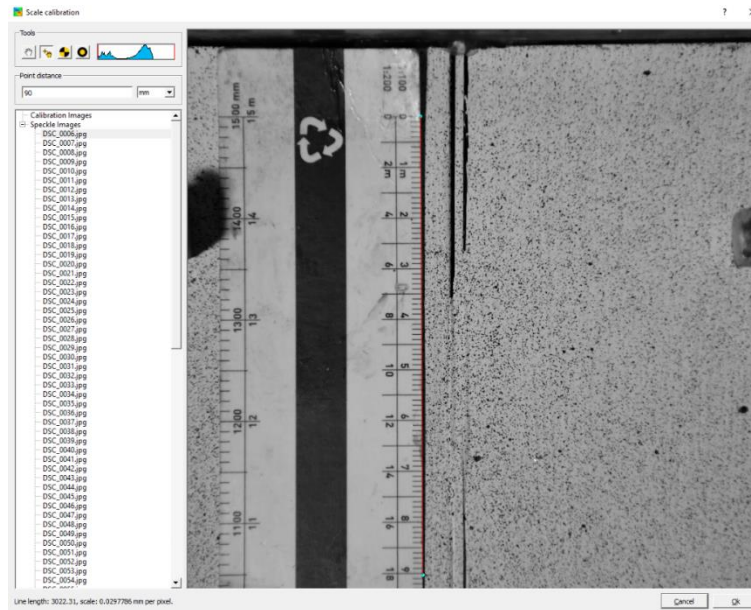


Figura 7.15 - Impostazione del fattore di conversione per mezzo della fotografia contenente il riferimento. Fatto ciò, è possibile caricare le restanti fotografie scattate durante lo svolgimento della prova. A questo punto, si deve selezionare l'area di analisi dei dati, denominata Area Of Interest (AOI). Selezionare una corretta AOI, priva di elementi inutili e contenente tutte le zone relativamente importanti, consente di limitare il carico computazionale che deve sviluppare il computer. Nello specifico, l'area selezionata è solamente quella circostante alla lamina e non l'intera superficie del provino.

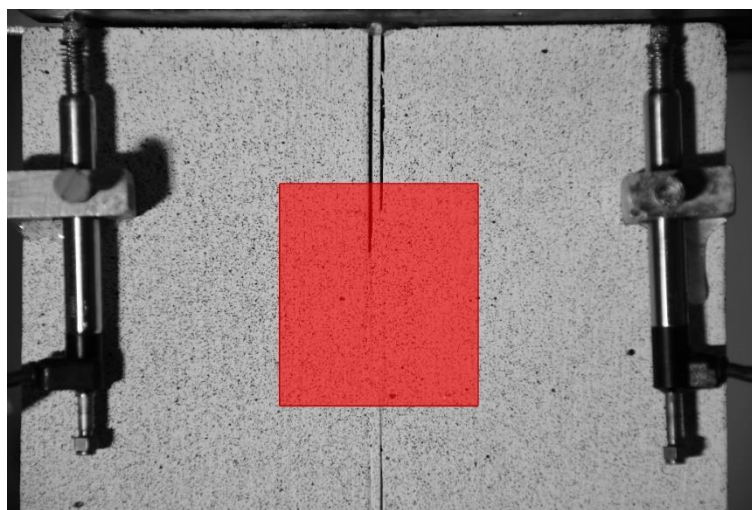


Figura 7.16 - Area Of Interest (AOI) del provino DS_C_30_1. È stato preso in considerazione solamente il tratto circostante alla lunghezza di ancoraggio.

Si procede a questo punto con il settaggio dei parametri *subset* e *step*. Il *subset* indica la dimensione delle celle di pixel da analizzare mentre lo *step* rappresenta il passo tra di esse. Ricordando che i programmi di analisi DIC lavorano per celle di pixel e non singolarmente su di essi, appare evidente come l'impostazione del *subset* sia fondamentale per la corretta analisi dei dati. Celle di dimensioni troppo elevate causano risultati approssimativi ed imprecisi, quelle di dimensioni limitate non permettono di avere un pattern unico e riconoscibile per ogni cella rendendo impossibile lo studio degli spostamenti. Occorre inoltre tenere presente che la dimensione del *subset* è inversamente proporzionale al rumore derivante dall'analisi. È pertanto necessario trovare il giusto equilibrio tra il dettaglio delle analisi che si intende svolgere e il rumore dei risultati che si desidera ottenere. Invece, la dimensione dello *step* definisce la spaziatura tra i *subset* che vengono analizzati durante la correlazione. Questo parametro influenza fortemente il tempo necessario all'analisi poiché quest'ultimo varia inversamente al quadrato della dimensione del passo.

Nel caso in esame, grazie ai tentativi effettuati in precedenza dall'Ing. Simone Biondo, si è scelta una configurazione che prevede un *subset* 41 con *step* 10.

Il programma ora è pronto per l'avvio dell'analisi. La AOI individuata nella fotografia di partenza viene ricercata nei successivi fotogrammi e, non trovandosi generalmente nella stessa posizione, vengono calcolati gli spostamenti e le relative deformazioni. Per ogni fotografia viene creato un file avente estensione .CSV contente le informazioni riportate in Figura 7.17, dove:

- "X" e "Y" è la posizione, in pixel, del punto desiderato;
- "u" e "v" sono gli spostamenti relativi lungo l'asse X e quelli lungo Y;
- "e" sono le deformazioni.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	"x"	"y"	"u"	"v"	"sigma"	"x_c"	"y_c"	"u_c"	"v_c"	"exx"	"eyy"	"exy"	"e1"	"e2"	"gamma"
2	2005	1285	0.005408	0.283393	0.020531	-23.1975	17.0036	0.00016	-0.00844	0.000524	0.000442	-0.00058	0.001064	-9.84E-05	-0.75003
3	2015	1285	-0.02973	0.224956	0.025724	-22.8997	17.0036	-0.00089	-0.0067	0.000361	0.000337	-0.00045	0.000804	-0.00011	-0.772
4	2025	1285	-0.00275	0.26223	0.019478	-22.602	17.0036	-8.00E-05	-0.00781	0.000283	0.00021	-0.00035	0.000595	-0.0001	-0.73309
5	2035	1285	0.009444	0.3018	0.013641	-22.3042	17.0036	0.00028	-0.00899	0.000265	6.63E-05	-0.00026	0.000439	-0.00011	-0.59997
6	2045	1285	0.006619	0.308005	0.011512	-22.0064	17.0036	0.000196	-0.00917	0.000281	-8.55E-05	-0.00018	0.000355	-0.00016	-0.38956
7	2055	1285	-0.00026	0.31113	0.011619	-21.7086	17.0036	-7.27E-06	-0.00927	0.000309	-0.00024	-0.00012	0.000336	-0.00026	-0.21416
8	2065	1285	-0.02298	0.300169	0.013169	-21.4108	17.0036	-0.00068	-0.00894	0.000334	-0.00038	-8.77E-05	0.000345	-0.00039	-0.12065
9	2075	1285	-0.01556	0.297111	0.012745	-21.113	17.0036	-0.00047	-0.00885	0.000349	-0.0005	-7.16E-05	0.000355	-0.00051	-0.08309
10	2085	1285	0.009308	0.30575	0.013004	-20.8152	17.0036	0.000276	-0.00911	0.000343	-0.00062	-6.93E-05	0.000348	-0.00062	-0.07178
11	2095	1285	0.041349	0.335055	0.012974	-20.5175	17.0036	0.001229	-0.00998	0.000323	-0.00071	-8.73E-05	0.00033	-0.00072	-0.08357
12	2105	1285	0.052859	0.336061	0.013981	-20.2197	17.0036	0.001578	-0.01001	0.000283	-0.00079	-0.00012	0.000297	-0.0008	-0.11362
13	2115	1285	0.017923	0.352793	0.013122	-19.9219	17.0036	0.000531	-0.01051	0.000221	-0.00085	-0.00018	0.000249	-0.00088	-0.15903
14	2125	1285	-0.00485	0.351788	0.012465	-19.6241	17.0036	-0.00015	-0.01048	0.000141	-0.00089	-0.00024	0.000194	-0.00094	-0.21685
15	2135	1285	-0.01479	0.325409	0.012375	-19.3263	17.0036	-0.00044	-0.00969	4.91E-05	-0.00091	-0.0003	0.000137	-0.001	-0.28132
16	2145	1285	0.007883	0.286269	0.011629	-19.0285	17.0036	0.000233	-0.00852	-4.62E-05	-0.00093	-0.00036	8.37E-05	-0.00106	-0.34429
17	2155	1285	-0.00532	0.310689	0.010774	-18.7307	17.0036	-0.00016	-0.00925	-0.00013	-0.00093	-0.00041	3.79E-05	-0.0011	-0.39766
18	2165	1285	0.013181	0.346666	0.010909	-18.433	17.0036	0.000393	-0.01032	-0.0002	-0.00092	-0.00043	2.25E-06	-0.00112	-0.43519
19	2175	1285	0.055225	0.355808	0.016336	-18.1352	17.0036	0.001643	-0.0106	-0.00023	-0.0009	-0.00043	-2.06E-05	-0.00111	-0.45269

Figura 7.17 - Esempio output del programma Vic-2D

POST PROCESSING: MATLAB

Ottenuti i file .CSV di ciascuna fotografia è possibile procedere con il loro studio. Al fine di velocizzare l'analisi dei risultati è stato utilizzato il programma MatLab¹⁰, strumento che consente di analizzare i dati, sviluppare algoritmi e creare modelli matematici. In particolare, si è fatto uso di tre script principali, creati con l'ausilio per l'appunto di MatLab, per ottenere le informazioni desiderate:

- Extract_square_quadrati: file che permette di calcolare gli spostamenti e le deformazioni lungo l'asse delle Y di due quadrati aventi in comune lo stesso valore sull'asse delle ordinate (corrispondente alla "loaded end"). Il primo fra i due quadrati è relativo al legno mentre il secondo fa riferimento alla lamina. Vengono analizzati tutti i file .CSV in questo modo è possibile ottenere, per ogni istante di tempo, gli spostamenti e le deformazioni della lamina depurati dagli effetti dei movimenti rigidi dell'intero provino.
- Extract_def_spo_y_lamina: file che consente di valutare le deformazioni e gli spostamenti lungo la lamina. In questo caso vengono analizzate due fasce parallele all'asse delle Y, la prima in corrispondenza del legno e la

¹⁰ Programma prodotto dalla software house MathWorks.

seconda nella zona del rinforzo. Viene esaminato solamente il file .CSV corrispondente alla forza massima registrata. Ciò consente di ottenere risultati depurati dagli effetti dei movimenti rigidi dell'intero provino nella condizione ultima di rottura.

- `Extract_def_x`: file che permette di calcolare gli spostamenti e le deformazioni lungo l'asse delle Y di fasce continue parallele all'asse delle X. Vengono analizzati solamente i file .CSV associati alle condizioni di carico pari al 20%, 40%, 60%, 80% e 100% della forza massima registrata. Quest'analisi permette di determinare l'area di influenza del rinforzo, cioè quella in cui l'FRP trasmette le tensioni al legno tramite il giunto incollato.

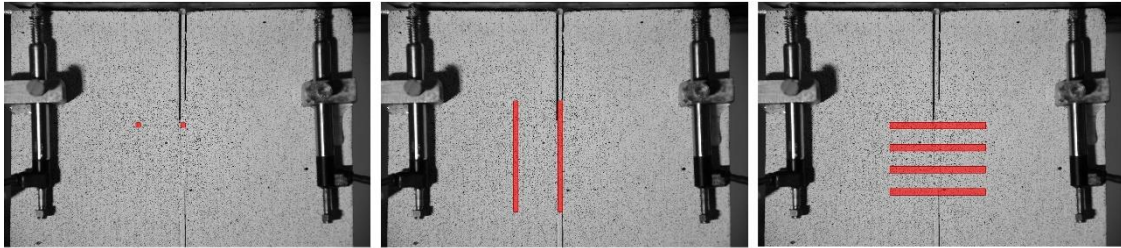


Figura 7.18 - Aree di riferimento dei file `Extract_square_quadrati`, `Extract_def_y_lamina` e `Extract_def_x`

Tutti i risultati elaborati da MatLab vengono esportati in un unico file Excel, completando così quelli ottenuti dalla macchina di prova e dagli LVDT.

7.4 FILE OTTENUTI DALLE ANALISI

Tutti i dati raccolti per ciascun campione, da quelli prodotti dalla macchina di prova fino a quelli elaborati tramite DIC, sono stati raggruppati in un unico file Excel costituito da una serie di fogli contenenti informazioni differenti.

Poiché la tecnica DIC non è stata applicata al secondo gruppo di provini, i fogli Excel con la dicitura "DIC" fanno riferimento solamente al primo e al terzo blocco di campioni.

DATI DI INPUT

In questo foglio sono presenti le principali caratteristiche degli elementi costituenti i provini testati, in particolare vengono definiti:

- E_{CFRP} = modulo elastico delle lamine in CFRP [GPa];
- A_{CFRP} = area della sezione delle lamine in CFRP [mm²];
- L_{lib} = distanza tra il bordo del provino e la colla [mm];
- L_b = lunghezza di ancoraggio [mm];
- P_f = perimetro delle lamine [mm];
- P_w = perimetro della fresatura [mm].

Questi dati saranno poi utili per il calcolo dello spostamento reale della lamina e per determinare la forza di legame presente.

OUTPUT MACCHINA

In questa sezione vengono riportati i dati registrati dalla macchina combinati con quelli registrati dai due LVDT, nello specifico il tempo [s], lo spostamento misurato dai due distanziometri [mm] e la forza [kN].

Oltre a ciò, vengono calcolati la media tra gli spostamenti registrati tra i due distanziometri [mm] e l'allungamento elastico del rinforzo nella zona non incollata [mm] compresa tra la loaded end e il bordo del blocco in legno. Questi due parametri consentono di ricavare, per semplice sottrazione, il reale

spostamento della zona incollata [mm]. Analiticamente si può esprimere questo concetto come:

$$S_{reale,CFRP} = S_{av,LVDT} - \Delta l_{el}$$

Dove:

- $S_{reale,CFRP}$ = spostamento reale della zona incollata [mm];
- $S_{av,LVDT}$ = media tra gli spostamenti registrati da LVDTc e LVDTd [mm];
- Δl_{el} = allungamento elastico della lamina nella zona non incollata [mm].

Il termine relativo all'allungamento elastico può essere calcolato come:

$$\Delta l_{el} = \frac{F}{E_{CFRP} \cdot A_{CFRP}} \cdot l_{lib}$$

Dove:

- F = forza registrata [kN];
- E_{CFRP} = 165 GPa;
- A_{CFRP} = 25,6 mm²;
- L_{lib} = 50 mm;

Oltre ai dati relativi agli spostamenti, in questo foglio viene calcolata la forza di legame presente all'interfaccia tra le superfici incollate. Si tratta del valore medio distribuito lungo la superficie incollata, ricavato tramite le seguenti formule [37]:

Tensione trasmessa dalla colla alla lamina: $\tau_{max,av,CFRP} = \frac{F_{max}}{P_f \cdot L_b}$

Tensioni trasmesse dalla colla al legno: $\tau_{max,av,W} = \frac{F_{max}}{P_w \cdot L_b}$

Dove:

- F_{max} = carico massimo registrato dalla cella di carico [kN];
- P_f = 35,2 mm;
- P_w = 44 mm.

Tempo s	LVDTc mm	LVDTd mm	Forza kN	media LVDT mm	Allungamento elastico mm	Spostamento reale mm	Forza di legame media		
							$\tau_{max,av,FRP}$	10.8053	MPa
30.00	-0.0002	0.0003	0.3455	0.0001	1.4688E-06	5.9568E-05	$\tau_{max,av,W}$	8.2022	MPa
30.20	-0.0002	0.0003	0.3443	0.0001	1.4637E-06	6.2865E-05			
30.40	-0.0002	0.0003	0.3418	0.0001	1.4534E-06	6.6555E-05			
30.60	-0.0002	0.0003	0.3426	0.0001	1.4568E-06	6.4442E-05			
30.80	-0.0002	0.0003	0.3467	0.0001	1.4739E-06	5.8108E-05			
31.00	-0.0002	0.0003	0.3466	0.0001	1.4737E-06	5.5348E-05			
31.20	-0.0002	0.0003	0.3440	0.0001	1.4625E-06	5.8385E-05			
31.40	-0.0002	0.0003	0.3457	0.0001	1.4698E-06	6.2320E-05			
31.60	-0.0002	0.0003	0.3503	0.0001	1.4892E-06	6.5972E-05			
31.80	-0.0002	0.0003	0.3535	0.0001	1.5030E-06	7.1078E-05			
32.00	-0.0002	0.0003	0.3564	0.0001	1.5154E-06	7.4481E-05			
32.20	-0.0002	0.0003	0.3612	0.0001	1.5356E-06	7.3543E-05			
32.40	-0.0002	0.0003	0.3636	0.0001	1.5459E-06	6.9592E-05			
32.60	-0.0002	0.0003	0.3644	0.0001	1.5494E-06	6.2481E-05			
32.80	-0.0002	0.0003	0.3683	0.0001	1.5657E-06	5.0492E-05			
33.00	-0.0002	0.0003	0.3723	0.0000	1.5828E-06	3.5610E-05			
33.20	-0.0002	0.0003	0.3722	0.0000	1.5826E-06	2.9429E-05			
33.40	-0.0002	0.0003	0.3711	0.0000	1.5778E-06	2.8644E-05			

Figura 7.19 - Foglio di calcolo "Outpur macchina"

DIC – SQUARE

Le prime quattro colonne di questo foglio sono dedicate alla caratterizzazione delle fotografie scattate per la DIC. In particolare, nella prima colonna è annotato il nome dello scatto, nella seconda il tempo trascorso dall'inizio della prova [s], nella terza la forza corrispondente al tempo trascorso (calcolata ricercando il valore corrispondente nel foglio di "Output macchina) e nell'ultima la percentuale di forza rispetto a quella massima registrata [%].

Nelle colonne seguenti sono riportati i valori estratti, mediante l'utilizzo di MatLab, degli spostamenti [pixel] e delle deformazioni [1] del legno e del rinforzo aventi ordinata pari a quella dell'inizio della "loaded end". Calcolare gli spostamenti all'interno del legno consente di depurare quelli della lamina, eliminando così gli effetti dovuti a movimenti rigidi dell'intero provino.

Infine, tutti i valori degli spostamenti sono poi moltiplicati per il fattore di conversione mm/pixel in modo che siano riferiti al sistema internazionale.

Nome Foto n	Tempo s	Forza LVDT kN	Forza %	v_wood pixel	v_FRP pixel	Δv pixel	v_wood mm	v_FRP mm	Δv mm	ASS(Δv) mm	e_wood	e_FRP
6	0	0.3455	3.19%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000E+00	0.0000E+00
7	12	0.4586	4.24%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000E+00	0.0000E+00
8	24	0.5822	5.38%	0.3156	0.2783	-0.0373	0.0094	0.0083	-0.0011	0.0011	-4.4096E-05	1.7777E-05
9	36	0.6998	6.47%	0.4873	0.4100	-0.0773	0.0145	0.0122	-0.0023	0.0023	-1.1222E-04	-8.0009E-05
10	48	0.8216	7.60%	0.8217	0.6899	-0.1318	0.0245	0.0205	-0.0039	0.0039	9.0271E-06	-4.7805E-05
11	60	0.9318	8.62%	1.1918	1.0344	-0.1575	0.0355	0.0308	-0.0047	0.0047	4.9200E-05	-1.7504E-04
12	72	1.0566	9.77%	1.5153	1.3614	-0.1539	0.0451	0.0405	-0.0046	0.0046	5.5026E-05	-4.3845E-05
13	84	1.1719	10.84%	1.6695	1.4465	-0.2230	0.0497	0.0431	-0.0066	0.0066	5.9209E-05	-9.5124E-05
14	96	1.2987	12.01%	2.1792	1.9472	-0.2319	0.0649	0.0580	-0.0069	0.0069	1.8386E-05	2.7096E-05
15	108	1.4078	13.02%	2.1834	1.9144	-0.2691	0.0650	0.0570	-0.0080	0.0080	-1.8933E-05	-3.2896E-05
16	120	1.5287	14.14%	2.5296	2.2176	-0.3120	0.0753	0.0660	-0.0093	0.0093	7.5964E-05	2.0476E-05
17	132	1.6459	15.22%	2.9738	2.6269	-0.3469	0.0886	0.0782	-0.0103	0.0103	1.0336E-04	2.6795E-05
18	144	1.7728	16.39%	3.0835	2.6764	-0.4071	0.0918	0.0797	-0.0121	0.0121	-1.8693E-05	-8.3834E-05
19	156	1.8944	17.52%	3.3445	2.9479	-0.3966	0.0996	0.0878	-0.0118	0.0118	1.0950E-04	-1.7301E-04
20	168	2.0108	18.59%	3.7745	3.3448	-0.4297	0.1124	0.0996	-0.0128	0.0128	7.1206E-06	1.0489E-04
21	180	2.1245	19.65%	4.0671	3.5844	-0.4827	0.1211	0.1067	-0.0144	0.0144	4.9767E-05	-1.8047E-05
22	192	2.2218	20.55%	4.1610	3.6684	-0.4926	0.1239	0.1092	-0.0147	0.0147	5.9390E-05	-2.8999E-05
23	204	2.3293	21.54%	4.4195	3.8936	-0.5259	0.1316	0.1159	-0.0157	0.0157	5.2740E-05	5.5368E-05

Figura 7.20 - Foglio di calcolo "DIC - Square"

DIC – DEF. LAMINA

In questa parte del file viene studiato il comportamento della lamina nelle condizioni ultime, in particolare vengono studiate le deformazioni lungo lo sviluppo longitudinale della stessa.

È stata scelta un'area di lunghezza maggiore rispetto alla sola zona incollata, in questo modo vengono così calcolate anche le deformazioni registrate nelle zone non incollate, ovvero quella tra il bordo del blocco in legno e la l'inizio della colla e quella che si trova dopo la zona incollata.

Nello specifico, nel foglio sono riportati nella prima colonna i dati relativi alla posizione in Y (Figura 7.22) [mm], nella seconda vengono ripetuti i dati della posizione Y ma espressi in [pixel].

Nella terza colonna e nella quarta vengono riportati i dati estratti da MatLab relativi alle deformazioni della lamina e del legno e, infine, nella quinta è riportata la deformazione netta depurata dai movimenti rigidi del campione. A destra viene riportato un grafico Distanza Loaded End (Y) – Deformazione.

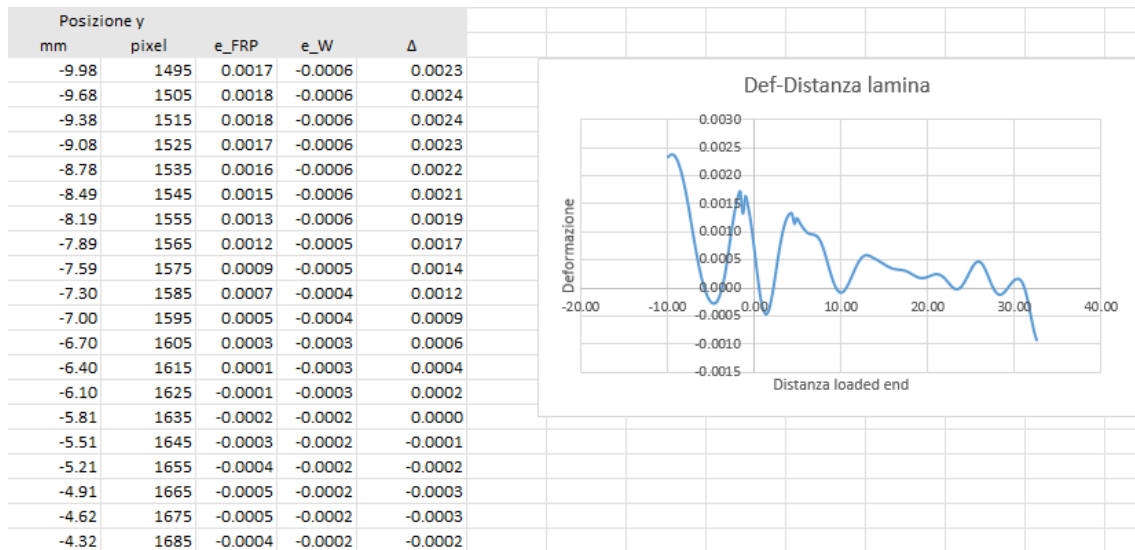


Figura 7.21 - Foglio di calcolo "DIC - Def. Lamina"

DIC – SEZIONE X + ELABORAZIONE

In questo foglio, per ogni percentuale di carico prefissata, vengono riportate le deformazioni [mm] e gli spostamenti registrati lungo ciascuna delle fasce parallele all'asse delle X necessarie per comprendere il comportamento nelle zone limitrofe alla lamina di rinforzo. Nello specifico, viene riportata nella prima colonna la posizione sull'asse delle ascisse del punto [pixel] e in quelle seguenti le deformazioni [1] e gli spostamenti [mm] registrati.

Nella parte a destra viene riportata una tabella che riassume i dati principali utilizzati nell'analisi: il fattore di conversione mm/pixel, i dati di input per MatLab, la percentuale di forza da analizzare e il numero del .CSV corrispondente alla specifica percentuale di sollecitazione.



Figura 7.22 - Schema usato nello studio del comportamento lungo la sezione [11]

posizione x pixel	F = 20%							
	e_y1	e_y2	e_y3	e_y4	s_y1	s_y2	s_y3	s_y4
2005	-5.90E-05	5.31E-06	1.92E-04	7.79E-04	0.1411	0.1419	0.1428	0.1454
2015	-3.09E-05	2.31E-05	1.61E-04	7.50E-04	0.1413	0.1419	0.1427	0.1447
2025	-1.02E-05	4.11E-05	1.30E-04	7.35E-04	0.1413	0.1418	0.1425	0.1439
2035	3.88E-06	5.95E-05	1.01E-04	7.34E-04	0.1411	0.1418	0.1423	0.1435
2045	1.25E-05	7.78E-05	7.47E-05	7.45E-04	0.1410	0.1416	0.1420	0.1436
2055	1.68E-05	9.55E-05	5.28E-05	7.64E-04	0.1409	0.1414	0.1418	0.1438
2065	1.78E-05	1.12E-04	3.58E-05	7.86E-04	0.1407	0.1415	0.1416	0.1435
2075	1.62E-05	1.26E-04	2.39E-05	8.04E-04	0.1402	0.1418	0.1415	0.1435
2085	1.46E-05	1.38E-04	1.52E-05	8.10E-04	0.1403	0.1417	0.1415	0.1432
2095	1.04E-05	1.48E-04	1.08E-05	8.03E-04	0.1403	0.1413	0.1415	0.1424
2105	4.03E-06	1.55E-04	1.05E-05	7.78E-04	0.1405	0.1408	0.1417	0.1427
2115	-3.93E-06	1.60E-04	1.35E-05	7.33E-04	0.1405	0.1404	0.1413	0.1431
2125	-1.29E-05	1.61E-04	1.89E-05	6.67E-04	0.1403	0.1403	0.1407	0.1428
2135	-2.20E-05	1.59E-04	2.53E-05	5.85E-04	0.1400	0.1403	0.1403	0.1425
2145	-3.08E-05	1.55E-04	3.17E-05	4.93E-04	0.1396	0.1403	0.1402	0.1422
2155	-3.87E-05	1.49E-04	3.69E-05	3.98E-04	0.1393	0.1396	0.1401	0.1422
2165	-4.56E-05	1.41E-04	4.02E-05	3.11E-04	0.1395	0.1394	0.1406	0.1427
2175	-5.12E-05	1.32E-04	4.12E-05	2.38E-04	0.1399	0.1394	0.1409	0.1425
2185	-5.54E-05	1.22E-04	4.00E-05	1.86E-04	0.1399	0.1397	0.1405	0.1416

Figura 7.23 - Foglio di calcolo DIC - Sezione X

F. Conversione mm/pixel	Sezioni					Forza	% Forza	CSV corrispondente
	Xmin pixel	Xmax pixel	Ymin pixel	Ymax pixel	Ymin mm			
0.0297786	2005	3465	1830	1930	0	4.40	40.73%	41
			2165	2265	9.98	6.54	60.45%	60
			2500	2600	19.95	8.69	80.33%	80
			2835	2935	29.93	10.81	100.00%	102

Figura 7.24 - Tabella riassuntiva del foglio di calcolo DIC - Sezione X

In un foglio successivo, denominato "DIC – sezione X elaborazione" vengono riassunti i dati principali estratti. Questo passaggio consente di analizzare più velocemente i dati significativi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	posizione x pixel	posizione [mm]	Y=20 s_y1	Y=40 s_y1	Y=60 s_y1	Y=80 s_y1	Y=100 s_y1	40-20 mm	60-40 mm	80-60 mm	100-80 mm	Fmax 0mm mm	Fmax 10 mm mm	Fmax 20 mm mm	max 30 mm mm				Deformazioni %
3	2005	-21.14	0.1411	0.3012	0.4606	0.6273	0.7988		0.1602	0.1594	0.1667	0.1715	0.798804096	0.7977178	0.8007135	0.803609			-0.01
4	2015	-20.85	0.1413	0.3011	0.4606	0.6273	0.7983		0.1601	0.1593	0.1667	0.1711	0.798348781	0.797139283	0.799837413	0.802631			-0.01
5	2025	-20.55	0.1413	0.3012	0.4604	0.6271	0.7980		0.1601	0.1591	0.1665	0.1707	0.79801675	0.797130349	0.799525334	0.80214			-0.01
6	2035	-20.25	0.1411	0.3007	0.4599	0.6263	0.7974		0.1596	0.1587	0.1657	0.1701	0.797353878	0.796768133	0.799389245	0.802079			-0.01
7	2045	-19.95	0.1410	0.3000	0.4595	0.6251	0.7966		0.1590	0.1583	0.1645	0.1693	0.796593035	0.796540462	0.798850848	0.802289			-0.01
8	2055	-19.65	0.1409	0.2995	0.4591	0.6243	0.7956		0.1585	0.1578	0.1637	0.1684	0.795645182	0.796158484	0.797733555	0.802295			-0.01
9	2065	-19.36	0.1407	0.2994	0.4585	0.6242	0.7948		0.1583	0.1572	0.1636	0.1675	0.794762544	0.795855554	0.797074853	0.801526			-0.01
10	2075	-19.06	0.1402	0.2988	0.4576	0.6232	0.7934		0.1578	0.1564	0.1626	0.1661	0.793384391	0.795517432	0.79663532	0.800338			-0.01
11	2085	-18.76	0.1403	0.2986	0.4570	0.6224	0.7926		0.1576	0.1558	0.1617	0.1653	0.792610147	0.794560727	0.796299418	0.798656			-0.01
12	2095	-18.46	0.1403	0.2984	0.4568	0.6220	0.7922		0.1574	0.1556	0.1613	0.1649	0.792164659	0.792865783	0.795741069	0.798387			-0.01
13	2105	-18.16	0.1405	0.2981	0.4565	0.6210	0.7916		0.1570	0.1553	0.1604	0.1643	0.79155658	0.790634554	0.795404571	0.797882			-0.02
14	2115	-17.87	0.1405	0.2982	0.4559	0.6211	0.7915		0.1571	0.1547	0.1604	0.1642	0.791483325	0.789142104	0.794181564	0.797419			-0.02
15	2125	-17.57	0.1403	0.2979	0.4554	0.6207	0.7911		0.1569	0.1541	0.1601	0.1638	0.791102754	0.78810608	0.791768902	0.796855			-0.02
16	2135	-17.27	0.1400	0.2979	0.4551	0.6202	0.7907		0.1568	0.1539	0.1596	0.1634	0.790704019	0.787251975	0.789500666	0.796306			-0.02
17	2145	-16.97	0.1396	0.2972	0.4547	0.6189	0.7896		0.1561	0.1534	0.1583	0.1623	0.789553374	0.787017266	0.787789885	0.796287			-0.02
18	2155	-16.68	0.1393	0.2967	0.4539	0.6176	0.7883		0.1556	0.1526	0.1570	0.1610	0.788258898	0.786716231	0.787169299	0.793545			-0.02
19	2165	-16.38	0.1395	0.2966	0.4532	0.6171	0.7878		0.1555	0.1520	0.1565	0.1605	0.787754746	0.786266033	0.786886402	0.790402			-0.03
20	2175	-16.08	0.1399	0.2961	0.4528	0.6166	0.7874		0.1551	0.1515	0.1560	0.1601	0.78740455	0.785351559	0.786455506	0.789903			-0.03

Figura 7.25 - Foglio di calcolo DIC - sezione X elaborazione

Capitolo 8

RISULTATI OTTENUTI

Per lo svolgimento dei test, sono stati codificati i provini secondo il seguente criterio:

DS_C_XXX_Y

Dove:

- DS: tipologia di prova eseguita (Direct Shear);
- C: materiale della lamina di rinforzo (Carbonio);
- XXX: lunghezza di ancoraggio [mm];
- Y: numerazione progressiva dei provini aventi le medesime peculiarità.

Durante questo stadio sperimentale sono stati realizzati tre set da quattro campioni ciascuno caratterizzati rispettivamente da una lunghezza di ancoraggio di 30 mm, 100 mm e 150 mm. La totalità dei provini testati, denominati secondo la codifica appena descritta, è:

1)	DS_C_30_1	DS_C_30_2	DS_C_30_3	DS_C_30_4
<hr/>				
2)	DS_C_100_1	DS_C_100_2	DS_C_100_3	DS_C_100_4
<hr/>				
3)	DS_C_150_1	DS_C_150_1	DS_C_150_1	DS_C_150_1

Tabella 8.1 - Riassunto dei provini testati rinforzati con lamine di carbonio

Nel momento di rottura, la prova è stata automaticamente interrotta dalla macchina a causa del repentino spostamento dovuto al cedimento del campione. Per estrarre le lamine dal blocco in legno, una volta concluso il test, è stato necessario applicare un'elevata forza di trazione.

8.1 DS_C_30

Come si denota dalla codifica, questo gruppo di provini è caratterizzato da una lamina in CFRP incollata al blocco ligneo per una lunghezza di ancoraggio di 30 mm. I profili di rinforzo sono caratterizzati da un modulo elastico E_{CFRP} pari a 165 GPa e le caratteristiche geometriche, descritte nel capitolo 7.4, sono:

- $A_{CFRP} = 25,6 \text{ mm}^2$;
- $L_{lib} = 50 \text{ mm}$;
- $P_f = 35,2 \text{ mm}$;
- $P_w = 44 \text{ mm}$;
- $L_b = 30 \text{ mm}$.

Le prove sono state eseguite con velocità costante pari a 0,05 mm/min con un tempo medio di 19 min e 15 sec. Oltre alla misurazione tramite LVDT, è stata utilizzata la DIC con un intervallo di scatto delle fotografie di 12 secondi. Per l'analisi dati sono stati impostati i parametri di subset e step rispettivamente pari 41/61 (41 per il primo provino e 61 per i rimanenti) e 10. Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva della durata della prova e il numero delle fotografie scattate per ciascun provino.

Provino	Durata prova [min]	N° di foto
DS_C_30_1	19'15''	97
DS_C_30_2	22'55''	115
DS_C_30_3	18'20''	92
DS_C_30_4	16'20''	82

Tabella 8.2 - Durata delle prove e numero di foto scattate per ciascun provino della serie DS_C_30

8.1.1 DS_C_30_1

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 10,83 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore. Come si può notare nella Figura 8.1, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla poliuretano. Se da un lato della lamina (a) l'adesivo è rimasto ancorato al rinforzo, dall'altro (b) non è così. La superficie da cui si è staccato l'adesivo è rimasta di conseguenza liscia e lucida. Non deve trarre in inganno la colla poliuretano rimasta sul lato (b) poiché non facente parte della regione incollata ma bensì di quella successiva precedentemente protetta dal nastro adesivo.



Figura 8.1 - Lamina del provino DS_C_30_1, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

Di seguito sono riportati i grafici che mettono in relazione lo scorrimento verticale subito dal rinforzo in CFRP al carico applicato. Nel primo è riportata la relazione $F - s$ ottenuta dagli spostamenti misurati tramite gli LVDT, nel secondo la relazione $F - s$ ottenuta mediante DIC e nell'ultimo viene riportato il confronto tra le due metodologie di misurazione.

È utile ricordare che gli scorrimenti misurati tramite estensimetri vengono depurati dall'effetto dell'allungamento elastico della lamina, mentre quelli ottenuti tramite DIC sono ottenuti sottraendo i movimenti rigidi del campione.

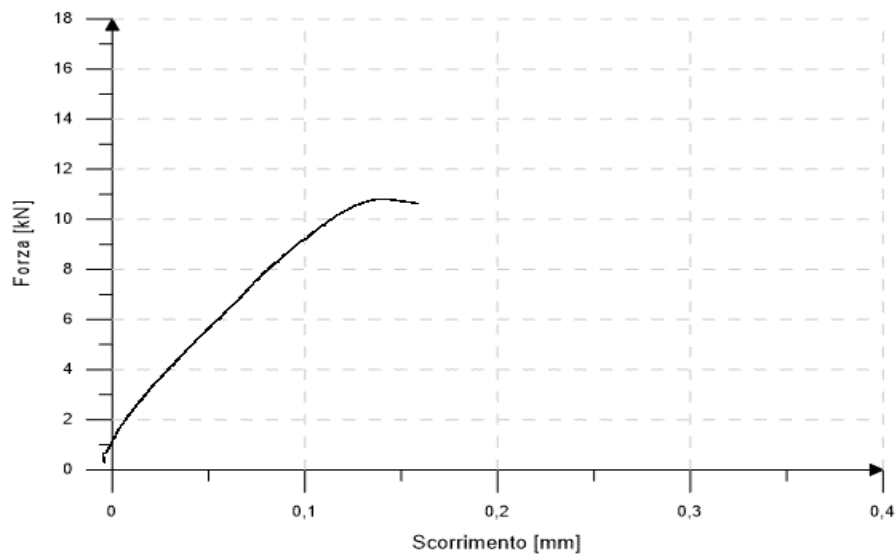


Grafico 8.1 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_1, ricavata tramite LVDT

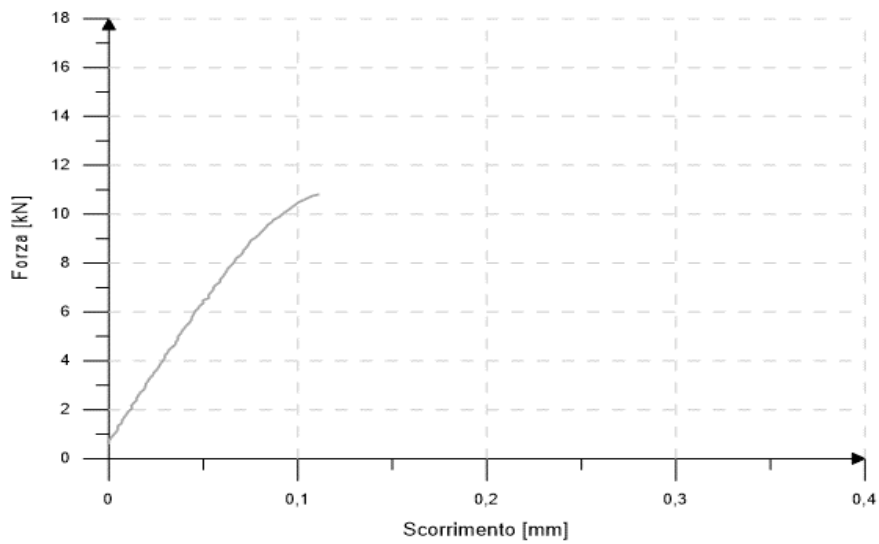


Grafico 8.2 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_1, ricavata tramite DIC

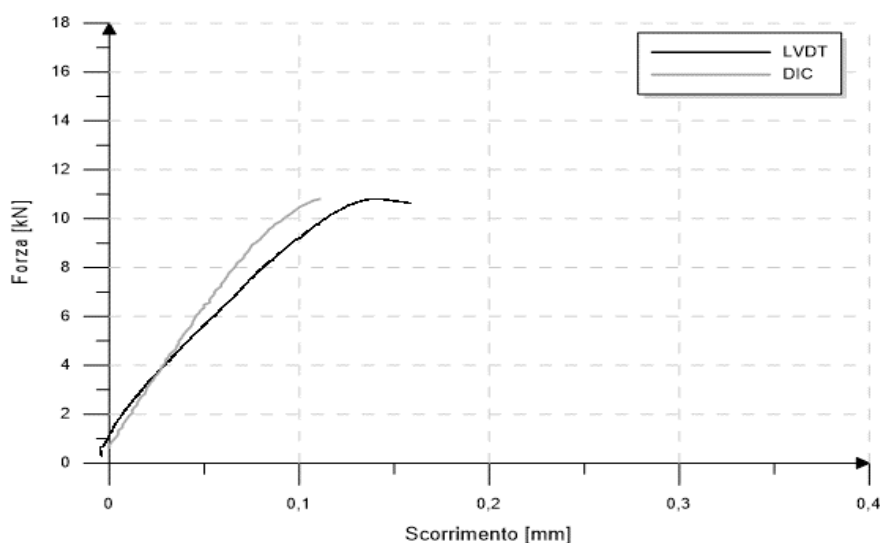


Gráfico 8.3 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_1, ricavata tramite LVDT e DIC

Benché le curve ottenute siano caratterizzate dallo stesso andamento, si nota una maggiore rigidità in quella ottenuta mediante DIC. Questo risultato non costituisce di per sé un errore in quanto gli spostamenti tramite LVDT possono presentare valori sovrastimati.

Provino	F_{max} [kN]	s_{LVDT} [mm]	s_{DIC} [mm]
DS_C_30_1	10,83	0,140	0,121

Tabella 8.3 - Carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_C_30_1

In termini percentuali, tra i due metodi di misura si nota una differenza nello spostamento ultimo pari al 14%.

FORZE DI LEGAME MEDIE

Le forze di legame medie presenti sulla superficie del legno e del rinforzo sono calcolate mediante le formule riportate nel capitolo 7.4.

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_30_1	10,25	8,20

Tabella 8.4 - Forze di legame medie per il provino DS_C_30_1

COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

L'utilizzo della DIC ha consentito di ricavare gli spostamenti e le deformazioni lungo lo sviluppo longitudinale della lamina di rinforzo. Nei grafici seguenti è stata assegnata all'ascissa nulla la posizione geometrica della loaded end. Alla sua destra si sviluppa la porzione incollata fino al raggiungimento dei 30 mm corrispondenti alla lunghezza di ancoraggio definita in partenza.

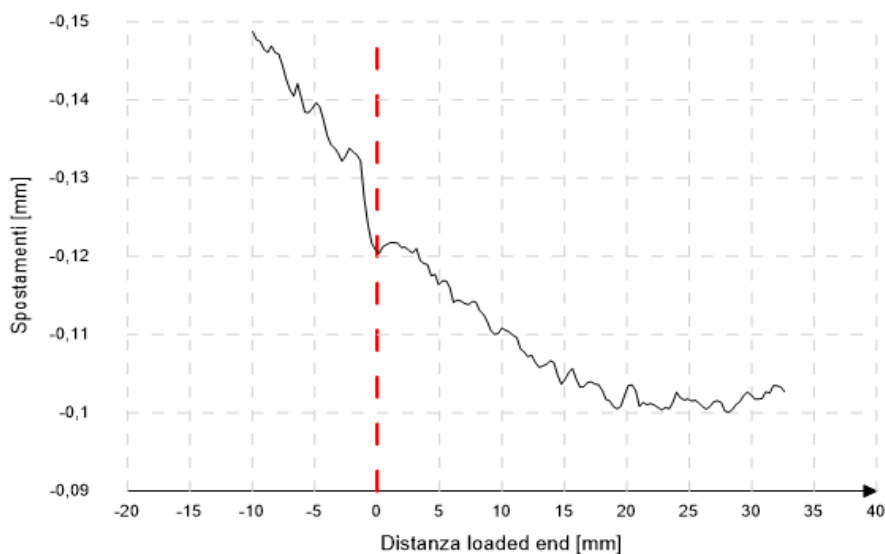


Grafico 8.4 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_30_1

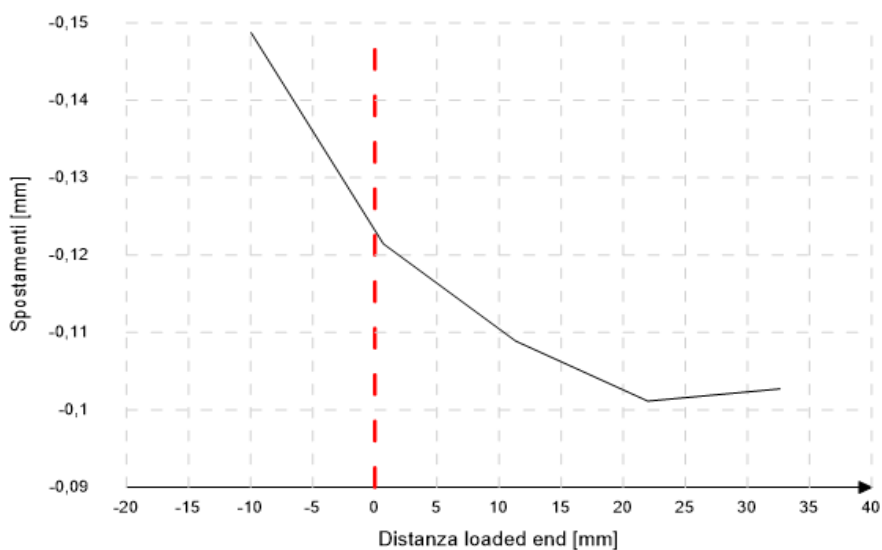


Grafico 8.5 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_30_1

La curva ottenuta nel Grafico 8.4 risulta essere in linea generale coerente con quanto atteso a livello teorico. Allontanandosi dalla loaded end, punto di applicazione del carico, si assiste alla riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. Nell'ultimo tratto è presente però un'impresione, ossia gli spostamenti sono crescenti invece di essere decrescenti. Dai grafici è possibile individuare la presenza di tre punti in cui la curva cambia inclinazione: $X \cong 0$ mm, $X \cong 10$ mm e $X \cong 22,5$ mm. Derivando gli spostamenti ottenuti il software di post-processing è in grado di ricavare le deformazioni lungo la lamina.

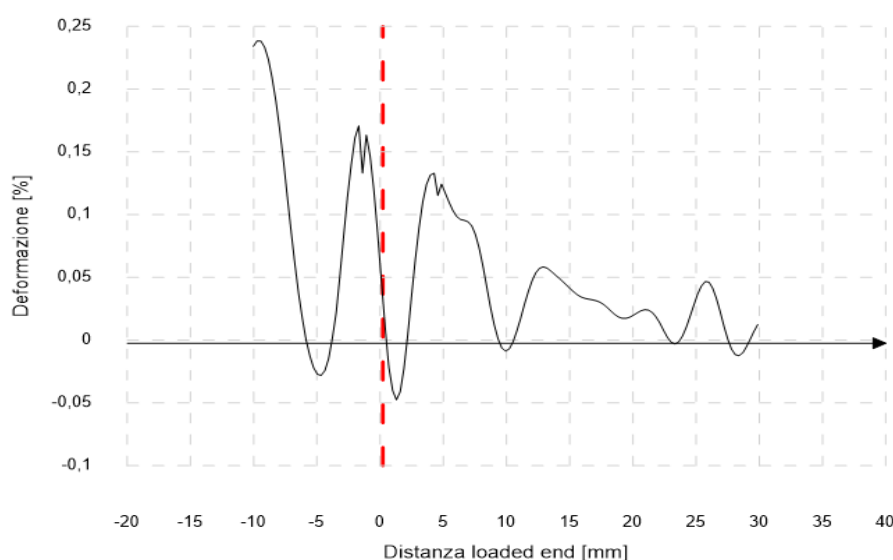


Grafico 8.6 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_C_30_1

In corrispondenza della loaded end è stato registrato un picco delle deformazioni. Nella zona in cui la lamina è vincolata al blocco si nota un trend decrescente della curva, confermando così l'andamento teorico atteso mentre, nella sezione di sinistra ovvero la parte scarica dalle tensioni di incollaggio, le deformazioni crescono all'aumentare della distanza dalla loaded end al posto di essere costanti.

