

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova
Dipartimento dei Beni Culturali

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN:

Studio e Conservazione dei Beni Archeologici e Architettonici

INDIRIZZO: Scienze e Tecnologie per i Beni Archeologici e Architettonici

CICLO XXVI

**MATERIALI COMPOSITI PER IL RINFORZO DI STRUTTURE IN LEGNO:
PROBLEMI DI DURABILITÀ E COMPATIBILITÀ**

Direttore della Scuola : Ch.mo Prof. Giuseppe Salemi

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. Giuseppe Salemi

Supervisore :Ch.ma Prof.ssa Maria Rosa Valluzzi

Dottoranda: Fabiola Nardon

Sommario

Il legno è un materiale da costruzione di lunga storia applicativa, molte strutture in legno, qualora adeguatamente progettate, realizzate e mantenute, risultano spesso ancora efficienti dopo secoli di utilizzo. La necessità di intervento di rinforzo sopraggiunge frequentemente quando sono richieste prestazioni meccaniche superiori rispetto a quelle che può offrire il materiale ligneo da solo. La ricerca di tecniche e prodotti adeguati allo scopo ha portato allo studio dei materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP, **Fiber Reinforced Polymers**), i quali soprattutto grazie alla loro versatilità, sono già utilizzati efficacemente nelle tecniche di rinforzo di murature storiche e conglomerati cementizi.

Il sodalizio tra materiali compositi a matrice polimerica e legno, risulta particolarmente indicato, soprattutto perché la peculiare leggerezza del legno viene mantenuta a fronte dell'aumento della resistenza della struttura. Sono anche evidenti le incompatibilità tra rinforzo e substrato, primo fra tutte il diverso comportamento nei confronti delle variazioni delle condizioni ambientali, in termini di temperatura e umidità.

La recente introduzione di fibre naturali di origine vegetale, la cui sperimentazione è appena agli inizi, ha contribuito ad ampliare l'orizzonte di studio di tali materiali, in particolare qualora applicati al legno. Alcuni studi sulla validità di questi materiali innovativi (NFRP, **NaturalFRP**) hanno evidenziato i vantaggi rispetto alle fibre di uso comune, quali vetro e carbonio. Le fibre naturali sono biodegradabili, rinnovabili e riciclabili, non sono tossiche e la loro produzione richiede minore energia e costi ridotti; inoltre ne esiste una vasta gamma con caratteristiche chimico-fisiche e prestazioni meccaniche diverse, adattabili a numerosissime applicazioni. È tuttavia fondamentale non sottovalutare gli aspetti critici che possono emergere dal sodalizio legno-compositi naturali, come l'alto assorbimento di umidità, la problematica adesione fibra-matrice, la scarsa resistenza al calore e la suscettibilità ad attacchi agenti biodeteriogeni, causati dalla loro origine naturale.

All'interno di questo panorama si è inserito tale lavoro di ricerca, il cui obiettivo principale è indagare la compatibilità e la durabilità da un punto di vista meccanico di alcuni materiali

compositi naturali di recente introduzione per il rinforzo degli elementi in legno appartenenti a strutture di interesse storico-artistico e validare la loro efficacia mediante confronto con i materiali compositi comunemente già utilizzati. Mediante prove meccaniche effettuate sui materiali costituenti il sistema di rinforzo, fibre e matrici, e sul sistema stesso sono stati definiti i limiti applicativi dei materiali selezionati. Attraverso prove mirate ad indagare il fenomeno di aderenza sono stati determinati i requisiti che deve avere il legno affinché sia efficace l'intervento di rinforzo e quali condizioni ambientali ne garantiscono il perdurare o ne causano un rapido degrado. Infine con prove sull'elemento strutturale rinforzato si è inteso validare la possibilità di utilizzare i materiali compositi naturali come alternativa a quelli già comunemente utilizzati.

Le prove sin qui condotte hanno permesso di validare in prima istanza i materiali compositi con fibre naturali, quali possibili alternative ai materiali già in uso, restano comunque da approfondire altri aspetti riguardo alle problematiche di compatibilità e durabilità.

Abstract

Wood is a building material with a long application history, many timber structures, if properly designed and maintained, are still working well after centuries of use. The need of strengthening occurs frequently when mechanical performance higher than those offered by wood alone are required. The research of new techniques and products has led to the use of fiber reinforced polymers (FRP). Thanks to their versatility, these materials can be effectively used in strengthening and repair of structural components made of historic masonry or concrete.

FRPs application on and wood elements seems particularly recommended because the characteristic wood lightness is kept against a significant increase of the structure strength. However, there are some incompatibilities between FRPs and the wood substrate, first of all the different behavior in relation to changes of the environmental conditions in terms of temperature and humidity.

The recent introduction of natural plant-based fibers, which are still in their infancy, has contributed to extend the studies of these materials, in particular when applied to wood elements. Some studies on the effectiveness of these innovative materials have pointed out the advantages compared to traditional fibers, such as glass and carbon. Natural fibers are biodegradable, renewable and recyclable, non-toxic and their production requires less energy and lower costs, in addition there exists a wide choice of fibers with typical chemical and physical characteristics and different mechanical properties, which can be used for different applications. However, it's important to avoid the underestimation of the critical issues concerning the use of composites applied on wood. Examples of critical issues are high moisture absorption, fiber-matrix adhesion problems, low heat resistance and sensitivity to biological attacks.

This research work is aimed to investigate the compatibility and durability of some natural composite materials of recent introduction from a mechanical point of view and validate their effectiveness through comparison with other composite materials commonly used.

Mechanical tests carried out on the constituent elements of the reinforcement system, fibers and matrix, and the system itself allowed for defining the limits of the selected materials. Bond tests were used to determine the influence of the wood substrate properties on the element strength and of the environmental conditions which guarantee the durability of the strengthening or cause its decay. Finally, the testing of structural reinforced element was carried out to validate the opportunity of using the natural composite materials as alternative to the traditional ones.

The tests conducted allowed for studying the applicability of composite materials with natural fibers as possible replacements for more traditional materials. Some aspects still need to be investigated with respect to compatibility and durability issues.

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va alla prof.ssa Maria Rosa Valluzzi che mi ha permesso di intraprendere l'esperienza del dottorato e mi ha supportata durante questi tre anni.

Un ringraziamento speciale all'ing. Enrico Garbin per aver dato un contributo essenziale alla progettazione della mia ricerca ed all'ing. Matteo Panizza per avermi coadiuvato e sostenuto durante l'intero percorso.

L'attività di laboratorio è stata resa possibile grazie al contributo delle aziende Bozza S.R.L, Fidia s.r.l., BASF S.p.A. e Weiss Chemie GmbH ed ha avuto modo di concretizzarsi con l'aiuto di tutto il personale del laboratorio, cui va un sincero ringraziamento.

Ringrazio Valentina Mazzone e Sofia Tiozzo Pezzoli, che con i loro lavori di tesi hanno contribuito all'attività di ricerca.

Un sentito ringraziamento va a tutti coloro che mi hanno affiancata in questi tre anni: ai dott. Gianluca Cadelano e Paolo Giulio Bison dell'ITIS-CNR, alle dott.sse Monica Favaro e Sara Bianchin dell'ICIS-CNR ed alla dott.ssa Rita Deiana del dBC.

Un ringraziamento ed un pensiero vanno al dott. Ermanno Grinzato.

Ed infine un grazie a tutti i ragazzi del "Gruppo Modena" per la collaborazione e il supporto di questi anni.

Indice

Sommario	i
Abstract	iii
Ringraziamenti	v
Indice	vii
Elenco delle figure	xi
Elenco delle tabelle	xvi
1 Introduzione	1
1.1 Inquadramento generale	1
1.2 Obiettivi del lavoro	3
1.3 Organizzazione della tesi	6
2 Stato dell'arte	7
2.1 Restauro: carte, norme e convenzioni	7
2.2 Introduzione dei materiali compositi per il rinforzo di elementi in legno nel consolidamento delle strutture	11
2.3 Materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (Fiber Reinforced Polymers – FRP)	12
2.3.1 Fibre sintetiche	16
2.3.2 Fibre naturali	17
2.3.3 Matrici	20
2.4 Legno	21
2.4.1 Struttura e composizione	23
2.4.2 Proprietà fisico-meccaniche	26
2.4.3 Degrado del legno	30
2.5 Studi sperimentali sui materiali compositi sintetici e naturali	32
2.6 Normativa di riferimento	36

3	I materiali	39
3.1	Legno	39
3.2	Materiali compositi a matrice polimerica	41
3.2.1	Fibra di carbonio	41
3.2.2	Fibra di vetro	43
3.2.3	Fibra di lino	45
3.2.4	Resina epossidica	47
3.2.5	Colla vinilica	51
3.3	Normativa di riferimento	54
4	Programma sperimentale	57
4.1	Introduzione	57
4.2	Selezione dei materiali	58
4.3	Preparazione dei campioni di legno fibrorinforzati	64
4.4	Metodologie investigative	66
4.4.1	Prove di caratterizzazione dei materiali utilizzati	66
4.4.2	Prove di aderenza: test di pull-off e shear test	67
4.4.3	Prove di flessione su travi fibrorinforzate	68
4.4.4	Analisi chimico-fisiche	68
4.5	Parametri di condizionamento	69
4.5.1	Fase 0 (F0) – Condizioni standard di riferimento	69
4.5.2	Fase 1 (F1) - influenza di elevati contenuti di umidità nel legno sulla riuscita dell'adesione degli FRP	71
4.5.3	Fase 2 (F2) - valutazione degli effetti combinati di umidità relativa e temperatura sull'adesione degli FRP	72
4.5.4	Fase 3 (F3) - valutazione degli effetti causati dall'esposizione a riscaldamento sull'adesione degli FRP	74
4.5.4	Fase 4 (F4) e fase 4 (F4) - valutazione degli effetti causati da una prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità sull'adesione degli FRP	75
4.6	Mercerizzazione	76
4.7	Nomenclatura dei campioni	78
5	Prove di caratterizzazione dei materiali	81
5.1	Prove di trazione di singoli fili di lino	81
5.1.1	Metodologia di prova	82
5.1.2	Risultati	82