COMPORAMENTO LUNGO LA SEZIONE

Oltre ad ottenere informazioni lungo lo sviluppo della lamina, la DIC consente di ricavare gli spostamenti e le deformazioni lungo sezioni parallele all'asse delle ascisse. Ciò permette di confrontare il comportamento del legno e quello della lamina di rinforzo individuando così l'area di influenza in cui vengono trasmessi gli sforzi. Nei grafici seguenti, individuata come coordinata $X = 0$ la posizione del baricentro della lamina di rinforzo, vengono riportati:

- La distribuzione degli spostamenti relativi lungo la sezione del provino, rilevati nella zona della loaded end per diverse condizioni di carico (20% - 40% - 60% - 80% - 100% di F_{max}). Essi sono calcolati come la differenza tra quelli di due condizioni di carico successive, ovvero analiticamente:

$$s = s_{F_i} - s_{F_{i-1}}$$

Questo passaggio consente di normalizzare i dati, permettendo di individuare quale intervallo di carico causa spostamenti maggiori all'interno del provino

- La distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end (10 mm – 20 mm – 30 mm) nella condizione di carico massimo;
- La distribuzione delle deformazioni lungo la sezione del provino misurate nella zona della loaded end per la condizione di carico massimo.

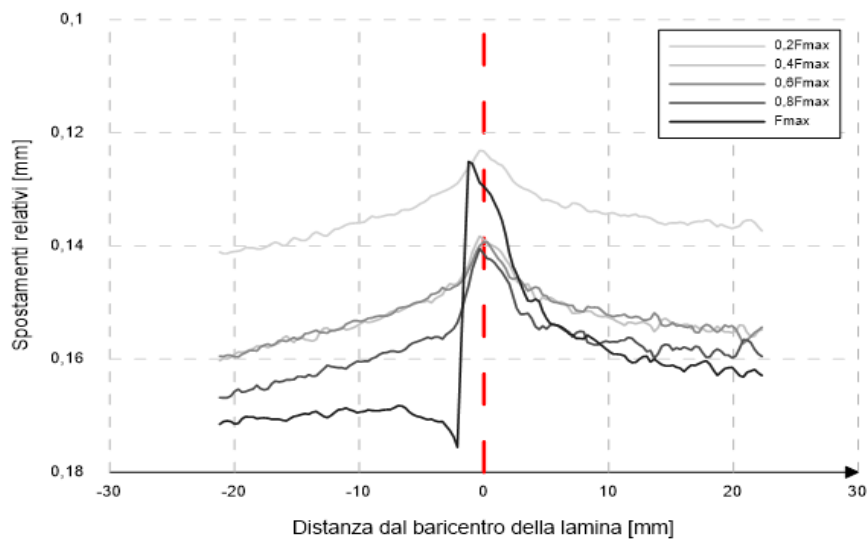


Grafico 8.7 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_C_30_1 al variare dell'intensità della forza

Le curve ottenute Grafico 8.7 sono coerenti con quanto atteso essendo caratterizzate da un andamento parabolico con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina. Le condizioni di carico in cui sono stati registrati gli spostamenti maggiori e minori sono rispettivamente quelle corrispondenti a F_{max} e $0,2F_{max}$. Nella curva corrispondente a F_{max} si nota un andamento verticale degli spostamenti causato dalla rottura all'interfaccia tra l'adesivo e il rinforzo.

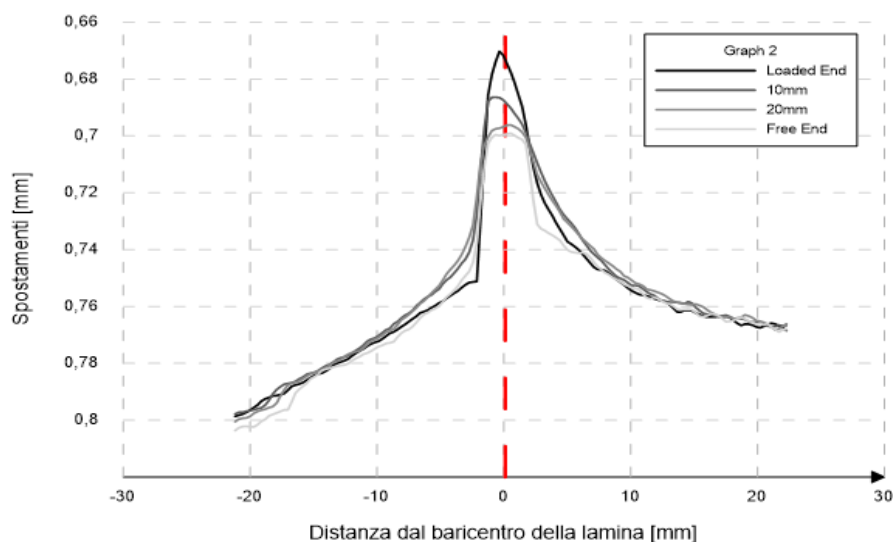


Grafico 8.8 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_C_30_1

Anche nel Grafico 8.8 si nota, in tutte le sezioni analizzate, l'andamento parabolico precedentemente descritto; in particolare gli spostamenti diminuiscono allontanandosi dalla loaded end coerentemente con quanto atteso. Derivando gli spostamenti ottenuti, il software di post-processing è stato in grado di ricavare le deformazioni lungo la sezione.

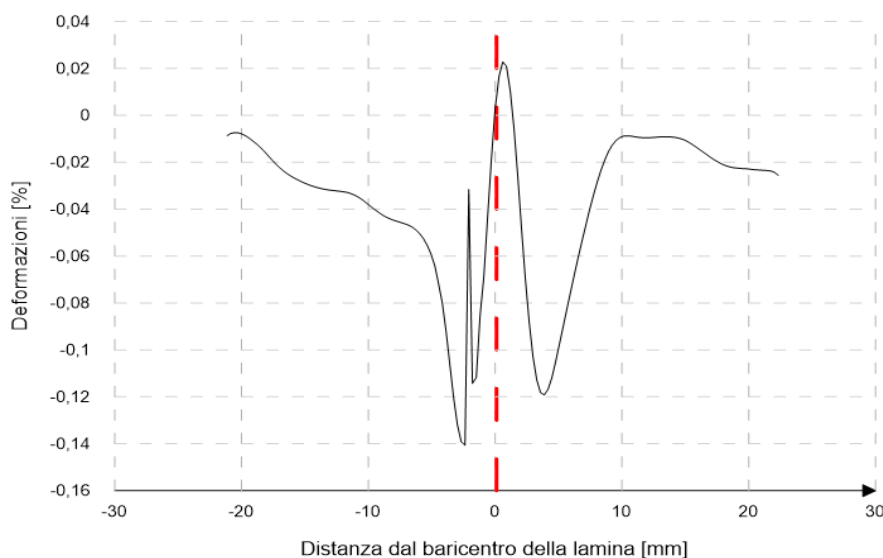


Grafico 8.9 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_C_30_1

La curva riportata nel Grafico 8.9 è errata poiché, sebbene in corrispondenza del baricentro della lamina siano state registrate deformazioni positive con andamento parabolico, alla sua sinistra e destra le deformazioni sono negative con andamento crescente anziché essere costante.

8.1.2 DS_C_30_2

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato è pari a 8,89 kN non corrispondente alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco, è seguita una breve fase nella quale si sono registrate forze di intensità minore, nonostante l'aumento dello spostamento. Come si può notare dalla Figura 8.2, la modalità di rottura è stata per frattura mista; nello specifico, sono ceduti contemporaneamente l'adesivo e parte della

superficie del legno. Visivamente, questa tipologia di frattura si riconosce per via della presenza della colla sia all'interno della scanalatura del blocco ligneo che sulla superficie della lamina. Inoltre, sono presenti numerose schegge di legno all'interno dell'adesivo rimasto ancorato al profilo di rinforzo.

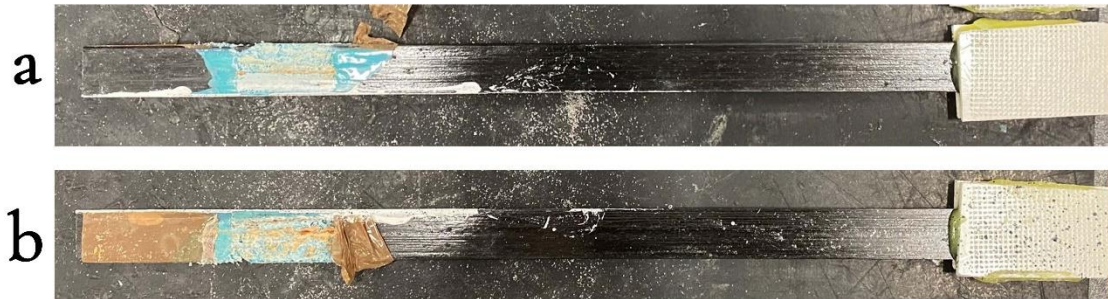


Figura 8.2 - Lamina del provino DS_C_30_2, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

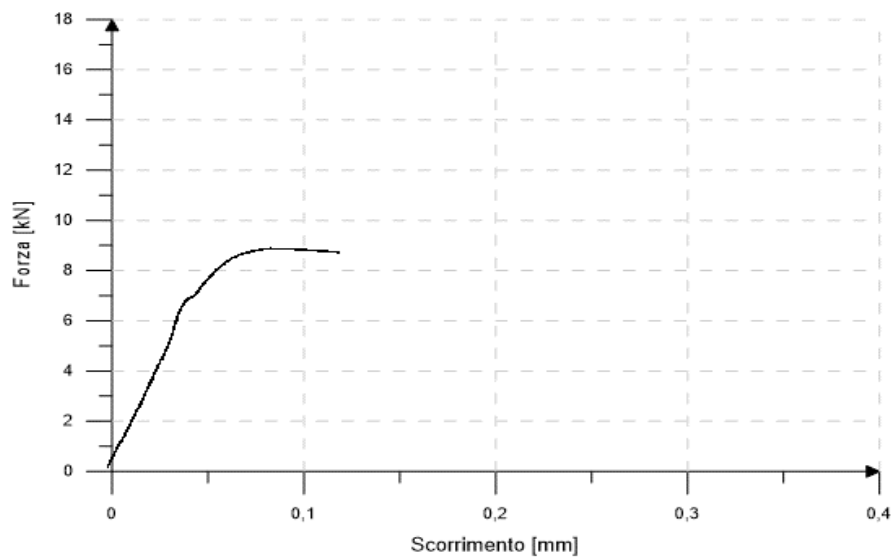


Grafico 8.10 - Relazione F - s per il provino DS_C_30_2, ricavata tramite LVDT

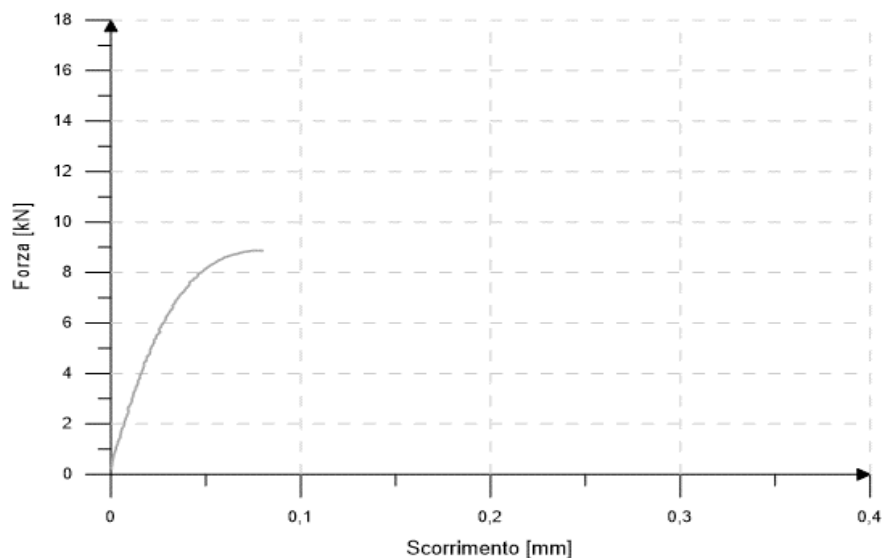


Grafico 8.11 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_2, ricavata tramite DIC

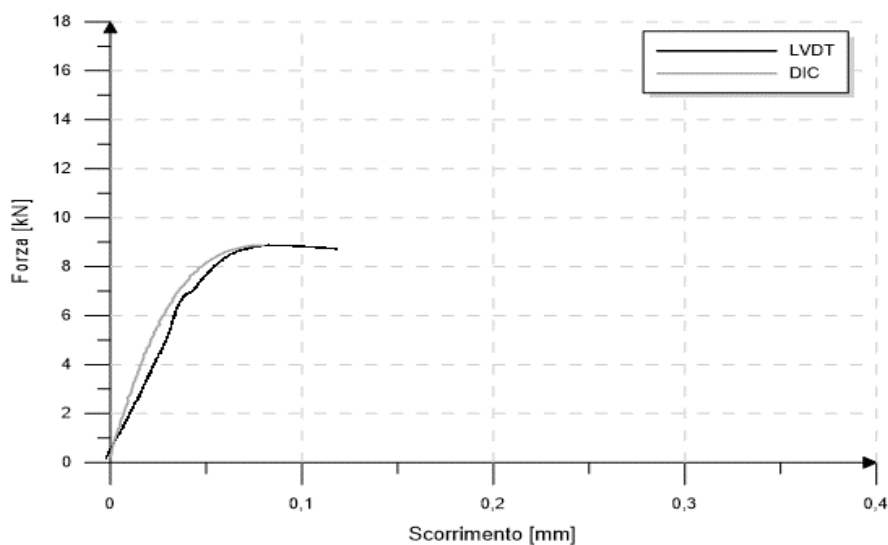


Grafico 8.12 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_2, ricavata tramite LVDT e DIC

Analogamente al campione precedente, benché le curve ottenute siano caratterizzate dallo stesso andamento, si nota una maggiore rigidità in quella ottenuta mediante DIC.

Provino	F_{\max} [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]	$s_{i,DIC}$ [mm]
DS_C_30_2	8,89	0,085	0,075

Tabella 8.5 - Carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_C_30_2

In termini percentuali, tra i due metodi di misura si nota una differenza nello spostamento ultimo pari al 12%.

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{\max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{\max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_30_2	7,62	6,10

Tabella 8.6 - Forze di legame medie per il provino DS_C_30_2

COMPORAMENTO LUNGO LA LAMINA

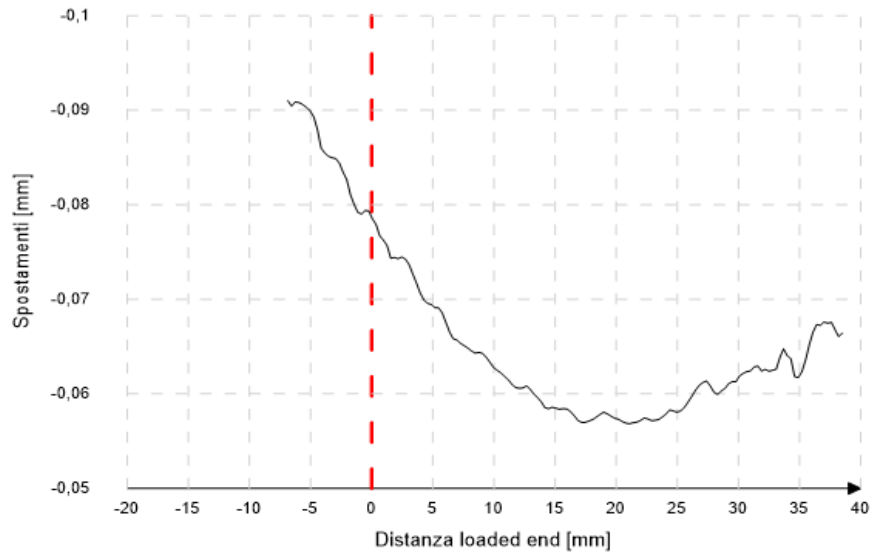


Grafico 8.13 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_30_2

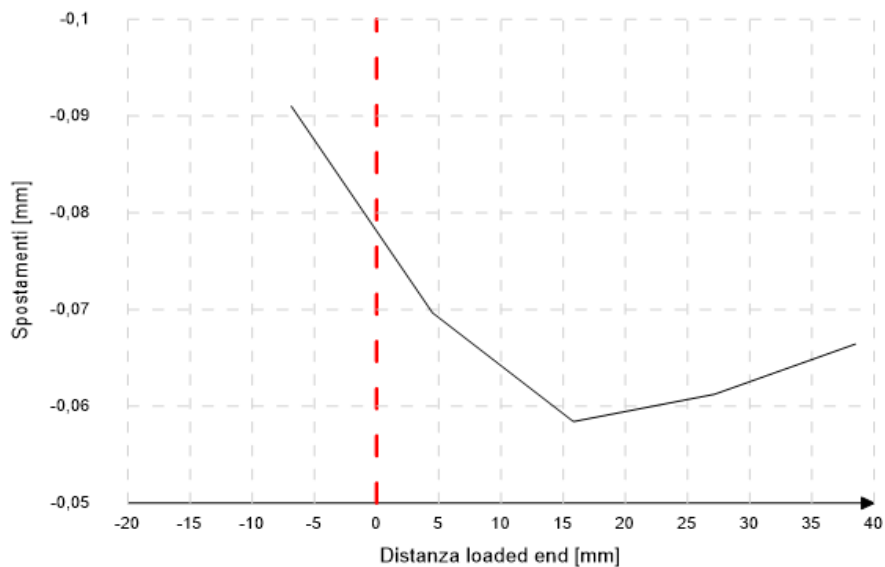


Grafico 8.14 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_30_2

Nella prima parte della curva gli spostamenti sono coerenti con quanto atteso a livello teorico, ossia diminuiscono lungo lo sviluppo longitudinale della lamina.

In corrispondenza $X \cong 15$ mm si nota l'inversione del trend della curva che diventa crescente. Da segnalare, la presenza di un punto di cambio di pendenza in corrispondenza di $X \cong 5$ mm causato dalla variazione delle sollecitazioni agenti poiché, in quell'area, la lamina viene vincolata al blocco in legno mediante l'adesivo poliuretano.

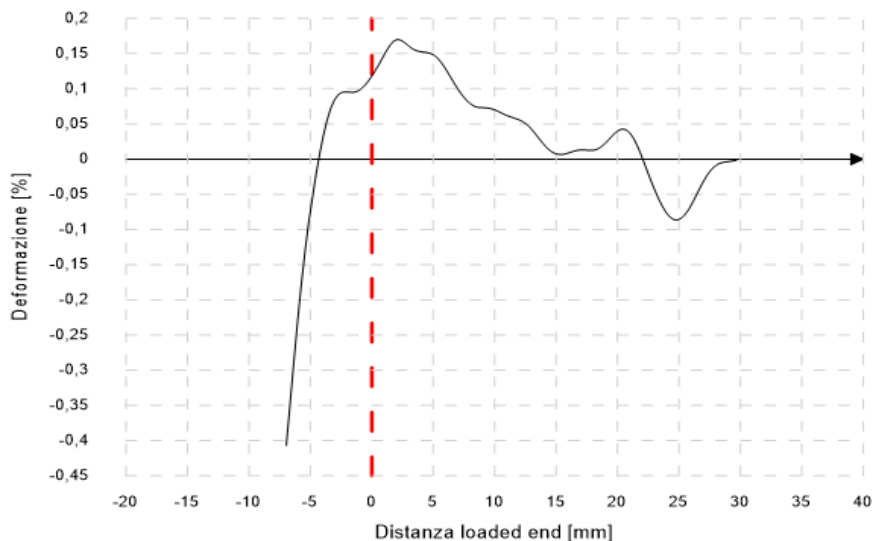


Grafico 8.15 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_C_30_2

La curva riportata nel Grafico 8.15 non è corretta nella parte a sinistra della loaded end dato che le deformazioni dovrebbero crescere linearmente al posto che essere decrescenti. Per quanto concerne la parte di destra, la curva rispetta in linea di massima l'andamento teorico atteso dato che le deformazioni decrescono allontanandosi dalla loaded end per poi annullarsi in corrispondenza della free end.

COMPORAMENTO LUNGO LA SEZIONE

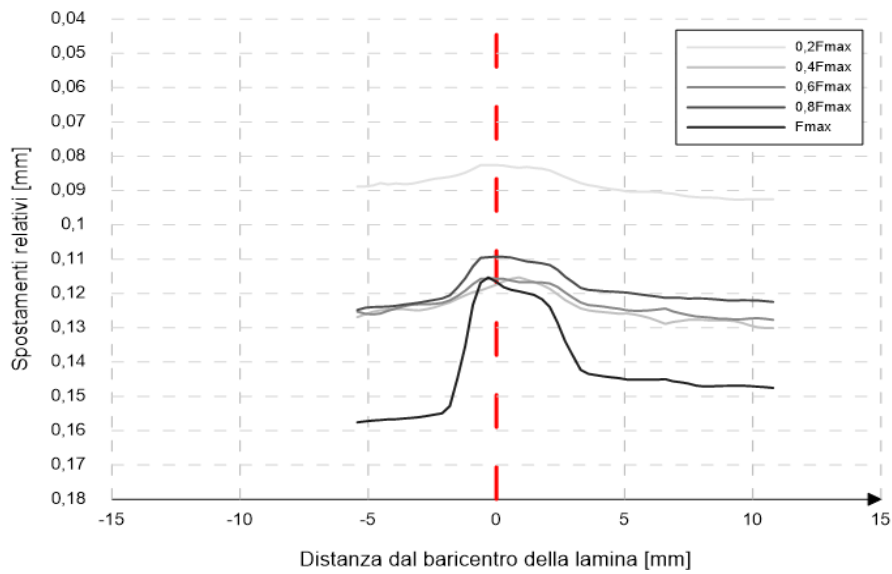


Grafico 8.16 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_C_30_2 al variare dell'intensità della forza

Le curve ottenute sono coerenti con quanto atteso essendo caratterizzate da un andamento parabolico con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina. È presente una crescita progressiva degli spostamenti all'aumentare dell'intensità della forza applicata. Si può inoltre affermare che a 3 mm di distanza dalla scanalatura gli spostamenti sono la metà rispetto a quelli presenti lungo la lamina.

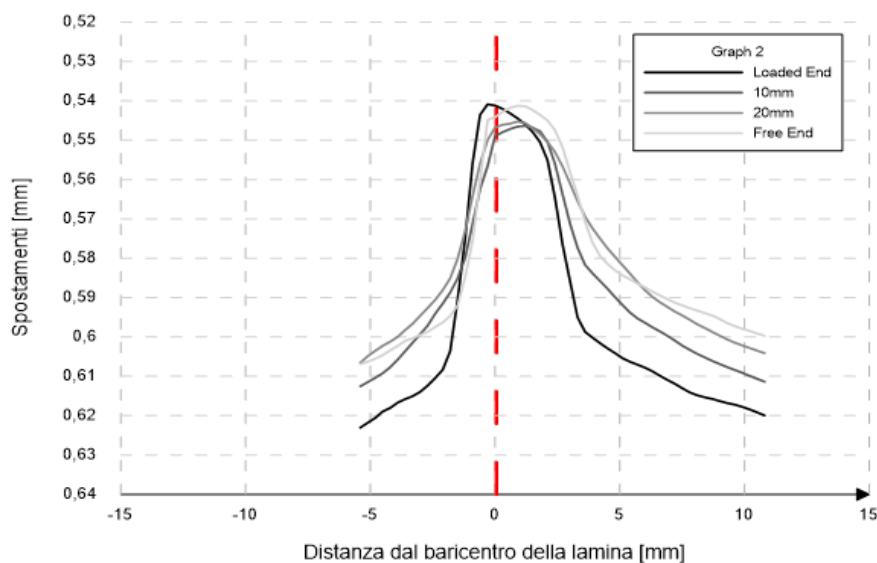


Grafico 8.17 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_C_30_2

Le curve degli spostamenti ottenute lungo le diverse sezioni sono molto simili tra loro ma si può notare, coerentemente con quanto atteso, come la sezione che risente maggiormente dell'applicazione del carico sia quella corrispondente alla loaded end, mentre quella meno perturbata sia quella relativa alla free end.

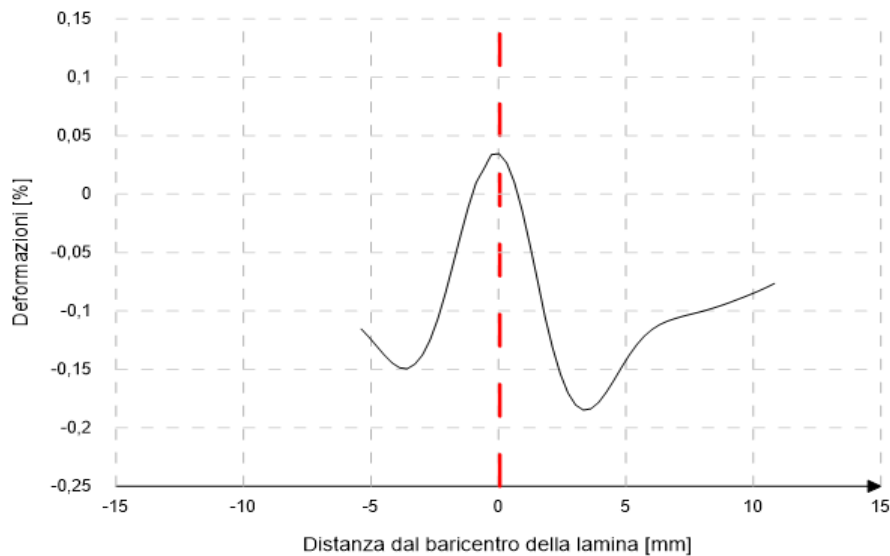


Grafico 8.18 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_C_30_2

Anche in questo caso, come nel provino DS_C_30_1, la curva delle deformazioni riportata nel Grafico 8.18 risulta essere errata. Sebbene in corrispondenza del baricentro della lamina sono state registrate deformazioni positive con andamento parabolico, a sinistra e a destra del rinforzo queste sono negative con andamento crescente anziché essere costante.

8.1.3 DS_C_30_3

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 7,48 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore. Come si può notare dalla Figura 8.3, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla poliuretano. Se da un lato della lamina (a) l'adesivo è rimasto ancorato al rinforzo, dall'altro (b) non è così. La superficie da cui si è staccato l'adesivo è rimasta di conseguenza liscia e lucida. Non deve trarre in inganno la colla poliuretano rimasta sul lato (b) poiché non facente parte della regione incollata ma bensì di quella successiva precedentemente protetta dal nastro adesivo.



Figura 8.3 - Lamina del provino DS_C_30_3, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

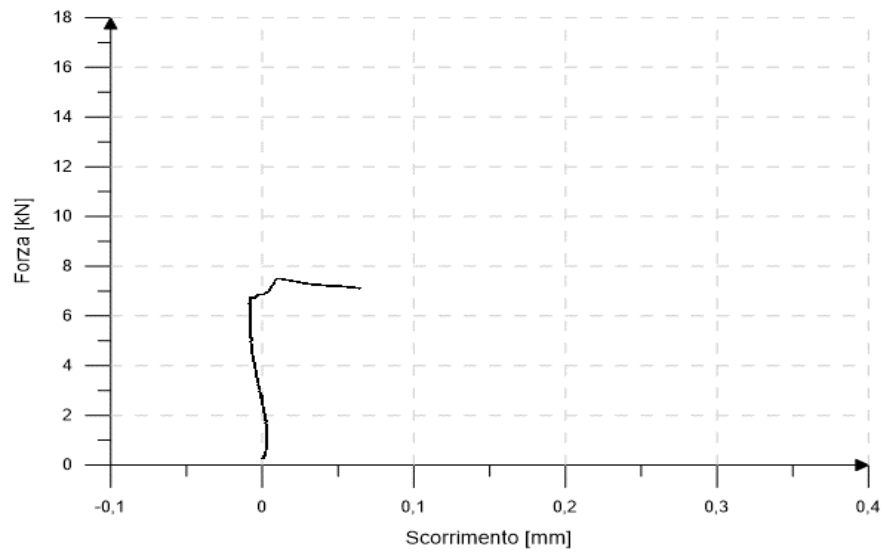


Grafico 8.19 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_3, ricavata tramite LVDT

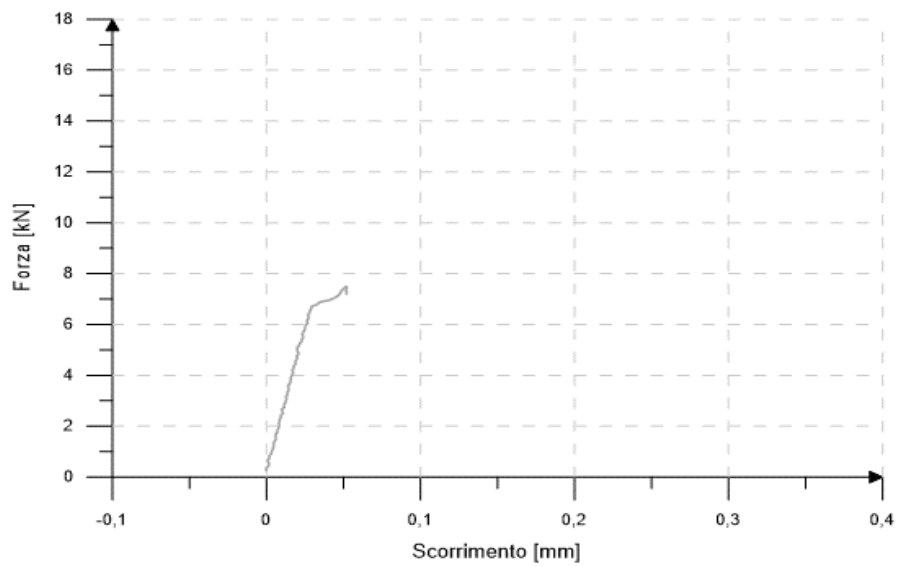


Grafico 8.20 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_3, ricavata tramite DIC

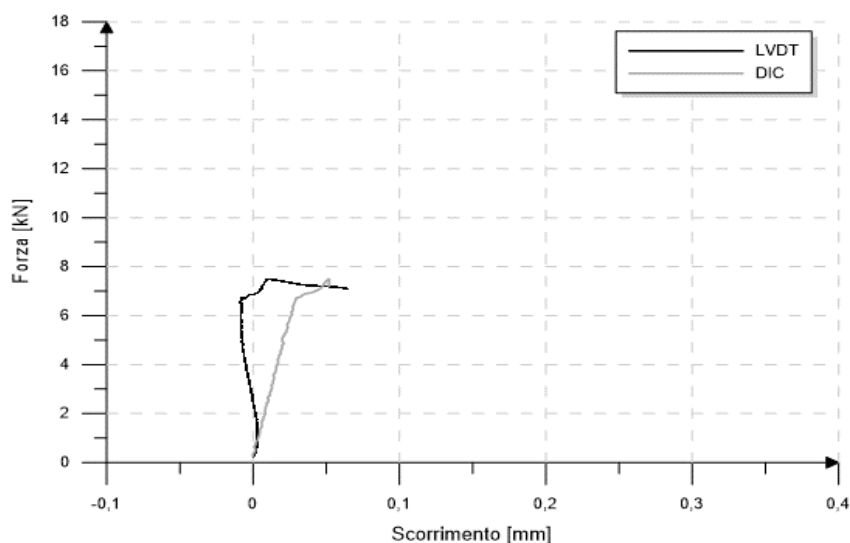


Grafico 8.21 - Grafico 8.3 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_3, ricavata tramite LVDT e DIC

Le curve non hanno lo stesso andamento; ciò è dovuto all'errata rilevazione dati tramite LVDT dato che, dopo un breve tratto iniziale, la curva cambia andamento arrivando persino ad assumere valori negativi.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]	$s_{i,DIC}$ [mm]
DS_C_30_3	7,48	0,010	0,052

Tabella 8.7 - Carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_C_30_3

In questo caso la differenza tra gli spostamenti registrati è del 81%, valore nettamente superiore rispetto al 14% e 12% registrati rispettivamente per il primo e il secondo campione. Si considerano quindi errati i dati derivanti dalla misurazione tramite estensimetri.

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_30_3	7,08	5,66

Tabella 8.8 - Forze di legame medie per il provino DS_C_30_3

COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

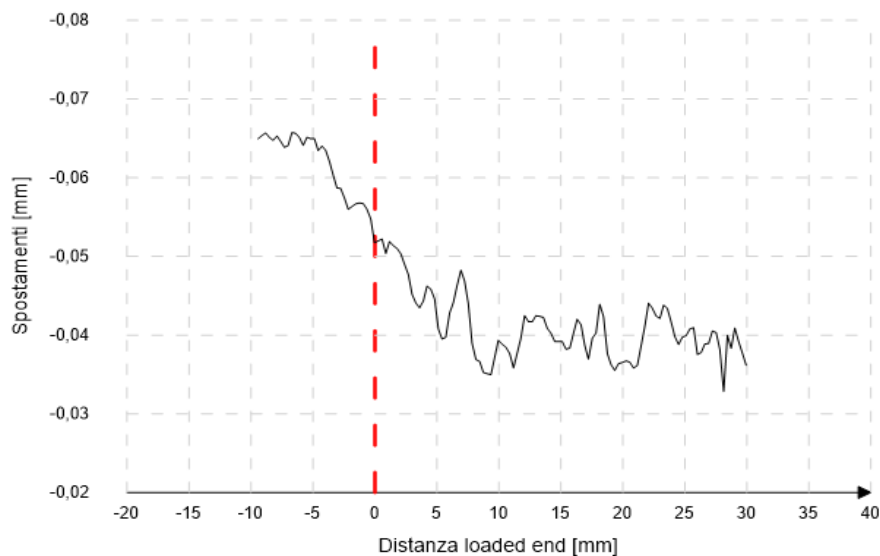


Grafico 8.22 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_30_3

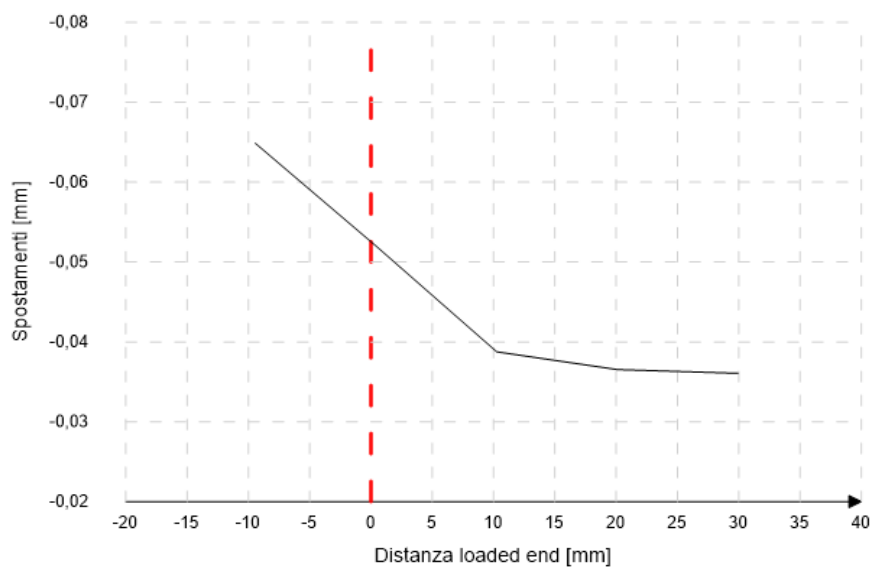


Grafico 8.23 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_30_3

Nonostante l'estrema variabilità dei dati ottenuti, si può affermare che, allontanandosi dalla loaded end, punto di applicazione del carico, vi sia una riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. Dopo un primo tratto decrescente, in corrispondenza di $X \cong 10$ la curva cambia drasticamente pendenza assumendo un trend pressoché costante. A differenza

dei campioni precedenti, non è presente nessun punto di cambio pendenza in corrispondenza di $X \cong 0$.

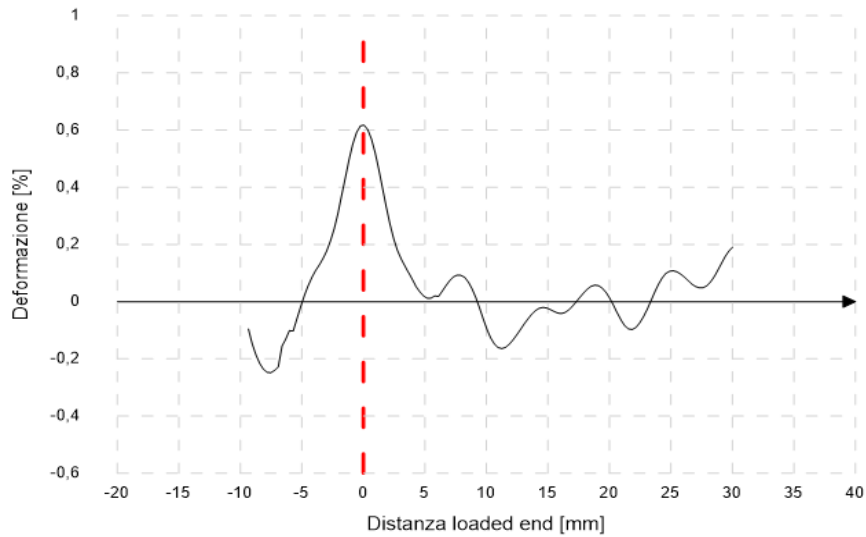


Grafico 8.24 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_C_30_3

La curva riportata nel grafico soprastante è del tutto errata. Nonostante si assista ad un picco di deformazioni in corrispondenza della loaded end, nelle rimanenti aree i risultati si rivelano inesatti. Infatti, allontanandosi alla sinistra dell'ascissa nulla, sono state registrate deformazioni decrescenti invece di costanti mentre a destra, in corrispondenza di $X \cong 10$ mm, assumono un trend crescente al posto che discendente.

COMPORAMENTO LUNGO LA SEZIONE

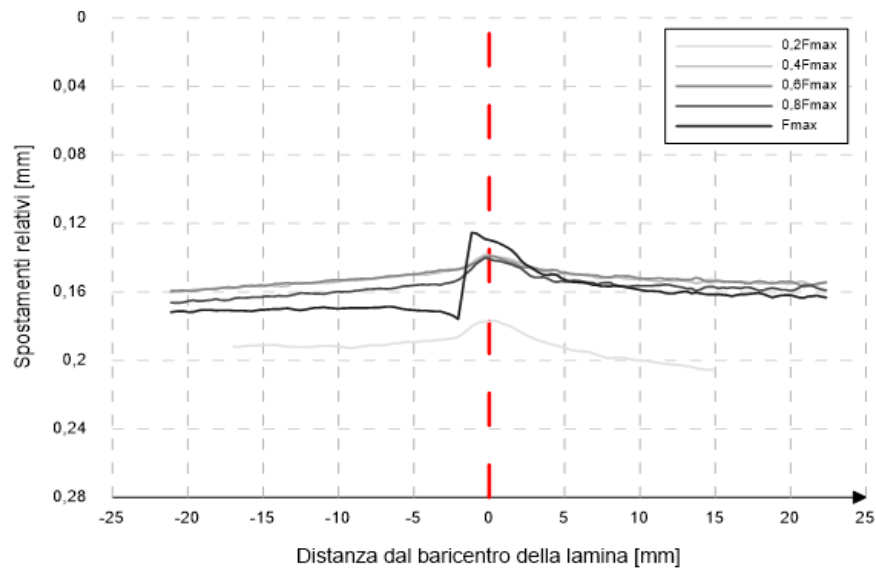


Grafico 8.25 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_C_30_3 al variare dell'intensità della forza

Le curve ottenute sono coerenti con quanto atteso essendo caratterizzate da un andamento parabolico con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina. Dal grafico si nota come la condizione di carico che ha causato spostamenti maggiori sia quella corrispondente a $0,2F_{max}$. Questo comportamento può essere dovuto ad un assestamento iniziale del giunto. Infatti, superata questa fase iniziale della prova, gli spostamenti maggiori sono stati registrati al raggiungimento della forza massima.

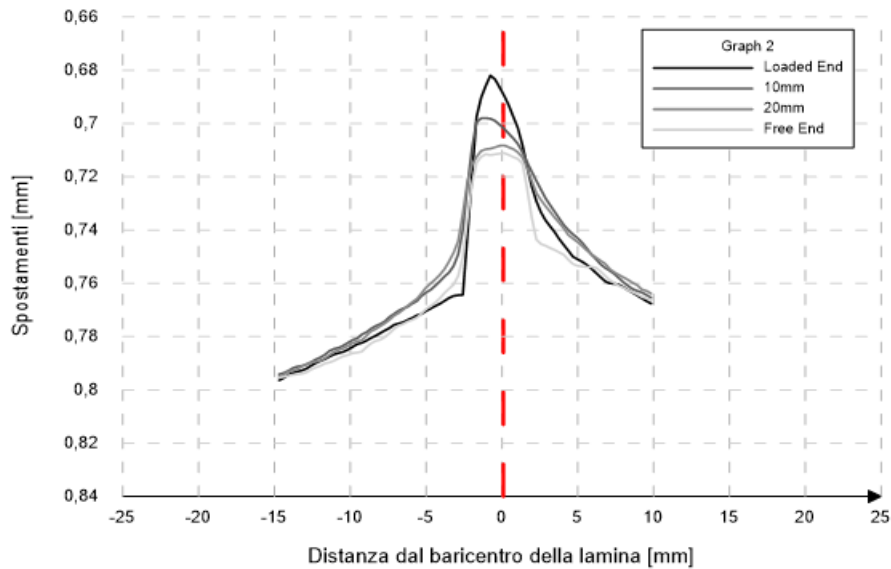


Grafico 8.26 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_C_30_3

Anche nel Grafico 8.26 si nota, in tutte le sezioni analizzate, l'andamento parabolico precedentemente descritto. L'entità degli spostamenti diminuisce all'allontanarsi dalla loaded end, confermando quanto atteso. Infatti, si nota come le curve con spostamenti maggiori e minori siano quelle associate rispettivamente alla loaded end e alla free end.

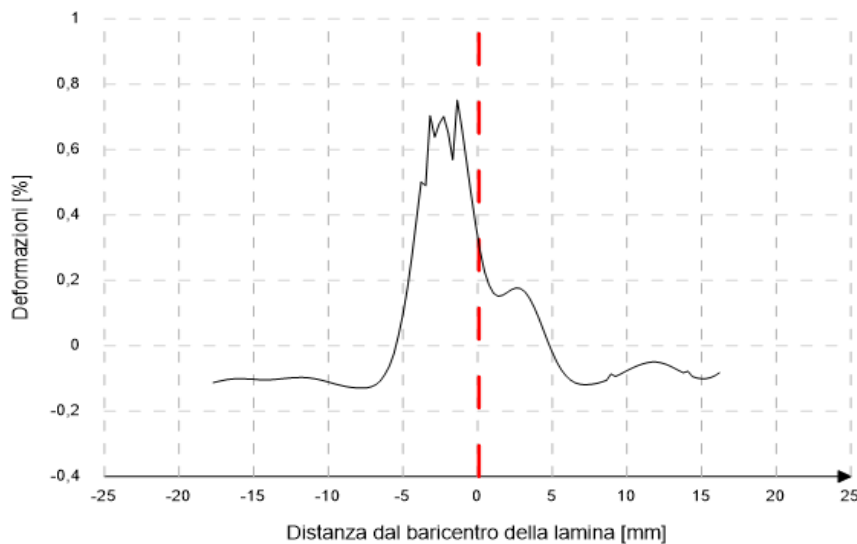


Grafico 8.27 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_C_30_3

La curva delle deformazioni riportata nel Grafico 8.9 è in linea di massima corretta.

Si osserva nel tratto centrale, corrispondente al baricentro della lamina, un picco derivante dalle deformazioni del profilo di rinforzo. Dal punto di colmo, dopo un tratto decrescente, la curva assume un andamento pressoché costante. Ciò appare subito evidente nella parte di sinistra del grafico ma tale affermazione può essere considerata vera anche per la parte di destra.

8.1.4 DS_C_30_4

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 9,72 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore. Come si può vedere nella Figura 8.4, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e colla poliuretano. Se da un lato (a) l'adesivo è rimasto incollato al rinforzo, dall'altro (b) non è così. Infatti, nonostante la presenza di colla sul lato inferiore della lamina, si nota come la sua superficie sia quasi totalmente liscia e lucida. Ciò è indice del fatto che il cedimento è avvenuto in corrispondenza dell'interfaccia carbonio-adesivo. Inoltre, è da far notare che sul lato (a) sono presenti delle schegge di legno intrappolate all'interno della colla.

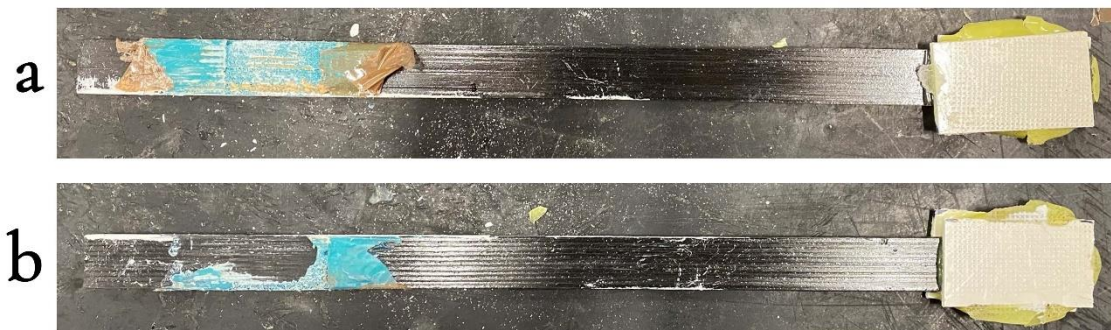


Figura 8.4 - Lamina del provino DS_C_30_4, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

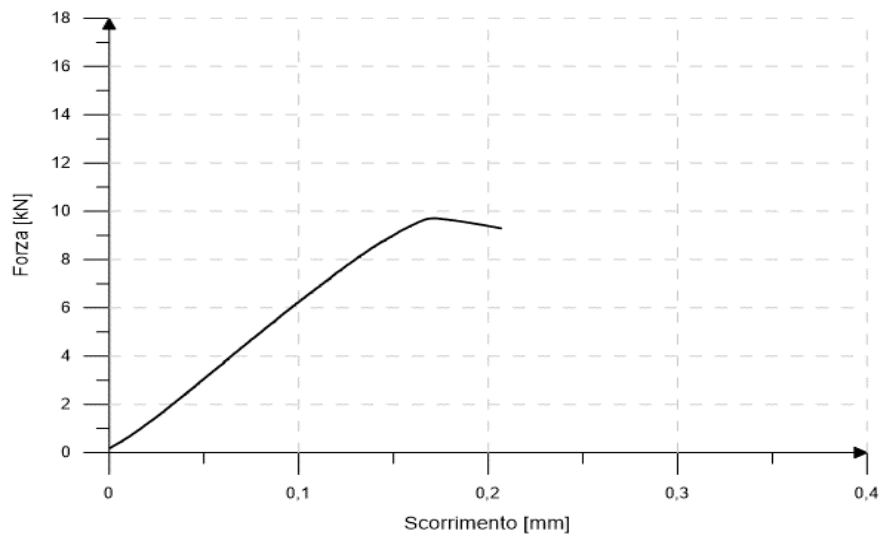


Grafico 8.28 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_4, ricavata tramite LVDT

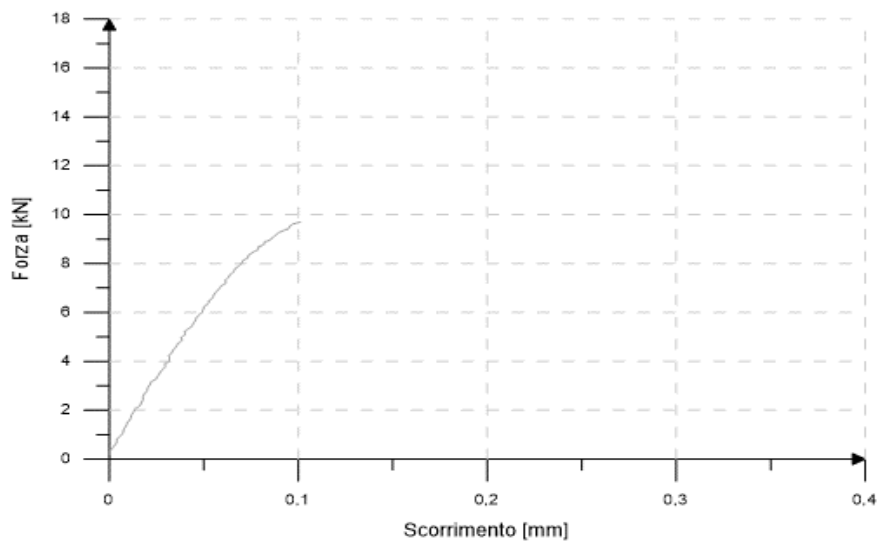


Grafico 8.29 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_4, ricavata tramite DIC

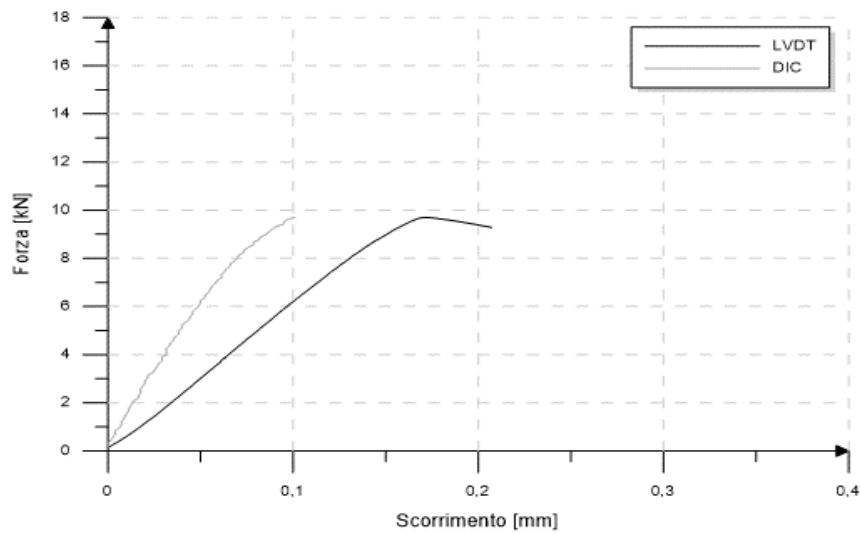


Grafico 8.30 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_30_4, ricavata tramite LVDT e DIC

Analogamente ai primi due campioni, benché le curve ottenute siano caratterizzate dallo stesso andamento, si nota una maggiore rigidezza in quella ottenuta mediante DIC.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]	$s_{i,DIC}$ [mm]
DS_C_30_4	9,72	0,172	0,101

Tabella 8.9 - Carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_C_30_4

In termini percentuali, tra i due metodi di misura si nota una differenza nello spostamento ultimo pari al 41%

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_30_4	9,72	7,36

Tabella 8.10 - Forze di legame medie per il provino DS_C_30_4

COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

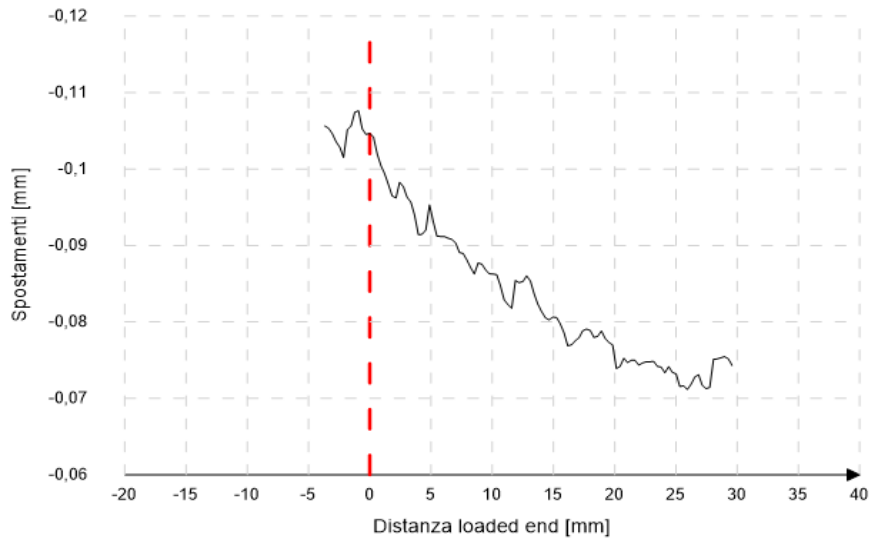


Grafico 8.31 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_30_4

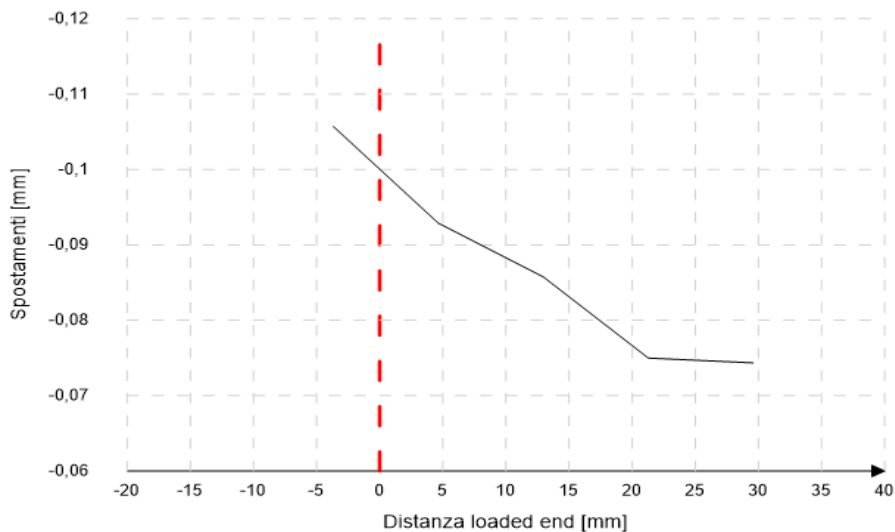


Grafico 8.32 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_30_4

La curva ottenuta risulta coerente con quanto atteso a livello teorico. Allontanandosi dalla loaded end, punto di applicazione del carico, vi è una riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. Si notano tre punti di cambio di pendenza in corrispondenza di $X \approx 5$ mm, $X \approx 15$ mm e $X \approx 20$ mm.

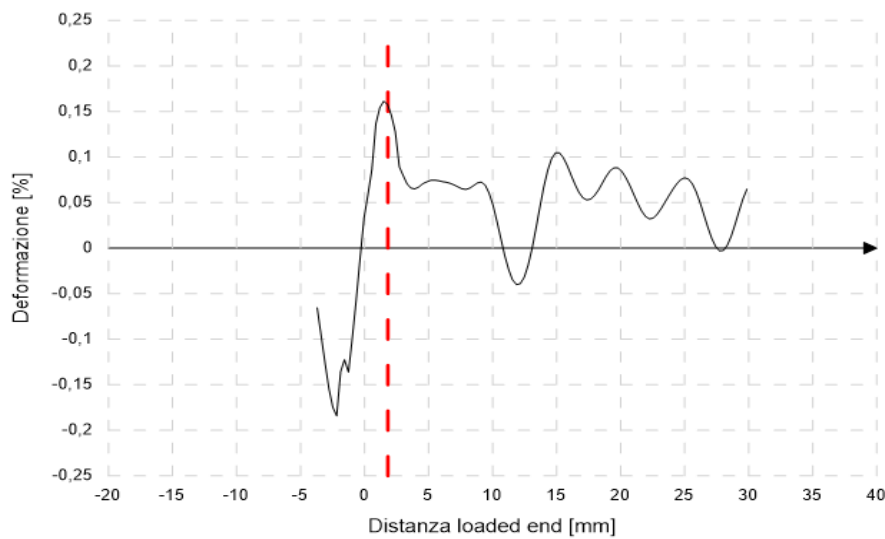


Grafico 8.33 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_C_30_4

La curva riportata nel grafico soprastante è del tutto errata. Benché si assista ad un picco di deformazioni in corrispondenza della loaded end, la curva è inesatta nelle restanti aree. Infatti, a sinistra sono state calcolate deformazioni decrescenti al posto che costanti, mentre a destra si nota un andamento costante anziché discendente.

COMPORTAMENTO LUNGO LA SEZIONE

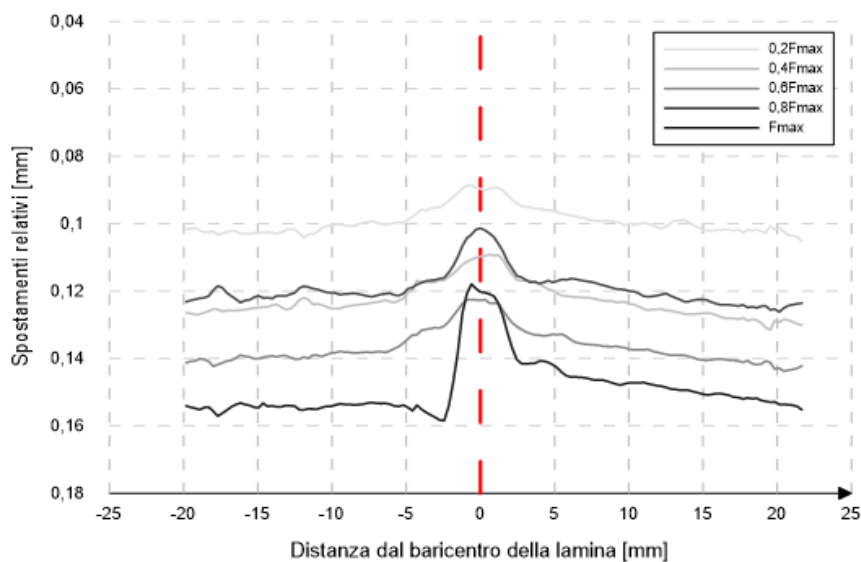


Grafico 8.34 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_C_30_4 al variare dell'intensità della forza

Le curve ottenute sono coerenti con quanto atteso essendo caratterizzate da un andamento parabolico con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina. È presente una crescita progressiva degli spostamenti all'aumentare dell'intensità della forza applicata. Da notare che al raggiungimento della condizione di carico associata a $0,8F_{\max}$ si sono registrati spostamenti inferiori rispetto alle condizioni di $0,4F_{\max}$ e $0,6F_{\max}$. Si può inoltre affermare che a 3 mm di distanza dal baricentro della lamina gli spostamenti registrati sono dimezzati rispetto a quelli presenti lungo la lamina.

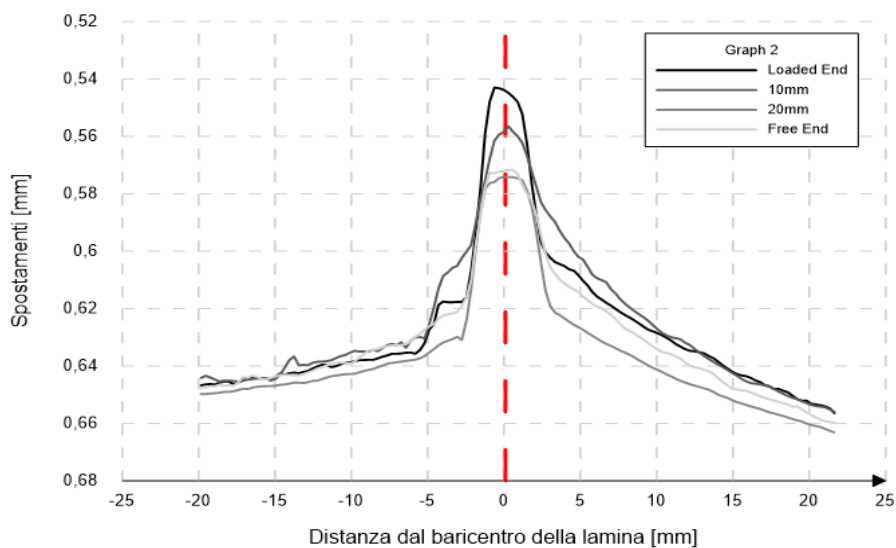


Grafico 8.35 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_C_30_4

Dal grafico soprastante si nota come le curve degli spostamenti ottenute lungo le diverse sezioni siano molto simili tra loro. In particolare, è da evidenziare che gli spostamenti minimi si sono registrati in corrispondenza della sezione distante 20 mm anziché nella free end.

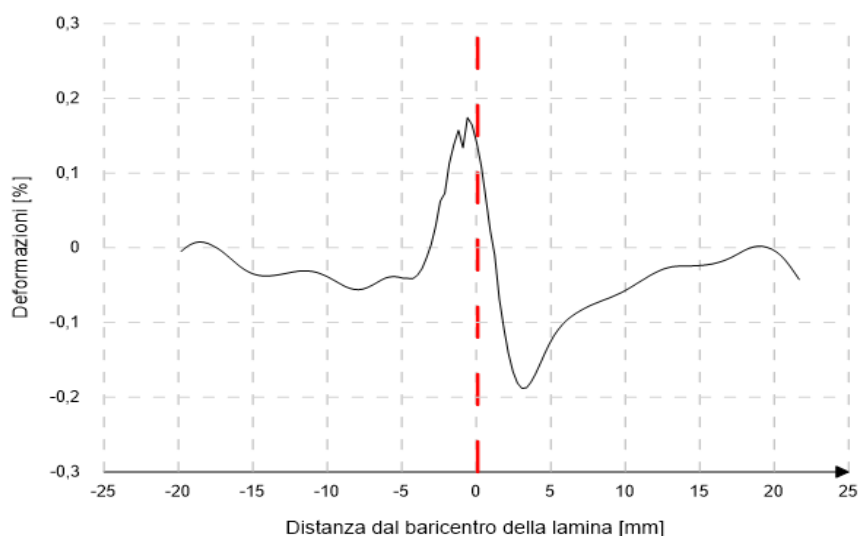


Grafico 8.36 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_C_30_4

La curva delle deformazioni riportata nel Grafico 8.36 è errata come quelle dei primi due provini della serie. Sebbene in corrispondenza del baricentro della lamina si siano registrate deformazioni positive con andamento parabolico, alla sinistra e alla destra del rinforzo esse sono negative e crescenti anziché essere costanti.

8.1.5 RIEPILOGO E CONSIDERAZIONI

La modalità di rottura è simile tra i provini numero 1, 3 e 4 ed è per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e l'adesivo. Questa tipologia di rottura è riconoscibile dal fatto che le lamine presentano, almeno da un lato, la superficie liscia e lucida. Si differenzia il provino DS_C_30_2 nel quale è stata registrata una frattura di tipo misto dove l'adesivo è rimasto ancorato sia alla superficie della lamina che all'interno della scanalatura. In tutti i provini testati, non si è mai verificato il completo distacco dell'adesivo da ambo i lati.

Per la misurazione dei dati relativi allo scorrimento della lamina, la tecnica DIC si è dimostrata molto più precisa ed affidabile rispetto all'utilizzo di due estensimetri. Si nota in generale che le curve ottenute tramite DIC sono più rigide rispetto alle altre e ciò può essere dovuto alla sovrastima dei valori derivanti

dall'utilizzo degli LVDT. Le cause possono essere molteplici tra cui il mancato parallelismo tra i due misuratori, il non perfetto allineamento in verticale di questi ultimi e lo spostamento della squadretta di contrasto durante la prova.

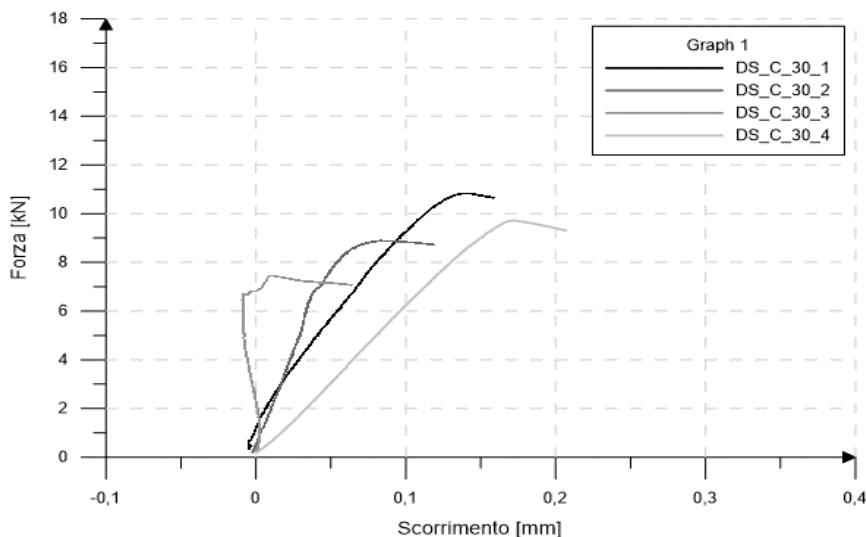


Gráfico 8.37 - Relazione $F - s$ ricavata tramite LVDT per i provini del gruppo DS_C_30

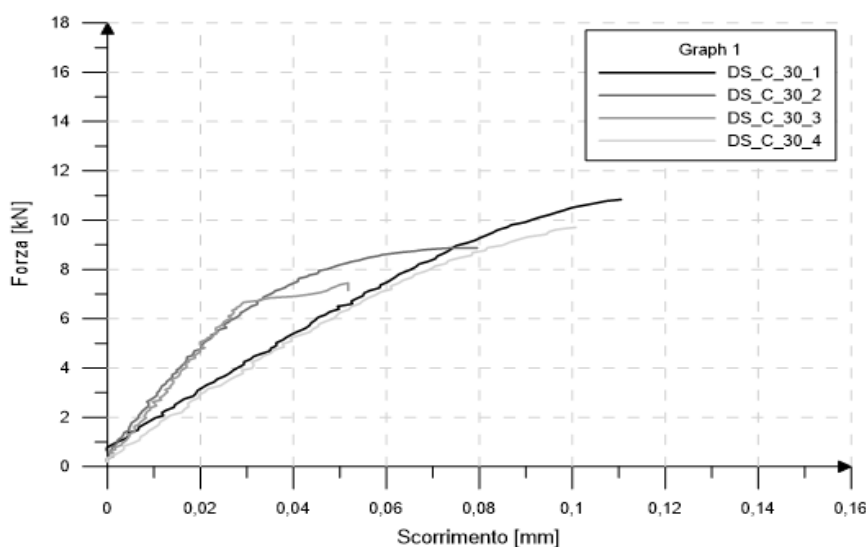


Gráfico 8.38 - Relazione $F - s$ ricavata tramite DIC per i provini del gruppo DS_C_30

Di seguito si riportano la tabella contenente i dati riepilogativi relativi delle forze massime registrate e i relativi scorrimenti, delle tensioni tangenziali medie e della modalità di rottura.

Provino	F_{max} [kN]	$S_{I,LVDT}$ [mm]	$S_{I,DIC}$ [mm]	$\tau_{max,av,CFR}$ P [MPa]	$\tau_{max,av,woo}$ d [MPa]	Modalità di rottura
DS_C_30_1	10,83	0,14	0,12	10,25	8,20	AD_FRP_A
DS_C_30_2	8,89	0,09	0,08	7,62	6,10	MISTA
DS_C_30_3	7,48	0,01	0,05	7,08	5,66	AD_FRP_A
DS_C_30_4	9,72	0,17	0,10	9,72	7,36	AD_FRP_A
Media	9,23	0,10	0,09	8,67	6,83	
Dev.Stan [%]	13,25	60,38	29,89	15,51	14,75	

Tabella 8.11 - Dati riepilogativi dei provini appartenenti alla serie DS_C_30

La DIC si è rivelata un'ottima tecnica anche per la misurazione degli spostamenti lungo lo sviluppo della lamina. Come si può vedere dal Grafico 8.39, gli spostamenti nella regione incollata hanno, in linea di massima, un andamento decrescente all'aumentare della distanza dalla loaded end.

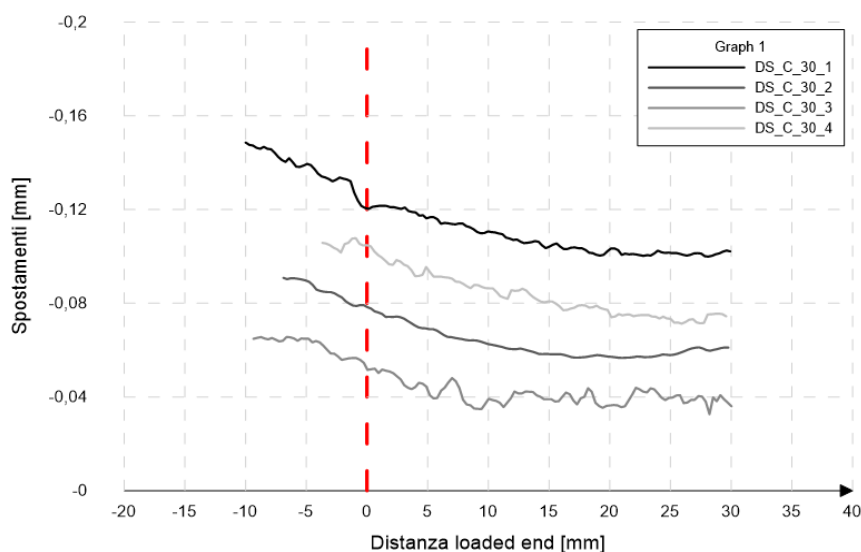


Grafico 8.39 - Distribuzione degli spostamenti lungo le lamine per i provini del gruppo DS_C_30

Se la rilevazione degli spostamenti lungo la lamina si è rivelata parzialmente un successo, non si può dire altrettanto per la misura delle deformazioni. Solamente nei primi due provini è stato possibile osservare un comportamento somigliante a quanto atteso a livello teorico; nonostante ciò, sono comunque presenti delle imprecisioni come, ad esempio, l'errato comportamento nella zona scarica dalle

tensioni di incollaggio della lamina. Negli ultimi due campioni, nonostante un picco registrato in prossimità della loaded end, il comportamento è lontano da quello atteso a livello teorico.

La DIC si è rivelata un'ottima tecnica anche per la misurazione degli spostamenti lungo le sezioni perpendicolari allo sviluppo della lamina. Come si evince dal Grafico 8.40, gli spostamenti hanno un andamento parabolico con vertice registrato in corrispondenza del baricentro della lamina. In generale, a circa 3 mm di distanza del baricentro del rinforzo, si assiste ad un cambiamento di comportamento delle curve che assumono un andamento lineare. Da notare che le curve dei provini 1, 2 e 4 sono molto simili tra di loro non solo per quanto riguarda l'andamento ma anche per i valori numerici registrati.

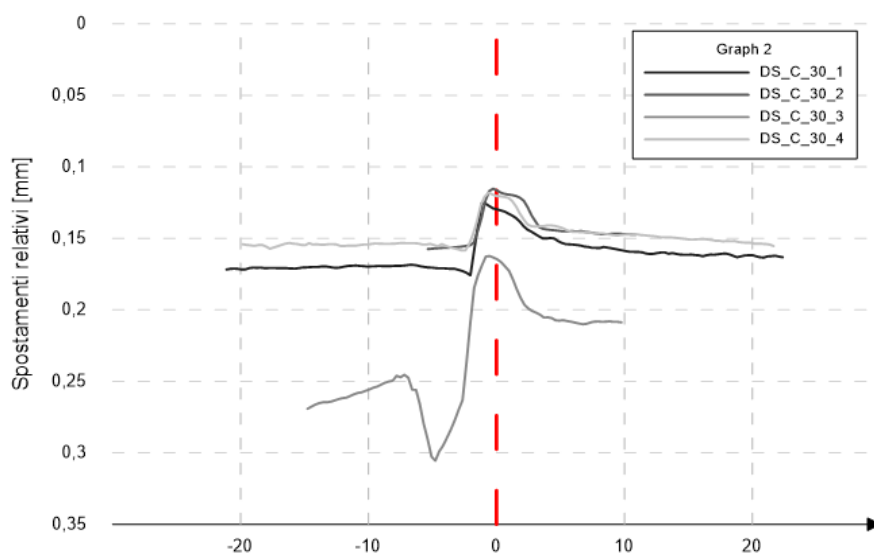


Grafico 8.40 - Distribuzione degli spostamenti, misurati in corrispondenza di F_{max} , lungo le sezioni per i provini del gruppo DS_C_30

Per quanto riguarda le deformazioni, in analogia a quelle registrate lungo lo sviluppo della lamina, sono perlopiù errate. Infatti, nonostante in corrispondenza del baricentro della lamina si assista sempre ad un picco, nelle zone limitrofe si sono registrate deformazioni negative invece di nulle. L'unico provino in cui si riscontra un comportamento coerente con la teoria è il numero 3 che, nonostante la presenza di qualche difetto, è in linea generale corretto.

SERIE SUCCESSIVA

Dato che in tre dei quattro campioni testati si è assistito ad una frattura dell'adesivo all'interfaccia tra la lamina in FRP e adesivo, è stata predisposta un'ulteriore serie di provini caratterizzati da una lunghezza di ancoraggio maggiore, in particolare pari a 100 mm. Ciò consente di indagare ulteriormente il fenomeno dell'incollaggio così da verificare se la rottura sia dovuta ad un'eccessiva tensione tangenziale, derivante da una limitata superficie di incollaggio, oppure dall'incompatibilità tra la tipologia di rinforzo usata e quella dell'adesivo.

Nella serie seguente è stata abbandonata la tecnica di misurazione dati tramite DIC poiché i risultati ottenuti, al pari di quelli individuati dall'Ing. Simone Biondo [11], non sono stati soddisfacenti. Le cause dell'imprecisione dei dati possono essere ricondotte al basso spessore delle lamine, alla dimensione eccessiva dei punti neri ottenuti con la bomboletta spray oppure alla versione del software Vic-2D.

8.2 DS_C_100

Come si denota dalla codifica, questo gruppo di provini è caratterizzato da una lamina di rinforzo in CFRP incollata al blocco in legno per una lunghezza di ancoraggio pari a 100 mm. I profili in carbonio sono caratterizzati da un modulo elastico E_{CFRP} pari a 165 GPa e le caratteristiche geometriche, descritte nel capitolo 7.4, sono:

- $A_{CFRP} = 25,6 \text{ mm}^2$;
- $L_{lib} = 50 \text{ mm}$;
- $P_f = 35,2 \text{ mm}$;
- $P_w = 44 \text{ mm}$;
- $L_b = 100 \text{ mm}$.

Le prove sono state eseguite con velocità costante pari a 0,05 mm/min con un tempo medio di 19 min. Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva della durata della prova di ciascun provino.

Provino	Durata prova [min]
DS_C_100_1	21'00''
DS_C_100_2	13'30''
DS_C_100_3	21'05''
DS_C_100_4	20'20''

Tabella 8.12 - Durata delle prove e per ciascun provino della serie DS_C_100

8.2.1 DS_C_100_1

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 14,80 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore.

Come si può notare dalla Figura 8.5, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla poliuretano. Se da un lato della lamina (b) l'adesivo è rimasto parzialmente ancorato alla superficie in carbonio, dall'altro (a) non è così. La superficie sulla quale è avvenuto il distacco dell'adesivo è rimasta di conseguenza liscia e lucida. Non deve trarre in inganno la colla poliuretano rimasto sul lato (a) poiché non fa parte della regione incollata, bensì di quella successiva precedentemente protetta dal nastro adesivo.

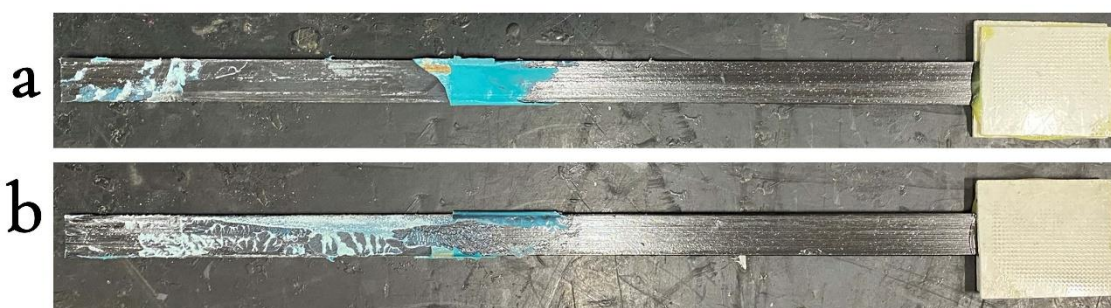


Figura 8.5 - Lamina del provino DS_C_100_1, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

Di seguito è riportato il grafico che mette in relazione lo scorrimento verticale subito dal rinforzo in CFRP, misurato tramite LVDT, al carico applicato. È utile ricordare che gli scorrimenti sono depurati dall'effetto dell'allungamento elastico della lamina.

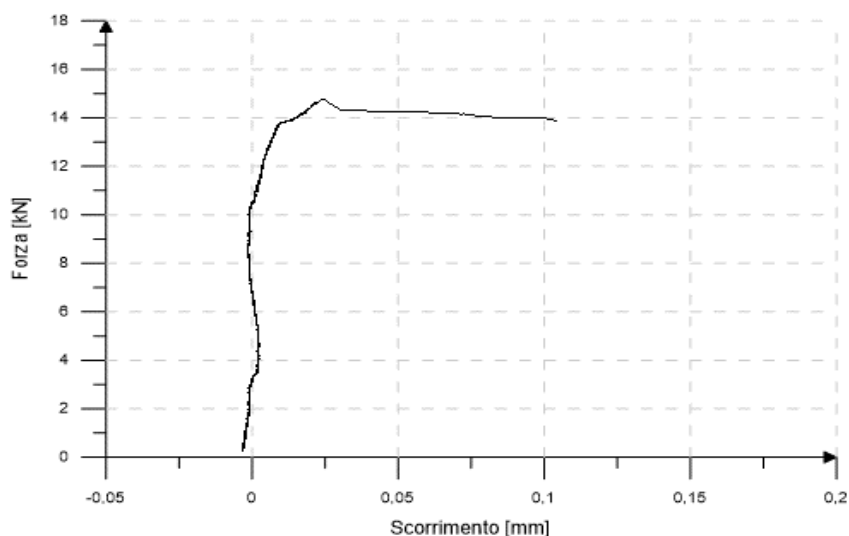


Grafico 8.41 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_100_1, ricavata tramite LVDT

Dal grafico si intravede un andamento lontano da quello teorico atteso; in particolare, dopo un tratto lineare crescente, la curva cambia il trend. Un'ulteriore caratteristica che si evidenzia dal grafico è la presenza di tratto ad andamento pressoché costante dopo il picco di carico. Durante questa fase, sono aumentati notevolmente gli spostamenti con la forza che è rimasta all'incirca costante.

Provino	F [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]
DS_C_100_1	14,81	0,024
	13,87	0,104

Tabella 8.13 - Carico massimo e carico a rottura e relativi scorrimenti del provino DS_C_100_1

FORZE DI LEGAME MEDIE

Le forze di legame medie presenti sulla superficie del legno e del rinforzo sono calcolate mediante le formule riportate nel capitolo 7.4.

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_100_1	4,21	3,37

Tabella 8.14 - Forze di legame medie per il provino DS_C_100_1

8.2.2 DS_C_100_2

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 12,67 kN corrisponde alla rottura del provino. Come si può notare dalla Figura 8.6, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla poliuretano. Se da un lato della lamina (b) l'adesivo è rimasto parzialmente ancorato alla superficie in carbonio, dall'altro (a) non è così. La superficie sulla quale è avvenuto il distacco dell'adesivo è rimasta di conseguenza liscia e lucida. Non deve trarre in inganno la colla poliuretano rimasto sul lato (a) poiché non facente parte della regione incollata, bensì di quella successiva precedentemente protetta dal nastro adesivo.

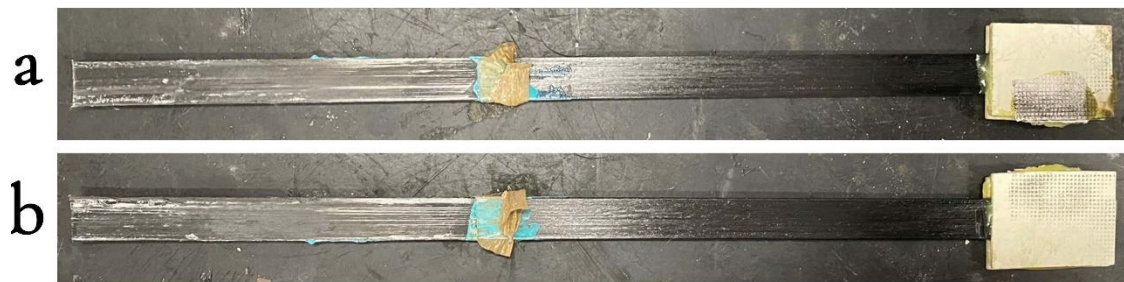


Figura 8.6 - Lamina del provino DS_C_100_2, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

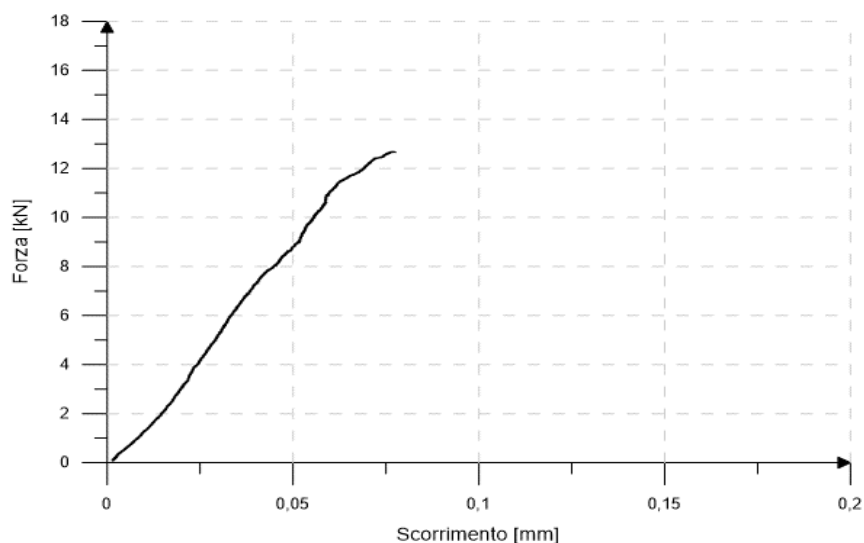


Grafico 8.42 -Relazione $F - s$ per il provino DS_C_100_2, ricavata tramite LVDT

La curva riportata nel Grafico 8.42 ha un andamento lineare crescente ed è di conseguenza coerente con quanto atteso.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]
DS_C_100_2	12,67	0,077

Tabella 8.15 - Carico massimo e relativo scorrimento del provino DS_C_100_2

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_100_2	3,60	2,88

Tabella 8.16 - Forze di legame medie per il provino DS_C_100_2

8.2.3 DS_C_100_3

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 12,67 kN corrisponde alla rottura del provino. Come si può notare dalla Figura 8.7, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla poliuretanic. Se da un lato della lamina (a) l'adesivo è restato parzialmente ancorato al rinforzo, dall'altro (a) non è verificato in egual modo.

La superficie da cui si è staccato la colla è rimasta di conseguenza liscia e lucida. Non deve trarre in inganno l'adesivo poliuretano rimasto sul lato (b) poiché non fa parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.

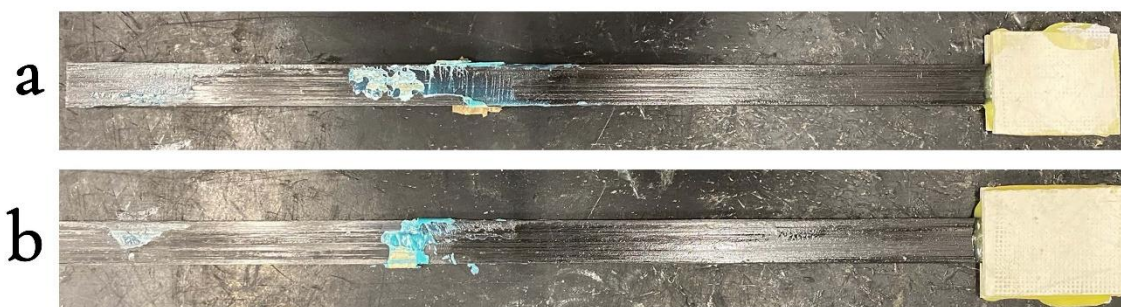


Figura 8.7 - Lamina del provino DS_C_100_3, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

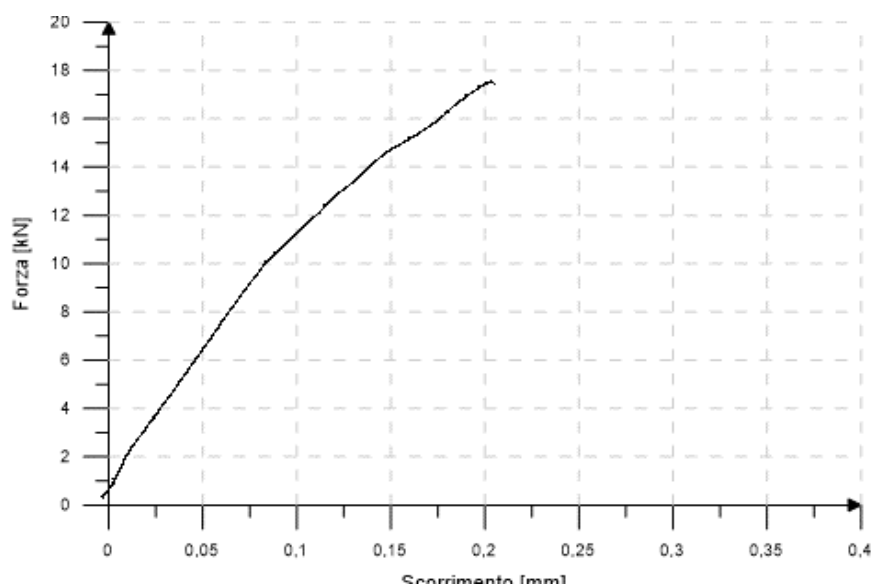


Grafico 8.43 - Relazione F - s per il provino DS_C_100_3, ricavata tramite LVDT

La curva riportata nel Grafico 8.43 ha un andamento lineare crescente ed è di conseguenza coerente con quanto atteso.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{I,LVDT}$ [mm]
DS_C_100_3	17,53	0,204

Tabella 8.17 - Carico massimo e relativo scorrimento del provino DS_C_100_3

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{\max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{\max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_100_3	4,98	3,94

Tabella 8.18 - Forze di legame medie per il provino DS_C_100_3

8.2.4 DS_C_100_4

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 17,53 kN corrisponde alla rottura del provino. Come si può notare dalla Figura 8.8, la modalità di collasso è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e colla poliuretanic. Se da un lato della lamina (a) l'adesivo è rimasto parzialmente ancorato al rinforzo, dall'altro (b) non è così. La superficie da cui si è staccato la colla è rimasta di conseguenza liscia e lucida. Non deve trarre in inganno l'adesivo poliuretanico rimasto su entrambi i lati poiché non facente parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.

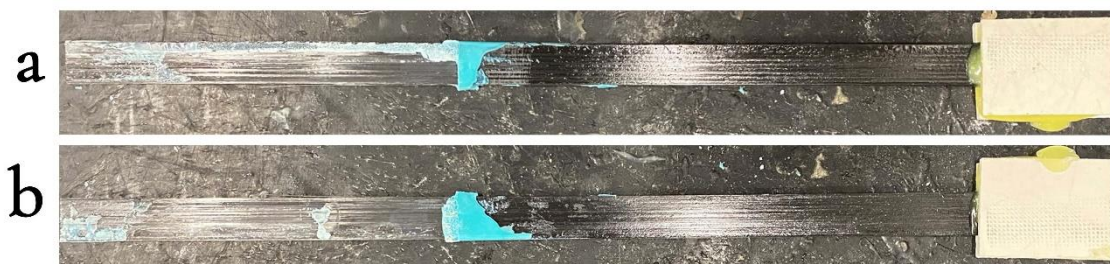


Figura 8.8 - Lamina del provino DS_C_100_4, fronte (a) e retro (b)

Una volta estratta il profilo dalla scanalatura del blocco ligneo, si è osservato un fenomeno mai accaduto nelle precedenti prove effettuate, comprese quelle della serie DS_C_30. La lamina è rimasta lesionata (Figura 8.9) durante la prova e alcune fibre di carbonio sono rimaste vincolate all'interno dell'adesivo (Figura 8.10).



Figura 8.9 - Lesione della lamina in carbonio del provino DS_C_100_4

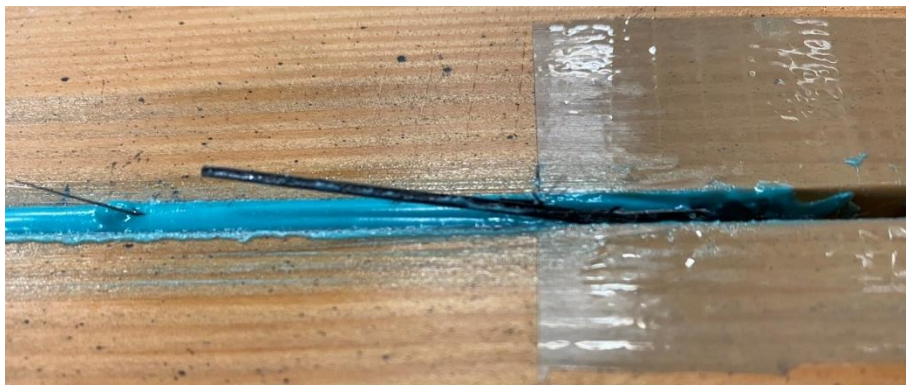


Figura 8.10 - Fibre di carbonio rimaste vincolate all'adesivo del provino DS_C:100_4

CARICO – SCORRIMENTO

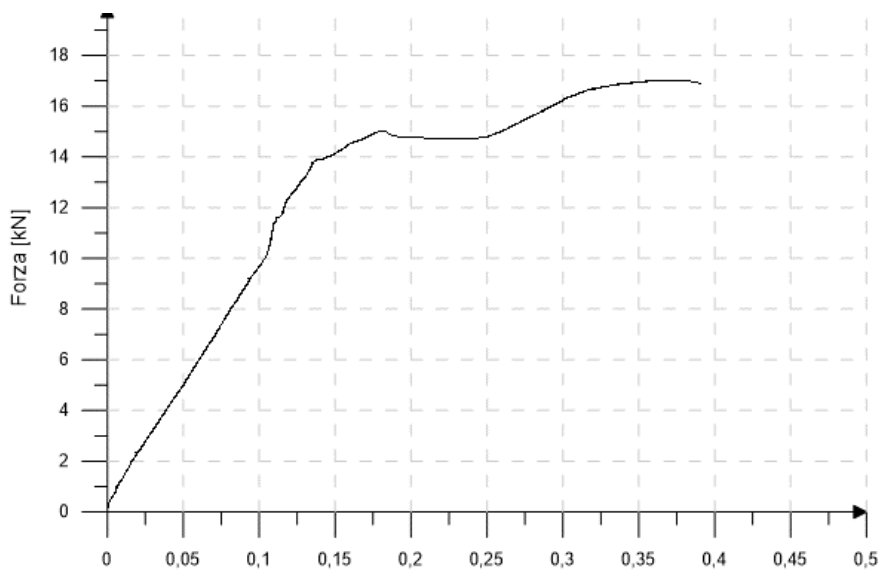


Grafico 8.44 - Relazione F - s per il provino DS_C_100_4, ricavata tramite LVDT

Dal grafico è possibile osservare un iniziale tratto ascendente fino al raggiungimento di un punto di flesso a circa 15,04 kN. Segue una fase in cui nonostante l'aumento degli spostamenti la forza applicata è rimasta pressoché costante. Infine, la curva ha assunto nuovamente un trend crescente fino al raggiungimento del punto di rottura del campione.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]
DS_C_100_4	15,03	0,179
	17,05	0,367

Tabella 8.19 – Carico al cambio di pendenza e carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_C_100_4

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_100_4	4,84	3,87

Tabella 8.20 - Forze di legame medie per il provino DS_C_100_4

8.2.5 RIEPILOGO E CONSIDERAZIONI

L'unica modalità di rottura riscontrata è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra la lamina di rinforzo e l'adesivo poliuretano. Nei campioni numero 1, 3 e 4 la colla è rimasta parzialmente ancorata ad un lato del rinforzo mentre nel numero 2 l'adesivo si è completamente staccato da entrambi i lati della barra. Nel provino numero 4 si è verificata la lesione della lamina durante l'esecuzione del test ed alcune fibre sono rimaste incollate all'adesivo poliuretano presente all'interno della scanalatura del blocco.

Dal grafico successivo si nota come i provini numero 3 e 4 siano caratterizzati dalla stessa pendenza del tratto iniziale della curva. Il numero 2 ha mostrato un comportamento più rigido mentre nel campione numero 1 i dati rilevati tramite LVDT sono errati. Le cause di ciò possono essere molteplici tra cui il mancato parallelismo tra i due misuratori, il non perfetto allineamento in verticale di quest'ultimi e lo spostamento della squadretta di contrasto durante la prova.

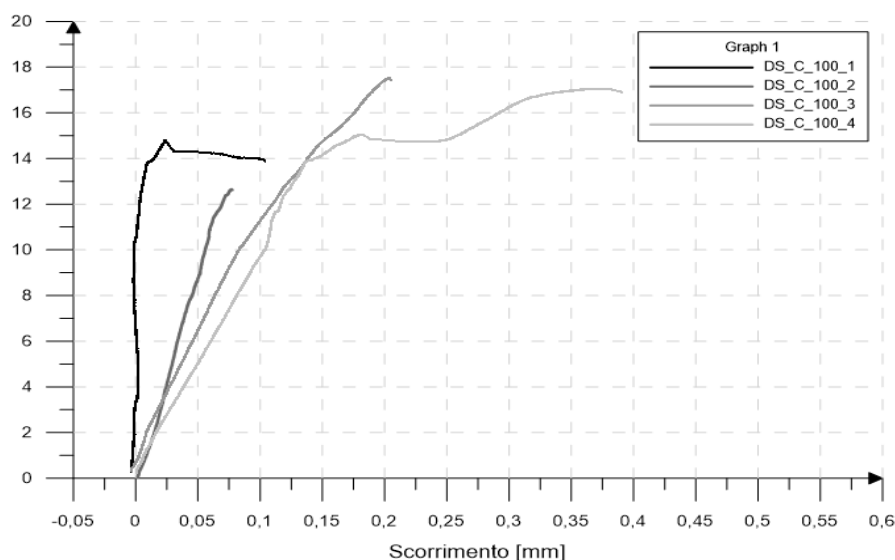


Grafico 8.45 - Relazione F - s ricavata tramite LVDT per i provini del gruppo DS_C_100

Di seguito si riportano la tabella contenente i dati riepilogativi relativi delle forze massime registrate e i relativi scorrimenti, delle tensioni tangenziali medie e della modalità di rottura.