5.2	Prove di trazione delle matrici	84
5.2.1	Preparazione dei campioni e metodologia di prova	84
5.2.2	Risultati	88
5.3	Prove di trazione assiale su FRP	90
5.3.1	Preparazione dei campioni e metodologia di prova	90
5.3.2	Risultati	95
6	Prove di aderenza	103
6.1	Test di pull-off	103
6.1.1	Preparazione dei campioni e metodologia di prova	103
6.1.2	Risultati - Analisi delle modalità di rottura	107
6.1.3	Risultati - Analisi delle resistenze	114
6.2	Shear test	142
6.2.1	Preparazione dei campioni e metodologia di prova	144
6.2.2	Risultati - Determinazione della lunghezza limite di adesione	146
6.2.3	Osservazioni - Determinazione della lunghezza limite di adesione	148
6.2.4	Risultati - Influenza dei condizionamenti	150
6.2.5	Osservazioni - Influenza dei condizionamenti	152
7	Prove di flessione su travi rinforzate	155
7.1	Introduzione	155
7.2	Set up di prova	157
7.2.1	Preparazione dei provini	157
7.2.2	Posizionamento dei provini	162
7.2.3	Strumentazione di prova	162
7.3	Risultati	164
7.3.1	Travi non rinforzate	166
7.3.2	Travi rinforzate con FFRP(V) - 3 strati di fibra	169
7.3.3	Travi rinforzate con FFRP(V) - 5 strati di fibra	172
7.3.4	Travi rinforzate con FFRP - 3 strati di fibra	174
7.3.5	Travi rinforzate con FFRP - 5 strati di fibra	179
7.3.6	Travi rinforzate con CFRP - 1 strato di fibra	181
7.4	Osservazioni conclusive	184
8	Analisi chimico-fisiche	187
8.1	Microscopia ottica	187

8.1.1	Metodologia di prova	188
8.1.2	Risultati	189
8.2	Spettrofotometria FT-IR	194
8.2.1	Metodologia di prova	197
8.2.2	Risultati	198
8.3	Termografia	204
8.3.1	Metodologia di prova	204
8.3.2	Preparazione dei campioni	208
8.3.3	Programma sperimentale	210
8.3.4	Risultati	211
9	Conclusioni	217
	Allegati	225
	Riferimenti	241

Elenco delle figure

1.1	Metodologie sperimentali .	5
2.1	Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito (<i>CNR-DT 200/2004</i>).	14
2.2	Differenziazione dei tipi di fibra.	16
2.3	Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale (<i>CNR-DT 200/2004</i>).	16
2.4	Sezione radiale di un tronco in cui si riconoscono la corteccia esterna (ob) ed interna (ib), il cambio cribro-vascolare (vc), l'alburno (sapwood), il duramen (heartwood) ed il midollo (p) (<i>USDA, 2010</i>).	23
2.5	Sezioni trasversali di (a) legno omoxilo, (b) legno eteroxilo (<i>Caneva et al, 2005</i>).	24
2.6	Struttura cellulare in cui si riconoscono la lamella mediana (ML), la parete cellulare primaria (P) e i tre strati della parete secondaria (S1, S2, S3) (<i>USDA, 2010</i>).	24
2.7	Cellulosa (<i>Allinger et al., 1981</i>).	25
2.8	Isteresi igroscopica del legno (<i>USDA, 2010</i>).	27
2.9	(a) rigonfiamento volumetrico (4) e nelle tre direzioni: assiale (1), radiale (2), trasversale (3) (<i>CNR-DT 201/2005</i>); (b) principali fessurazioni e deformazioni in relazione alla direzione degli anelli di accrescimento (<i>USDA, 2010</i>).	28
2.10	(a) muffa, (b) carie bruna, (c) carie bianca e (d) carie soffice (<i>USDA, 2010</i>).	31
3.1	Trave di legno di abete utilizzata nella sperimentazione.	40
3.2	Fibra di carbonio MBrace, utilizzata nella sperimentazione.	43
3.3	Fibra di vetro MBrace, utilizzata nella sperimentazione.	44
3.4	Struttura del lino dalla pianta alle fibrille di cellulosa (<i>Yan et al., 2014</i>).	45
3.5	Micro-struttura di una cellula di fibra di lino (<i>Yan et al., 2014</i>).	46
3.6	Fibra di lino FIDFLAX, utilizzata nella sperimentazione.	47
3.7	Gruppo epossidico.	48
3.8	Reazione di formazione del diepossido.	48
3.9	Reazione di formazione della resina epossidica.	49
3.10	(a) componente A (diepossido), (b) componente B (diammina), (c, d) resina epossidica.	50
3.11	(a) componente A, (b) componente B, (c) primer.	50
3.12	Reazione di formazione dell'acetato di vinile a partire da acetilene ed acido acetico.	51
3.13	Reazione di formazione dell'acetato di vinile per ossidazione dell'etilene.	51