Provino	F_{max} [kN]	$S_{I,LVDT}$ [mm]	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]	Modalità di rottura
DS_C_100_1	14,80	0,024	4,21	3,37	AD_FRP_A
DS_C_100_2	12,67	0,077	3,60	2,88	AD_FRP_A
DS_C_100_3	17,53	0,204	4,98	3,94	AD_FRP_A
DS_C_100_4	17,05	0,367	4,84	3,87	AD_FRP_A
Media	15,51	0,168	4,41	3,52	
Dev.Stan [%]	12,49	78,69	12,46	12,16	

Tabella 8.21 - Dati riepilogativi dei provini appartenenti alla serie DS_C_100

SERIE SUCCESSIVA

Poiché in ciascuna prova della serie si è assistito ad una rottura all'interfaccia tra la barra in carbonio e l'adesivo poliuretano, è stata predisposta un'ulteriore serie di provini caratterizzati da una lunghezza di ancoraggio maggiore, in particolare pari a 150 mm. Ciò consente di indagare ulteriormente il fenomeno dell'incollaggio in modo da verificare se la rottura sia da imputare ad

un'eccessiva tensione tangenziale oppure all'incompatibilità tra la tipologia di rinforzo usata e quella dell'adesivo. Allo stato attuale, la prima delle due cause sembrerebbe da escludere poiché nella serie precedente, ovvero la DS_C_30, sono stati registrati valori di sforzo all'interfaccia maggiori rispetto a quelli appena riportati.

Nella serie seguente, è stata utilizzata nuovamente la misurazione dei dati tramite DIC poiché, rispetto al primo set, sono state introdotte delle notevoli migliorie. In particolare, è stato aggiornato all'ultima versione disponibile il software Vic-2D ed è stata sostituita la bomboletta spray con una in grado di creare un pattern più fitto di punti di diametro inferiore.

8.3 DS_C_150

Come si denota dalla codifica, questo gruppo di provini è caratterizzato da profilo di rinforzo in CFRP incollato al blocco in legno per una lunghezza di ancoraggio pari a 150 mm. Le lamine di rinforzo sono caratterizzate da un modulo elastico E_{CFRP} pari a 165 GPa e le caratteristiche geometriche, descritte nel capitolo 7.4, sono:

- $A_{CFRP} = 25,6 \text{ mm}^2$;
- $L_{lib} = 50 \text{ mm}$;
- $P_f = 35,2 \text{ mm}$;
- $P_w = 44 \text{ mm}$;
- $L_b = 150 \text{ mm}$.

Ciascuna delle prove eseguite è stata caratterizzata da due fasi distinte. Nella prima, la velocità di esecuzione del test è stata impostata pari a 0,05 mm/min fino al raggiungimento della rottura dei legami creatisi nella zona d'incollaggio. Successivamente, durante la seconda fase, è stata utilizzata una velocità pari a 0,50 mm/min fino al raggiungimento della rottura del campione. Questa differenza nell'esecuzione dei test rispetto alle serie precedenti è dovuta al fatto che la forza di attrito sviluppata con una lunghezza di ancoraggio pari a 150 mm non è più trascurabile e gioca un ruolo chiave nella rottura del campione. Il tempo medio delle prove, comprendente la prima e la seconda fase, è stato di 36 min e 40 sec.

Grazie all'introduzione di alcune migliorie rispetto alla prima serie di prova è stata utilizzata nuovamente la DIC. L'intervallo di scatto tra una fotografia e quella successiva è stato impostato a 12 secondi e per l'analisi dati sono stati utilizzati valori di subset e step rispettivamente pari a 31 e 10. Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva della durata della prova e il numero delle fotografie scattate per ciascun provino.

Provino	Durata prova [min]	N° di foto
DS_C_150_1	33'50''	118 ¹¹
DS_C_150_2	30'15''	152
DS_C_150_3	36'50''	185
DS_C_150_4	45'45''	233

Tabella 8.22 - Durata delle prove e numero di foto scattate per ciascun provino della serie DS_C_150

8.3.1 DS_C_150_1

Durante la prima parte della prova, il software di acquisizione fotografica si è bloccato con la conseguente perdita di alcuni dati. Dopo diversi tentativi di riavvio del programma e di settaggio delle impostazioni, è stato possibile procedere con l'acquisizione dei rimanenti dati a partire dal minuto 13. Di conseguenza, nel grafico forza-spostamento tramite DIC si notano degli sbalzi di spostamento. Superata questa fase iniziale, in cui la forza ha raggiunto un valore pari al 24% di quella massima, è stato comunque possibile analizzare i dati relativi agli spostamenti-deformazioni della lamina e delle sezioni perpendicolare ad essa.

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 15,23 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore. Come si può notare dalla Figura 8.11, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla. Entrambi i lati della lamina sono rimasti lisci e lucidi e l'adesivo è restato interamente aggrappato all'interno della scanalatura. Non deve trarre in inganno

¹¹ Non complete a causa del blocco del software di acquisizione fotografica

la resina rimasta sul rinforzo poiché non facente parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.

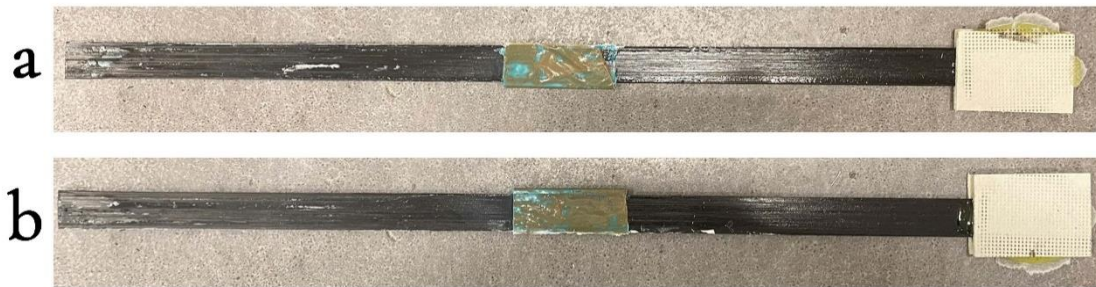


Figura 8.11 - Lamina del provino DS_C_150_1, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

Di seguito sono riportati i grafici che mettono in relazione lo scorrimento verticale subito dal rinforzo in CFRP al carico applicato. Nel primo è riportata la relazione $F - s$ ottenuta dagli spostamenti misurati tramite gli LVDT, nel secondo la relazione $F - s$ ottenuta mediante DIC e nell'ultimo viene riportato il confronto tra le due metodologie di misurazione. I dati riportati fanno riferimento solo alla prima parte del test fino al raggiungimento della rottura del giunto.

È utile ricordare che gli scorrimenti misurati tramite estensimetri sono depurati dall'effetto dell'allungamento elastico della lamina, mentre quelli ottenuti tramite DIC sono depurati dall'effetto dei movimenti rigidi del campione.

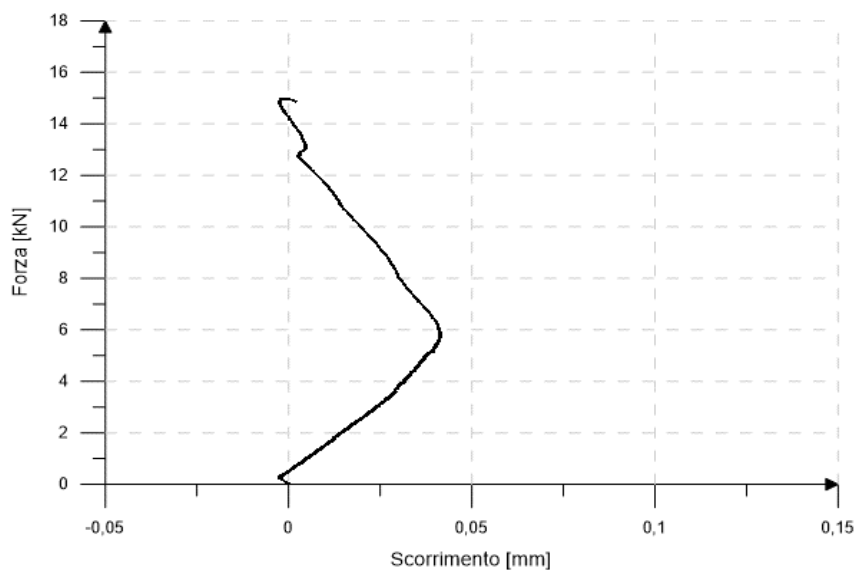


Grafico 8.46 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_150_1, ricavata tramite LVDT

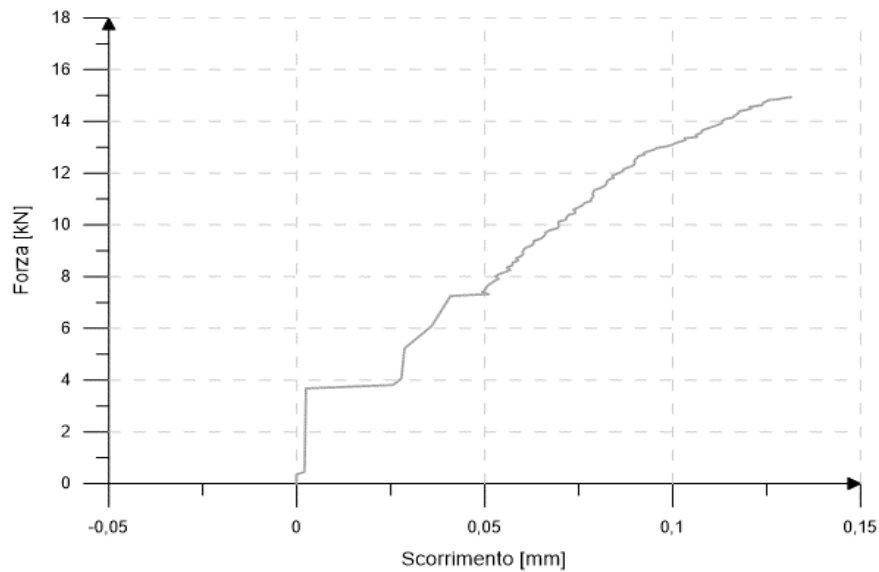


Grafico 8.47 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_150_1, ricavata tramite DIC

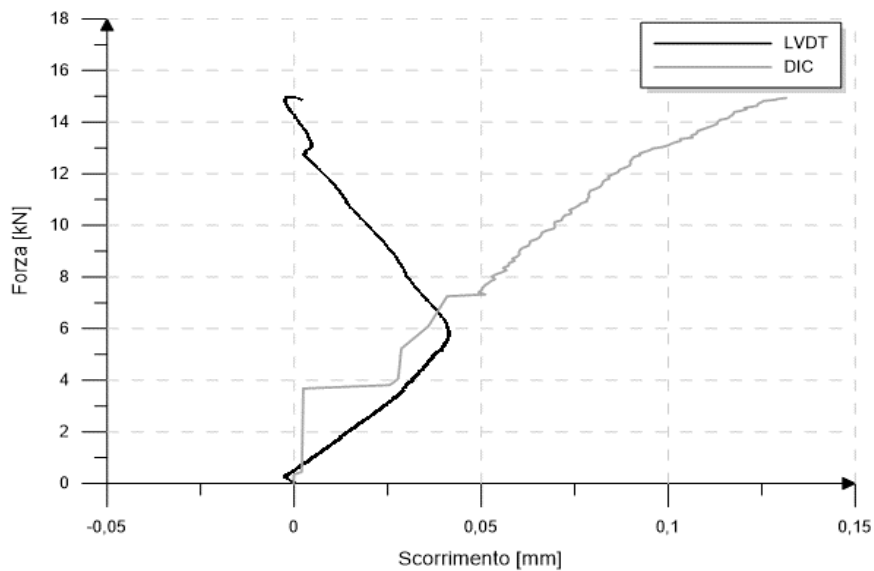


Grafico 8.48 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_150_1, ricavata tramite LVDT e DIC

La curva ottenuta tramite LVDT è errata; infatti, dopo un tratto crescente, si assiste ad un'inversione di tendenza. Considerato che si è presentato il problema relativo al blocco del software per l'acquisizione delle immagini, è difficile avere la certezza che la curva ricavata tramite DIC sia corretta, ma in generale è coerente con quanto atteso, ossia è crescente fino al raggiungimento della forza massima applicata.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{I,LVDT}$ [mm]	$s_{I,DIC}$ [mm]
DS_C_150_1	14,95	0,00012	0,132

Tabella 8.23 -Carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_C_150_1

In termini percentuali, tra i due metodi di misura si nota una differenza nello spostamento ultimo pari al 99%.

FORZE DI LEGAME MEDIE

Le forze di legame medie presenti sulla superficie del legno e del rinforzo sono calcolate mediante le formule riportate nel capitolo 7.4. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti:

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_150_1	2,84	2,27

Tabella 8.24 - Forze di legame medie per il provino DS_C_150_1

COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

L'utilizzo della DIC ha consentito di ricavare gli spostamenti e le deformazioni lungo lo sviluppo longitudinale della lamina di rinforzo. Nei grafici seguenti è stata assegnata all'ascissa nulla la posizione geometrica della loaded end. Alla sua destra si sviluppa la porzione incollata fino al raggiungimento dei 150 mm corrispondenti alla lunghezza di ancoraggio definita in partenza.

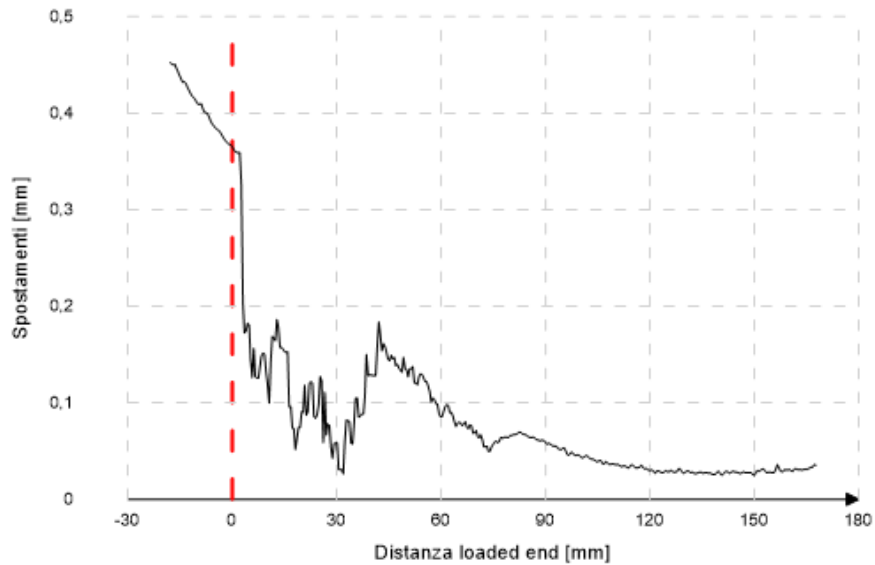


Grafico 8.49 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_150_1

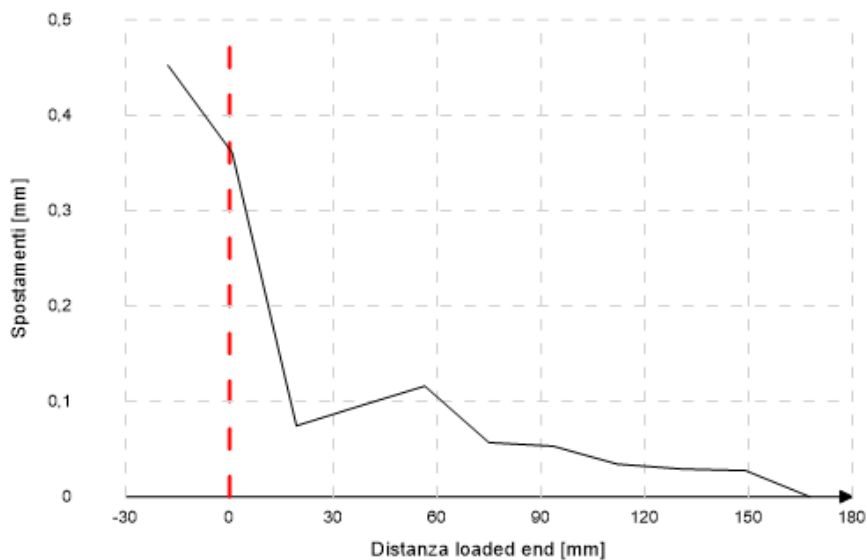


Grafico 8.50 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_150_1

La curva del Grafico 8.49, nonostante presenti un andamento generale decrescente, è errata nel tratto compreso tra $X \approx 0$ mm e $X \approx 50$ mm. I valori registrati sono estremamente variabili e si assiste al cambio di trend della curva una volta superati i 30 mm.

Visto che gli spostamenti sono errati, anche le deformazioni lo sono di conseguenza poiché ricavate con un'operazione di derivazione degli spostamenti grazie al software di post-processing

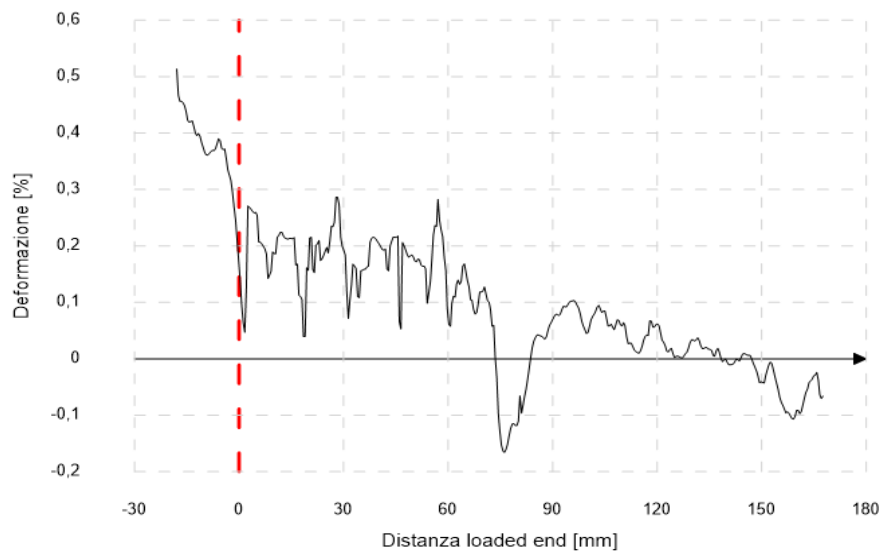


Grafico 8.51 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_C_150_1

COMPORTAMENTO LUNGO LA SEZIONE

Nei grafici seguenti, individuata come coordinata $X = 0$ la posizione del baricentro della lamina di rinforzo, si riportano:

- La distribuzione degli spostamenti relativi lungo la sezione del provino, rilevati nella zona della loaded end per diverse condizioni di carico (20% - 40% - 60% - 80% - 100% di F_{max}). Essi sono calcolati come la differenza tra quelli di due condizioni di carico successive, ovvero analiticamente:

$$s = s_{F_i} - s_{F_{i-1}}$$

Questo passaggio consente di normalizzare i dati, permettendo di individuare quale intervallo di carico causa spostamenti maggiori all'interno del provino

- La distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end (50 mm - 100 mm - 150 mm) nella condizione di carico massimo;
- La distribuzione delle deformazioni lungo la sezione del provino misurate nella zona di loaded end per la condizione di carico massimo.

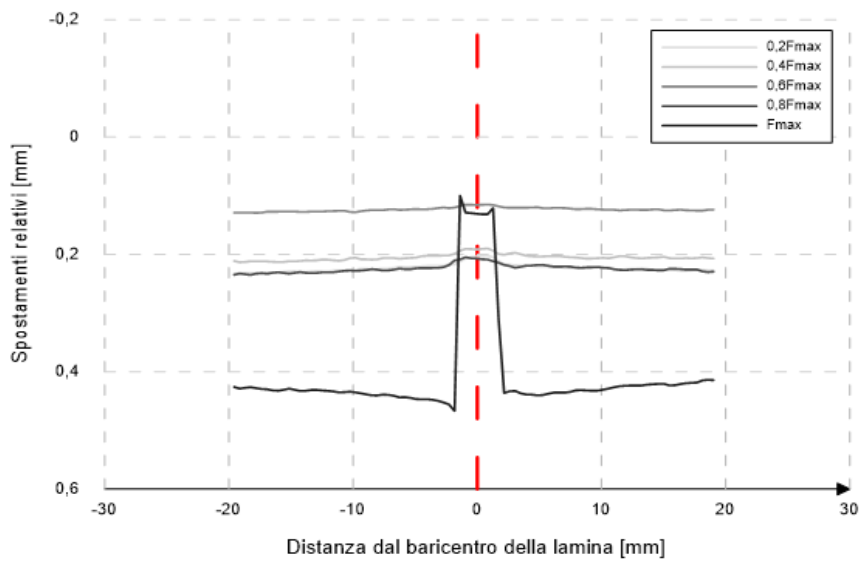


Grafico 8.52 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_C_150_1 al variare dell'intensità della forza

Dal Grafico 8.52 si nota come il range che ha causato spostamenti maggiori sia quello compreso tra lo $0,8F_{\max}$ e F_{\max} . All'opposto, la condizione di carico che ha causato spostamenti minori è quella compresa tra lo $0,4F_{\max}$ e $0,6F_{\max}$. Da notare il fatto che solamente in corrispondenza del carico massimo si osserva una netta differenza di comportamento tra il legno e il profilo di rinforzo. Si può inoltre affermare che ad una distanza di 3 mm dal baricentro della lamina, gli effetti dati dall'applicazione del carico sono praticamente nulli.

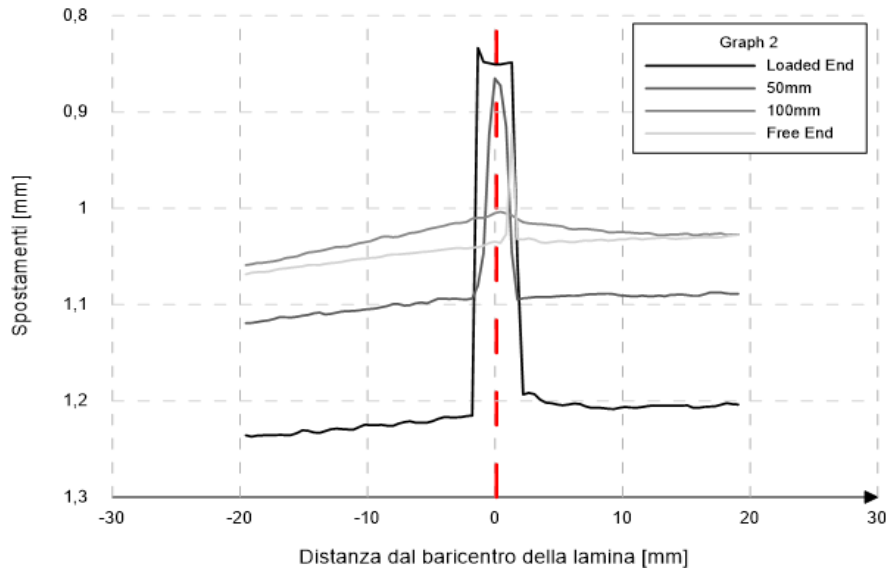


Grafico 8.53 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_C_150_1

Le curve ottenute nel Grafico 8.53 sono caratterizzate da un picco degli spostamenti registrato in corrispondenza del baricentro della lamina. Si nota, coerentemente con quanto atteso, che in corrispondenza della Loaded End si registrano spostamenti maggiori rispetto alle altre sezioni del provino. All'opposto, nella zona della free end, area teoricamente scarica dalle tensioni, sono stati registrati spostamenti pressoché costanti.

Derivando i risultati ottenuti nel Grafico 8.52, il software di post-processing è stato in grado di ricavare le deformazioni lungo la sezione:

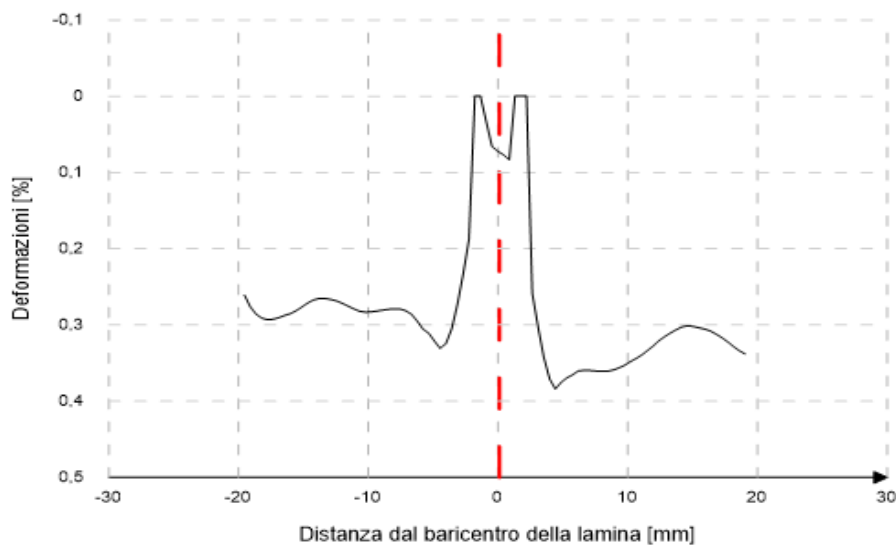


Grafico 8.54 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_C_150_1

La curva delle deformazioni riportata nel Grafico 8.54 è errata. In corrispondenza del baricentro della lamina si notano due picchi con valore numerico pari a 0. Ciò è indice del fatto che il software per l'analisi dati tramite DIC non è stato in grado di calcolare in quelle zone le deformazioni. Inoltre, nelle aree circostanti al rinforzo si notano deformazioni variabili anziché essere costanti.

8.3.2 DS_C_150_2

Durante la fase di estrazione della lamina dal blocco, operazione successiva alla conclusione della prova, si è danneggiata la parte terminale della lamina di rinforzo. Di conseguenza, le lesioni alla barra in carbonio riportate successivamente nell'immagine della modalità di rottura non sono da attribuire all'esecuzione del test.

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 13,47 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore.

Come si può notare dalla Figura 8.11, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla. Entrambi i lati della lamina sono rimasti lisci e lucidi e l'adesivo è restato interamente aggrappato all'interno della scanalatura. Non deve trarre in inganno la resina rimasta sul rinforzo poiché non facente parte della regione incollata ma di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.



Figura 8.12 - Lamina del provino DS_C_150_2, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

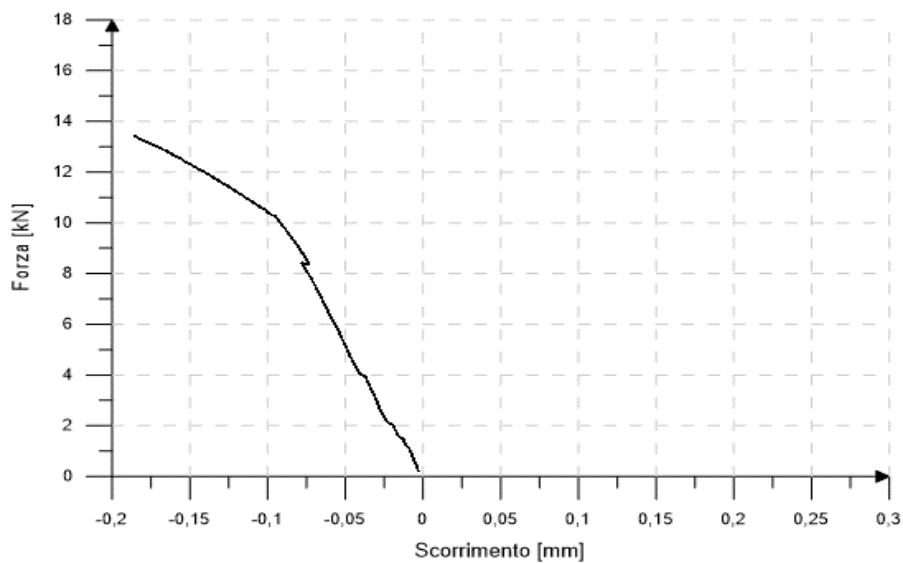


Grafico 8.55 - Relazione F - s per il provino DS_C_150_2, ricavata tramite LVDT

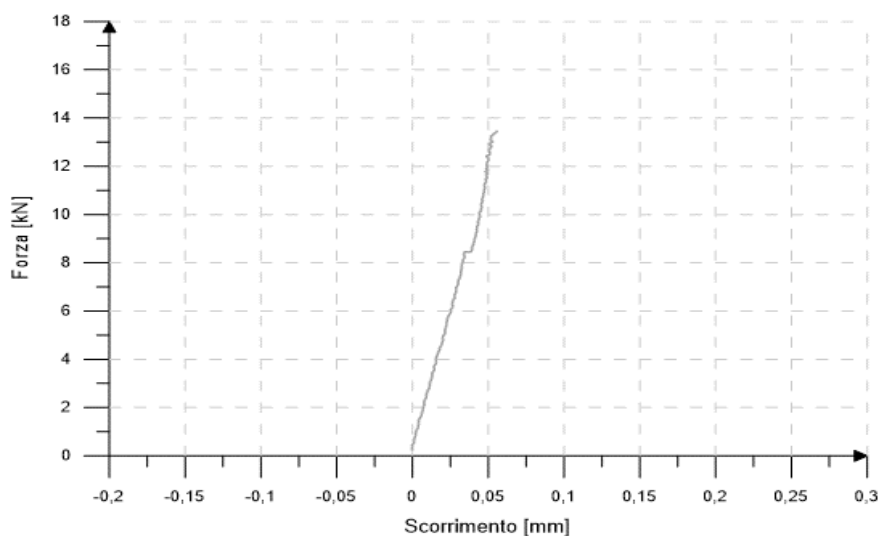


Grafico 8.56 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_150_2, ricavata tramite DIC

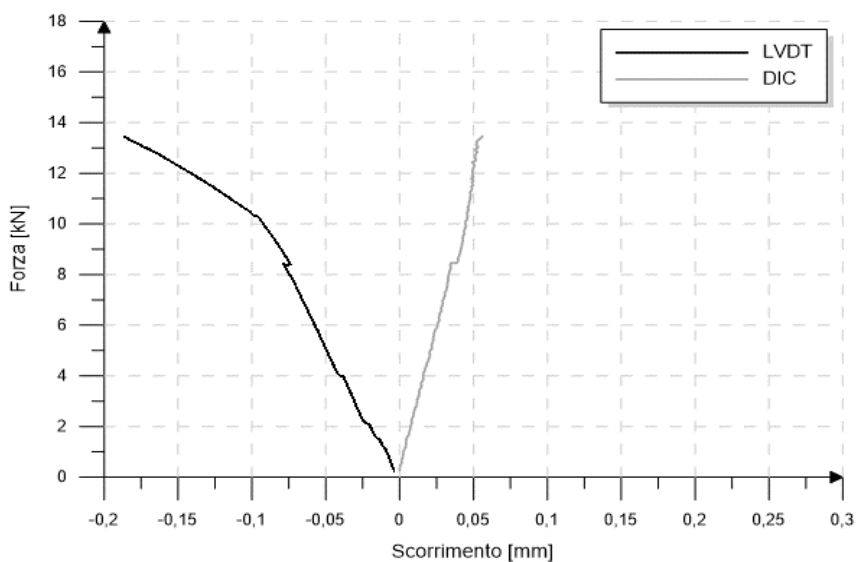


Grafico 8.57 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_150_2, ricavata tramite LVDT e DIC

La curva ricavata tramite estensimetri è errata poiché assume valori negativi. Ciò è dovuto al fatto che gli spostamenti misurati dagli LVDT sono inferiori all'allungamento elastico e di conseguenza, nel momento del calcolo degli spostamenti effettivi, si ottengono valori minori dello zero.

Provino	F_{\max} [kN]	s_{LVDT} [mm]	s_{DIC} [mm]
DS_C_150_2	12,38	-0,111	0,056

Tabella 8.25 – Carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_C_150_2

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{\max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{\max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_150_2	2,55	2,04

Tabella 8.26 - Forze di legame medie per il provino DS_C_150_2

COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

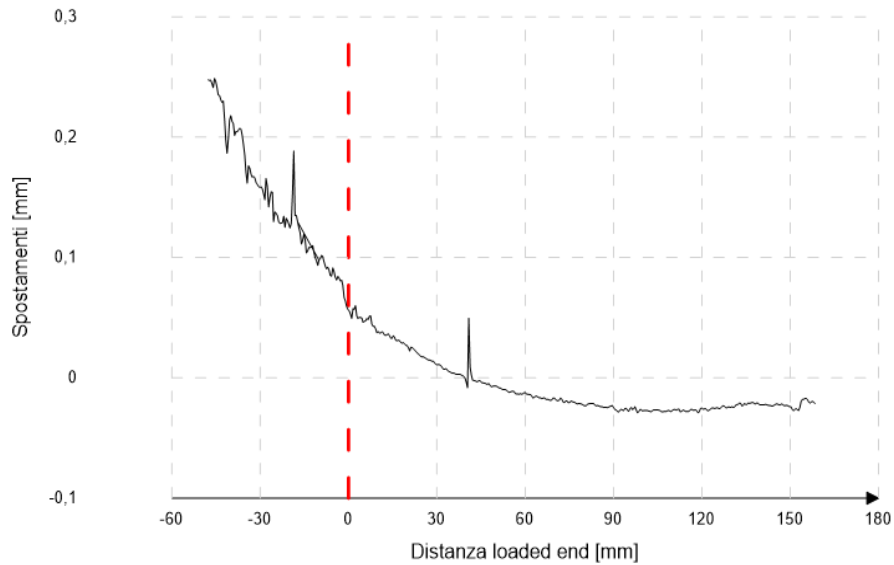


Grafico 8.58 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_150_2

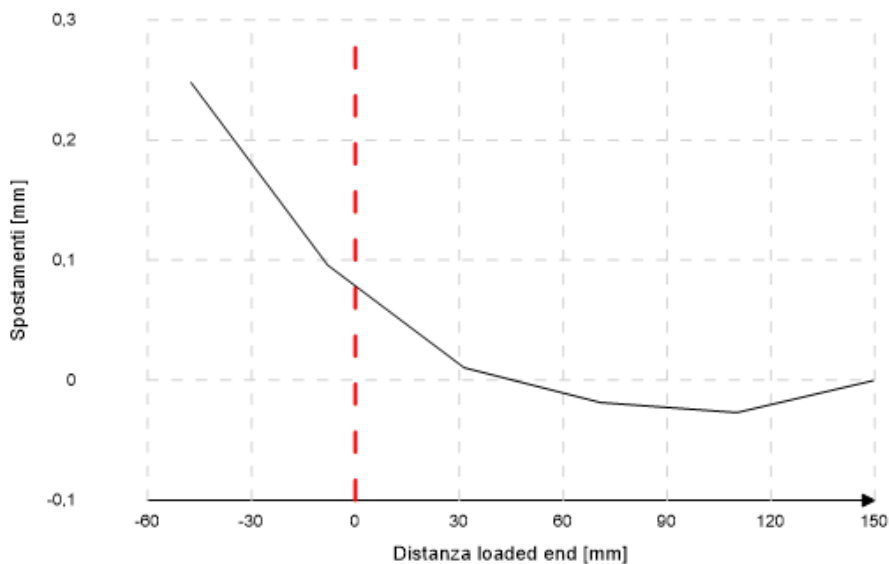


Grafico 8.59 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_150_2

La curva ottenuta nel Grafico 8.58 risulta essere in linea generale coerente con quanto atteso a livello teorico. In corrispondenza di $x = 40$ mm è stato registrato

un picco di spostamento, allontanandosi dalla loaded end, punto in cui si viene applicato il carico, vi è una riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. È interessante notare la presenza di tre punti in cui curva cambia inclinazione: $X \cong 0$ mm, $X \cong 30$ mm e $X \cong 110$ mm. Nell'ultimo tratto della curva, ovvero oltrepassato il punto di ordinata $X \cong 110$ mm, si nota un andamento leggermente crescente degli spostamenti

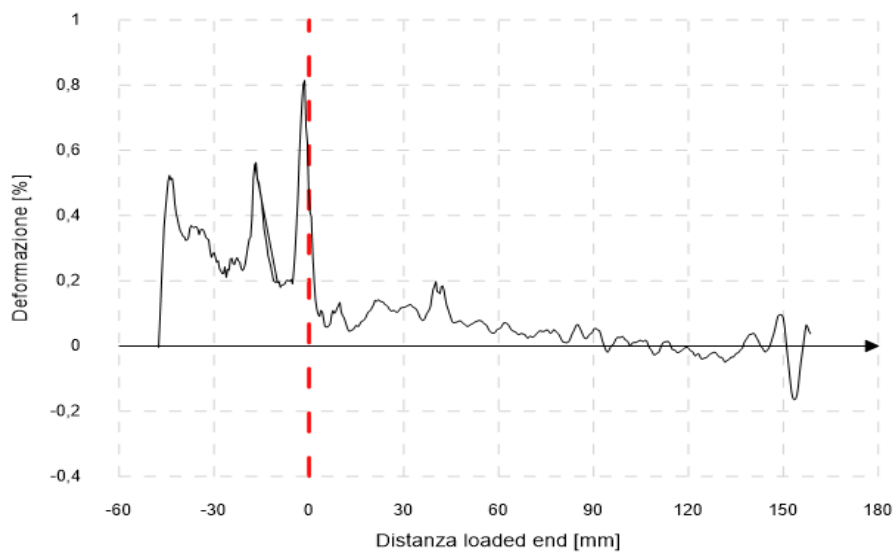


Grafico 8.60 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_C_150_2

La curva del grafico soprastante presenta numerose discordanze rispetto a quanto atteso. Nonostante in corrispondenza dell'ascissa nulla sia stato registrato un picco delle deformazioni, nella zona di destra si assiste ad un crollo delle deformazioni anziché essere decrescenti parabolicamente, mentre nella parte di sinistra si nota un andamento estremamente variabile delle deformazioni anziché essere costanti.

COMPORAMENTO LUNGO LA SEZIONE

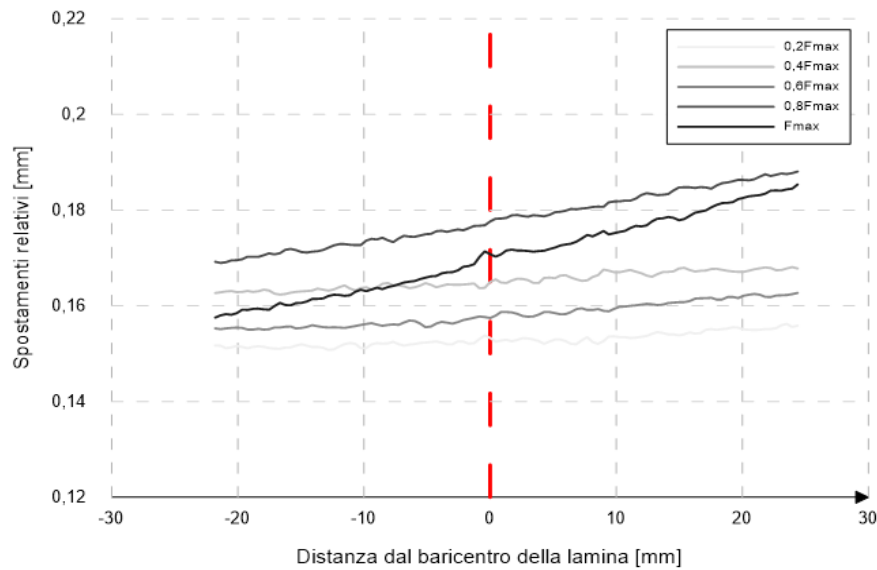


Grafico 8.61 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_C_150_2 al variare dell'intensità della forza

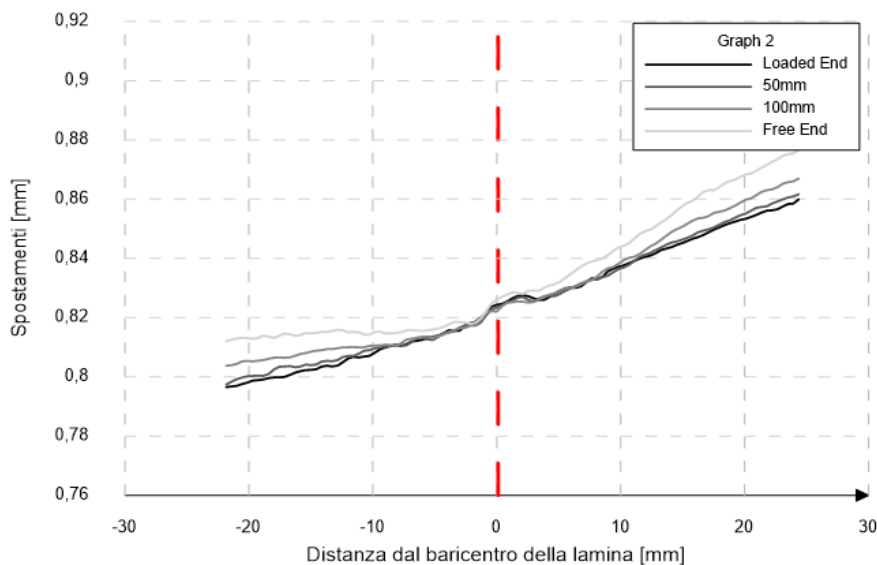


Grafico 8.62 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_C_150_2

I grafici relativi agli spostamenti lungo sezioni perpendicolari allo sviluppo della lamina sono entrambi errati. Infatti, non si nota un comportamento parabolico con picco in corrispondenza del baricentro del profilo di rinforzo ma un andamento crescente all'aumentare dell'ascissa. Ciò può essere dovuto, ad esempio, alla rotazione del provino sottoposta al carico.

Dato che gli spostamenti calcolati sono errati, anche le deformazioni lo sono di conseguenza in quanto ricavare indirettamente per derivazione degli stessi.

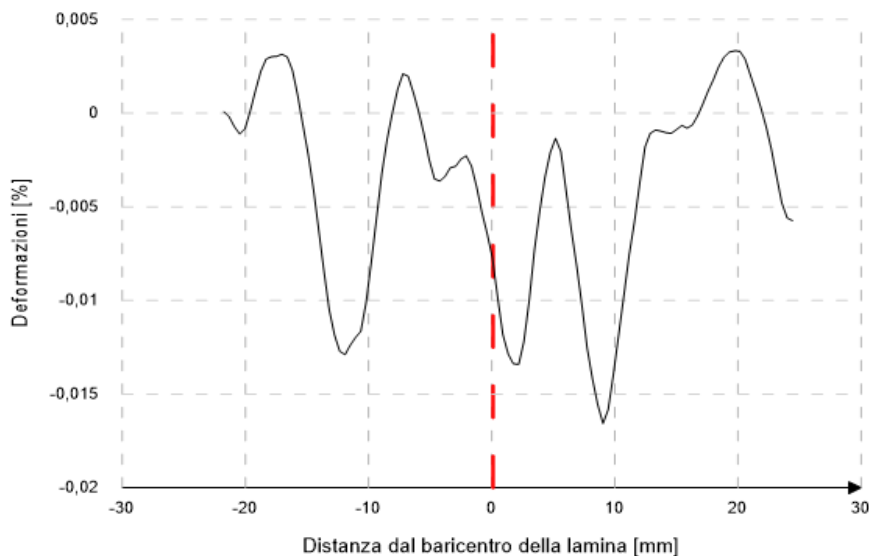


Grafico 8.63 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_C_150_2

8.3.3 DS_C_150_3

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 16,03 kN corrisponde alla rottura del provino. Come si può notare dalla Figura 8.13, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla. Entrambi i lati della lamina sono rimasti lisci e lucidi e l'adesivo è restato interamente aggrappato all'interno della scanalatura. Non deve trarre in inganno la resina rimasta sul rinforzo poiché non facente parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.



Figura 8.13 - Lamina del provino DS_C_150_3, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

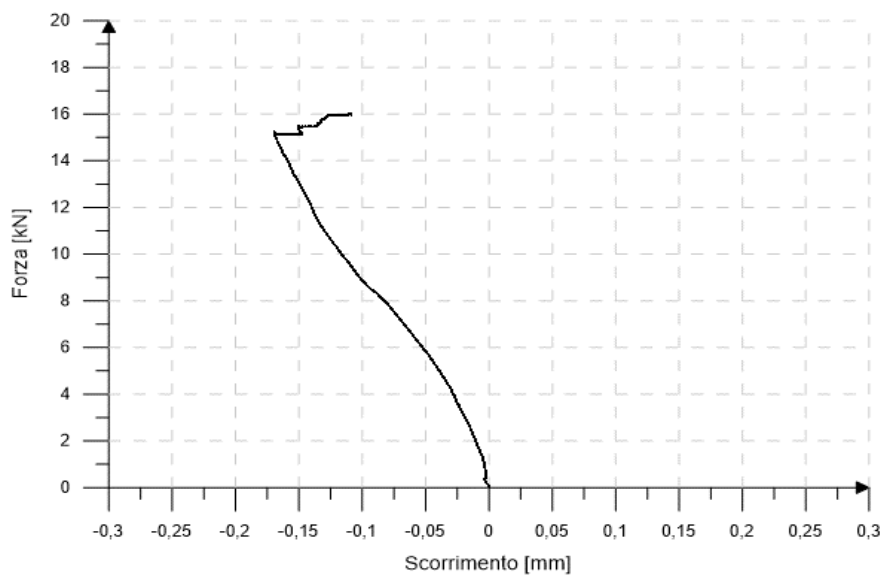


Grafico 8.64 - Relazione F - s per il provino DS_C_150_3, ricavata tramite LVDT

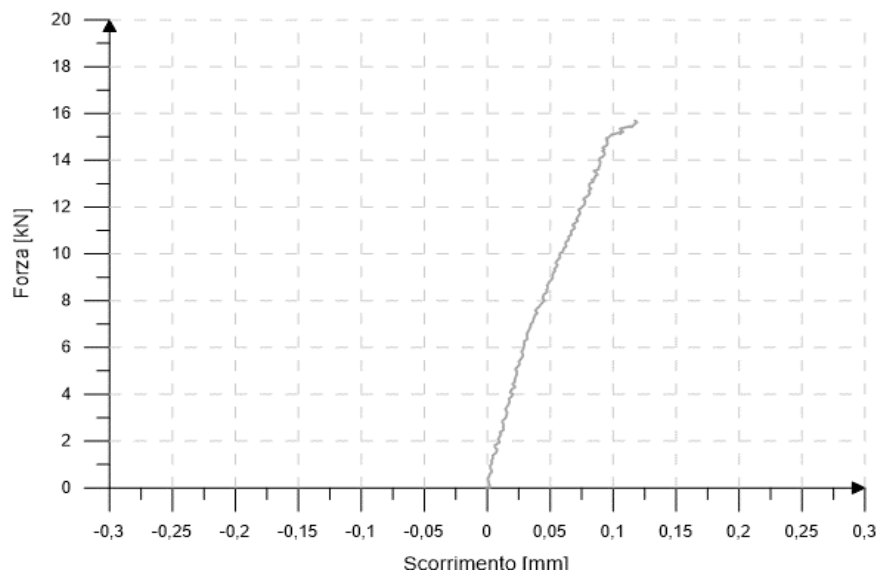


Grafico 8.65 - Relazione F - s per il provino DS_C_150_3, ricavata tramite DIC

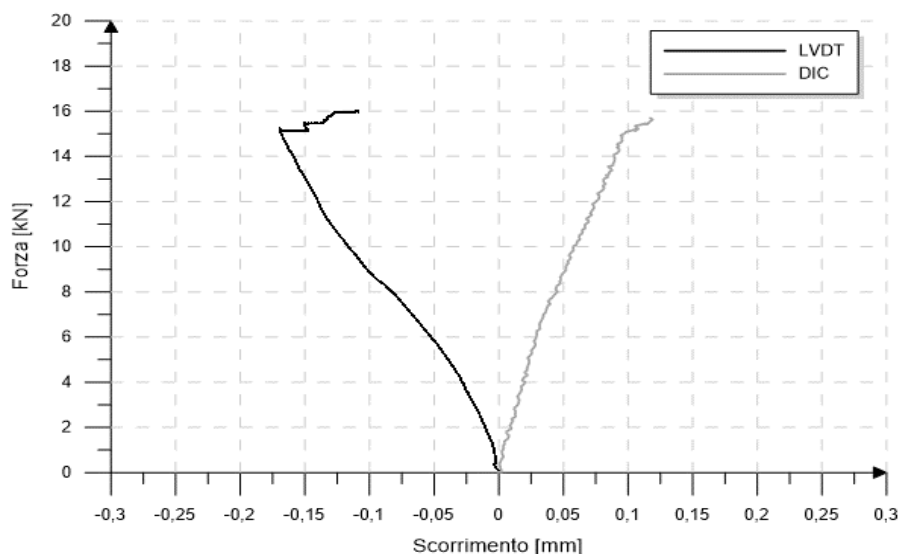


Grafico 8.66 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_150_3, ricavata tramite LVDT e DIC

La curva ricavata tramite estensimetri è errata poiché assume valori negativi. Ciò è dovuto al fatto che gli spostamenti misurati dagli LVDT sono inferiori all'allungamento elastico e di conseguenza, nel momento del calcolo degli spostamenti effettivi, si ottengono valori minori dello zero.