3.14	Polimerizzazione dell'acetato di vinile in polivinilacetato (il simbolo • indica il radicale).	52
3.15	Colla vinilica.	53
3.16	Classi di durabilità della norma UNI EN 204 (2002).	53
4.1	(a) fibra di canapa, (b) resina fenol-resorcinica, (c) colla poliuretanica.	59
4.2	(a) resina epossidica, (b) colla vinilica, (c) resina fenol-resorcinica, (d) colla poliuretanica.	60
4.3	Aumento volumetrico riscontrato nella colla poliuretanica.	61
4.4	Valori finali dei test di trazione assiale su resina epossidica (sopra), desunti da prove Rilem e di colla vinilica (sotto).	61
4.5	Deformazione osservata nei campioni di resina fenol-resorcinica.	62
4.6	Valori finali dei test di trazione assiale su singoli fili di fibra di canapa (sopra) e lino (sotto).	63
4.7	Rimozione con carta abrasiva dello strato di ossidazione superficiale.	64
4.8	Realizzazione di un campione rinforzato con FRP (resina epossidica).	65
4.9	Spessori dei materiali compositi con (a) 3 strati, (b) 4 strati e (c) 5 strati di fibra.	66
4.10	(a) campioni a bagno, (b) curva di imbibizione (<i>Nardon, 2010</i>).	72
4.11	Contenitore sigillato utilizzato nella fase 2.	73
4.12	Due diversi telai utilizzati per la mercerizzazione della fibra di lino.	77
4.13	Telaio posto all'interno della vasca.	77
4.14	Strumentazione adottata per tenere costantemente movimentata la soluzione alcalina.	78
5.1	Set up di prova per la trazione di singoli fili di lino.	82
5.2	Grafico carico-spostamento delle prove di trazione di singoli fili di lino.	83
5.3	Stampo per la preparazione dei campioni da testare.	85
5.4	Reazione della colla vinilica.	85
5.5	(a) degradazione della colla vinilica causata dal calore, (b) imbrunimento delle matrici, (c, d) rammollimento delle matrici.	
5.6	(a) macchia rossastra su campione di resina epossidica, (b, c) rammollimento e dilatazione di campioni di colla vinilica.	87
5.7	Set up di prova per la trazione delle matrici ed estensimetri.	87
5.8	Grafico tensione-deformazione delle prove delle matrici della fase 0.	88
5.9	Progressione della prova di trazione di campioni di colla vinilica.	88
5.10	Confronto delle tensioni e delle deformazioni dei campioni condizionati di resina epossidica.	89
5.11	Impregnazione della fibra di lino con colla vinilica (a) e resina epossidica (b).	91
5.12	Alcuni campioni asciugati (i più chiari sono FFRP(V) e quelli più scuri FFRP).	92
5.13	Imbrunimento dei campioni con colla vinilica (a) e con resina epossidica (b). Irrigidimento dei FFRP(V) in seguito al riscaldamento a 100 °C (c) e 140 °C (d).	92
5.14	Deformazione e rammollimento delle strisce di FFRP(V).	93
5.15	(a) deformazione e rammollimento delle strisce di FFRP dopo essere state in acqua, (b).umidità sulla superficie, quando estratte dai sacchi sigillati.	93
5.16	Set up di prova per la trazione delle strisce di FRP.	94
5.17	Grafico tensione-deformazione di FFRP(V), FFRP e CFRP.	97
5.18	Differenze in termini di tensione e deformazione tra FFRP, FFRP(V) e CFRP.	97
5.19	Tensioni e deformazioni massime rispetto al numero di strati di fibra.	100

5.20	Tensioni e deformazioni massime rispetto alla fase di condizionamento (non è presente il dato sulla deformazione dei campioni della F4 ₄₀ per problemi con l'apparato di misura).	101
5.21	Tensioni e deformazioni massime rispetto alla fase di condizionamento.	101
6.1	Geometria dei campioni per i test di pull-off.	104
6.2	Preparazione dei campioni per la prova.	106
6.3	Set up di prova per il test di pull-off.	106
6.4	Modalità di rottura (<i>ASTM C 1583</i>).	107
6.5	(a) rottura A; (b) rottura B; (c) rottura C; (d) rottura M; (e, f) prove non valide.	107
6.6	Percentuali di prove valide per i diversi materiali compositi.	108
6.7	Incidenza delle modalità di rottura per tipo di composito.	109
6.8	Incidenza delle modalità di rottura per fase di condizionamento.	109
6.9	Incidenza delle modalità di rottura per fase di condizionamento e tipo di composito.	111
6.10	Incidenza delle modalità di rottura per tipo di fibra e di matrice.	112
6.11	Risultati dei test di pull-off sui campioni multistrato.	113
6.12	Grafici relativi a FFRP – fase 1.	116
6.13	Grafici relativi a FFRP – fase 2.	117
6.14	Grafici relativi a FFRP – fase 3.	118
6.15	(a) prima del riscaldamento, (b) dopo il riscaldamento.	119
6.16	(a) campione umido, (b) campione nuovamente in equilibrio con le condizioni standard.	119
6.17	Grafici relativi a FFRP – fase 4.	120
6.18	Grafici relativi a FFRP – fase 5.	121
6.19	Danni causati dalla prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità.	122
6.20	Interval plot dei valori delle fasi 4 e 5 (intervallo di confidenza=95%).	122
6.21	Grafici relativi a FFRP(V) – fase 1.	124
6.22	Grafici relativi a FFRP(V) – fase 2.	125
6.23	Grafici relativi a FFRP(V) – fase 3.	126
6.24	Rottura C del campione VL(F3 ₁₄₀)02 causata dal degrado della colla vinilica.	127
6.25	Grafici relativi a FFRP(V) – fase 4	128
6.26	Grafici relativi a FFRP(V) – fase 5.	129
6.27	Presenza di mufte sia sul legno, sia sul composito.	120
6.28	Grafici relativi a CFRP – fase 1.	131
6.29	Grafici relativi a CFRP – fase 2.	132
6.30	Grafici relativi a CFRP – fase 3.	133
6.31	Grafici relativi a CFRP – fase 4.	135
6.32	Grafici relativi a GFRP – fase 1.	136
6.33	Grafici relativi a GFRP – fase 2.	137
6.34	Grafici relativi a GFRP – fase 3.	138
6.35	Grafici relativi a GFRP – fase 4.	139
6.36	Confronto delle tensioni massime misurate per FFRP(M) ed FFRP.	141
6.37	Geometria dei campioni per gli shear test.	144
6.38	(a) computer con il software per la gestione della macchina di prova; (b) macchina di prova universale Galdabini; (c) sistema di acquisizione multicanale con pc associato; (d) cella di carico; (e) potenziometri.	145
6.39	Preparazione dei campioni per la prova.	145
6.40	(a, c) rottura al limite della zona adesiva, (b, d) rottura vicino all'afferraggio.	148
6.41	Grafici carico-spostamento, rottura del composito.	149
6.42	Grafici carico-spostamento, delaminazione.	149
6.43	Modalità di delaminazione (a) e rottura del composito (b) per FFRP(V).	150

6.44	Modalità di delaminazione (a) e rottura del composito (b) per FFRP.	150
6.45	Risultati delle prove di shear test - FFRP.	151
6.46	Strato di reazione nei campioni FFRP condizionati a F1-40%.	151
6.47	Risultati delle prove di shear test – FFRP(V).	152
6.48	Confronto tra P_{max} degli shear test e delle trazioni assiali.	153
7.1	Configurazione di prova (UNI EN 407).	156
7.2	Configurazione del provino (misure in mm).	157
7.3	(a, b) preparazione travi rinforzate con FFRP, (c) preparazione travi con FFRP(V), (d) travi pronte per essere testate.	157
7.4	Rastrematura con resina epossidica alle estremità del rinforzo con composito naturale.	158
7.5	(a) LVDT, (b) dettaglio del punto di contatto tra staffa e strumento, (c) estensimetro DD1.	159
7.6	Posizione e distanza reciproca degli LVDT.	159
7.7	Denominazione degli strumenti di misura.	160
7.8	Appoggi cilindrici.	161
7.9	Spessori in legno per garantire il perfetto contatto tra le parti.	161
7.10	Preparazione della trave per la prova.	162
7.11	(a) sistema di acquisizione; (b) pompa idraulica; (c) martinetto idraulico con cella di carico e putrella; (d) trasduttori induttivi di spostamento.	163
7.12	Dettaglio del sistema di acquisizione, della pompa idraulica e della cella di carico.	163
7.13	Corrispondenza tra gli strumenti di misura ed i valori espressi nel grafico.	165
7.14	Grafici relativi alla prova di TRAVE_NR_01.	166
7.15	(a) primo segno di cedimento; (b) proseguo della prova senza strumentazione; (c) rottura della trave.	167
7.16	Grafici relativi alla prova di TRAVE_NR_02.	168
7.17	Frattura del legno in zona tesa e compressa.	169
7.18	Grafici relativi alla prova di TRAVE_VL(3S)_01).	170
7.19	Forte flessione della trave in prossimità del carico di rottura.	170
7.20	Presenza del midollo che subisce uno schiacciamento.	171
7.21	Rottura della trave per scorrimento reciproco delle fibre del legno.	171
7.22	Grafici relativi alla prova di TRAVE_VL(3S)_02.	172
7.23	Rottura della trave per collasso delle fibre in zona tesa.	172
7.24	Deformazione del legno.	173
7.25	Grafici relativi alla prova di TRAVE_VL(5S)_01.	173
7.26	Asimmetria della rottura della trave per collasso delle fibre in zona tesa.	174
7.27	Scollamento del composito FFRP(V) – 5 strati dal punto di rottura del legno.	174
7.28	Grafici relativi alla prova di TRAVE_VL(5S)_02.	175
7.29	Rottura della trave per collasso delle fibre in zona tesa e lo scorrimento reciproco.	175
7.30	Grafici relativi alla prova di TRAVE_EP_L(3S)_01.	176
7.31	Rottura della trave per collasso delle fibre.	177
7.32	Grafici relativi alla prova di TRAVE_EP_L(3S)_02.	178
7.33	Incastro dell'appoggio nel legno.	178
7.34	Rottura della trave per collasso delle fibre.	178
7.35	Grafici relativi alla prova di TRAVE_EP_L(5S)_01.	179
7.36	Rottura della trave per collasso delle fibre.	180
7.37	Grafici relativi alla prova di TRAVE_EP_L(5S)_02.	180
7.38	Rottura della trave per scorrimento delle fibre.	181
7.39	Grafici relativi alla prova di TRAVE_EPC_01.	182