Raggiunti i 15,11 kN, la curva riportata nel Grafico 8.66, cambia comportamento e diventa crescente.

Grafico 8.67 - Ingrandimento del picco della relazione $F - s$ del provino DS_C_150_3

Provino	F [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]	$s_{i,DIC}$ [mm]
DS_C_150_3	15,11	0,167	0,106
	16,03	-0,109	0,122

Tabella 8.27 - Carico al momento dell'inversione del trend e carico massico con rispettivi scorrimenti del provino DS_C_150_3

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_150_3	3,03	2,43

Tabella 8.28 - Forze di legame medie per il provino DS_C_150_3

COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

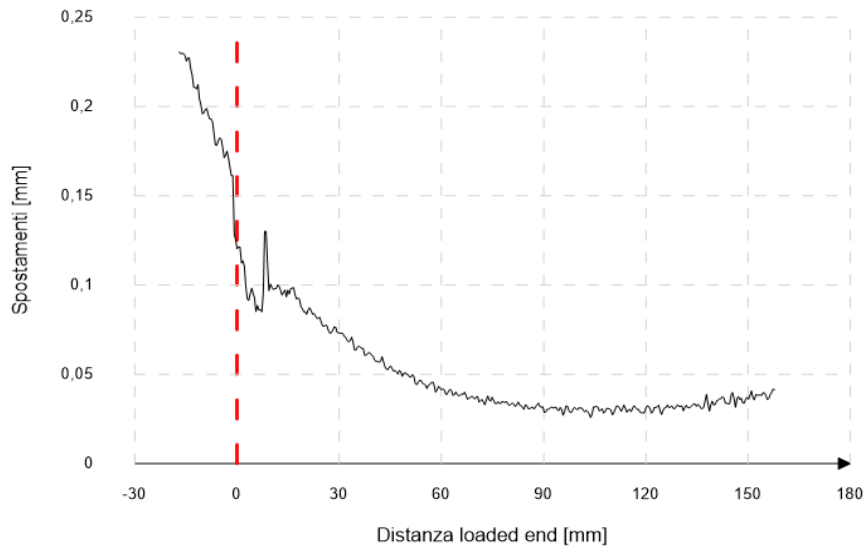


Grafico 8.68 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_150_3

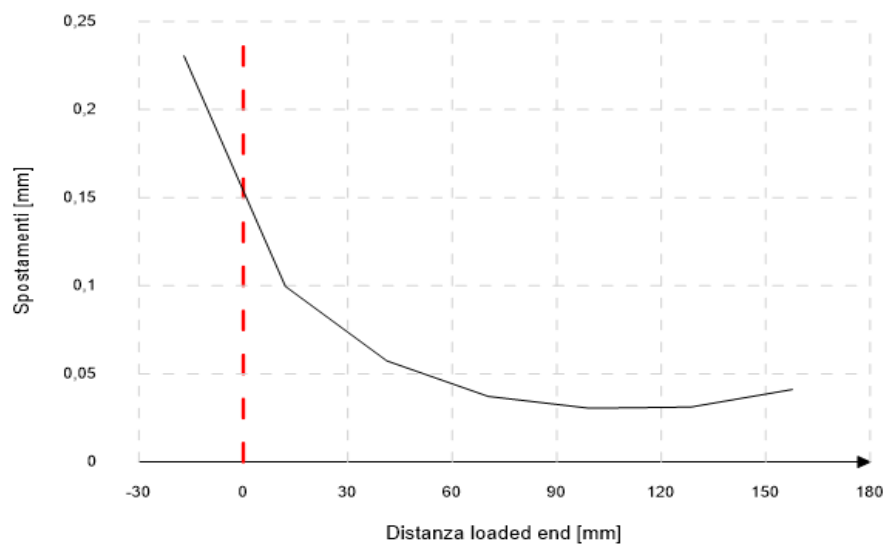


Grafico 8.69 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_150_3

La curva ottenuta risulta essere in linea generale coerente con quanto atteso a livello teorico sebbene in corrispondenza di $x = 10$ mm sia stato registrato un picco di spostamento. Allontanandosi dalla loaded end, punto di applicazione del carico, vi è una riduzione delle sollecitazioni e di conseguenza degli spostamenti. Nell'ultima parte della lamina, ovvero a partire da un'ascissa $\cong 130$ mm, la curva cambia andamento assume un trend leggermente crescente.

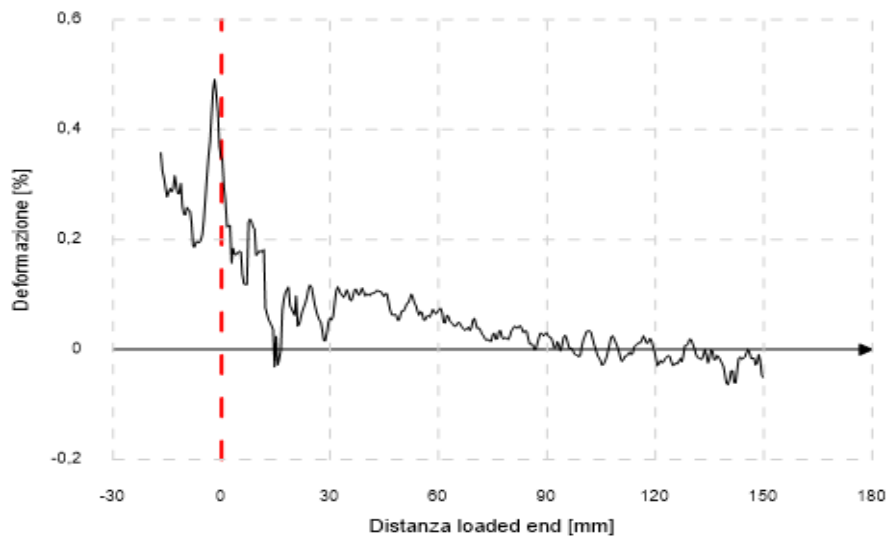


Grafico 8.70 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_C_150_3

Nella zona a destra della loaded end viene confermato l'andamento teorico atteso, ossia le deformazioni decrescono lungo lo sviluppo della lamina. Ciò non è vero per la zona di sinistra, parte scarica dalle tensioni di incollaggio. Le deformazioni in quest'area, dopo essere calate drasticamente, assumono un trend crescente allontanandosi dall'ascissa nulla al posto che essere costanti.

COMPORTAMENTO LUNGO LA SEZIONE

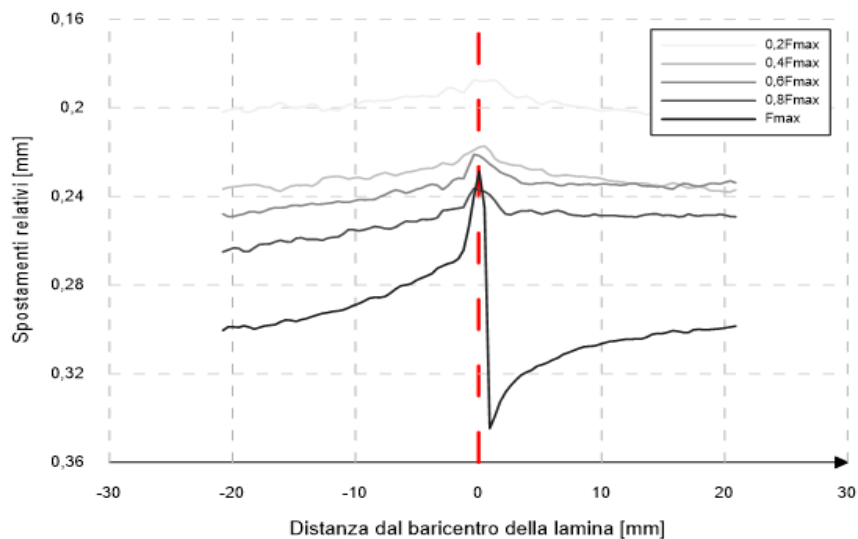


Grafico 8.71 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_C_150_3 al variare dell'intensità della forza

Le curve ottenute nel Grafico 8.71 sono coerenti con quanto atteso essendo caratterizzate da un andamento parabolico con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina.

È presente una crescita progressiva degli spostamenti all'aumentare dell'intensità della forza applicata. Da evidenziare il comportamento che assume il campione nella parte di destra in corrispondenza di F_{max} . Si nota un salto del grafico che può essere dovuto, per esempio, alla rottura all'interfaccia tra l'adesivo e la lamina di rinforzo.

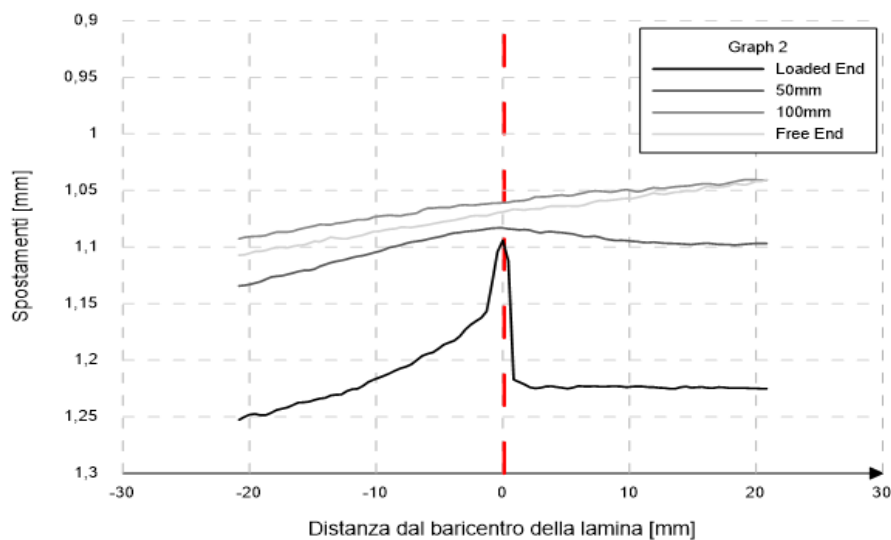


Grafico 8.72 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_C_150_3

Dal Grafico 8.72 si nota come in corrispondenza dei 100 mm e della free end gli spostamenti siano pressoché costanti e l'effetto dovuto all'applicazione del carico inizia ad evidenziarsi in corrispondenza dei 50 mm

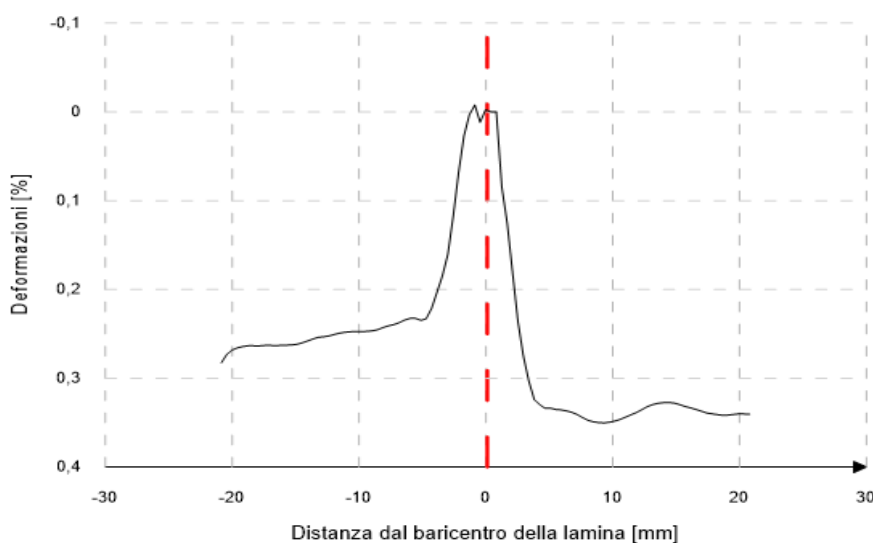


Grafico 8.73 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_C_150_3

Le deformazioni ottenute rispecchiano il comportamento atteso, ovvero in corrispondenza del baricentro della lamina vi è un picco di deformazioni mentre ai lati, in particolare partendo dalla distanza di 5 mm, esse sono pressoché costanti.

8.3.4 DS_C_150_4

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 16,70 kN corrisponde alla rottura del provino. Come si può notare dalla Figura 8.14, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e la colla. Entrambi i lati della lamina sono rimasti lisci e lucidi e l'adesivo è restato interamente aggrappato all'interno della scanalatura. Non deve trarre in inganno la resina rimasta sul rinforzo poiché non facente parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo. Da evidenziare anche il fatto che, oltre alla rottura dell'adesivo, si è riscontrato anche il danneggiamento del profilo di rinforzo.

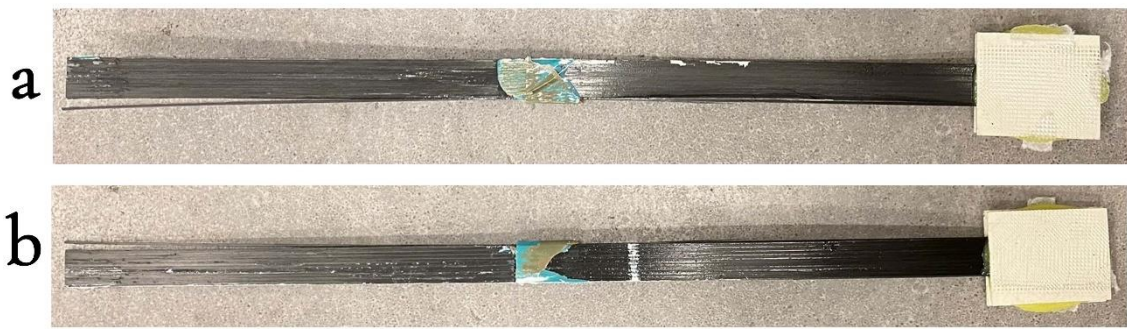


Figura 8.14 - Lamina del provino DS_C_150_4, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

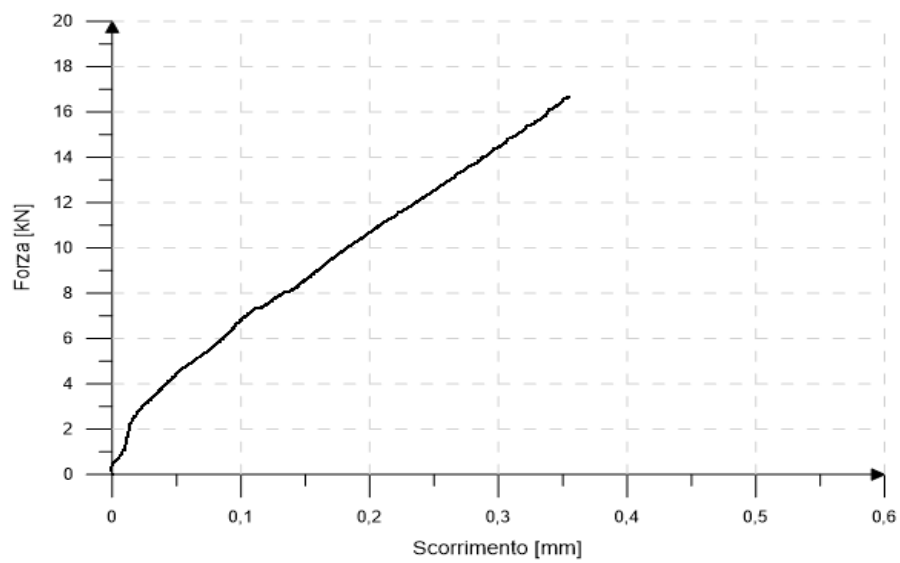


Grafico 8.74 - Relazione F - s per il provino DS_C_150_4, ricavata tramite LVDT

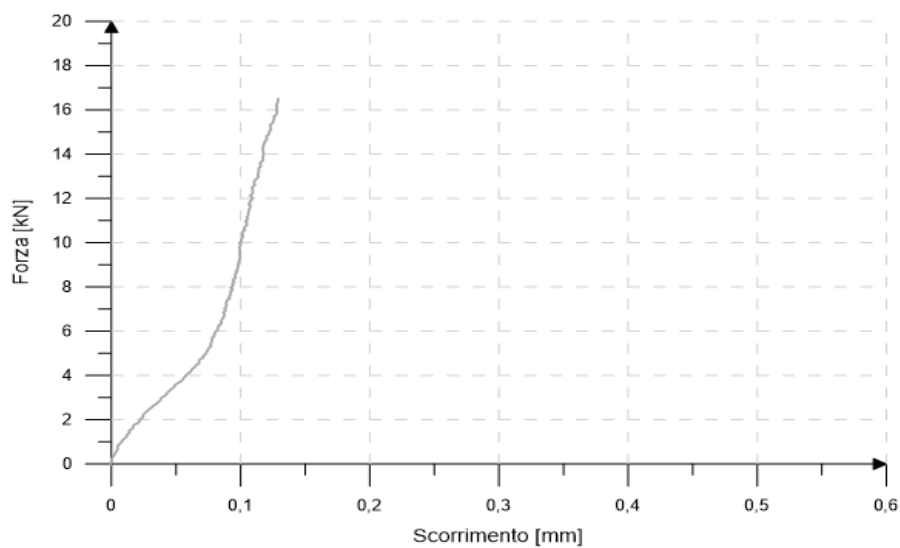


Grafico 8.75 - Relazione F - s per il provino DS_C_150_4, ricavata tramite DIC

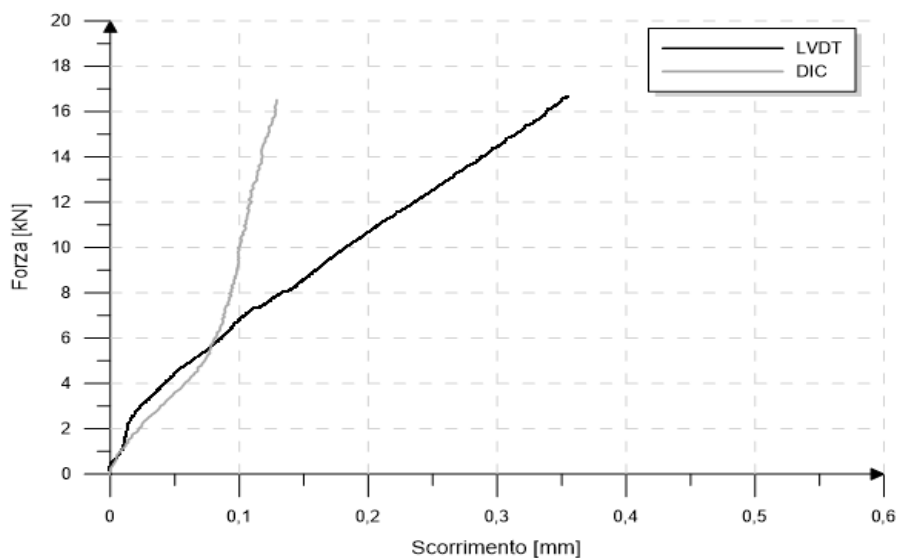


Grafico 8.76 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_150_4, ricavata tramite LVDT e DIC

Benché le curve ottenute siano caratterizzate dallo stesso andamento, si nota una maggiore rigidezza in quella ottenuta mediante DIC. Per quanto riguarda la misurazione tramite correlazione fotografica si nota un aumento della pendenza della curva, ciò è in contrasto con quanto atteso.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]	$s_{i,DIC}$ [mm]
DS_C_150_4	16,70	0,355	0,132

Grafico 8.77 - Carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_C_150_4

In termini percentuali, tra i due metodi di misura si nota una differenza nello spostamento ultimo pari al 62%.

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_C_150_4	3,16	2,53

Tabella 8.29 - Forze di legame medie per il provino DS_C_150_3

COMPORAMENTO LUNGO LA LAMINA

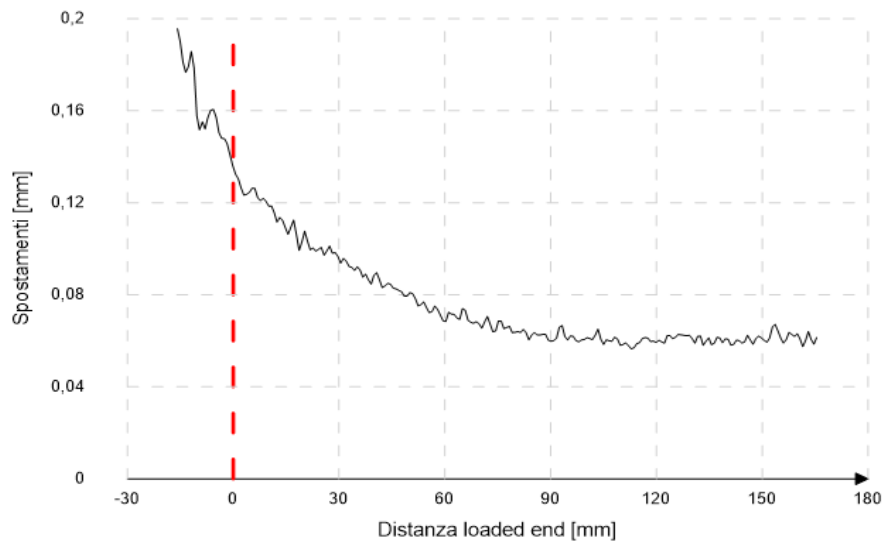


Grafico 8.78 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_150_4

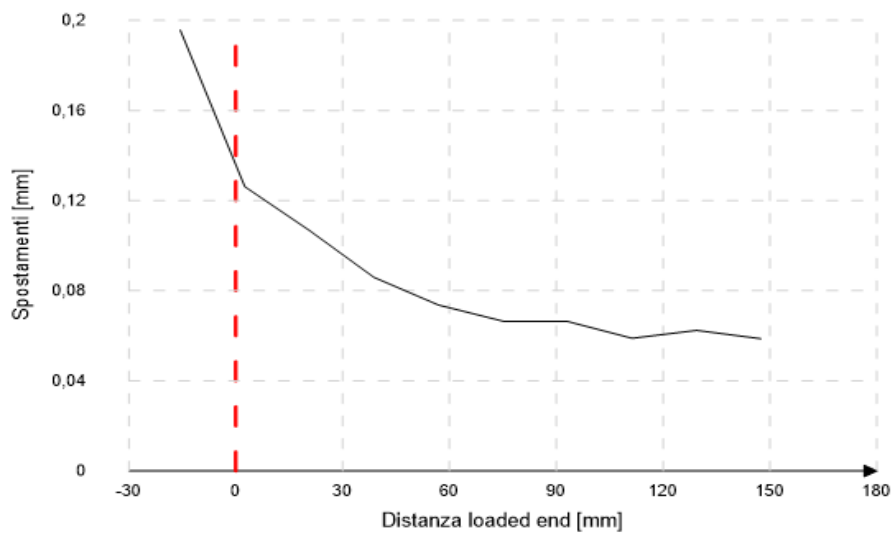


Grafico 8.79 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_C_150_4

La curva ottenuta risulta essere in linea generale coerente con quanto atteso a livello teorico. Allontanandosi dalla loaded end vi è una riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. È interessante notare la presenza di due punti in cui curva cambia inclinazione: $X \cong 0$ e $X \cong 40$.

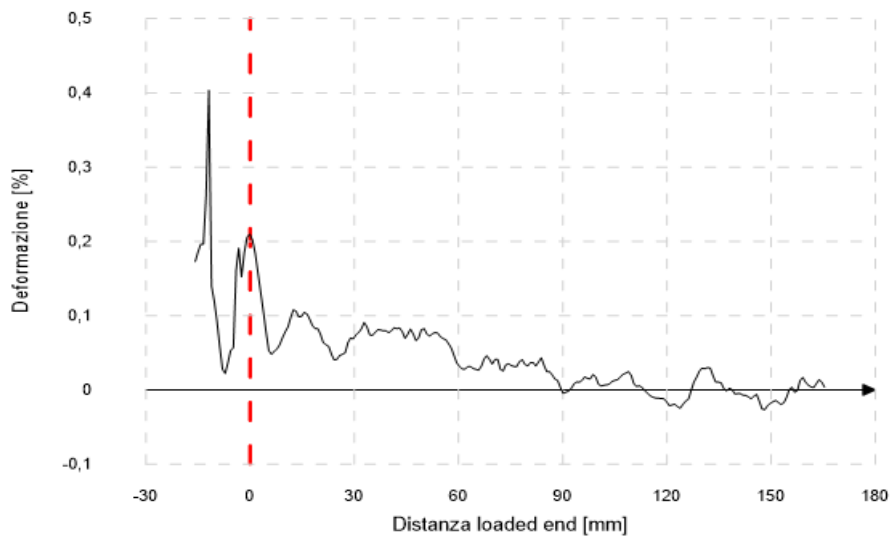


Grafico 8.80 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_C_150_4

Dal Grafico 8.79 si nota un picco di deformazione in corrispondenza della loaded end e alla sua destra della loaded end viene confermato l'andamento teorico atteso, ossia le deformazioni decrescono lungo lo sviluppo della lamina. Ciò non può però essere sostenuto per l'area di sinistra, parte della lamina scarica dalle tensioni di incollaggio. Infatti, allontanandosi dalla loaded end, si nota un incremento lineare delle deformazioni al posto che essere costanti.

COMPORAMENTO LUNGO LA SEZIONE

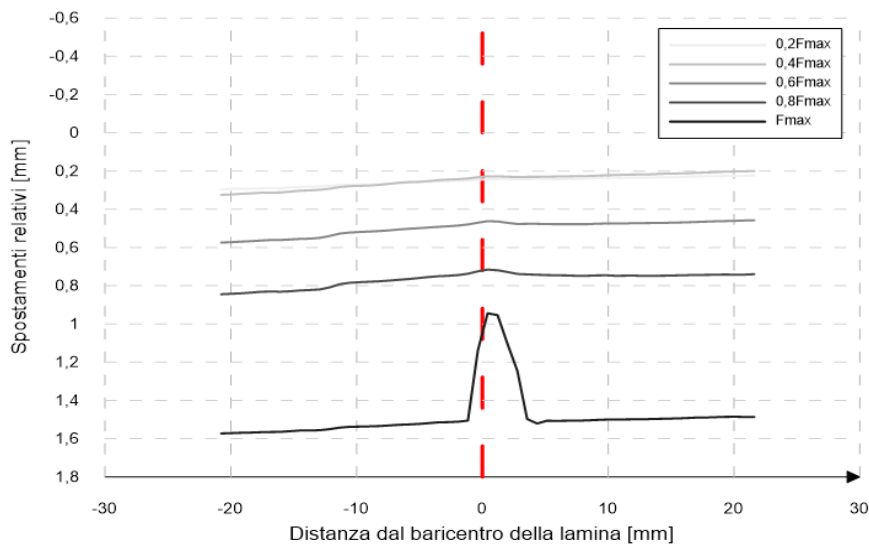


Grafico 8.81 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_C_150_4 al variare dell'intensità della forza

Dal grafico soprastante si nota come solamente in corrispondenza di F_{max} si sia registrato un andamento parabolico degli spostamenti con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina di rinforzo. Questo indica che il giunto è rimasto praticamente immobile fino alla rottura del campione.

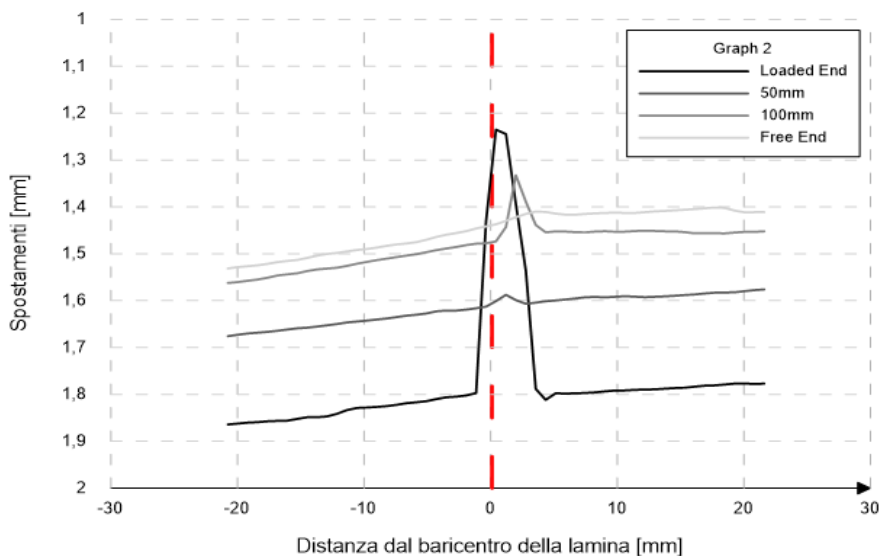


Grafico 8.82 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_C_150_4

Le curve corrispondenti alla loaded end e ai 50 mm si nota il comportamento parabolico caratteristico delle sezioni perpendicolari allo sviluppo della lamina. Nel caso dei 100 mm questo comportamento è molto meno marcato mentre in corrispondenza della free end non si hanno perturbazioni derivanti dall'applicazione del carico.

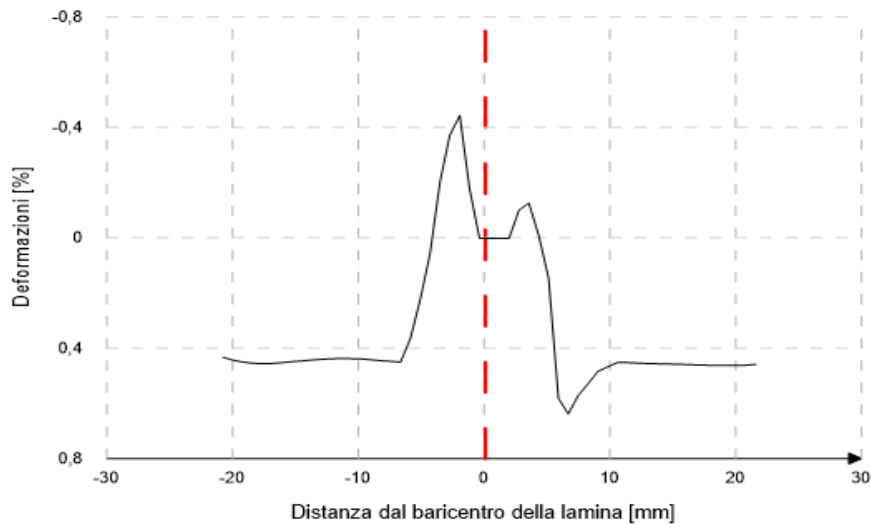


Grafico 8.83 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_C_150_4

Il Grafico 8.83 è errato. Sebbene ai lati dell'ascissa nulla si noti un comportamento costante della curva, in corrispondenza del baricentro della lamina si notano due picchi di deformazioni ai lati di un tratto orizzontale nullo. Ciò è indice del fatto che la lettura dati tramite DIC non ha permesso di ricavare le deformazioni in corrispondenza della lamina di rinforzo.

8.3.5 RIEPILOGO E CONSIDERAZIONI

La modalità di rottura è simile tra tutti i provini testati ed è per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in CFRP e l'adesivo. Questa tipologia di rottura è riconoscibile dal fatto che le lamine presentano, almeno da un lato, la superficie liscia e lucida. Nel caso in esame, la resina si è sempre staccata da ambo i lati del profilo di rinforzo.

Per la misurazione dei dati relativi allo scorrimento della lamina, la tecnica DIC si è dimostrata molto più precisa ed affidabile rispetto all'utilizzo di due estensimetri. Si nota in generale che le curve ottenute tramite DIC sono più rigide rispetto alle altre e ciò può essere dovuto alla sovrastima dei valori derivanti dall'utilizzo degli LVDT. Inoltre, nei campioni 2 e 3 la rilevazione tramite estensimetri è errata. Le cause possono essere molteplici tra cui il mancato parallelismo tra i due misuratori, il non perfetto allineamento in verticale di quest'ultimi e lo spostamento della squadretta di contrasto durante la prova.

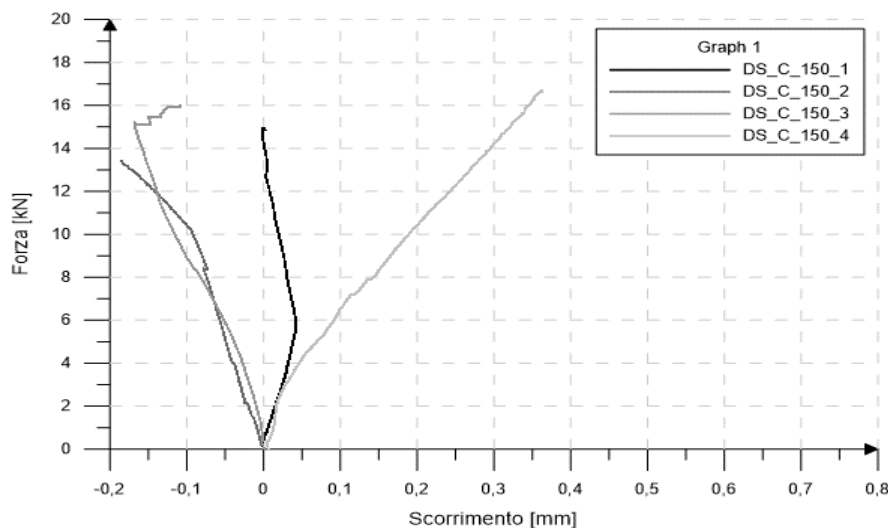


Grafico 8.84 - Relazione F - s ricavata tramite LVDT per i provini del gruppo DS_C_30

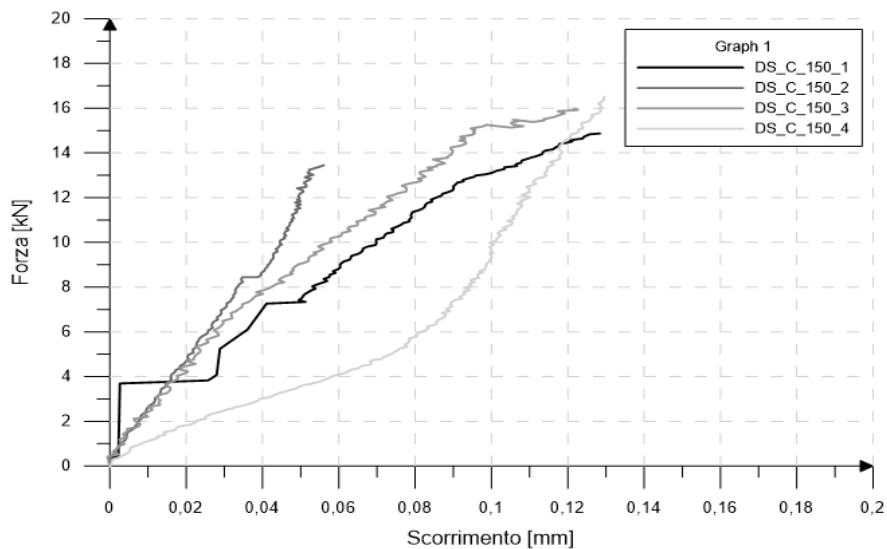


Grafico 8.85 - Relazione $F - s$ ricavata tramite DIC per i provini del gruppo DS_C_150

Dal Grafico 8.85 si nota come i provini numero 1, 2 e 3 siano, al netto dei problemi riscontrati nel primo, contraddistinti dallo stesso andamento. Il numero 4 è caratterizzato da una curva meno pendente rispetto ai precedenti ma è quello in cui si è registrata la forza maggiore.

Di seguito si riporta la tabella contenente i dati riepilogativi relativi delle forze massime registrate e i relativi scorrimenti, delle tensioni tangenziali medie e della modalità di rottura.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{I,LVDT}$ [mm]	$s_{I,DIC}$ [mm]	$\tau_{max,av,CFRP}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]	Modalità di rottura
DS_C_150_1	14,95	0,00012	0,132	2,84	2,27	AD_FRP_A
DS_C_150_2	12,38	-0,111	0,056	2,55	2,04	AD_FRP_A
DS_C_150_3	16,03	-0,109	0,122	3,03	2,43	AD_FRP_A
DS_C_150_4	16,70	0,355	0,132	3,16	2,53	AD_FRP_A
Media	15,02	0,034	0,111	2,90	2,32	
Dev.Stan	10,95	560,30	28,71	7,92	7,99	

Tabella 8.30 - Dati riepilogativi dei provini appartenenti alla serie DS_C_150

La DIC si è rivelata un'ottima tecnica anche per la misurazione degli spostamenti lungo lo sviluppo della lamina. Come si nota dal Grafico 8.86, gli spostamenti

nella regione incollata hanno, in linea di massima, un andamento decrescente all'aumentare della distanza dalla loaded end. Nel caso del campione numero 1, nella regione compresa tra la loaded end e i 50 mm, i dati rilevati sono incongruenti con quanto atteso.

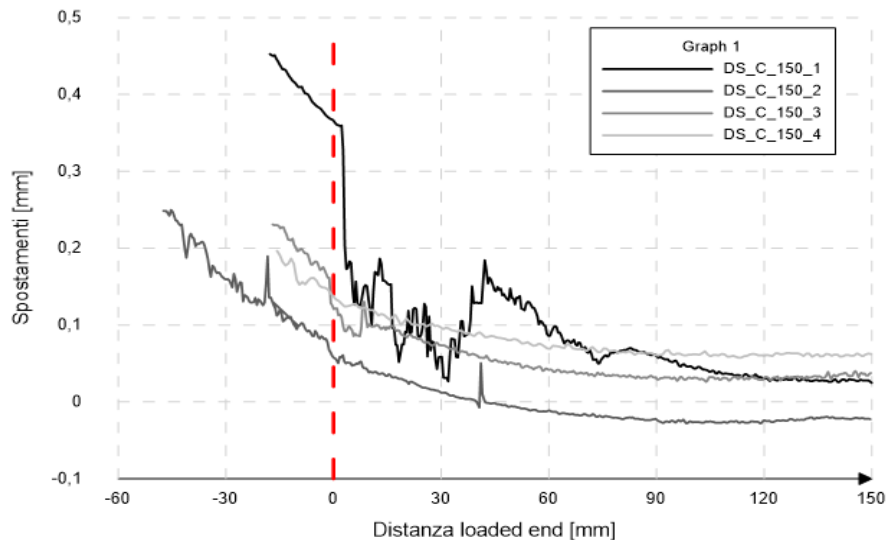


Grafico 8.86 - Distribuzione degli spostamenti lungo le lamine per i provini del gruppo DS_C_150

Se la rilevazione degli spostamenti lungo la lamina si è rivelata parzialmente un successo, altrettanto non si può dire per la misura delle deformazioni. Solamente negli ultimi due provini è stato possibile osservare un comportamento somigliante a quanto atteso a livello teorico; nonostante ciò, sono comunque presenti delle imprecisioni come, ad esempio, l'errato comportamento nella zona scarica dalle tensioni di incollaggio della lamina. Nei primi due campioni, nonostante un picco registrato in prossimità della loaded end, il comportamento è lontano da quello atteso a livello teorico.

La DIC si è rivelata un'ottima tecnica anche per la misurazione degli spostamenti lungo le sezioni perpendicolari allo sviluppo della lamina. Come si nota dal Grafico 8.87, gli spostamenti hanno un andamento parabolico con vertice registrato in corrispondenza del baricentro della lamina. In generale, a circa 3 mm di distanza del baricentro del rinforzo, si assiste ad un cambiamento di

comportamento delle curve che assumono un andamento lineare. Da evidenziare che la curva del provino numero 2 è essenzialmente costante, indice del fatto che i dati ricavati non sono esatti.

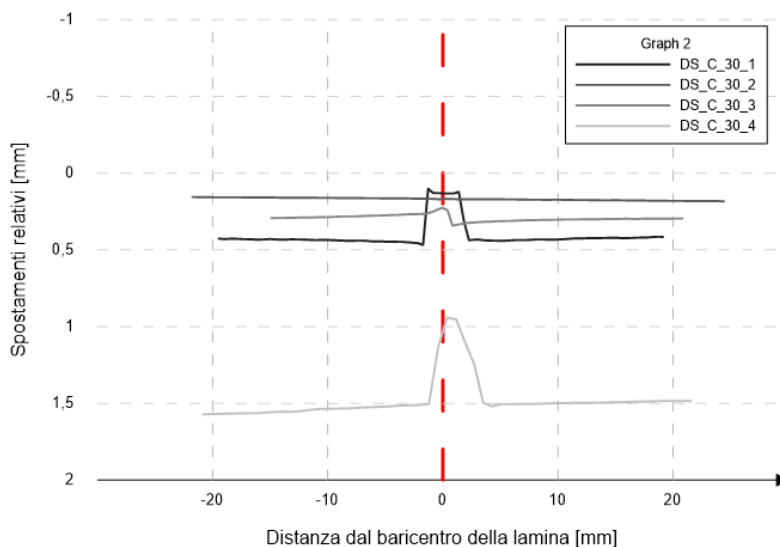


Grafico 8.87 - Distribuzione degli spostamenti, misurati in corrispondenza di F_{max} , lungo le sezioni per i provini del gruppo DS_C_150

Per quanto riguarda le deformazioni, in analogia a quelle registrate lungo lo sviluppo della lamina, sono perlopiù errate. Infatti, nonostante in corrispondenza del baricentro della lamina si assista sempre ad un picco, nelle zone limitrofe si sono registrate deformazioni negative invece di nulle. L'unico provino in cui si riscontra un comportamento coerente con la teoria è il numero 3 che, nonostante la presenza di qualche difetto, è in linea generale corretto.

Capitolo 9

PROGRAMMA SPERIMENTALE CON LAMINE IN ACCIAIO

Con lo scopo di studiare ulteriormente il fenomeno dell'aderenza tra i profili di rinforzo e il legno con la tecnica della Near-Surface Mounted, è stata condotta un'ulteriore campagna di prove sperimentali. Nello specifico, sono state impiegate lamine in acciaio inox che, in linea teorica, sono in grado di aderire meglio alla resina poliuretana rispetto a quelle costituite da fibre di carbonio. Infatti, dai test precedenti è stato possibile giungere alla conclusione che l'adesivo bicomponente poliuretano adoperato non è in grado di legarsi sufficientemente alla matrice epossivinilesterica delle lamine in CFRP.

Analogamente ai campioni appartenenti alle serie precedenti, i provini testati sono composti da un blocco prismatico in legno di larice, di dimensioni 160 · 160 · 300 mm, a cui è stato incollato il rinforzo all'interno di una scanalatura effettuata in posizione baricentrica rispetto al lato del provino. I blocchi lignei sono gli stessi impiegati precedentemente nella serie DS_C_150 del presente elaborato e la lamina di rinforzo in acciaio è stata incollata per una lunghezza di ancoraggio (L_b) pari a 100 mm. Il valore della lunghezza di legame è stato scelto in modo da poter confrontare i dati ottenuti con quelli della serie DS_C_100. Tale lunghezza consente di evitare effetti collaterali indesiderati dovuti alla superficie di incollaggio troppo limitata ma, allo stesso tempo, è sufficiente affinché si sviluppi la completa aderenza tra i diversi materiali.

I profili di rinforzo sono delle lamine in acciaio inox austenitico caratterizzate dalla lunghezza di 400mm, di larghezza 16 mm e di spessore di 2 mm.

I campioni testati sono stati codificati secondo il seguente criterio:

DS_S_100_Y

Dove:

- DS: tipologia di prova eseguita (Direct Shear);
- S: materiale della lamina di rinforzo (Steel = acciaio);
- 100: lunghezza di ancoraggio [mm];
- Y: numerazione dei provini aventi le stesse caratteristiche.

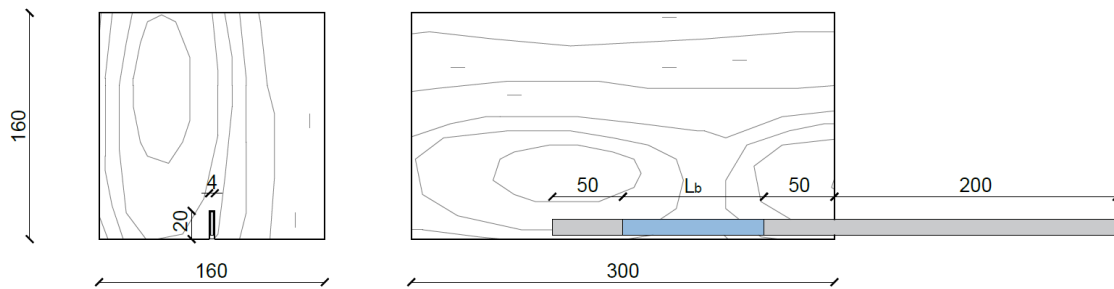


Figura 9.1 - Dimensioni dei provini testati

Poiché la larghezza delle lamine in acciaio è pari a 2 mm, valore superiore rispetto a quelle in carbonio, si è utilizzata nuovamente la DIC con lo scopo di misurare le deformazioni superficiali della lamina, del blocco in legno e del giunto incollato.

Nel proseguo del capitolo non vengono riportate le caratteristiche del legno e dell'adesivo poiché sono le medesime descritte rispettivamente nel paragrafo 7.1.1 e in quello 7.1.2.. Vengono invece riportate quelle delle lamine in acciaio, le modalità di preparazione dei campioni e i risultati ottenuti. Per l'ottenimento di quest'ultimi è stato impiegato lo stesso setup descritto nel capitolo 7.3 e i medesimi file di elaborazione dati riportati nel paragrafo 7.4.