7.40	Rottura per spaccatura netta del legno in corrispondenza degli appoggi.	182
7.41	Grafici relativi alla prova di TRAVE_EPC_02.	183
7.42	Rottura per spaccatura netta del legno in corrispondenza degli appoggi.	184
7.43	Carichi massimi ottenuti per ogni tipo di composito.	185
7.44	Flessioni massime ottenute per ogni tipo di composito.	185
8.1	Schema del percorso effettuato dal fascio luminoso nella modalità a luce riflessa.	188
8.2	Sezione di campione per osservazione al microscopio.	189
8.3	(a) FFRP(V); (b) FFRP; (c) CFRP; (d) GFRP.	190
8.4	Vuoti presenti in campioni di fibra di carbonio(a, b) e di vetro (c, d).	191
8.5	Scurimento della colla vinilica in seguito al condizionamento F3-140 °C.	192
8.6	(a, c) modalità a fresco; (b, d) modalità fuori tatto; sopra FFRP, sotto FFRP(V).	193
8.7	(a) tre strati; (b) quattro strati; (c) cinque strati.	193
8.8	Regione spettrale della radiazione elettromagnetica con espansione della regione IR (<i>Derrick et al., 1999</i>).	195
8.9	Tipi di vibrazione molecolari (<i>Skoog e Leary, 2000</i>).	196
8.10	Schema di uno spettrofotometro (<i>Allinger et al., 1981</i>).	197
8.11	Comparazione di uno spettro acquisito in modalità ATR e in riflessione.	198
8.12	Microprelievo.	199
8.13	Spettro infrarosso EP_F0.	199
8.14	Confronto degli spettri di resina epossidica.	201
8.15	Spettro infrarosso V_F0.	202
8.16	Confronto degli spettri di colla vinilica.	203
8.17	Configurazione 1.	209
8.18	Configurazione 2.	209
8.19	Campione verniciato.	210
8.20	Strumentazione utilizzata.	210
8.21	Campione Rinforzato con CFRP – configurazione 1.	212
8.22	Campione Rinforzato con GFRP – configurazione 1.	212
8.23	Campione Rinforzato con AFRP – configurazione 1.	212
8.24	Campione Rinforzato con FFRP – configurazione 1.	213
8.25	Campione Rinforzato con FFRP(V) – configurazione 1.	213
8.26	Campione Rinforzato con CFRP – configurazione 2.	214
8.27	Campione Rinforzato con GFRP – configurazione 2.	214
8.28	Campione Rinforzato con AFRP – configurazione 2.	215
8.29	Campione Rinforzato con FFRP – configurazione 2.	215
8.30	Campione Rinforzato con FFRP(V) – configurazione 2.	216