9.1 CARATTERISTICHE DELLE LAMINE IN ACCIAIO

Le lamine in acciaio inox sono caratterizzate dalle dimensioni medie di 400 mm di lunghezza, 16 mm di larghezza e 2 mm di spessore. I profili sono stati ottenuti per taglio a freddo di una lamiera, di conseguenza sono caratterizzati da piccole imperfezioni come, ad esempio, la non perfetta rettilineità. La tipologia di acciaio

inox non è stata specificata dal produttore, per cui è stato necessario ricavarla indirettamente. Vista l'impossibilità di effettuare una caratterizzazione chimica del materiale, è stato testato meccanicamente un profilo avente le stesse dimensioni delle lamine utilizzate per rafforzare in seguito i provini in legno. Dal legame sforzo-deformazione ottenuto, per confronto diretto con l'Eurocodice 3 [57], è stato così possibile caratterizzare il profilo. La prova per la caratterizzazione è stata effettuata mediante l'utilizzo della macchina MTS 810 con cella di carico da 250 kN e i dati di deformazione sono stati ottenuti tramite estensimetro. Di seguito si riportano i dati ottenuti:

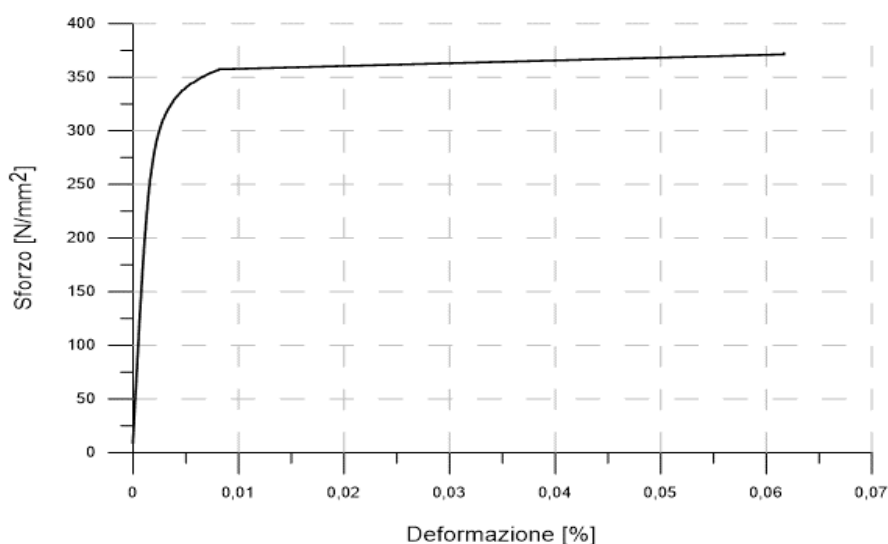


Grafico 9.1 - Relazione sforzo-deformazione della lamina testata meccanicamente

Dal grafico suindicato si nota come la tensione di snervamento sia compresa tra i 300 e i 350 MPa. Utilizzando la tabella 2.1 riportata nella norma EN 1993-1-4 [57] è possibile notare che la categoria dell'acciaio inox è quella degli Austenitici. Oltre alle differenti tipologie, la norma fornisce il valore del modulo elastico da utilizzare per determinare la resistenza degli elementi, nel caso in esame:

$$E = 200000 \quad [N / mm^2]$$

9.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI

In primis, trattandosi di blocchi in legno già testati precedentemente, è stato necessario verificare l'integrità delle sezioni. Accertata quest'ultima, sono stati segnati, sulle superfici dei blocchi, i riferimenti relativi alle prescrizioni geometriche da rispettare. Le regole sono le medesime dei provini rinforzati con lamine in carbonio e prevedono di:

- Interporre una lunghezza di 50 mm tra lo spigolo del blocco e l'inizio della loaded end per evitare una rottura prematura del provino a causa della fessurazione del legno [37];
- Lasciare una lunghezza libera di 50 mm tra la loaded end e il termine della lamina per evitare l'insorgere di fenomeni di delaminazione;
- Far sporgere, all'esterno del blocco, la lamina per una lunghezza di 200 mm per permettere il successivo ancoraggio da parte del morsetto della macchina di prova.

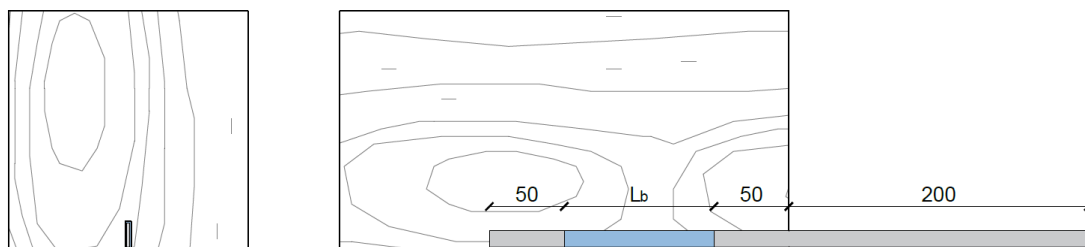


Figura 9.2 - Prescrizioni geometriche

Marcati i riferimenti geometrici da rispettare, è stato applicato del nastro adesivo da imballaggio all'interno della scanalatura al fine di impedire che la colla possa aderire anche alle superfici adiacenti. Tale operazione garantisce che il tratto centrale, di lunghezza pari a L_b , sia l'unico in grado di trasferire le sollecitazioni dalla lamina al legno.

Il passo successivo è stato quello di pulire la superficie delle lamine in acciaio. Per eseguire quest'operazione è stato utilizzato lo stesso prodotto [53] precedentemente adoperato per i profili in carbonio. Infatti, il detergente può

essere adoperato “per pulire e migliorare l’adesione degli adesivi e sigillanti elastici su metalli, plastiche e superfici rivestite”. Nella Figura 9.3 si nota la differenza di brillantezza tra le prime due lamine pulite e le seconde non trattate.



Figura 9.3 - Differenza tra le lamine in acciaio pulite e quelle non trattate

Sono state poi incollate le lamine di rinforzo all’interno delle apposite scanalature. Questa operazione è stata eseguita iniettando, per mezzo di una pistola meccanica, la colla all’interno della fresatura e inserendo poi la lamina all’interno della stessa. Nell’eseguire quest’ultima fase è stata posta particolare attenzione alla posizione della lamina, in modo che fosse ben centrata evitando così l’insorgenza di sforzi parassiti dovuti alla non simmetria. Infine, è stata rimossa la resina in eccesso strabordata per consentire una migliore lettura dei dati tramite DIC.

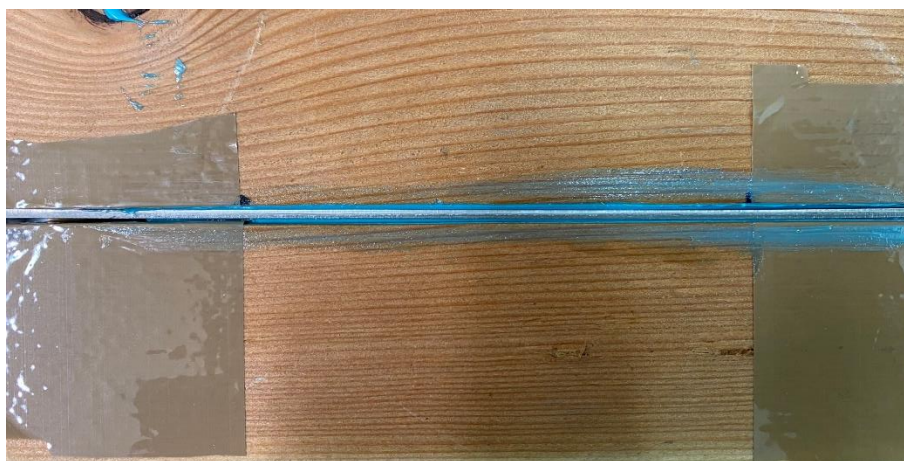


Figura 9.4 - Incollaggio del rinforzo

A questo punto è stato possibile procedere con l'ultima fase preparatoria necessaria poi per lettura dei dati tramite DIC. In primo luogo, è stato rimosso il nastro adesivo e successivamente sono state applicate sulla superficie del campione due mani di vernice bianca per uniformare il colore di base. In seguito, sono stati creati, con l'ausilio di una bomboletta spray, i punti neri necessari a formare lo speckle pattern fondamentale per ricavare gli spostamenti e le deformazioni superficiali del legno.



Figura 9.5 - Provino appartenente alla serie DS_S_100 pronto per essere testato

9.3 RISULTATI OTTENUTI

I profili di rinforzo sono caratterizzati da un modulo elastico E_{steel} pari a 200 GPa e le caratteristiche geometriche, descritte nel capitolo 7.4, sono:

- $A_{\text{steel}} = 32,96 \text{ mm}^2$;
- $L_{\text{lib}} = 50 \text{ mm}$;
- $P_f = 36 \text{ mm}$;
- $P_w = 44 \text{ mm}$;
- $L_b = 100 \text{ mm}$.

Le prove numero 1, 2 e 3 sono state eseguite con una velocità costante pari a 0,05 mm/min mentre la numero 4 è stata condotta con una velocità pari a 0,10 mm/min. Oltre alla misurazione tramite LVDT, è stata utilizzata la DIC con un intervallo di scatto delle fotografie di 12 secondi per il primo provino e di 8 secondi per i successivi. Per l'analisi dati sono stati impostati i parametri di subset e step rispettivamente di 41 e 10. Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva contenente informazioni relative alla velocità della prova, alla sua durata, alla frequenza di scatto e al numero delle fotografie scattare per ciascun provino.

Provino	Velocità prova [mm/min]	Durata prova [min]	Frequenza di scatto [sec]	N° di foto
DS_S_100_1	0,05	14'00''	12	52 ¹²
DS_S_100_2	0,05	14'35''	8	110
DS_S_100_3	0,05	40'00''	8	286
DS_S_100_4	0,10	7'22''	8	57

Tabella 9.1 - Riassunto delle prove relative ai provini appartenenti alla serie DS_S_100

¹² Non complete a causa del blocco del software di acquisizione fotografica

9.3.1 DS_S_100_1

Durante la prima parte della prova, il software di acquisizione fotografica si è bloccato con la conseguente perdita di alcuni dati. Dopo diversi tentativi di riavvio del programma e di settaggio delle impostazioni, è stato possibile procedere con l'acquisizione dei rimanenti dati a partire dal minuto 5. Di conseguenza, nel grafico forza-spostamento tramite DIC si notano degli sbalzi di spostamento. Superata questa fase iniziale, in cui la forza ha raggiunto un valore pari al 19% di quella massima, è stato comunque possibile analizzare i dati relativi agli spostamenti-deformazioni della lamina e delle sezioni perpendicolare ad essa.

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 8,13 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore. Come si può notare dalla Figura 9.6, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in acciaio e la colla. Entrambi i lati della lamina sono rimasti lisci e lucidi e l'adesivo è restato interamente aggrappato all'interno della scanalatura. Non deve trarre in inganno la resina rimasta sul rinforzo poiché non facente parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.

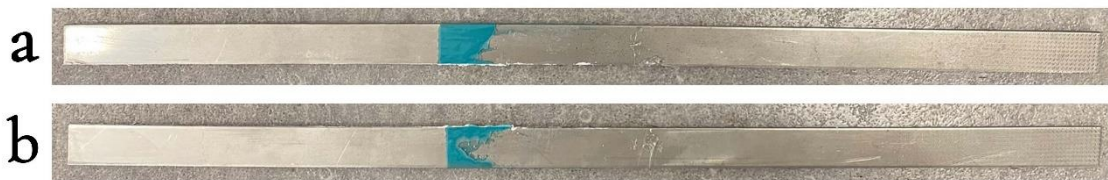


Figura 9.6 - Lamina del provino DS_S_100_1, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

Di seguito sono riportati i grafici che mettono in relazione lo scorrimento verticale subito dal rinforzo in acciaio al carico applicato. Nel primo, è riportata la relazione $F - s$ ottenuta dagli spostamenti misurati tramite gli LVDT, nel secondo la relazione $F - s$ ottenuta mediante DIC e nell'ultimo viene riportato il confronto tra le due metodologie di misurazione. È utile ricordare che gli scorrimenti misurati tramite estensimetri vengono depurati dall'effetto dell'allungamento elastico della lamina, mentre quelli ottenuti tramite DIC sono ottenuti sottraendo i movimenti rigidi del campione.

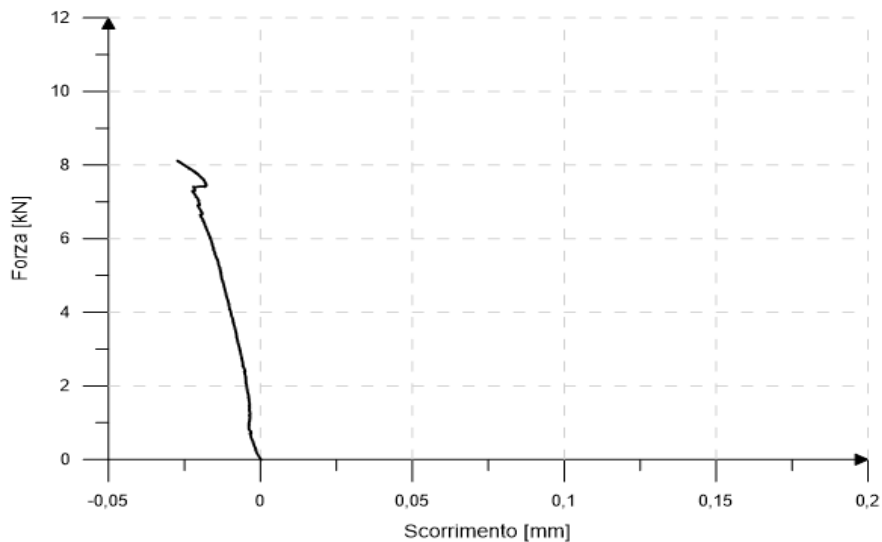


Grafico 9.2 - Relazione $F - s$ per il provino DS_S_100_1, ricavata tramite LVDT

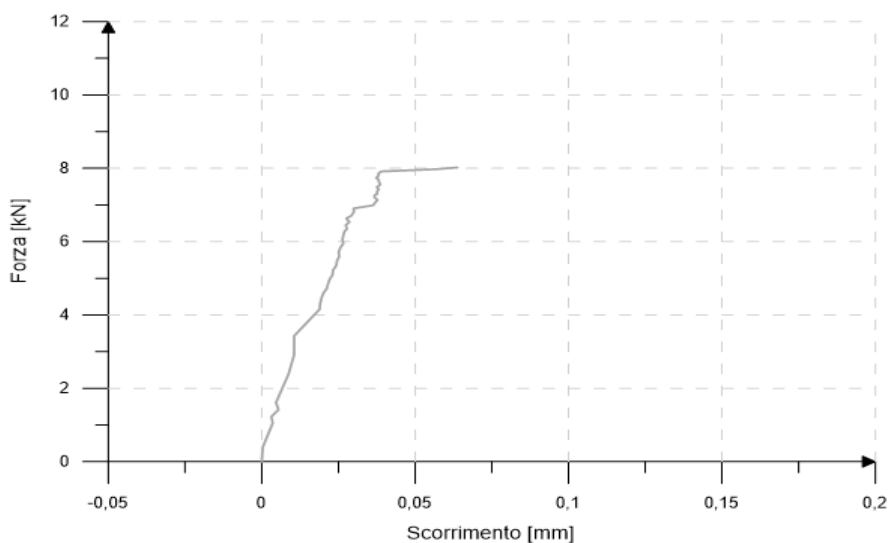


Grafico 9.3 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_100_1, ricavata tramite DIC

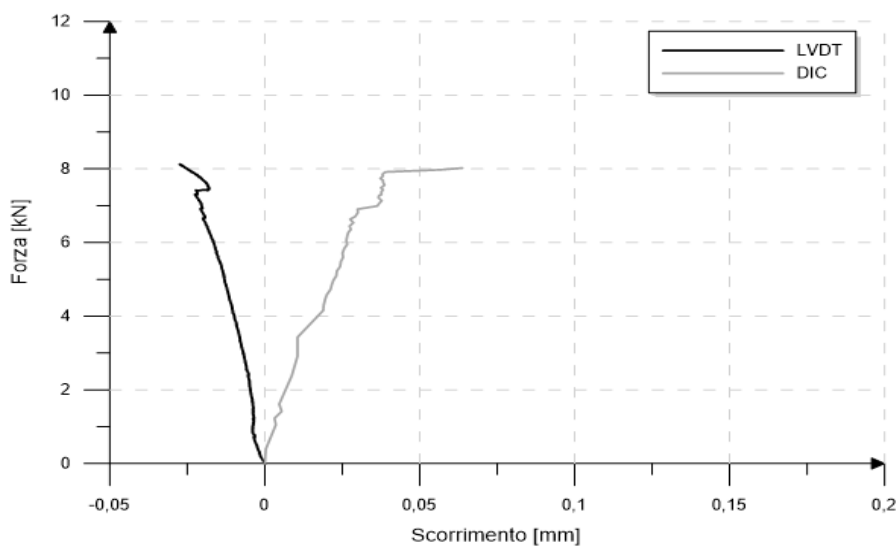


Grafico 9.4 - Relazione $F - s$ per il provino DS_S_100_1, ricavata tramite LVDT e DIC

Dal Figura 9.3 si nota come la curva ricavata con gli estensimetri abbia un andamento crescente ma con valori negativi di spostamento; ciò deriva dal fatto che l'allungamento elastico è maggiore rispetto agli spostamenti rilevati tramite gli LVDT. Per quanto concerne la curva ricavata tramite DIC, invece risulta coerente con quanto atteso, ossia è crescente fino al raggiungimento della rottura del campione.

Provino	F [kN]	s _{I,LVDT} [mm]	s _{I,DIC} [mm]
DS_S_100_1	7,46	-0,021	0,037
	8,13	-0,027	0,064

Tabella 9.2 - Carico alla rottura, carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_S_100_1

FORZE DI LEGAME MEDIE

Le forze di legame medie presenti sulla superficie del legno e del rinforzo sono calcolate mediante le formule riportate nel capitolo 7.4.

Provino	$\tau_{\max,av,steel}$ [MPa]	$\tau_{\max,av,wood}$ [MPa]
DS_S_100_1	2,29	1,84

Tabella 9.3 - Forze di legame medie per il provino DS_S_100_1

COMPORAMENTO LUNGO LA LAMINA

L'utilizzo della DIC ha consentito di ricavare gli spostamenti e le deformazioni lungo lo sviluppo longitudinale della lamina di rinforzo. Nei grafici seguenti è stata assegnata all'ascissa nulla la posizione geometrica della loaded end. Alla sua destra si sviluppa la porzione incollata fino al raggiungimento dei 100 mm, corrispondenti alla lunghezza di ancoraggio definita in partenza.

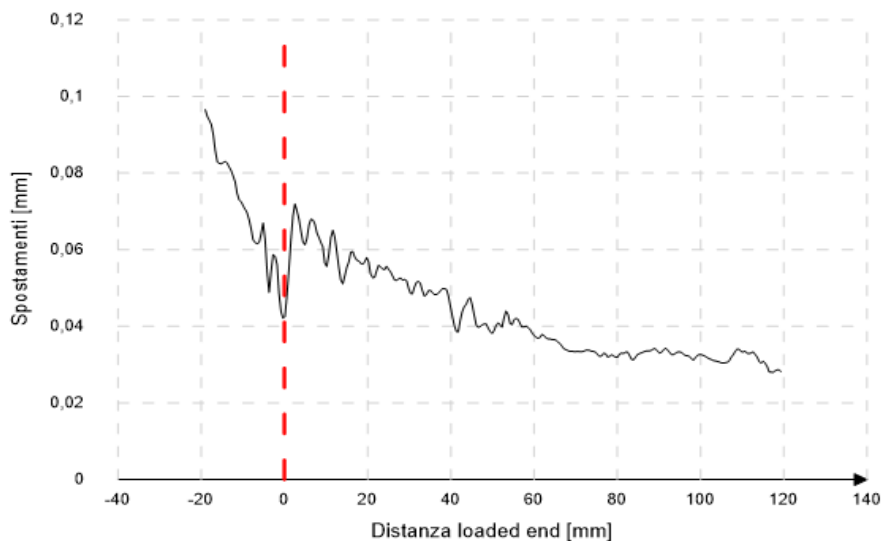


Grafico 9.5 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_S_100_1

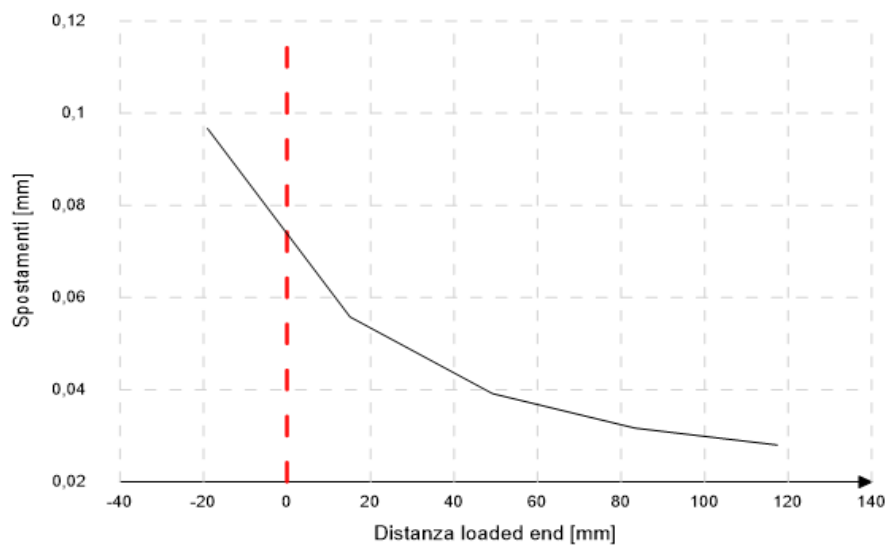


Grafico 9.6 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_S_100_1

La curva ottenuta nel Grafico 9.5 risulta essere in linea generale coerente con quanto atteso a livello teorico. Allontanandosi dalla loaded end, punto di applicazione del carico, si assiste alla riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. Dai grafici è possibile individuare la presenza di due punti principali in cui la curva cambia inclinazione: $X \cong 10$ mm e $X \cong 50$ mm. Derivando gli spostamenti ottenuti, il software di post-processing è in grado di ricavare le deformazioni lungo la lamina.

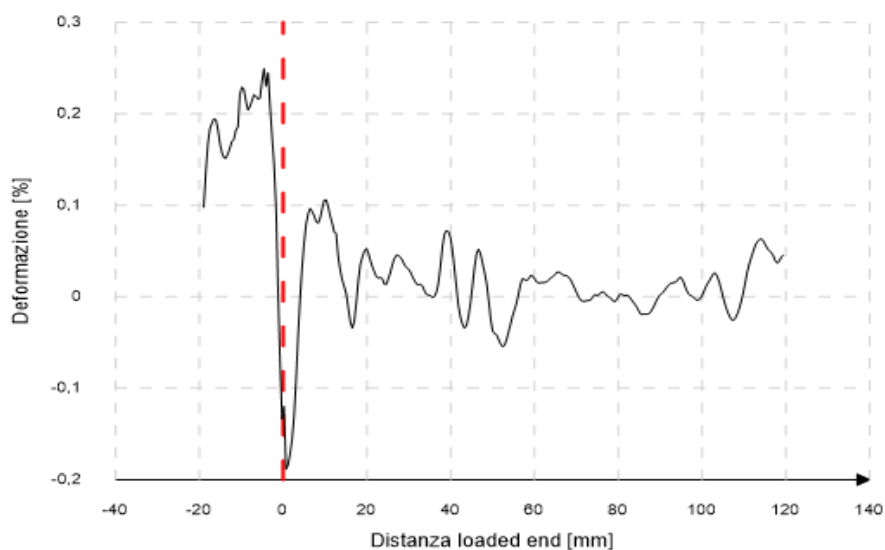


Grafico 9.7 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_S_100_1

Le deformazioni ottenute non sono coerenti con quanto atteso. Alla destra della loaded end la curva ha un trend costante con valori estremamente variabili mentre a sinistra, allontanandosi dall'ascissa nulla, le deformazioni sono decrescenti anziché costanti.

COMPORAMENTO LUNGO LA SEZIONE

Oltre ad ottenere informazioni lungo lo sviluppo della lamina, la DIC consente di ricavare gli spostamenti e le deformazioni lungo sezioni parallele all'asse delle ascisse. Ciò permette di confrontare il comportamento del legno e quello della lamina di rinforzo individuando così l'area di influenza in cui vengono trasmessi gli sforzi. Nei grafici seguenti, individuata come coordinata $X = 0$ la posizione del baricentro della lamina di rinforzo, vengono riportati:

- La distribuzione degli spostamenti relativi lungo la sezione del provino, rilevati nella zona della loaded end per diverse condizioni di carico (20% - 40% - 60% - 80% - 100% di F_{max}). Essi sono calcolati come la differenza tra quelli di due condizioni di carico successive, ovvero analiticamente:

$$s = s_{F_i} - s_{F_{i-1}}$$

Questo passaggio consente di normalizzare i dati, permettendo di individuare quale intervallo di carico causa spostamenti maggiori all'interno del provino

- La distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end (30 mm – 60 mm – 100 mm) nella condizione di carico massimo;
- La distribuzione delle deformazioni lungo la sezione del provino misurate nella zona della loaded end per la condizione di carico massimo.

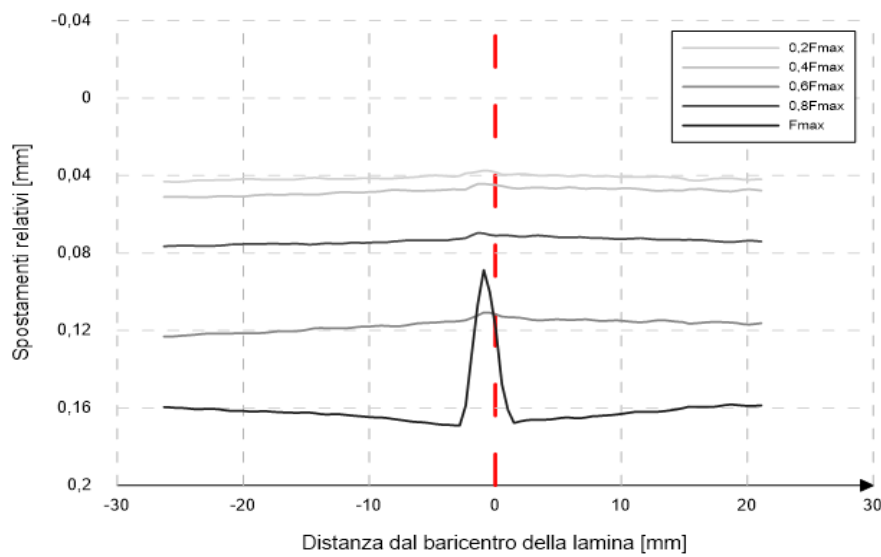


Grafico 9.8 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_S_100_1 al variare dell'intensità della forza

Dalle curve riportate nel Grafico 9.8 si evidenzia come i maggiori spostamenti siano stati registrati per la condizione di carico corrispondente a F_{max} . Nella suddetta condizione si nota un andamento parabolico con vertice collocato in corrispondenza del baricentro della lamina. Per quanto concerne invece le restanti curve, esse sono caratterizzate da un andamento pressoché costante; ciò indica che gli spostamenti sono relativi all'intero provino e non al singolo giunto. Un'ulteriore particolarità deriva dal fatto che gli spostamenti misurati a $0,6F_{max}$ sono maggiori rispetto a quelli di $0,8F_{max}$.

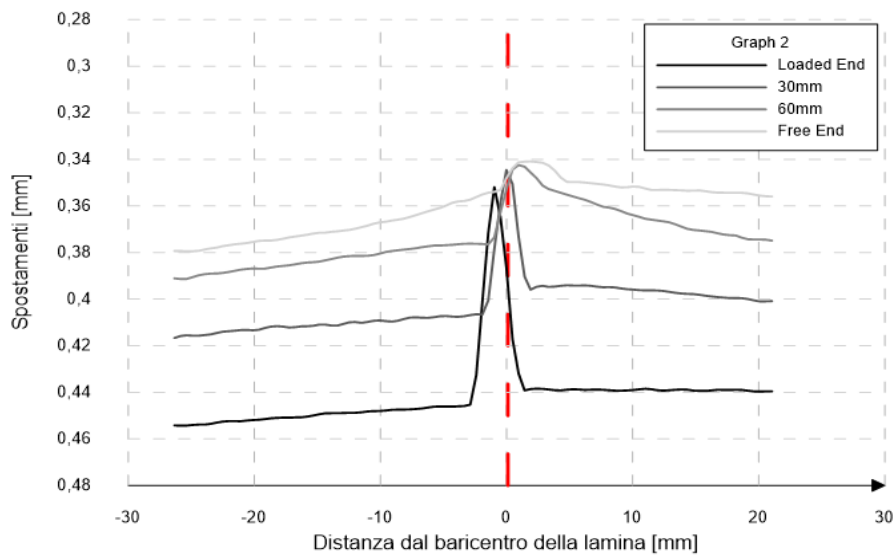


Grafico 9.9 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_S_100_1

Coerentemente con quanto atteso, in tutte le sezioni analizzate si nota un comportamento parabolico con vertice in corrispondenza della mezzeria del profilo di rinforzo. Le sezioni in cui si registrano valori maggiori e minori sono rispettivamente quella relativa alla loaded end e quella in corrispondenza della free end. Derivando gli spostamenti ottenuti, il software di post-processing è stato in grado di ricavare le deformazioni lungo la sezione.

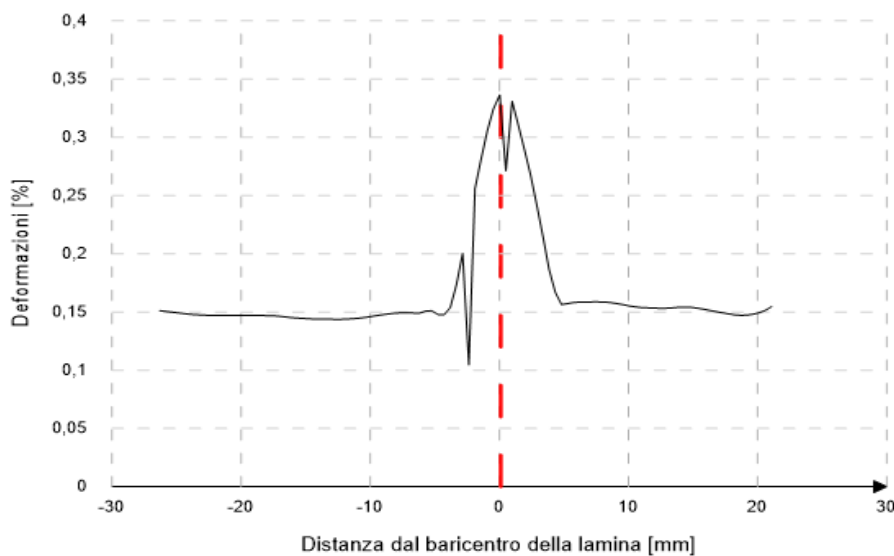


Grafico 9.10 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_S_100_1

La curva ottenuta nel grafico soprastante, al netto di qualche piccola imperfezione, è corretta. In corrispondenza del baricentro della lamina è presente il vertice di una parabola mentre ai suoi lati le deformazioni sono costanti.

9.3.2 DS_S_100_2

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 7,94 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore. Come si può notare dalla Figura 9.7, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in acciaio e la colla. Entrambi i lati della lamina sono rimasti lisci e lucidi e l'adesivo è restato interamente aggrappato all'interno della scanalatura. Non deve trarre in inganno la resina rimasta sul rinforzo poiché non facente parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.

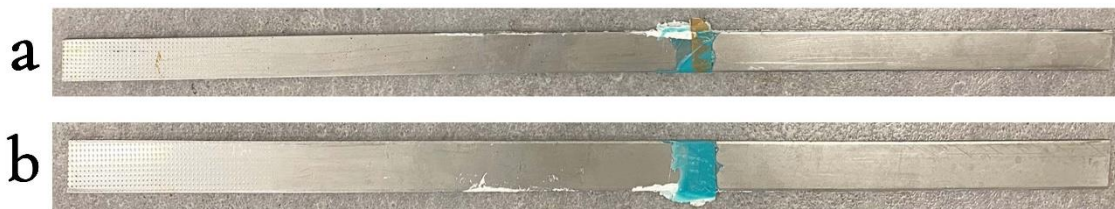


Figura 9.7 - Lamina del provino DS_S_100_2, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

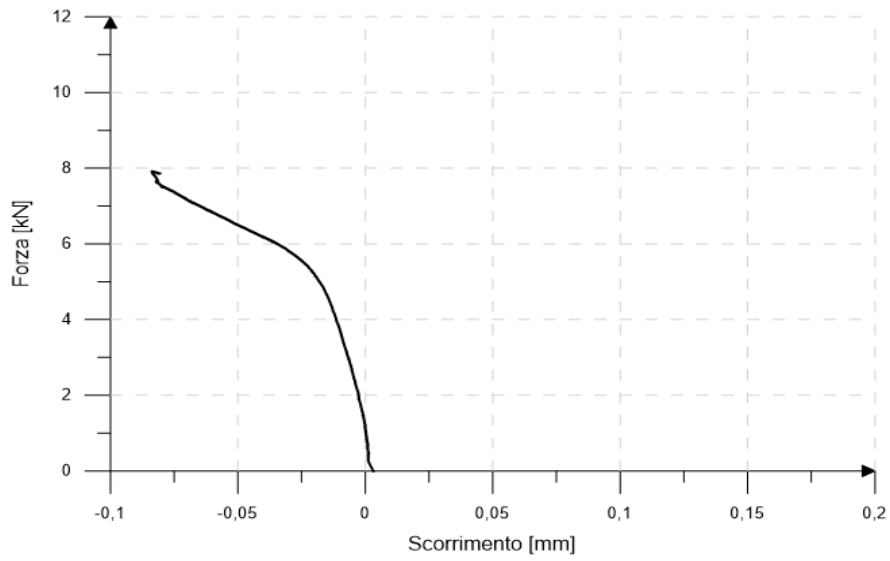


Grafico 9.11 - Relazione F - s per il provino DS_S_100_2, ricavata tramite LVDT

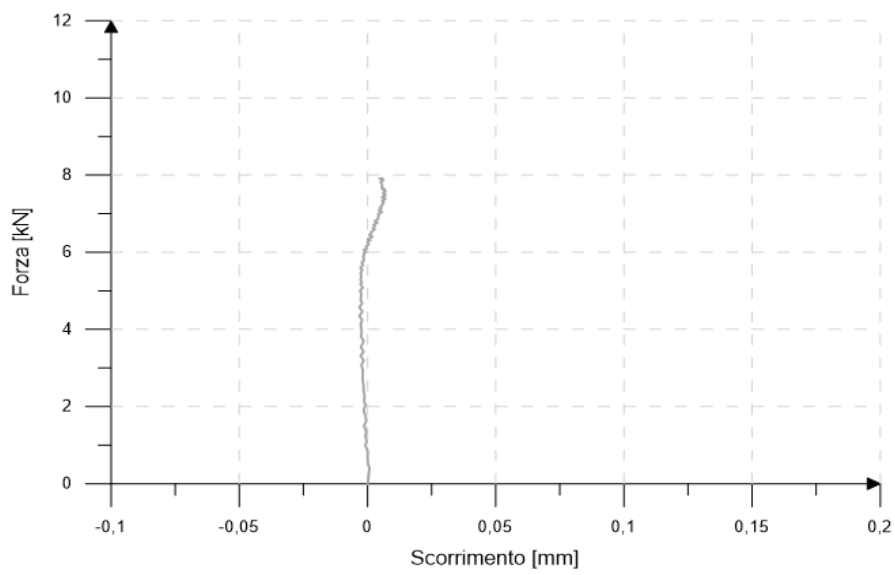


Grafico 9.12 - Relazione F - s per il provino DS_C_100_2, ricavata tramite DIC

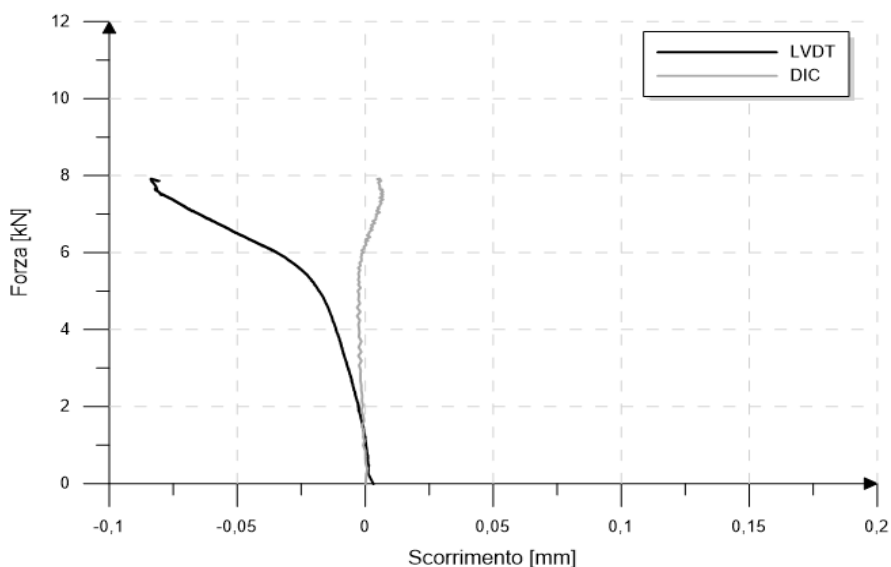


Grafico 9.13 - Relazione $F - s$ per il provino DS_S_100_2, ricavata tramite LVDT e DIC

Analogamente al campione precedente, i dati ottenuti dagli estensimetri presentano delle incongruenze rispetto a quanto atteso. Infatti, dalla curva riportata nel Grafico 9.11 si nota un andamento decrescente con valori di scorrimento negativi. Nella curva ottenuta tramite rilevazione con DIC si nota un'elevata rigidezza; gli spostamenti rimangono pressoché costanti per gran parte della prova. Ricordando che gli scorrimenti in questo caso sono ricavati come la differenza tra quelli della lamina e quelli del legno, si può concludere che per bassi livelli di carico gli spostamenti sono relativi all'intero campione e non al singolo giunto.

Provino	F [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]	$s_{i,DIC}$ [mm]
DS_S_100_2	7,40	-0,076	0,0056
	7,93	-0,083	0,0006

Tabella 9.4 - Carico alla rottura, carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_S_100_2

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{max,av,steel}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_S_100_2	2,20	1,80

Tabella 9.5 - Forze di legame medie per il provino DS_S_100_2

COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

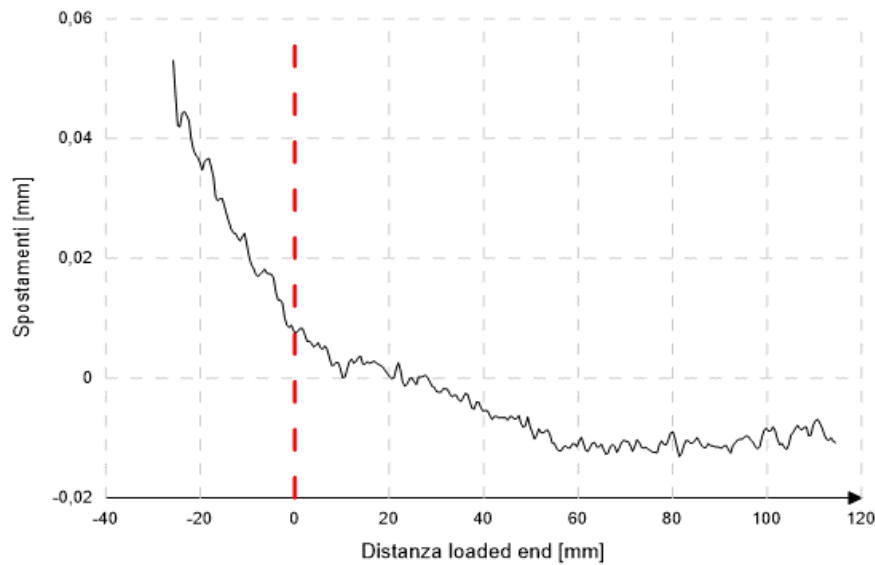


Grafico 9.14 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_S_100_2

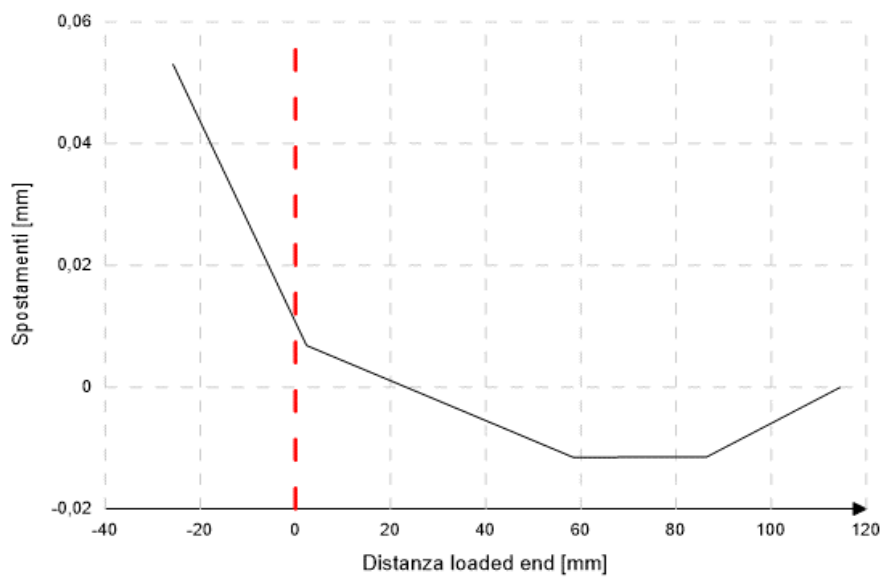


Grafico 9.15 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_S_100_2

La curva ottenuta nel Grafico 9.14 risulta essere in linea generale coerente con quanto atteso a livello teorico. Allontanandosi dalla loaded end, punto di applicazione del carico, si assiste alla riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. Nell'ultimo tratto è presente però un'impresione, ossia gli spostamenti sono crescenti invece che decrescenti. Dai

grafici è possibile individuare la presenza di tre punti in cui la curva cambia inclinazione: $X \cong 0$ mm, $X \cong 60$ mm e $X \cong 90$ mm.

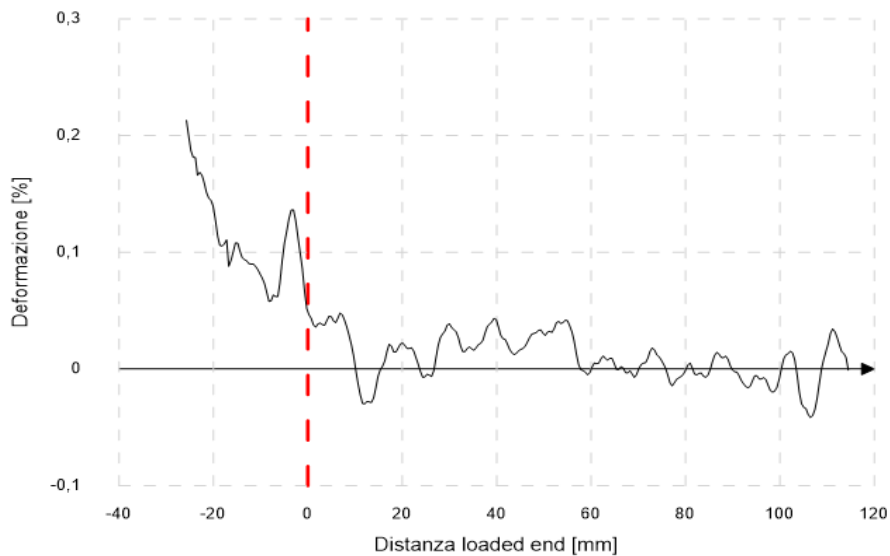


Grafico 9.16 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_S_100_2

La curva del grafico riportato sopra presenta numerose discordanze rispetto a quanto atteso. Nonostante in corrispondenza dell'ascissa nulla sia stato registrato un picco delle deformazioni, nella zona di destra si nota un andamento estremamente variabile delle deformazioni anziché essere decrescenti, mentre nella parte di sinistra, allontanandosi dalla loaded end, esse sono linearmente crescenti anziché costanti.

COMPORAMENTO LUNGO LA SEZIONE.

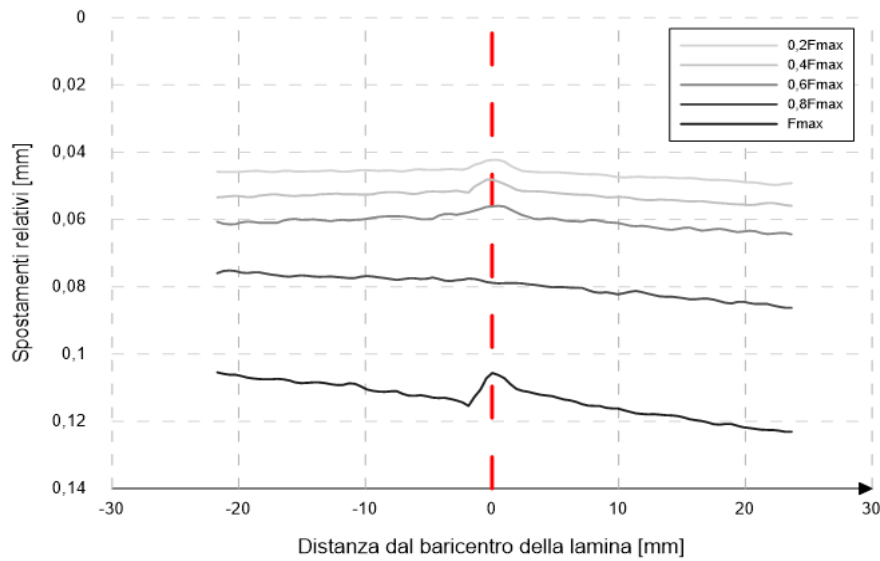


Grafico 9.17 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_S_100_2 al variare dell'intensità della forza

Le curve ottenute Grafico 9.17 sono coerenti con quanto atteso essendo caratterizzate da un andamento parabolico con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina. Le condizioni di carico in cui sono stati registrati gli spostamenti maggiori e minori sono rispettivamente quelle corrispondenti a F_{max} e $0,2F_{max}$.

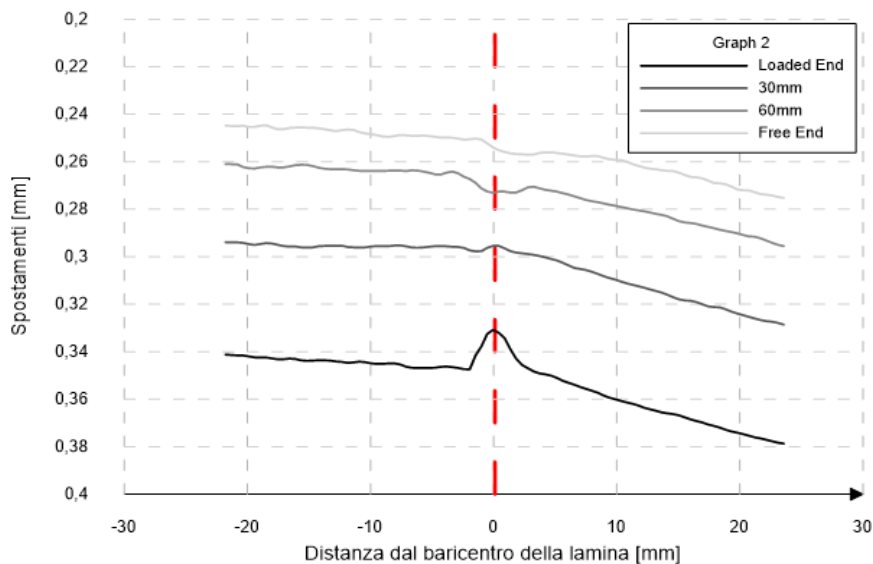


Grafico 9.18 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_S_100_2

Come riportato in precedenza, in corrispondenza della loaded end, la curva assume un andamento parabolico con vertice in corrispondenza della mezzeria del rinforzo. Tale affermazione non è valida però per le restati sezioni, ciò significa che, già alla distanza di 30 mm dalla zona di applicazione del carico, il giunto non risente in maniera particolare degli effetti della forza agente.