Elenco delle tabelle

1.1	Parametri di condizionamento.	5
2.1	Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione (valori indicativi) (CNR-DT 200/2004).	13
2.2	Confronto tra fibre naturali e di vetro (Wambu et al., 2003).	15
2.3	Composizione chimica percentuale di legni di conifera e latifoglie (Caneva et al., 2005).	25
2.4	Contenuto di umidità del legno in diversi ambienti (Amerio e Canavesio, 1999).	27
2.5	Valori medi della massa volumica (in kg/m ³) di alcune specie legnose, con contenuto di umidità pari al 12% (Amerio e Canavesio, 1999).	29
2.6	Variazioni del modulo di elasticità E (in N/mm ²) parallelamente alla fibratura, in dipendenza dell'umidità, a temperatura fra 10 e 20 °C (Amerio e Canavesio, 1999).	30
2.7	Alcune proprietà delle principali fibre vegetali desunte dagli studi di [1] Netravali e Chabba, 2003, [2] Wambua et al., 2003, [3] Dittenber e Ganga Rao, 2012, [4] Kalia et al., 2009.	34
2.8	Alcune proprietà e caratteristiche della fibra di lino dalla letteratura.	35
3.1	Confronto di alcune caratteristiche fisico-meccaniche del legno di abete rosso.	40
3.2	Combinazioni di fibre e matrici che costituiscono gli FRP oggetto di studio.	41
3.3	Composizione tipica delle fibre di vetro (% in peso) (CNR-DT 200/2004).	44
4.1	Combinazioni di fibre e matrici tra cui è stata effettuata la selezione dei materiali.	58
4.2	Combinazioni di fibre e matrici selezionate per la sperimentazione.	63
4.3	Condizioni standard di riferimento per i diversi materiali.	70
4.4	Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 0.	70
4.5	Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 1.	71
4.6	Parametri di condizionamento.	73
4.7	Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 2.	74
4.8	Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 3.	74
4.9	Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 4.	76
4.10	Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 5.	76
5.1	Valori delle prove di trazione di singoli fili di lino.	83
5.2	Confronto tra i dati ottenuti sperimentalmente e quelli tabulati.	84
5.3	Numero di prove di trazione di matrici per condizionamento.	84
5.4	Risultati delle prove di trazione.	90

5.5	Riepilogo delle prove di trazione assiale effettuate.	91
5.6	Modalità di rottura ottenute nelle prove di trazione assiale su campioni non condizionati.	96
5.7	Valori di carico, tensione e deformazione di FFRP(V), FFRP e CFRP.	98
5.8	Modulo elastico E calcolato in tre distinti intervalli.	98
5.9	Modalità di rottura ottenute nelle prove di trazione assiale su campioni non condizionati.	99
6.1	Numero di test di pull-off per classe di composito.	104
6.2	Numero di campioni e test di pull-off effettuati per fase di condizionamento.	105
6.3	Numero di rotture per tipo.	112
6.4	Valori di tensione per la fase 0.	115
6.5	Valori di tensione per la fase 0.	123
6.6	Valori di tensione per la fase 0.	130
6.7	Valori di tensione per la fase 0.	135
6.8	Numero di campioni e test di pull-off effettuati per fase di condizionamento.	140
6.9	Risultati delle prove di pull-off su campioni di FFRP(M).	140
6.10	Numero di test di pull-off per classe di composito e lunghezza di aderenza.	143
6.11	Numero di test di pull-off per classe di composito e fase di condizionamento.	143
6.12	Valori ottenuti nelle prove di shear test su FFRP.	146
6.13	Valori ottenuti nelle prove di shear test su FFRP(V).	146
6.14	Valori ottenuti nella nuova serie di prove di shear test.	147
7.1	Caratteristiche delle travi sottoposte a flessione.	156
7.2	Caratteristiche degli strumenti.	160
7.3	Intervalli dei cicli di carico (espressi in N).	164
7.4	Tempistica relativa alle prove di flessione.	164
7.5	Risultati delle prove di flessione.	165
7.6	Carichi massimi e flessioni ottenuti per ogni tipo di composito.	184
8.1	Incidenza di rotture B e C.	192
8.2	Energia e tipo di eccitazione dello spettro elettromagnetico (<i>Allinger et al., 1981</i>)	194
8.3	Provenienza dei campioni analizzati.	198

Introduzione

1.1 Inquadramento generale

Il legno è un materiale da costruzione di lunga storia applicativa. Molte strutture in legno, qualora adeguatamente progettate, realizzate e mantenute, risultano spesso ancora efficienti dopo secoli di utilizzo, necessitando di interventi di rinforzo solo quando – per lo più per il cambio di destinazione d’uso e le mutate esigenze di sicurezza - sono richieste prestazioni superiori rispetto a quelle che può offrire il materiale ligneo da solo. Per tale necessità di consolidamento sono state sperimentate negli anni numerose soluzioni, senza che nessuna venisse universalmente riconosciuta e adottata, nonostante non siano mancati anche risultati soddisfacenti.

Nella ricerca di tecniche e prodotti adeguati allo scopo, si è approdati allo studio dei materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica. Tali materiali, soprattutto grazie alla loro versatilità, sono già utilizzati efficacemente nelle tecniche di rinforzo di murature storiche e conglomerati cementizi.

Il ritardo nell’adozione dei fibrorinforzati anche negli interventi che riguardano elementi in legno è stata causata essenzialmente dalla mancanza di specifica normativa nel settore ed in parte anche dalla modesta fiducia riservata al legno come materiale strutturale, che ha determinato la limitazione dell’impiego di tale materiale solo in ambiti ristretti e circoscritte aree geografiche (*CNR-DT 201/2005*). Tuttavia in tempi recenti, questo materiale sta godendo

di rinnovato interesse nell'ingegneria costruttiva e ciò ha portato benefici anche nell'ambito del restauro architettonico, privilegiando il consolidamento alla sostituzione degli elementi in legno, qualora sia possibile, evitando di perdere in tal modo il valore storico ed a volte artistico dell'elemento.