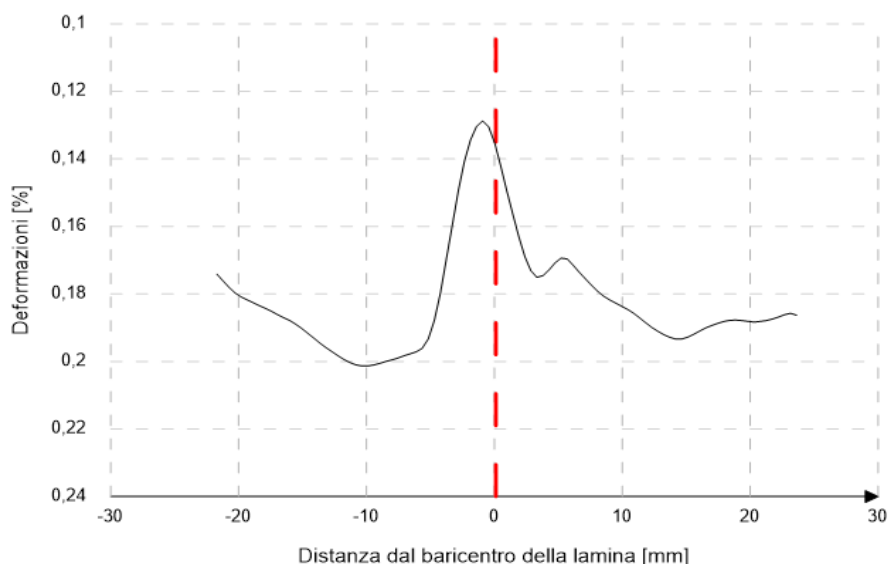


Grafico 9.19 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_S_100_2

La curva riportata nel Grafico 9.19 è parzialmente errata poiché sebbene in corrispondenza del baricentro della lamina siano state registrate deformazioni positive con andamento parabolico, alla sua sinistra e destra esse non sono costanti.

9.3.3 DS_S_100_3

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 11,22 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore. Come si può notare dalla Figura 9.8, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in acciaio e la colla. Entrambi i lati della lamina sono rimasti lisci e lucidi e l'adesivo è restato interamente aggrappato all'interno della scanalatura. Non deve trarre in inganno

la resina rimasta sul rinforzo poiché non facente parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.

MODALITÀ DI ROTTURA

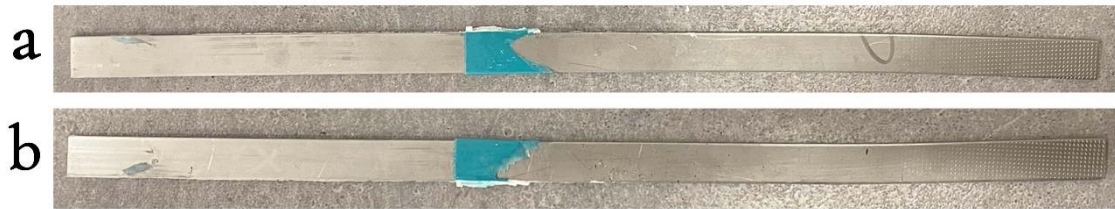


Figura 9.8 - Lamina del provino DS_S_100_3, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

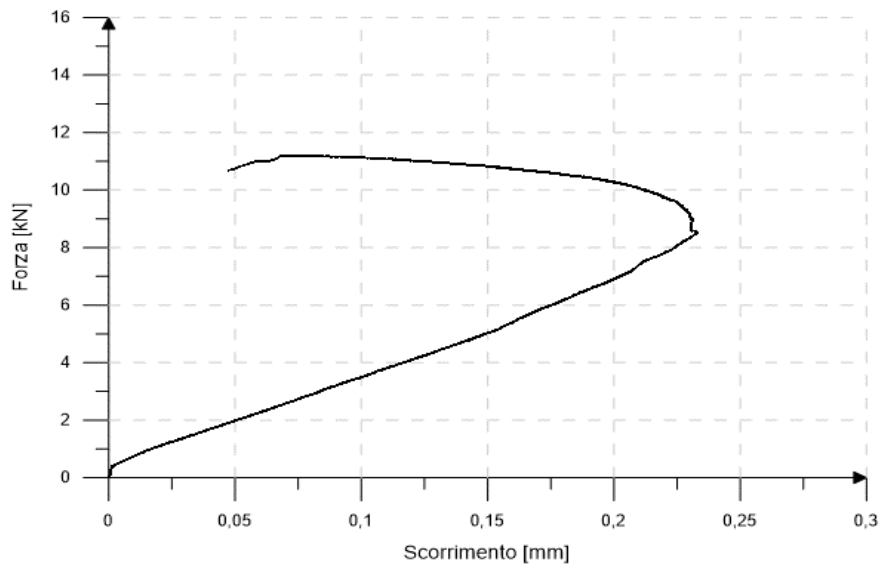


Grafico 9.20 - Relazione F - s per il provino DS_S_100_3, ricavata tramite LVDT

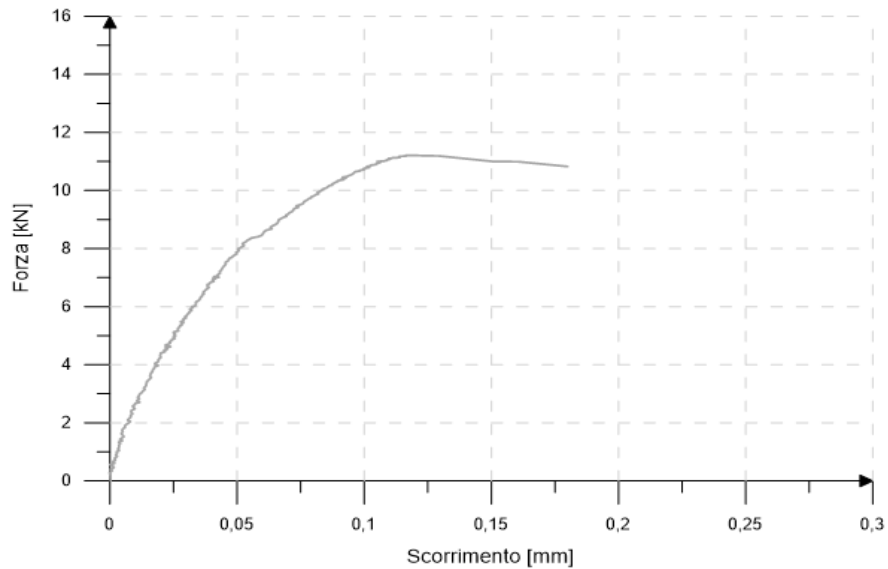


Grafico 9.21 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_100_3, ricavata tramite DIC

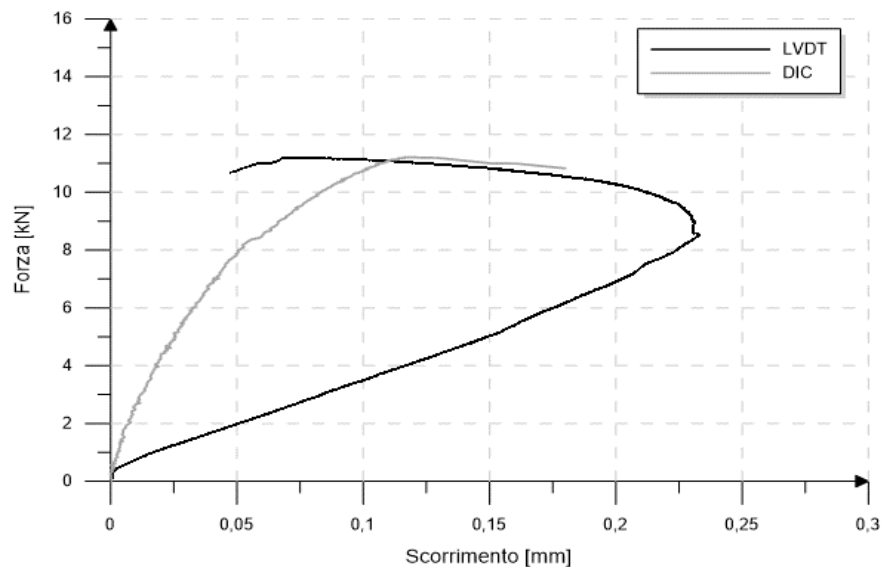


Grafico 9.22 - Relazione $F - s$ per il provino DS_S_100_3, ricavata tramite LVDT e DIC

Dal Grafico 9.20 si nota come la curva ricavata tramite LVDT, dopo un iniziale tratto lineare crescente, cambi andamento fino a giungere alla rottura del campione. Ciò può essere dovuto al cedimento dell'incollaggio della piastra di contrasto a L, alla rotazione della lamina oppure al recupero della deformazione elastica dell'acciaio. Invece, la curva ricavata tramite DIC risulta essere crescente fino al picco di carico per poi essere leggermente discendente fino al raggiungimento della rottura del provino.

Provino	F [kN]	s _{l,LVDT} [mm]	s _{l,DIC} [mm]
DS_S_100_3	10,18	0,04	0,180
	11,20	0,07	0,117

Tabella 9.6 - Carico alla rottura, carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_S_100_3

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{\max,av,steel}$ [MPa]	$\tau_{\max,av,wood}$ [MPa]
DS_S_100_3	2,97	2,43

Tabella 9.7 - Forze di legame medie per il provino DS_S_100_3

COMPORAMENTO LUNGO LA LAMINA

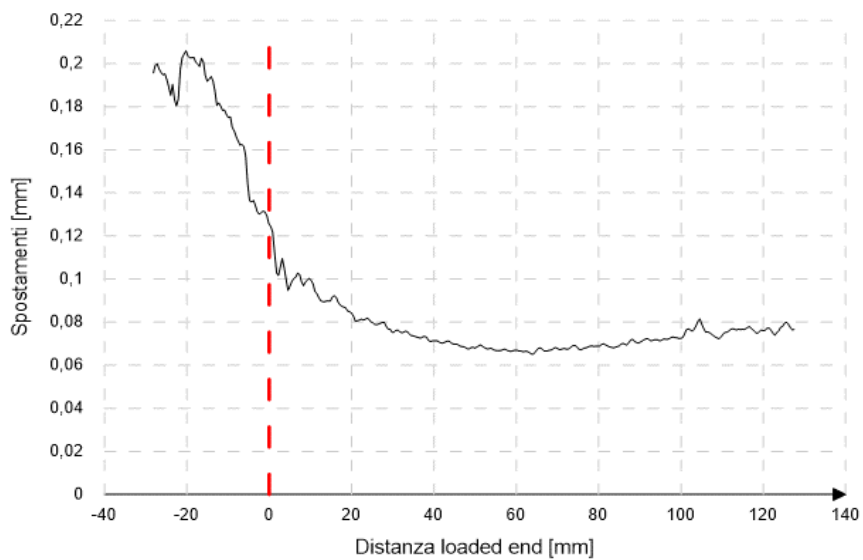


Grafico 9.23 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_S_100_3

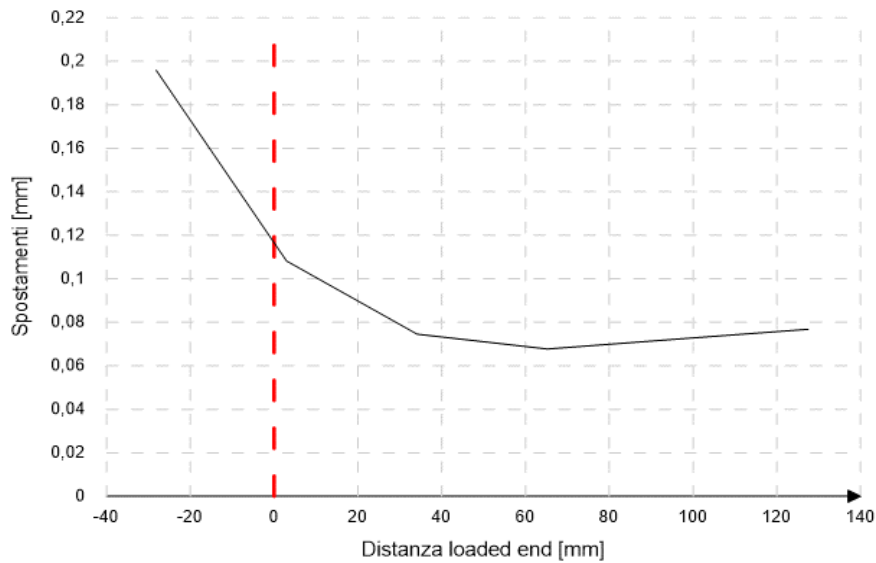


Grafico 9.24 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_S_100_3

La curva ottenuta nel Grafico 9.23 risulta essere in linea generale coerente con quanto atteso. Allontanandosi dalla loaded end, punto di applicazione del carico, si assiste alla riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. Nell'ultimo tratto è presente però un'impresione, ossia gli spostamenti sono crescenti invece che decrescenti. Dai grafici è possibile individuare la presenza di tre punti in cui la curva cambia inclinazione: $X \cong 0$ mm, $X \cong 35$ mm e $X \cong 65$ mm.

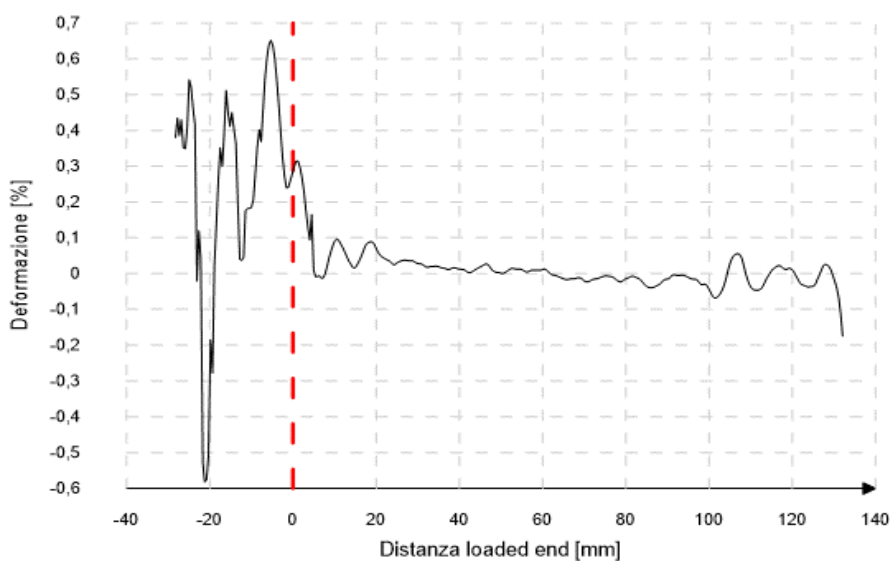


Grafico 9.25 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_S_100_3

La curva ottenuta per derivazione degli spostamenti è errata; infatti, lungo lo sviluppo della lamina le deformazioni sono pressoché costanti anziché decrescenti e nella prima parte, area scarica dalle tensioni di incollaggio, sono stati calcolati valori estremamente variabili anziché costanti.

COMPORAMENTO LUNGO LA SEZIONE

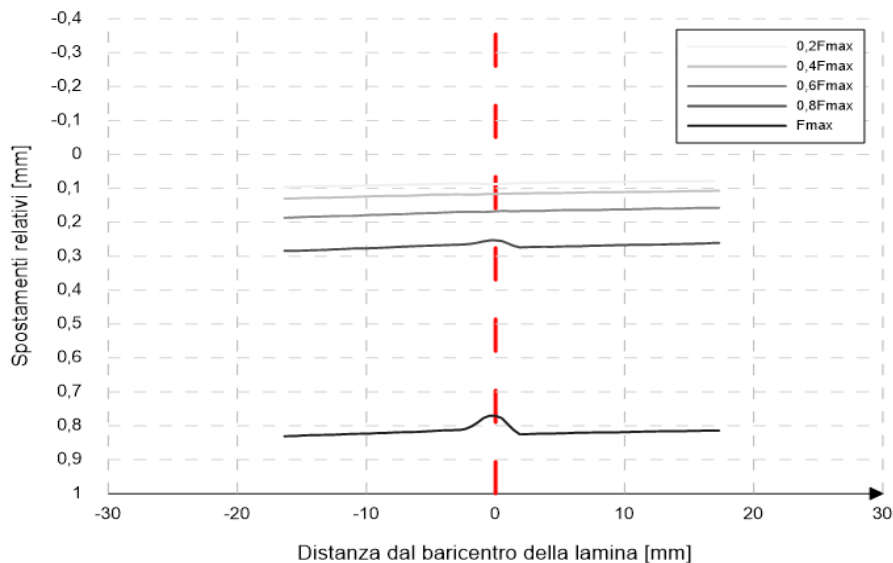


Grafico 9.26 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_S_100_3 al variare dell'intensità della forza

Dalle curve riportate nel Grafico 9.26 si evidenzia come i maggiori spostamenti siano stati registrati per la condizione di carico corrispondente a F_{max} . Nella suddetta condizione si nota un andamento parabolico con vertice collocato in corrispondenza del baricentro della lamina. Per quanto concerne invece le altre curve, esse sono caratterizzate da un andamento pressoché costante; ciò indica che spostamenti sono relativi all'intero provino e non al singolo giunto. La prima differenza di comportamento tra la lamina e le zone circostanti si registra in corrispondenza di $0,8F_{max}$.

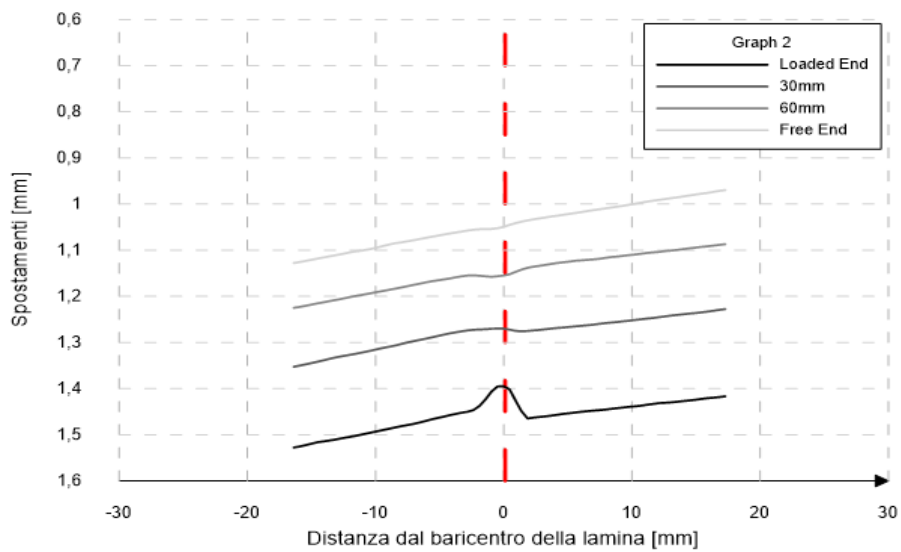


Grafico 9.27 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_S_100_3

Come detto in precedenza, nella sezione relativa alla loaded end si evidenzia un andamento parabolico degli spostamenti con vertice in corrispondenza del baricentro del rinforzo. Tale affermazione non è però valida per le restanti sezioni, segno del fatto che, alla distanza di 30 mm dalla zona di applicazione del carico, il giunto non risente in maniera particolare degli effetti della forza agente.

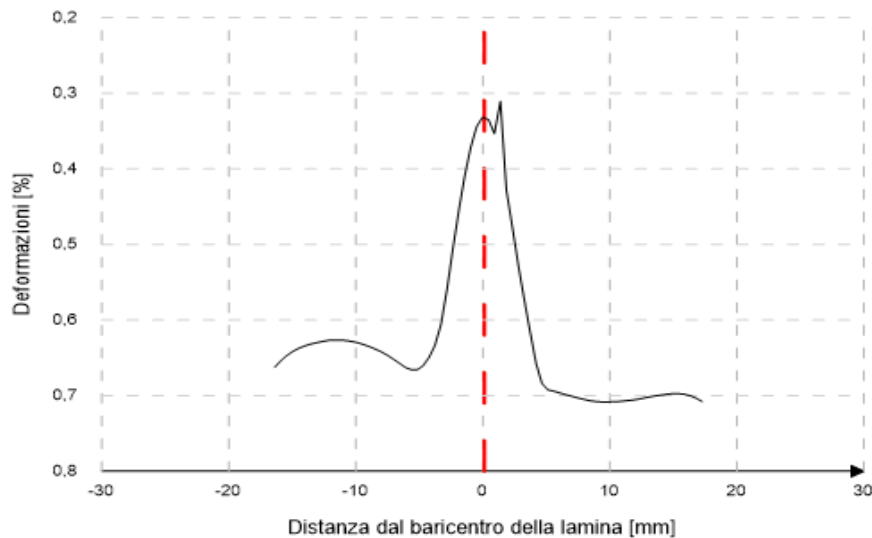


Grafico 9.28 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_S_100_3

La curva delle deformazioni riportata nel Grafico 9.28 è in linea di massima corretta. Si osserva nel tratto centrale, corrispondente al baricentro della lamina,

un picco derivante dalle deformazioni del profilo di rinforzo e alla sua sinistra, dopo un tratto decrescente, la curva assume un andamento pressoché costante. La parte di sinistra è invece imperfetta poiché si evince un andamento crescente e successivamente decrescente.

9.3.4 DS_S_100_4

MODALITÀ DI ROTTURA

Il carico massimo registrato dalla macchina di prova è pari a 7,39 kN e non corrisponde alla rottura del provino. Infatti, subito dopo il picco è seguita una breve fase in cui, nonostante l'aumento dello spostamento, si sono registrate forze di intensità minore. Come si può notare dalla Figura 9.9, la modalità di rottura è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in acciaio e la colla. Entrambi i lati della lamina sono rimasti lisci e lucidi e l'adesivo è restato interamente aggrappato all'interno della scanalatura. Non deve trarre in inganno la resina rimasta sul rinforzo poiché non facente parte della regione incollata bensì di quella successiva, precedentemente protetta dal nastro adesivo.

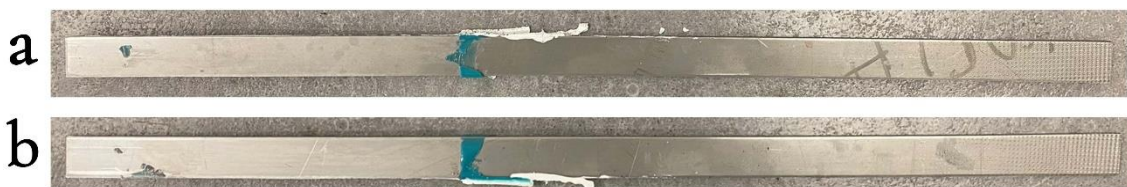


Figura 9.9 - Lamina del provino DS_S_100_4, fronte (a) e retro (b)

CARICO – SCORRIMENTO

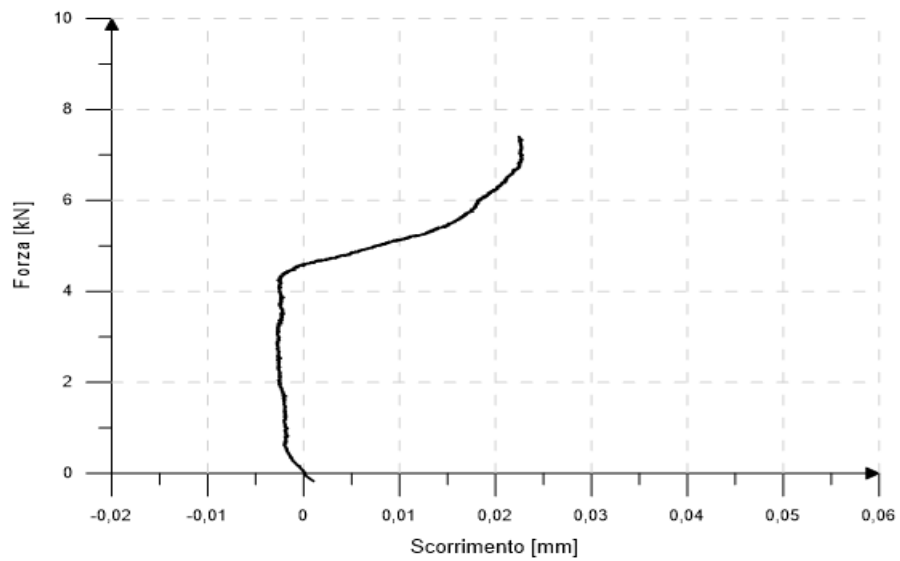


Grafico 9.29 - Relazione $F - s$ per il provino DS_S_100_4, ricavata tramite LVDT

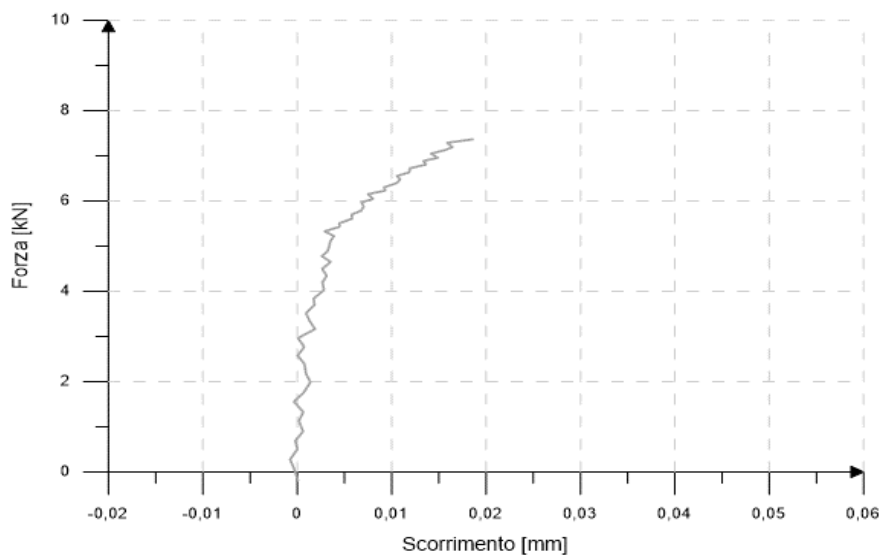


Grafico 9.30 - Relazione $F - s$ per il provino DS_C_100_4, ricavata tramite DIC

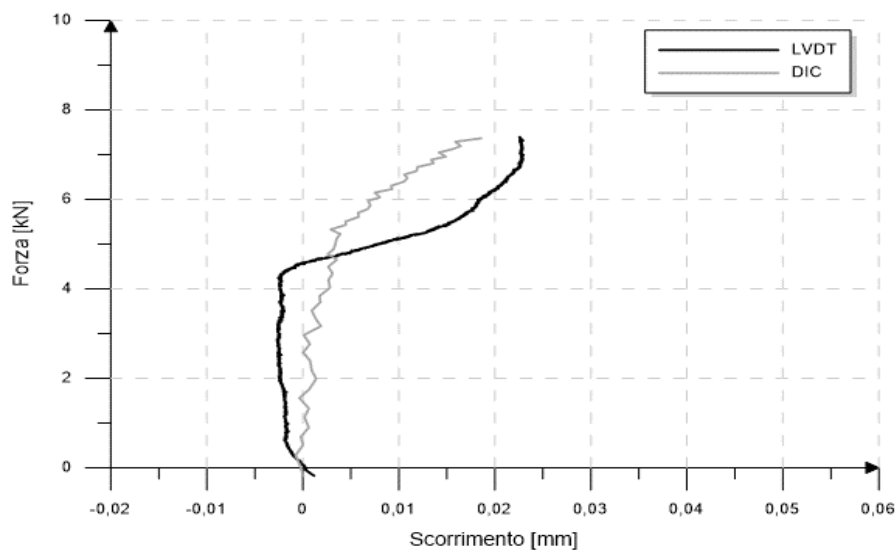


Grafico 9.31 - Relazione $F - s$ per il provino DS_S_100_4, ricavata tramite LVDT e DIC

La curva ottenuta mediante LVDT esibisce un comportamento inizialmente costante per poi essere crescente fino alla rottura del campione. Tale verticalità deriva dal fatto che gli scorrimenti registrati sono pari all'allungamento elastico del profilo di rinforzo. La curva invece ottenuta mediante DIC risulta essere sempre crescente fino al raggiungimento della rottura del provino.

Provino	F_{max} [kN]	$s_{i,LVDT}$ [mm]	$s_{i,DIC}$ [mm]
DS_S_100_4	7,39	0,023	0,019

Tabella 9.8 - Carico massimo e relativi scorrimenti del provino DS_S_100_4

FORZE DI LEGAME MEDIE

Provino	$\tau_{max,av,steel}$ [MPa]	$\tau_{max,av,wood}$ [MPa]
DS_S_100_4	2,05	1,68

Tabella 9.9 - Forze di legame medie per il provino DS_S_100_4

COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

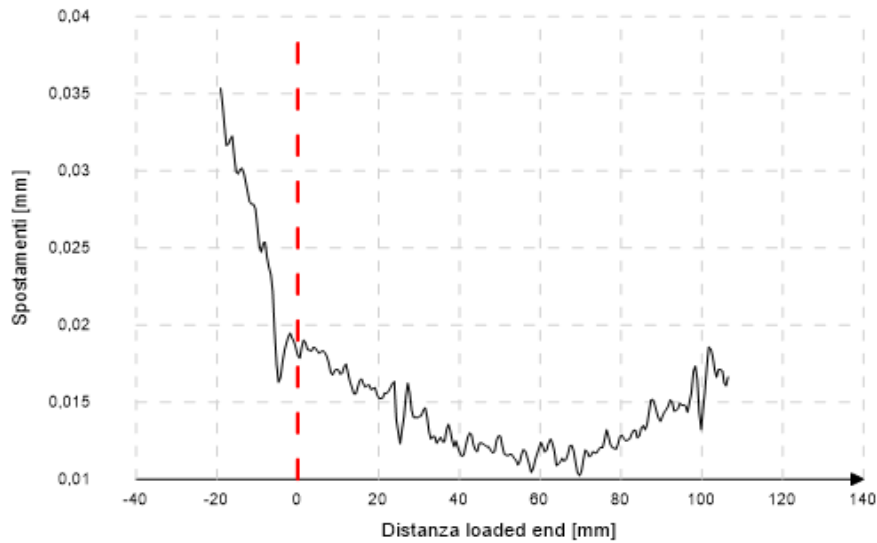


Grafico 9.32 - Distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_S_100_4

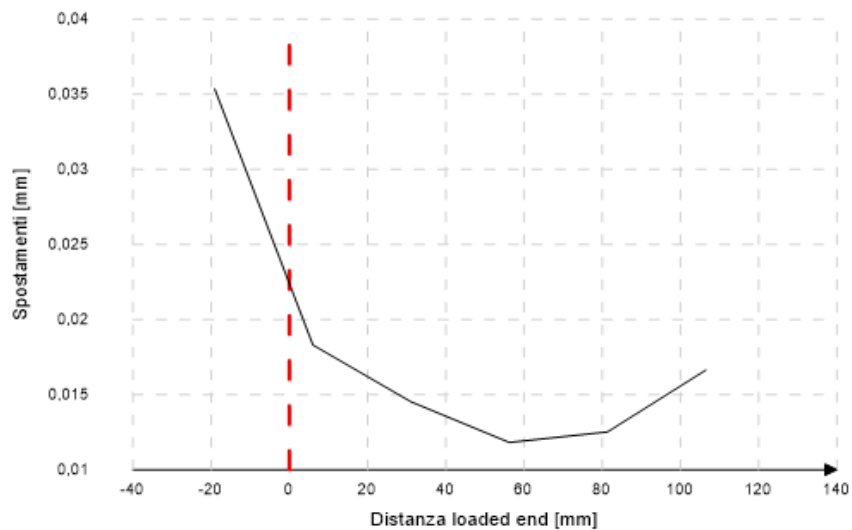


Grafico 9.33 - Semplificazione della distribuzione degli spostamenti lungo la lamina per il provino DS_S_100_4

La curva ottenuta nel Grafico 9.32 risulta essere, nella prima parte, coerente con quanto atteso a livello teorico. Allontanandosi dalla loaded end, punto di applicazione del carico, si assiste alla riduzione delle sollecitazioni agenti e di conseguenza degli spostamenti. Nell'ultimo tratto è però presente un'impresione, ossia gli spostamenti sono crescenti invece che decrescenti. Dai

grafici è possibile individuare la presenza di tre punti in cui la curva cambia inclinazione: $X \cong 5$ mm, $X \cong 55$ mm e $X \cong 80$ mm.

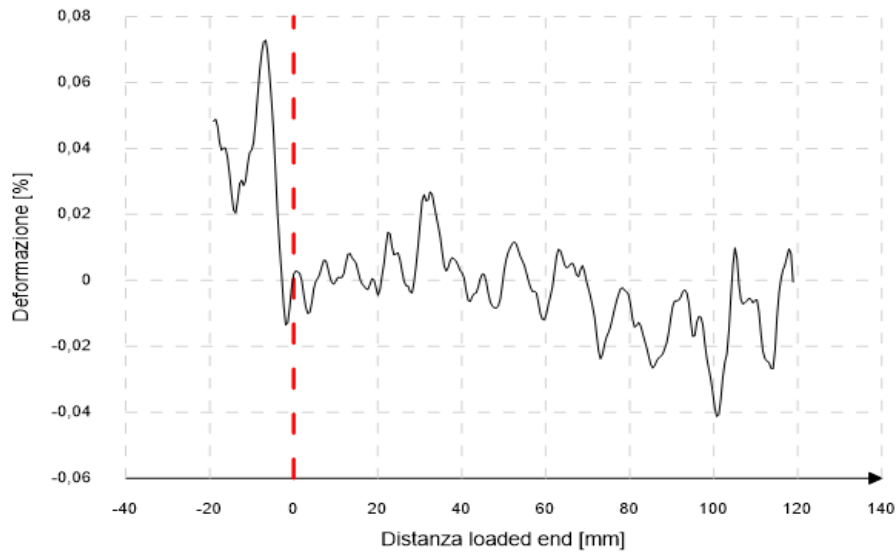


Grafico 9.34 - Distribuzione delle deformazioni lungo la lamina per il provino DS_S_100_4

Le deformazioni ottenute non sono coerenti con quanto atteso. Alla destra della loaded end la curva ha un trend costante con valori estremamente variabili mentre a sinistra, allontanandosi dall'ascissa nulla, le deformazioni sono decrescenti anziché costanti.

COMPORTAMENTO LUNGO LA SEZIONE

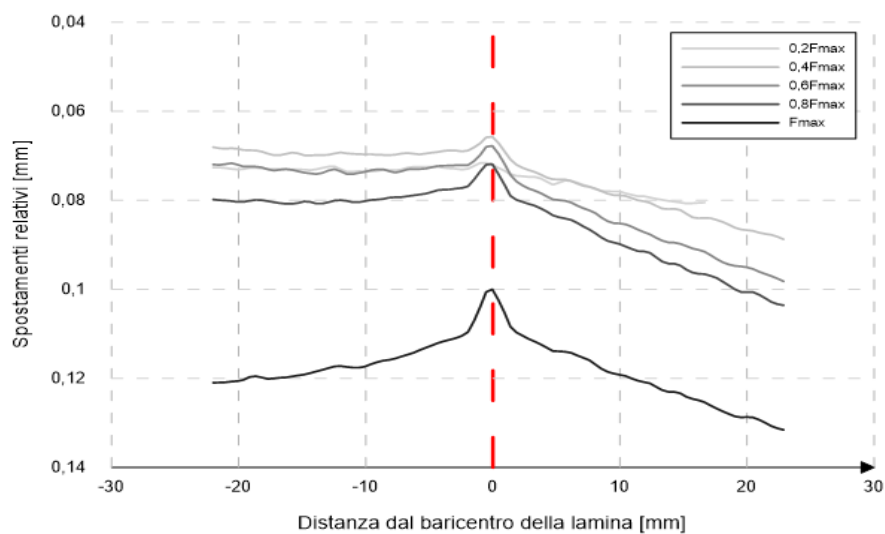


Grafico 9.35 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione per il provino DS_S_100_4 al variare dell'intensità della forza

Le curve ottenute Grafico 9.35 sono coerenti con quanto atteso, essendo caratterizzate da un andamento parabolico con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina. Le condizioni di carico in cui sono stati registrati gli spostamenti maggiori e minori sono rispettivamente quelle corrispondenti a F_{\max} e $0,4F_{\max}$.

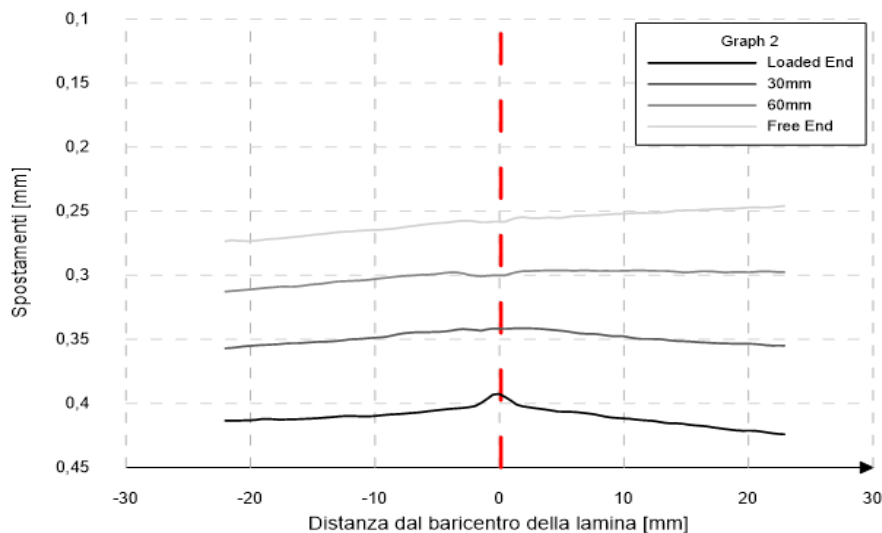


Grafico 9.36 - Distribuzione degli spostamenti lungo la sezione al crescere della distanza dalla loaded end per il provino DS_S_100_4

Come detto in precedenza, in corrispondenza della loaded end la curva assume un andamento parabolico con vertice in corrispondenza della mezzera del rinforzo. Tale affermazione non è valida però per le restati sezioni, ciò significa che, già alla distanza di 30 mm dalla zona di applicazione del carico, il giunto non risente in maniera particolare degli effetti della forza agente.

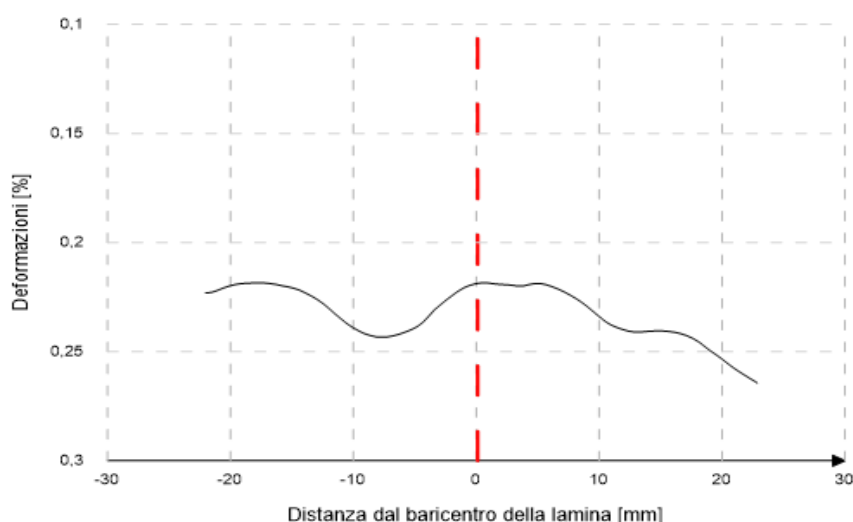


Grafico 9.37 - Distribuzione delle deformazioni lungo la sezione per il provino DS_S_100_4

Le deformazioni calcolate indirettamente nel grafico soprastante sono completamente errate. Infatti, non si nota nemmeno in corrispondenza dell'ascissa nulla un picco della curva dovuto alle deformazioni della lamina.

9.3.5 RIEPILOGO E CONSIDERAZIONI

La modalità di rottura è simile tra tutti i provini testati ed è per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo in acciaio e l'adesivo. Questa tipologia di rottura è riconoscibile dal fatto che le lamine presentano, almeno da un lato, la superficie liscia e lucida. Nel caso in esame, la resina si è sempre staccata da ambo i lati del profilo di rinforzo.

Per la misurazione dei dati relativi allo scorrimento della lamina, la tecnica DIC si è dimostrata molto più precisa ed affidabile rispetto all'utilizzo di due estensimetri. L'utilizzo degli LVDT nella presente prova non ha fornito informazioni soddisfacenti e la causa è da ricercarsi nella scarsa rigidità dei profili di rinforzo.

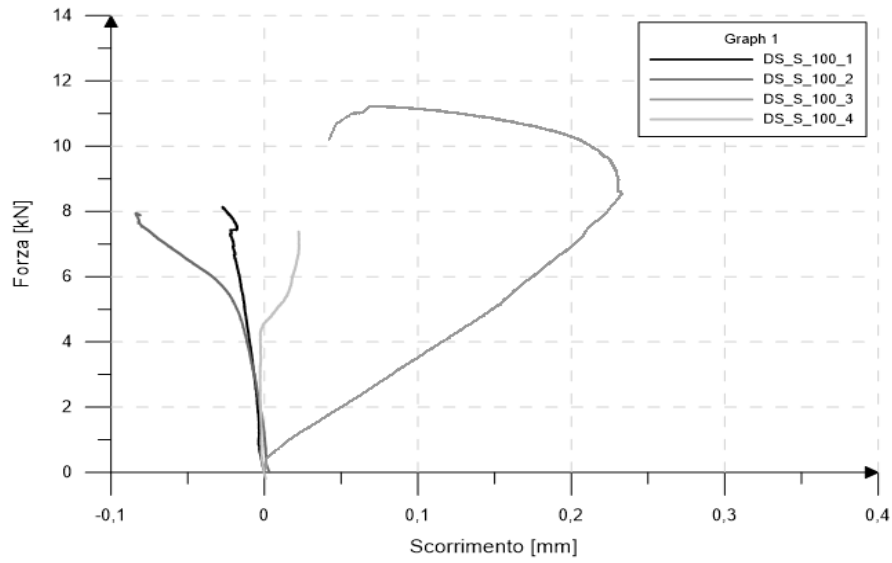


Grafico 9.38 - Relazione $F - s$ ricavata tramite LVDT per i provini del gruppo DS_S_100

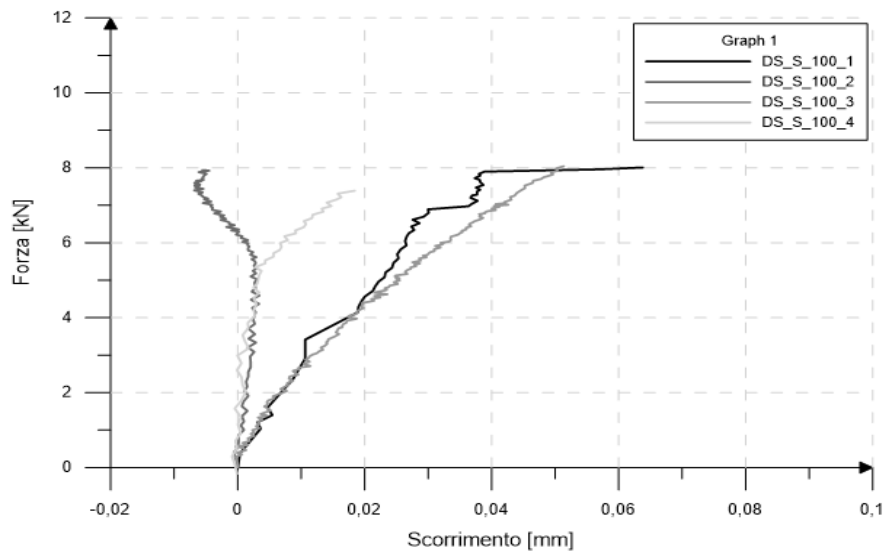


Grafico 9.39 - Relazione $F - s$ ricavata tramite DIC per i provini del gruppo DS_S_100

Di seguito si riportano la tabella contenente i dati riepilogativi relativi delle forze massime registrate e i relativi scorrimenti, delle tensioni tangenziali medie e della modalità di rottura.

Provino	F_{max} [kN]	$S_{I,LVDT}$ [mm]	$S_{I,DIC}$ [mm]	$\tau_{max,av,CFR}$ P [MPa]	$\tau_{max,av,woo}$ d [MPa]	Modalità di rottura
DS_S_100_1	8,13	-0,027	0,064	2,29	1,84	AD_STEEL_A
DS_S_100_2	7,93	-0,083	0,001	2,20	1,80	AD_STEEL_A
DS_S_100_3	11,20	0,070	0,117	2,97	2,43	AD_STEEL_A
DS_S_100_4	7,39	0,023	0,019	2,05	1,68	AD_STEEL_A
Media	8,66	-0,004	0,050	2,38	1,94	
Dev.Stan	17,20	-1340,08	89.65	14,83	14,99	

Tabella 9.10 - Dati riepilogativi dei provini appartenenti alla serie DS_S_100

La DIC si è rivelata un'ottima tecnica anche per la misurazione degli spostamenti lungo lo sviluppo della lamina. Come si può vedere dal Grafico 9.40, gli spostamenti nella regione incollata hanno, in linea di massima, un andamento decrescente all'aumentare della distanza dalla loaded end.

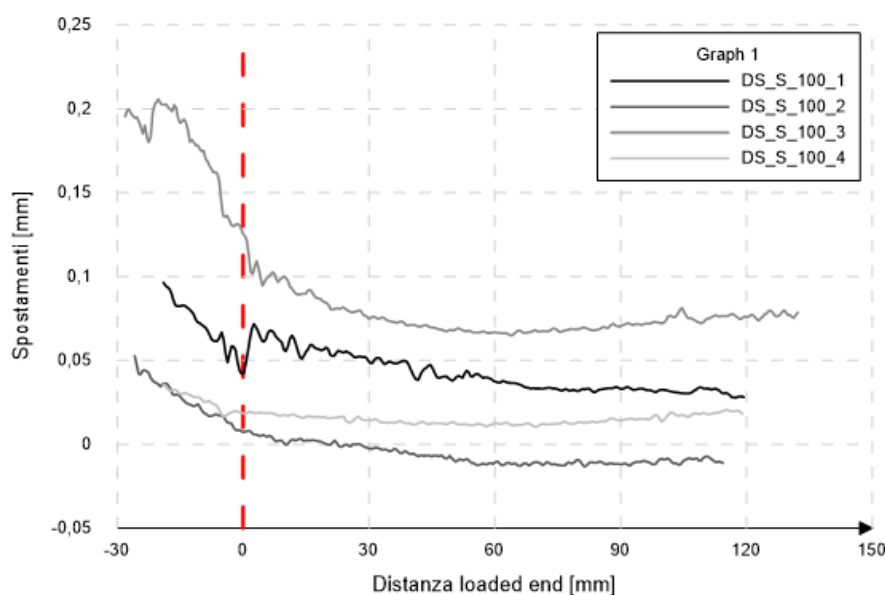


Grafico 9.40 - Distribuzione degli spostamenti lungo le lamine per i provini del gruppo DS_S_100

Se la rilevazione degli spostamenti lungo la lamina si è rivelata parzialmente un successo, non si può dire altrettanto per la misura delle deformazioni. In nessuno dei provini testati è stato possibile osservare un comportamento somigliante a quanto atteso a livello teorico.

La DIC si è rivelata un'ottima tecnica anche per la misurazione degli spostamenti lungo le sezioni perpendicolari allo sviluppo della lamina. In generale, a circa 3 mm di distanza del baricentro del rinforzo, si assiste ad un cambiamento di comportamento delle curve che assumono un andamento lineare. Da notare che provini 1 e 2 sono molto simili tra di loro e presentano un comportamento lineare se confrontati con i numeri 3 e 4. In precedenza, si è visto che anch'essi presentano delle curve caratterizzate da parabole con vertice in corrispondenza del baricentro della lamina ma la scala del grafico annulla visivamente tale comportamento.