Il sodalizio tra materiali compositi a matrice polimerica e legno, risulta particolarmente indicato, soprattutto perché la peculiare leggerezza del legno viene mantenuta a fronte di un consistente aumento della resistenza della struttura. Altrettanto evidenti sono le incompatibilità, primo fra tutte il diverso comportamento nei confronti delle variazioni delle condizioni ambientali, in termini di temperatura e umidità (CNR-DT 201/2005).

La necessaria sperimentazione dei prodotti per il restauro, quando essi siano di nuova formulazione o il loro utilizzo venga esteso a substrati mai trattati prima, ha sollevato numerosi punti interrogativi riguardo la durabilità dei materiali compositi applicati al legno, problematica che ha ricevuto limitata attenzione, rispetto ad altri materiali costruttivi.

Essendo l'uso di questi materiali di recente introduzione, rispetto a tecniche e materiali considerate efficaci e frequentemente utilizzati, essi sono in costante evoluzione.

Data la crescente preoccupazione per l'esaurimento delle risorse petrolifere e una nuova sensibilità rispetto al concetto di sostenibilità, insieme alle recenti normative ambientali è stata promossa la ricerca di nuovi materiali e processi compatibili con l'ambiente anche nell'ambito dei compositi fibrorinforzati (Netravali e Chabba, 2003), ampliando il fronte di studio di tali prodotti.

Recentemente, nel confezionamento dei materiali compositi, sono state introdotte fibre naturali di origine vegetale, (tra cui cotone, canapa, lino, juta) la cui sperimentazione è appena agli inizi. Alcuni studi sulla validità di questi materiali innovativi hanno evidenziato i vantaggi rispetto alle fibre di uso comune, quali vetro, carbonio ed arammide. Le fibre naturali sono biodegradabili, rinnovabili e riciclabili, non sono tossiche e la loro produzione richiede minore energia e costi ridotti; inoltre ne esiste una vasta gamma con caratteristiche chimico-fisiche e prestazioni meccaniche diverse, adattabili a numerosissime applicazioni (Maya e Sabu, 2008).

Risulta però di fondamentale importanza non sottovalutare gli altrettanti aspetti critici che i prodotti naturali mostrano, come la scarsa bagnabilità, l'incompatibilità con alcune matrici polimeriche, l'alto assorbimento di umidità e la problematica adesione fibra-matrice (Wambua et al., 2003). Le fibre vegetali sono inoltre poco resistenti al calore (Sgriccia et al., 2008) e la loro origine naturale le rende facilmente attaccabili da agenti biodeteriogeni (Caneva et al., 2005), problema evidente anche per compositi da esse derivati (Dittenber e Ganga Rao, 2012).

Alla luce di quanto evidenziato appare quindi necessario focalizzare l'attenzione sull'analisi di fenomeni fondamentali quali l'aderenza fibra-matrice e composito-legno e la durabilità e compatibilità dei materiali compositi naturali.

1.2 Obiettivi del lavoro

L'obiettivo principale di questa ricerca è indagare la compatibilità e la durabilità da un punto di vista meccanico di alcuni materiali compositi naturali di recente introduzione per il rinforzo degli elementi in legno appartenenti a strutture di interesse storico-artistico e validare la loro efficacia mediante confronto con i materiali compositi comunemente già utilizzati.

Tra i prodotti esistenti in commercio sono state selezionate una fibra di origine vegetale e due matrici, nello specifico si tratta della fibra di lino impregnata sia con la classica resina epossidica sia con l'innovativa – da un punto di vista applicativo – colla vinilica. Essa, ampiamente utilizzata nel settore del legno è stata scelta per proporre un'alternativa alla resina epossidica, poiché pur non risultando una matrice biodegradabile, mostra numerosi aspetti interessanti anche dal punto di vista ecologico. Chiamata anche colla del falegname, la compatibilità della vinilica con il legno è un fatto assodato, inoltre è atossica, necessita solo di acqua per la pulizia degli strumenti, non contiene solventi essendo in base acquosa ed è facilmente reperibile ed economica. Sono state altresì studiate le fibre tradizionali di carbonio e vetro, anch'esse impregnate con matrice epossidica.

La ricerca si è articolata in tre parti, ossia (i) la definizione di un protocollo operativo specifico il più possibile ripetibile mediante consultazione della letteratura esistente e lo studio del comportamento dei singoli costituenti e dei materiali compositi e la loro interazione con l'ambiente, (ii) indagini in laboratorio del fenomeno di aderenza, mediante analisi meccaniche e chimico-fisiche ed infine (iii) analisi dei fenomeni rilevati al fine di contribuire alla comprensione degli aspetti di compatibilità e durabilità di tali materiali.

Gli interrogativi cui si è cercato di dare una risposta sono essenzialmente:

- (i