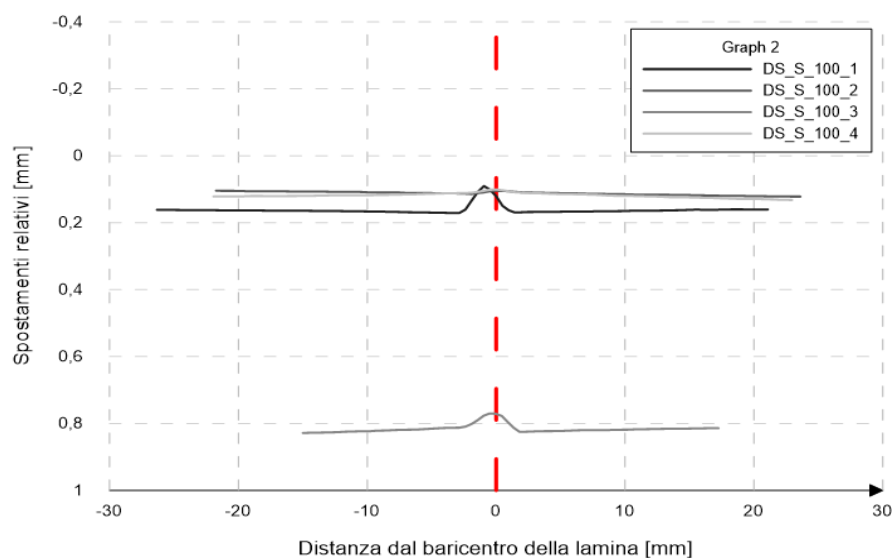


Grafico 9.41 - Distribuzione degli spostamenti, misurati in corrispondenza di F_{max} , lungo le sezioni per i provini del gruppo DS_S_100

Per quanto riguarda le deformazioni lungo le sezioni perpendicolari allo sviluppo del rinforzo, nel provino numero 1 si riscontra un comportamento coerente con la teoria, tale affermazione può essere estesa anche al numero 3 se non si considera la parte a sinistra dell'ascissa nulla. Per quanto concerne i restanti provini, ovvero il numero 2 e il 4, le curve delle deformazioni ottenute sono errate.

Capitolo 10

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La quasi totalità dei provini testati, sia quelli con lamine in CFRP che quelli con profili in acciaio, è giunta a rottura a causa della frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo e il collante. Questa modalità di frattura è di tipo fragile ed è dovuta alla perdita di adesione tra la lamina e la colla. Nei campioni aventi lunghezza di ancoraggio pari a 30 mm l'adesivo poliuretano è rimasto aggrappato almeno ad un lato della lamina di rinforzo, mentre in quelli incollati per lunghezze maggiori si è sempre verificato il distacco della resina da entrambi i lati del rinforzo, sia per il carbonio che per l'acciaio. Solamente in un caso è stata riscontrata una rottura di tipo misto; nella fattispecie si parla del campione DS_C_30_2, nel quale sono ceduti contemporaneamente l'adesivo e parte della superficie del legno.

Confrontando i risultati ottenuti per le quattro serie di provini si nota come all'aumentare della lunghezza di ancoraggio cresce il carico che il giunto è in grado di sopportare, fino a raggiungere la lunghezza effettiva. I provini appartenenti alla serie DS_C_30 hanno resistito ad una forza massima media di 9,23 kN, quelli della DS_C_100 a 15,51 kN mentre i campioni della DS_C_150 a 15,02 kN. L'aumento della lunghezza di ancoraggio da 30 mm a 100 mm ha consentito di incrementare la resistenza del 68% mentre il passaggio a 150 mm non ha portato a significativi benefici. Una tra le possibili cause di questo comportamento può essere ricercata nel fatto che le lamine appartenenti al terzo set non sono state precedentemente carteggiate; oppure, un'altra motivazione potrebbe essere il raggiungimento della lunghezza effettiva, soglia oltre la quale non si hanno benefici derivanti dall'aumento dell'area incollata. La forza minore è stata registrata per il campione DS_C_30_3 pari a 7,48 kN mentre quella maggiore è 17,53 kN misurata per il DS_C_100_3. I provini caratterizzati da

lamine in acciaio hanno resistito ad una forza massima media di 8,66 kN, ossia il 56% rispetto a quelli rinforzati con profili in CFRP aventi pari lunghezza di incollaggio. I valori massimo e minimo della forza applicata ai provini della serie DS_S_100 sono rispettivamente 11,20 kN (3) e 7,39 (4). Di seguito si riporta il grafico che mette in relazione il carico massimo registrato per i singoli provini in funzione della loro lunghezza di legame.

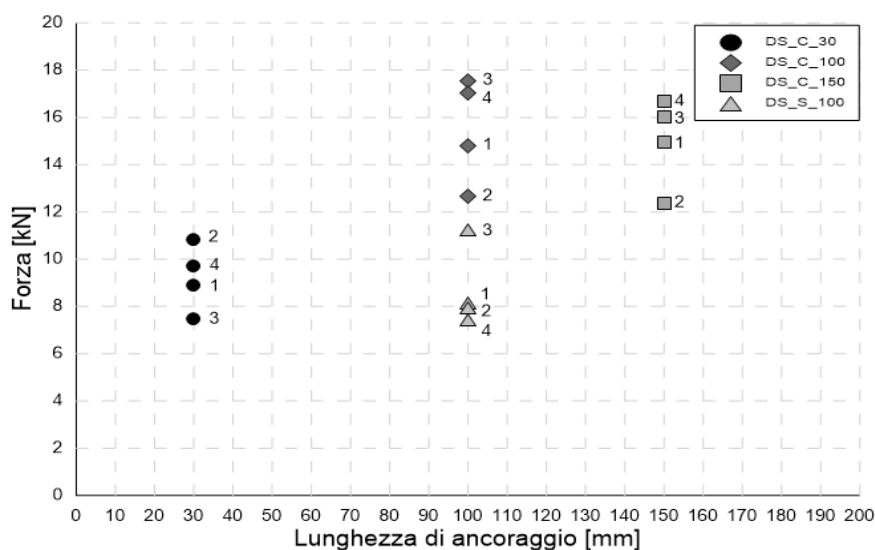


Grafico 10.1 - Relazione $F_{max} - l_b$ per tutti i provini testati

Per quanto concerne gli scorrimenti dei giunti, si riportano di seguito i dati ottenuti con la DIC, esclusi i campioni della serie DS_S_100, in cui non è stato utilizzato tale metodo di misura. Gli spostamenti registrati per i provini appartenenti alla serie DS_S_30 sono paragonabili a quelli ottenuti nella DS_S_150 e sono rispettivamente in media 0,09 mm e 0,11 mm. I dati invece relativi alla serie DS_S_100, ricavati tramite LVDT, mostrano uno scorrimento medio pari a 0,168 mm, valori superiori rispetto ai set precedenti. Gli spostamenti relativi ai campioni rinforzati con lamine in acciaio sono in media inferiori rispetto a tutti gli altri poiché in grado di resistere ad un carico inferiore; in particolare, i valori registrati sono in media di 0,050 mm. Di seguito si riporta il grafico che mette in relazione lo scorrimento massimo per i singoli provini in

funzione della lunghezza di legame, ad esclusione del provino DS_S_100_1 in cui sono stati registrati dati inesatti.

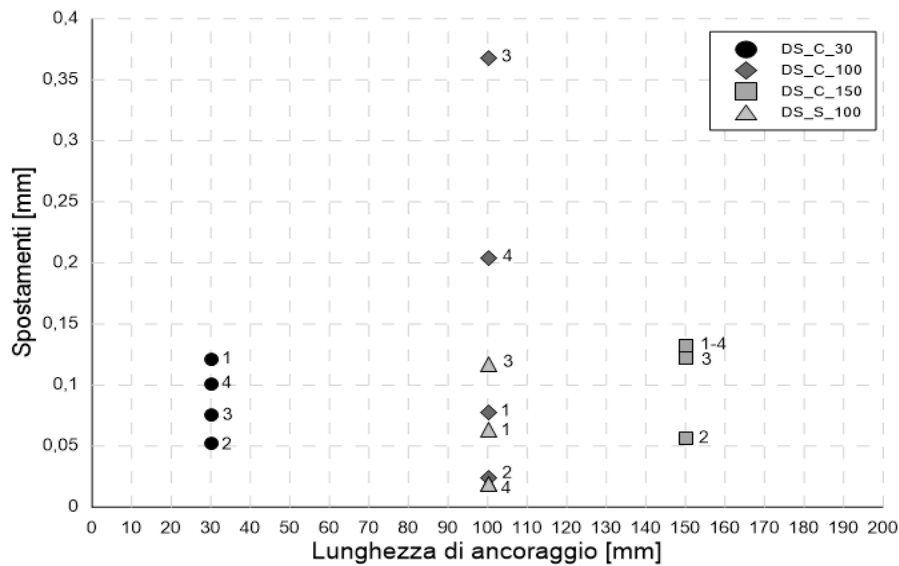


Figura 10.1 - Relazione $s - l_b$ per tutti i provini testati

In generale si osserva che, all'aumentare dell'intensità della forza applicata, crescono di conseguenza gli spostamenti; fanno eccezione i provini DS_C_100_1, DS_C_100_2 e DS_C_150_2. Di seguito si riporta il grafico che mette in relazione la forza massima e il relativo spostamento di ciascun campione.

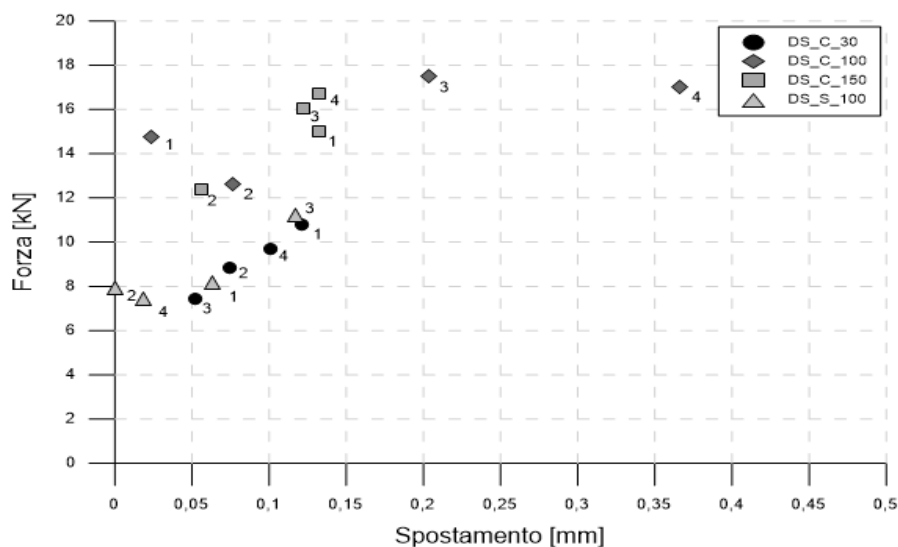


Figura 10.2 - Relazione $F_{max} - s$ per tutti i provini testati

Confrontando i risultati riportati nel Grafico 10.2 (sono esclusi i provini DS_C_100_1 e DS_S_100_2 dato che sono caratterizzati da una curva inesatta), si nota come la maggior parte dei provini abbia lo stesso comportamento nel tratto iniziale poiché caratterizzati da curve aventi la stessa inclinazione. Tra tutti i campioni riportati, spicca il DS_C_100_4 in quanto contraddistinto dallo spostamento maggiore pari a 0,367 mm; inoltre, esibisce una curva differente dai restanti poiché, dopo un iniziale parte crescente, presenta un tratto orizzontale a cui segue nuovamente una parte crescente.

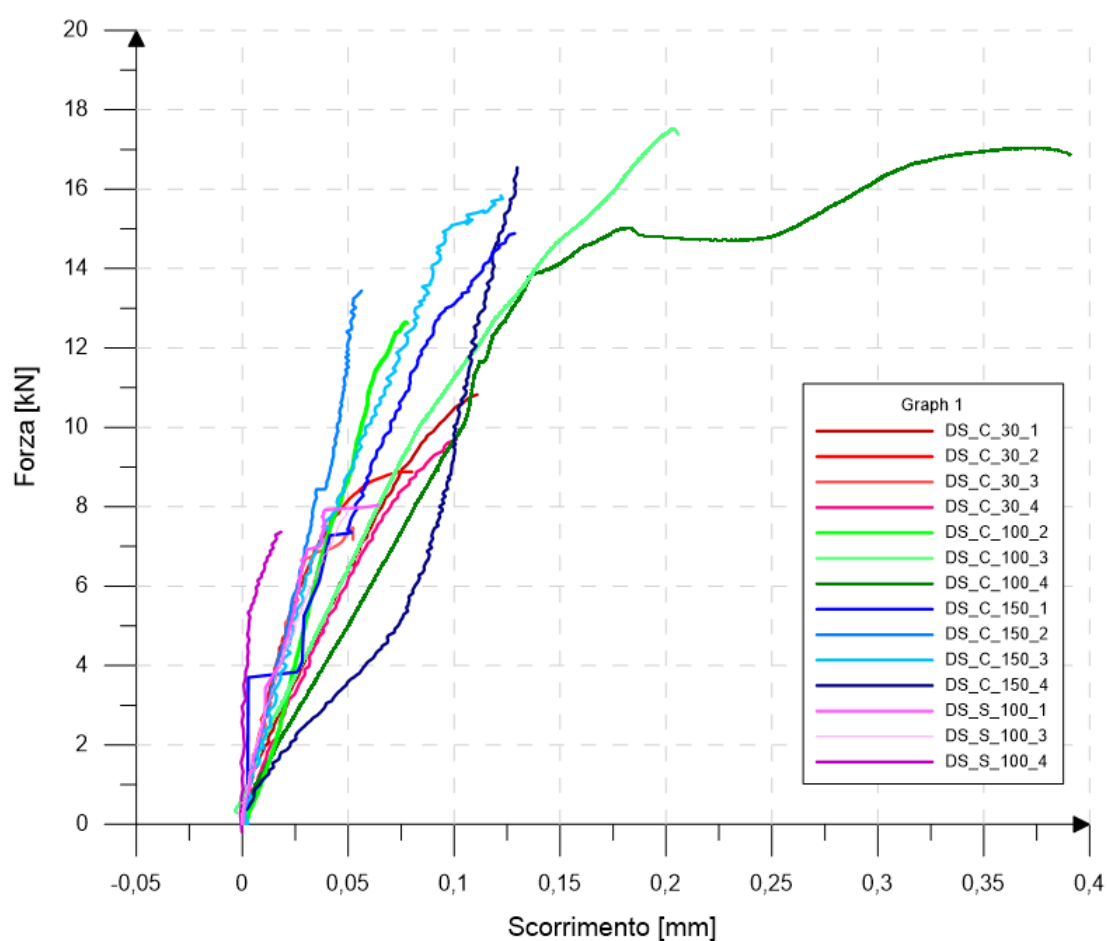


Grafico 10.2 - Relazione F - s per tutti i provini testati

Nel momento di raggiungimento della forza massima si osserva che ad una distanza di 10 mm dalla loaded end, punto di applicazione del carico, gli spostamenti diminuiscono drasticamente. In particolare, la riduzione media percentuale delle serie DS_C_30, DS_C_150 e DS_S_100 è rispettivamente pari al

16,6%, 17,4% e 27,5%. Ad una distanza invece di 20 mm, la riduzione media percentuale è del 23,85%, 33,44% e 38,53% per gli stessi gruppi di provini. Un dato particolarmente rilevante è quello del provino DS_S_100_2 in cui a 20 mm di distanza dalla loaded end si registrano spostamenti praticamente nulli. Dai dati quindi si evince che un terzo degli spostamenti si concentra entro i primi venti millimetri di incollaggio, sia per quanto riguarda le lamine in carbonio che quelle in acciaio per qualsiasi lunghezza di ancoraggio.

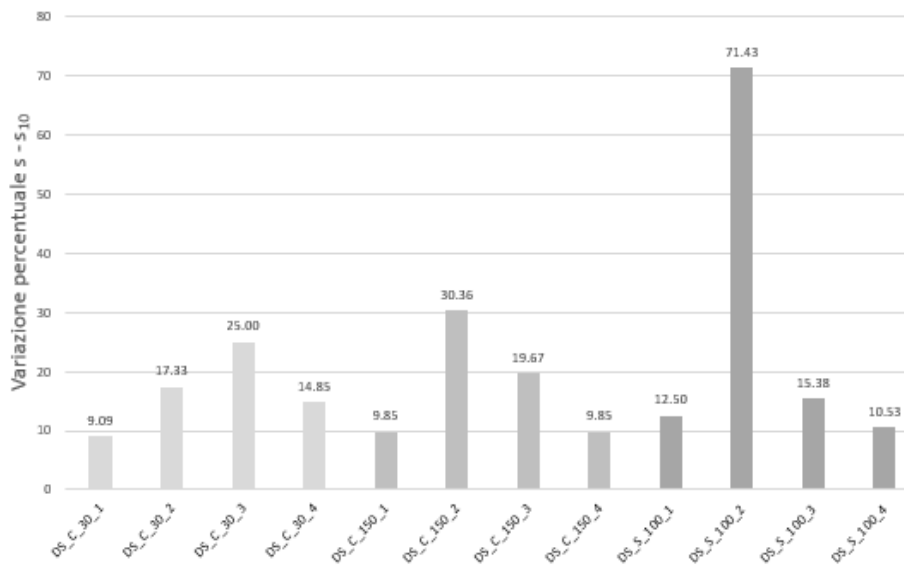


Grafico 10.3 - Variazione spostamenti tra $s_0 - s_{10}$ per i provini testati con DIC

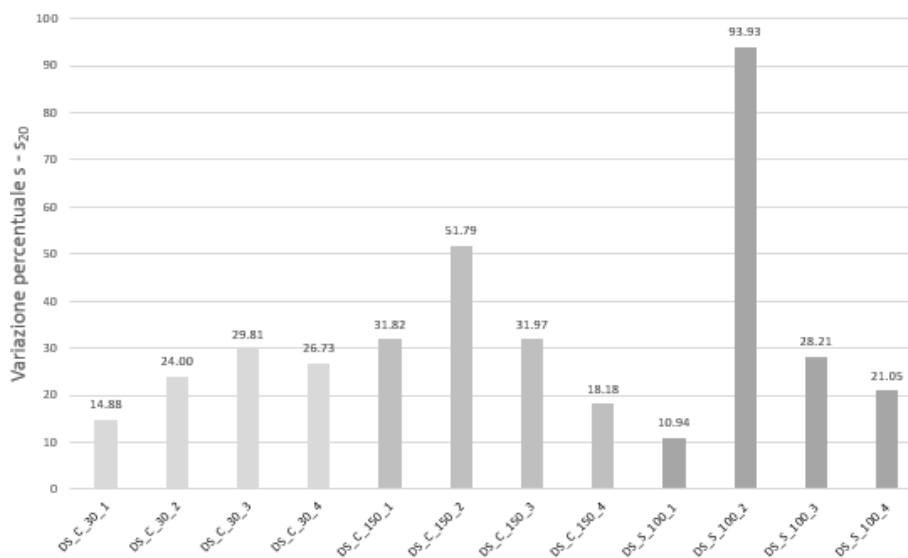


Grafico 10.4 - Variazione spostamenti tra $s_0 - s_{20}$ per i provini testati con DIC

Dallo studio del comportamento lungo sezioni perpendicolari allo sviluppo della lamina (Grafico 10.5), si desume un andamento parabolico delle curve, caratterizzate dal vertice in corrispondenza del baricentro del rinforzo e da un andamento costante a 5 mm del centro del solco. È inoltre evidente come al crescere della forza applicata, si riscontri una maggiore differenza tra il comportamento del legno e della lamina. Infine, è da evidenziare come le curve appartenenti alla serie di provini DS_C_150 siano caratterizzate da una certa variabilità dei valori ottenuti rispetto alle serie DS_C_30 e DS_S_100.

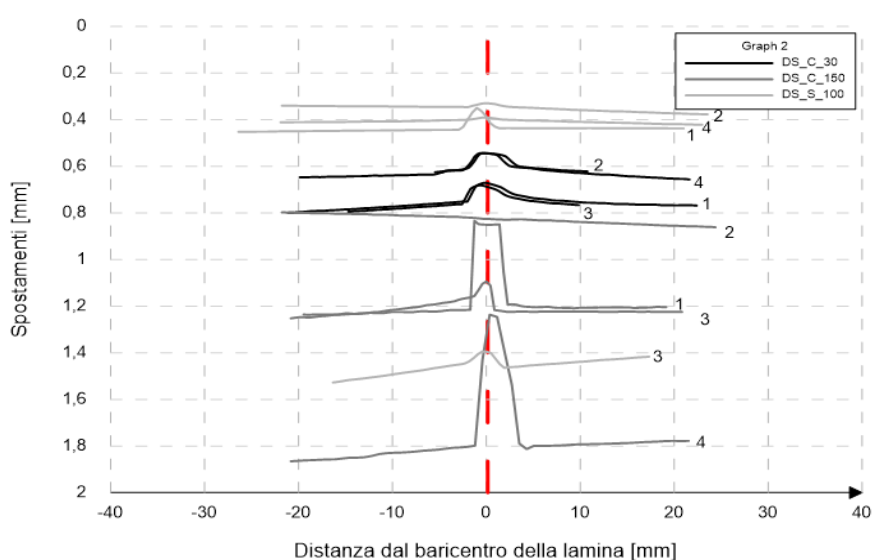


Grafico 10.5 - Variazione degli spostamenti lungo la sezione della loaded end perpendicolare allo sviluppo della lamina. Dati ottenuti al momento di applicazione di F_{max} per i provini testati con DIC

Dalle forze massime registrate è stato possibile ricavare analiticamente le tensioni tangenziali medie agenti all'interfaccia rinforzo-adesivo; nello specifico sono 8,67 MPa, 4,41 MPa, 2,90 MPa e 2,38 MPa rispettivamente per le serie DS_C_100, DS_C_150 e DS_S_100. Poiché non si è mai osservata una frattura coesiva dell'adesivo, si può concludere che la resina poliuretana è in grado di resistere a tensioni tangenziali medie superiori ai 10,25 MPa.

Infine, si riporta nella Tabella 10.1 il riepilogo dei risultati ottenuti dai test.

*Rinforzo NSM di travi lignee: verifica del
comportamento meccanico di un adesivo poliuretano*

Provino	F_{max} [kN]	S_{1,LVDT} [mm]	S_{DIC} [mm]	τ_{max,av,CFR} p [MPa]	τ_{max,av,woo} d [MPa]	Modalità di rottura
DS_C_30_1	10,83	0,140	0,121	10,25	8,20	AD_FRP_A
DS_C_30_2	8,89	0,085	0,075	7,62	6,10	MISTA
DS_C_30_3	7,48	0,010	0,052	7,08	5,66	AD_FRP_A
DS_C_30_4	9,72	0,172	0,101	9,72	7,36	AD_FRP_A
DS_C_100_1	14,80	0,024	-	4,21	3,37	AD_FRP_A
DS_C_100_2	12,67	0,077	-	3,60	2,88	AD_FRP_A
DS_C_100_3	17,53	0,204	-	4,98	3,94	AD_FRP_A
DS_C_100_4	17,05	0,367	-	4,84	3,87	AD_FRP_A
DS_C_150_1	14,95	0,001	0,132	2,84	2,27	AD_FRP_A
DS_C_150_2	12,38	-0,111	0,056	2,55	2,04	AD_FRP_A
DS_C_150_3	16,03	-0,109	0,122	3,03	2,43	AD_FRP_A
DS_C_150_4	16,70	0,355	0,132	3,16	2,53	AD_FRP_A
DS_S_100_1	8,13	-0,027	0,064	2,29	1,84	AD_STEEL_A
DS_S_100_2	7,93	-0,083	0,006	2,20	1,80	AD_STEEL_A
DS_S_100_3	11,20	0,070	0,117	2,97	2,43	AD_STEEL_A
DS_S_100_4	7,39	0,023	0,019	2,05	1,68	AD_STEEL_A

Tabella 10.1 - Principali risultati ottenuti dai test

Capitolo 11

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

11.1 CONCLUSIONI

Lo scopo del presente elaborato è stato quello di indagare, attraverso una campagna sperimentale, l'efficacia di un adesivo poliuretano bicomponente utilizzato per il consolidamento di sezioni lignee mediante tecnica NSM (Near Surface Mounted). Questa innovativa tecnologia di rinforzo strutturale prevede di incollare, per mezzo di specifici adesivi, dei profili di rinforzo all'interno di scanalature eseguite direttamente sulle superficie degli elementi da rinforzare. L'obiettivo è quello di definire un quadro generale delle attuali conoscenze in merito e di poter confrontare i risultati ottenuti con le informazioni fornite dalla letteratura scientifica.

La campagna sperimentale si è basata sull'esecuzione di quattro serie di prove, ciascuna caratterizzata da quattro campioni. Ogni provino testato è costituito da un blocco in legno a cui è stato incollato, per mezzo di un adesivo poliuretano bicomponente, un profilo di rinforzo all'interno di una specifica scanalatura. Le diverse serie di prove si differenziano tra loro in base alla lunghezza di incollaggio e al materiale del profilo di rinforzo; nello specifico, sono state adoperate lamine in CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ancorate per 30 mm, 100 mm, 150 mm e lamine in acciaio inossidabile incollate per 100 mm.

Nel primo set testato, caratterizzato da profili in carbonio e lunghezza di ancoraggio di 30 mm, tre dei quattro campioni sono ceduti per frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo e l'adesivo, mentre il restante si è rotto a causa del cedimento contemporaneo della superficie del legno e della resina poliuretano. Concluse così le prime prove, non è stato possibile definire univocamente la causa che ha portato alla rottura dei provini; di conseguenza, è stata predisposta

un'ulteriore serie di campioni caratterizzati da una lunghezza di ancoraggio pari a 100 mm. Lo scopo è stato quello di verificare se il cedimento dei primi campioni fosse da imputare all'eccessiva tensione tangenziale derivante da una limitata superficie di incollaggio, oppure all'incompatibilità tra la tipologia di rinforzo usata e quella dell'adesivo. Tutti i provini appartenenti al secondo set, analogamente alla maggior parte dei campioni del primo, sono ceduti a causa della frattura adesiva all'interfaccia tra il rinforzo e la resina poliuretano. A differenza però dei precedenti, l'adesivo non è mai rimasto aggrappato ad almeno un lato del profilo di rinforzo. A questo punto della campagna sperimentale è stato quindi possibile dedurre che la causa della rottura dei diversi campioni fosse l'incompatibilità tra la matrice delle lamine in CFRP e l'adesivo poliuretano bicomponente. Per confermare però tale ipotesi, è stata predisposta una terza serie di prove caratterizzata da una lunghezza di incollaggio pari a 150 mm. Similmente al secondo set, anche in questo l'unica modalità di rottura riscontrata è stata per frattura adesiva all'interfaccia tra la lamina in fibre di carbonio e la colla; ciò ha così confermato l'ipotesi precedentemente esposta.

Data l'incompatibilità esistente tra l'adesivo e le lamine in CFRP, sono state sostituite quest'ultime con profili in acciaio inossidabile in grado, in linea teorica, di aderire in maniera più efficiente alla resina poliuretano. Per ottenere dati confrontabili con le prove precedenti è stata utilizzata una lunghezza di ancoraggio pari a 100 mm, valore intermedio tra quelli precedenti. Nonostante ciò, la tipologia di modalità di rottura non è cambiata; inoltre, i campioni di quest'ultima serie sono stati in grado di resistere solamente alla metà della forza massima applicata precedentemente ai provini rinforzati con CFRP, aventi medesima lunghezza di ancoraggio.

In conclusione, dai test effettuati, è possibile affermare che la colla si è comportata egregiamente rispetto all'adesione al legno, in quanto è rimasta sempre ancorata all'interno della scanalatura, ma risulta inadeguata per le superficie lisce delle lamine di rinforzo.

Per quanto concerne invece l'analisi dei dati, è stata adoperata, contemporaneamente all'uso di due estensimetri, una recente tecnologia di rilevazione denominata DIC (Digital Image Correlation). Nello specifico, si tratta di una tecnica ottica che permette, grazie al confronto di una o più fotografie, di esaminare i campi di spostamento che subiscono i corpi sottoposti a sollecitazioni di qualsiasi genere. Nello specifico, si tratta di una tecnologia non distruttiva e senza contatto che permette, tramite la misurazione della variazione di posizione di blocchi di pixel, di calcolare gli spostamenti relativi tra i punti e di conseguenza le deformazioni superficiali dell'elemento da studiare.

Confrontando i dati con quelli ricavati dall'Ing. Simone Biondo [11], è possibile confermare che la DIC si è rilevata estremamente efficace nella determinazione dei campi di spostamento dei provini testati, sia per quanto concerne le aree all'interno della scanalatura sia per quelle limitrofe. Al contrario, nonostante sia stata modificata la modalità di preparazione dei provini in modo da permettere il contatto visivo diretto con il rinforzo, nella maggior parte dei casi le deformazioni ottenute si sono rilevate imprecise o addirittura errate. Le cause dell'imprecisione di questo metodo di misura sono quindi da imputare al basso spessore delle lamine, al pattern di punti neri non abbastanza fitto e alla non perfetta verticalità del solco e della lamina rispetto alla macchina fotografica. Da escludere come causa dell'ottenimento di risultati imperfetti la modalità di funzionamento del software, poiché non sono stati rilevati significativi cambiamenti tra la versione del programma rilasciato nel 2009 e il suo aggiornamento del 2021.

11.2 SVILUPPI PER IL FUTURO

Per proseguire lo studio del rinforzo di travi lignee mediante la tecnica NSM sarà necessario effettuare ulteriori prove sperimentali. In particolare, esse dovranno essere incentrate sulla ricerca di un adesivo in grado di aderire in maniera adeguata sia ai profili di rinforzo che al legno. Si consiglia di provare, nel caso di utilizzo di barre in FRP, un adesivo epossidico compatibile con la matrice dei profili da utilizzare, verificando quindi l'adeguatezza nello stesso in diverse condizioni termoigrometriche. Una volta individuato l'adesivo in grado di vincolare adeguatamente il profilo di rinforzo fino alla rottura superficiale del legno, le prove potranno incentrarsi sull'individuazione, per una determinata configurazione, della lunghezza di legame effettiva. In seguito, le prove dovranno essere svolte utilizzando essenze legnose diverse per verificare l'universalità di adesione dell'adesivo individuato. Infine, sarà necessario testare sezioni in legno non ricavate appositamente per l'esecuzione di prove di laboratorio. Si ricorda infatti che nelle prove sperimentali descritte nel presente elaborato è stato adoperato legname integro dotato di scarsa presenza di difetti. Questo passaggio è fondamentale per verificare l'affidabilità della NSM, tecnica pensata per ripristinare le sezioni durante il loro esercizio.

Qualora in un futuro venga utilizzata nuovamente la DIC per l'analisi dei dati, sarà necessario garantire il perfetto allineamento verticale tra il solco e la lamina di rinforzo con la macchina fotografica, pena la mancata lettura delle deformazioni. Inoltre, sarà necessario modificare la modalità di realizzazione dello speckle pattern in modo da ottenere punti più fitti con un diametro inferiore. Si potrebbe, per esempio, sostituire la bomboletta spray con un aerografo, strumento in grado di spruzzare vernici nebulizzandole attraverso aria compressa.

APPENDICE

SCRIPT MATLAB CURVA CARICO-SCORRIMENTO

Viene di seguito riportato a titolo esemplificativo lo script utilizzato per ricavare i dati dalla DIC relativi al grafico F - s per il provino DS_C_150_1.

```
n = 118; %number of csv files
n = n+2; %the first two rows are empty
d = dir('D:\Prove di laboratorio\DS_C_150\DS_C_150_1\DIC\CSV'); %legge tutti
i file nella directory
column1 = 14; %first column to be read (as shown in excel) (spostamento u)
column2 = 5; %first column to be read (as shown in excel) (deformazione exx)

yi_q1 = 1381; %first pixel to be read (as shown in excel) for wood
yf_q1 = 1421;
yi_q2 = 1801; %first pixel to be read (as shown in excel) for FRP
yf_q2 = 1841;
xi = 4339;
xf = 4379;

Data = [];
filename = [];
v = [];
c = 1;
for i = 3:n

    filename = d(i).name;
    m = importfile(filename);
    Data = m.data;
    index_q1 = find(Data(:,13)>= yi_q1 & Data(:,13)<=yf_q1 & Data(:,12)>=xi &
Data(:,12)<=xf);
    index_q2 = find(Data(:,13)>= yi_q2 & Data(:,13)<=yf_q2 & Data(:,12)>=xi &
Data(:,12)<=xf);

    v1= mean(Data(index_q1,column1));
    v2= mean(Data(index_q2,column1));
    v(c,1) = v1;
    v(c,2) = v2;
    v(c,3) = v2-v1;

    e1= mean(Data(index_q1,column2));
    e2= mean(Data(index_q2,column2));
    v(c,4) = e1;
    v(c,5) = e2;
    v(c,6) = e2-e1;

    c = c+1;
end
%%
xlswrite('D:\Prove di
laboratorio\DS_C_150\DS_C_150_1\DS_C_150_1.xlsx',v,'Output matlab - square');
```

SCRIPT MATLAB COMPORTAMENTO LUNGO LA LAMINA

Viene di seguito riportato a titolo esemplificativo lo script utilizzato per ricavare i dati dalla DIC relativi agli spostamenti e deformazioni lungo la lamina per il campione DS_C_150_1.

```
n = [118] %csv files
n = n+2; %the first two rows are empty
d = dir('D:\Prove di laboratorio\DS_C_150\DS_C_150_1\DIC\CSV'); %legge tutti
i file nella directory

column1 = 5; %(deformazione exx)
column2 = 14; %(spostamento exx)

yi = 1801; %first pixel to be read (as shown in excel) (FRP)
yf = 1841;

yiw = 1381; %first pixel to be read (as shown in excel) (WOOD)
yfw = 1421;

xi = 599;
xf = 4779;
xvect = [xi:10:xf]; %intervalli di 5 o 10 in base a VIC

Data = [];
filename = [];
e = [];
e1 = [];
e1w = [];
v = [];
v1 = [];
v1w = [];
index1_qk = [];
index2_qk = [];

for i = 115

    filename = d(i).name;
    m = importfile(filename);
    Data = m.data;

    for k = 1:length(xvect)
        index1_qk =(find(Data(:,13)>= yi & Data(:,13)<= yf & Data(:,12) ==
xvect(k)));
        e1(k) = mean(Data(index1_qk,column1));
        index2_qk =(find(Data(:,13)>= yiw & Data(:,13)<= yfw & Data(:,12) ==
xvect(k)));
        e1w(k) = mean(Data(index2_qk,column1));

        index_qk =[];
        index_qkw =[];

        index1_qk =(find(Data(:,13)>= yi & Data(:,13)<= yf & Data(:,12) ==
xvect(k)));
```

```

v1(k) = mean(Data(index1_qk,column2));
index2_qk =(find(Data(:,13)>= yiw & Data(:,13)<= yfw & Data(:,12) ==
xvect(k)));
v1w(k) = mean(Data(index2_qk,column2));
end

e = [e e1' e1w'];
e1 = [];
e1w = [];
v = [v v1' v1w']
v1 = [];
v2 = [];

end
T = [xvect' v e]

%%
% figure(1)          %grafico
% plot(yvect, e(:,4))
% grid on
% ylim([0 1e-5])

%%
xlswrite('D:\Prove di
laboratorio\DS_C_150\DS_C_150_1\DS_C_150_1.xlsx',T,'Output matlab
def_y_lamina');

```

SCRIPT MATLAB IL COMPORTAMENTO LUNGO LA SEZIONE

Viene di seguito riportato a titolo esemplificativo lo script utilizzato per ricavare i dati dalla DIC relativi agli spostamenti e deformazioni lungo sezioni perpendicolari alla lamina per il campione DS_C_150_1.

```

n = [6 11 33 70 115]; %csv files
n = n+2; %the first two rows are empty
d = dir('D:\Prove di laboratorio\DS_C_150\DS_C_150_1\DIC\CSV'); %legge tutti
i file nella directory

column1 = 14; %first column to be read (as shown in excel) (spostamento x)
column2 = 5; %first column to be read (as shown in excel) (deformazione exx)

yi = 1381; %first pixel to be read (as shown in excel)
yf = 2251;
yvect = [yi:10:yf]; %intervalli di 5 o 10 in base a VIC

xiA = 4339;
xfA = 4379;
xiB = 3209;
xfB = 3247;
xiC = 2079;
xfC = 2119;
xiD = 959;
xfD = 999;

```

```
% yiE = 0;
% yfE = 0;

Data = [];
filename = [];
e = [];
eA = [];
index_qkA = [];
eB = [];
index_qkB = [];
eC = [];
index_qkC = [];
eD = [];
index_qkD = [];
eE = [];
index_qkE = [];
eSA = [];
eSB = [];
eSC = [];
eSD = [];
eSE = [];

for i = n

    filename = d(i).name;
    m = importdata(filename);
    Data = m.data;

    % calcolo le deformazioni alle varie distanze
    for k = 1:length(yvect)
        index_qkA = (find(Data(:,13)== yvect(k) & Data(:,12)>=xiA &
Data(:,12)<=xfA));
        eA(k) = mean(Data(index_qkA,column2));
        index_qkA = [];
    end

    for k = 1:length(yvect)
        index_qkB = (find(Data(:,13)== yvect(k) & Data(:,12)>=xiB &
Data(:,12)<=xfB));
        eB(k) = mean(Data(index_qkB,column2));
        index_qkB = [];
    end

    for k = 1:length(yvect)
        index_qkC = (find(Data(:,13)== yvect(k) & Data(:,12)>=xiC &
Data(:,12)<=xfC));
        eC(k) = mean(Data(index_qkC,column2));
        index_qkC = [];
    end

    for k = 1:length(yvect)
        index_qkD = (find(Data(:,13)== yvect(k) & Data(:,12)>=xiD &
Data(:,12)<=xfD));
        eD(k) = mean(Data(index_qkD,column2));
        index_qkD = [];
    end

end
```

```

% for k = 1:length(xvect)
% index_qkE =(find(Data(:,1)== xvect(k) & Data(:,2)>=yiE &
Data(:,2)<=yfE));
% eE(k) = mean(Data(index_qkE,column2));
% index_qkE =[];
% end

% calcolo gli spostamenti alle varie distanze
for k = 1:length(yvect)
index_qkA =(find(Data(:,13)== yvect(k) & Data(:,12)>=xiA &
Data(:,12)<=xfA));
eSA(k) = mean(Data(index_qkA,column1));
index_qkA =[];
end

for k = 1:length(yvect)
index_qkB =(find(Data(:,13)== yvect(k) & Data(:,12)>=xiB &
Data(:,12)<=xfB));
eSB(k) = mean(Data(index_qkB,column1));
index_qkB =[];
end

for k = 1:length(yvect)
index_qkC =(find(Data(:,13)== yvect(k) & Data(:,12)>=xiC &
Data(:,12)<=xfC));
eSC(k) = mean(Data(index_qkC,column1));
index_qkC =[];
end

for k = 1:length(yvect)
index_qkD =(find(Data(:,13)== yvect(k) & Data(:,12)>=xiD &
Data(:,12)<=xfD));
eSD(k) = mean(Data(index_qkD,column1));
index_qkD =[];
end

% for k = 1:length(xvect)
% index_qkE =(find(Data(:,1)== xvect(k) & Data(:,2)>=yiE &
Data(:,2)<=yfE));
% eSE(k) = mean(Data(index_qkE,column1));
% index_qkE =[];
% end

e = [e eA' eB' eC' eD' eE' eSA' eSB' eSC' eSD' eSE'];
eA = [];
eB = [];
eC = [];
eD = [];
eE = [];
eSA = [];
eSB = [];
eSC = [];
eSD = [];
eSE = [];
end
e = [yvect' e]

```

```
%%  
% figure(1)          %grafico  
% plot(xvect, e(:,2))  
% grid on  
% %ylim([0 1e-5])  
  
%%  
xlswrite('D:\Prove di  
laboratorio\DS_C_150\DS_C_150_1\DS_C_150_1.xlsx',e,'Output matlab def_x');
```

BIBLIOGRAFIA

- [1] Istat, «Annuario statistico italiano 2015 - Costruzioni».
- [2] «Legno», *Treccani*.
- [3] «Tackle climate change: use wood». [Online]. Disponibile su: <https://europanel.org/wp-content/uploads/2018/09/Tackle-Climat-Change-EN.pdf>
- [4] Marco Andrea Pisani, Sara Cattaneo, e Tommaso D'Antino, *Consolidamento delle strutture*, 3a ed. Ulrico Hoepli Editore S.p.A., 2019.
- [5] A. Bernasconi, G. Schickhofer, K. Frühwald, e G. Traetta, «Il materiale legno».
- [6] Maurizio Piazza, Roberto Tomasi, e Roberto Modena, *Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee*. Ulrico Hoepli Editore S.p.A.
- [7] Mario Moschi, «Progettare con il legno».
- [8] Natterer, Herzog, e Volz, *Atlante del legno*. Utet Giuridica.
- [9] Marco Pio Lauriola, «Costruzioni in legno». A.A. -2014 2013.
- [10] «<https://risponde.promolegno.com/domanda/data/quali-sono-i-valori-dei-coefficienti-di-dilatazione-termica-del-legno/index.html>».
- [11] Simone Biondo, «Indagine sperimentale sul comportamento di interfaccia in travi lignee consolidate con la tecnica NSM», Politecnico di Milano, 2020.
- [12] Luca Pozza, «Durabilità e robustezza delle strutture in legno». 2018 2017.
- [13] Daniela Antelmi, «Indagine sui sistemi di incollaggio nel consolidamento di travi lignee», Politecnico di Milano, 2014.
- [14] Concetta Grimaldi, «Indagine sull'efficacia del rinforzo di membrature lignee eseguito con la tecnica NSM», Politecnico di Milano, 2018.
- [15] «CNR-DT201-2005 - Istruzioni per interventi di consolidamento statico di strutture lignee mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati».
- [16] Chris Gentile, Dagmar Svecova, Sami H. Rizkalla, e F.ASCE, «Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications», *Journal of composites for construction*, feb. 2002, doi: 10.1061/~ASCE!1090-0268~2002!6:1~11!
- [17] Robert F. Lindyberg *et al.*, «ReLAM: nonlinear probabilistic model for the analysis of reinforced Glulam Beams in Bending», giu. 2012.

- [18] «EN335-2013. Durabilità del legno e dei prodotti lignei. Classi d'uso: definizioni ed applicazioni».
- [19] «Norma Tecnica UNI EN 9504:1989, "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno," 1989.»
- [20] «CNR-DT200-2004 - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati».
- [21] Roberto Frassine, *Tecnologie e proprietà dei materiali compositi*.
- [22] «<https://www.targlass.it/materiali-compositi/fibre-di-rinforzo/fibre-di-vetro/caratteristiche-e-produzione/>».
- [23] Technological District on Engineering of polymeric and composite Materials and Structures, «I materiali compositi».
- [24] «<https://fibrolux.com/it/sezione-materiali-compositi/dati-interessanti/pultrusione/>».
- [25] J. Ramoa Correia, «Pultrusion of advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites», 2013, doi: 10.1533/9780857098641.2.207.
- [26] G.Sala, L. DI Landro, A. Airoidi, e P. Bettini, «Tecnologie di pultrusione e roll wrapping».
- [27] «ACI 440.1R-06 -Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars». 2006.
- [28] «CNR-DT203-2006 - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato».
- [29] International Federation for Structural Concrete, A c. di, *FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007.
- [30] Masoud Abedini, Javad Mehrmashhadi, Mohamed H. Mussa, e Mohammad Ansari, «Evaluation of Concrete Structures Reinforced with Fiber Reinforced Polymers Bars: A Review», *Asian Journal of Scientific Research*, giu. 2017, doi: 10.18488/journal.2.2017.75.165.175.
- [31] Ferhat Aydin e Seymanur Arslan, «Investigation of the durability performance of FRP bars in different environmental conditions», *Advances in Concrete Construction*, vol. 12, n. 4, 2021, doi: 10.12989/acc.2021.12.4.295.

- [32] Sandor Solyom e György L. Balázs, «Bond of FRP bars with different surface characteristics», *Construction and Building Materials*, vol. 264, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119839.
- [33] Porter ML e Barnes BA, «Accelerated Durability of FRP Reinforcement For Concrete Structures», presentato al Proceedings of the 1st international conference on durability of fiber reinforced polymer (FRP) Composites for Construction, Sherbrooke, Canada, 1998.
- [34] Yi Chen, Julio F. Davalos, Indrajit Ray, e Hyeong-Yeol Kim, «Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures», *Composite structures*, vol. 78, 2007, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.08.015.
- [35] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, «Norme tecniche per le costruzioni». 17 gennaio 2018.
- [36] Zsombor Kálmán Szabó e György L. Balázs, «Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures», *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, gen. 2007, doi: 10.3311/pp.ci.2007-1.05.
- [37] Josè Sena-Cruz, Marco Jorge, Jorge M. Branco, e Vitor M.C.F Cunha, «Bond between glulam and NSM CFRP laminates», vol. 40, pagg. 260–269, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.089.
- [38] A. Bilotta, F. Ceroni, M. Di Ludovico, E. Nigro, M. Pecce, e G. Manfredi, «Bond efficiency of EBR and NSM FRP systems for strengthening concrete members», *Journal of composites for construction*, ott. 2011, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000204.
- [39] Antonio Borri, Marco Corradi, e Andrea Grazini, «A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials», *Composites: Part B*, giu. 2004, doi: 10.1016/j.compositesb.2004.04.013.
- [40] Weidong Lu, Zhibin Ling, Qifan Geng, Weiqing Liu, Heifeng Yang, e Kong Yue, «Study of flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates», *Construction and Building Materials*, n. 91, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.050.
- [41] Juliano Fiorelli e Antonio Alves Dias, «Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber», *Materials Research*, vol. 6, n. 2, giu. 2003, doi: 10.1590/S1516-14392003000200014.

- [42] Marco Corradi, Luca Righetti, e Antonio Borri, «Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber», *Materials*, lug. 2015, doi: 10.3390/ma8074034.
- [43] Stefano Lopez, «Indagine sull'efficienza dell'incollaggio nelle protesi in lamellare di travi lignee», Politecnico di Milano, 2015.
- [44] «Rugosità», *Treccani*.
- [45] Qingfeng Xu, Lingzhu Chen, Kent A. Harries, Fuwen Zhang, Zhuolin Wang, e Xi Chen, «Experimental study and numerical simulation of long-term behavior of timber beams strengthened with near surface mounted CFRP bars», *Materials and Structures*, ago. 2016, doi: 10.1617/s11527-016-0874-9.
- [46] Andrea Pisacane, «Indagine sull'efficienza dell'incollaggio nel consolidamento strutturale di travi lignee», Politecnico di Milano, 2016.
- [47] «UNI 11035-2:2010. Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale».
- [48] Sireg, «Scheda tecnica produttore "Carbopree"».
- [49] Sika, «Scheda tecnica produttore "CarboDur"».
- [50] Henkel, «Scheda tecnica produttore "Loctite UK 1351 B25 / Loctite UK 5452"».
- [51] Ing. Giorgio Giacomini, «I materiali compositi FRP a matrice organica e i criteri normativi per l'installazione ed il controllo in cantiere.»
- [52] Sireg, «Scheda tecnica Carbopree HS Laminates - High Strength».
- [53] «https://www.henkel-adhesives.com/it/it/prodotto/solvent-based-adhesives/teroson_sb_450.html».
- [54] «http://www.lpmsc.polimi.it/__trashed/».
- [55] «<https://www.meccanicaneews.com/2021/11/05/misura-della-deformazione-mediante-digital-image-correlation-dic/>».
- [56] E. Gabrielli e C. Colla, «La tecnica della correlazione digitale di immagini per il monitoraggio di provini di muratura sottoposti a prove meccaniche».
- [57] «Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio».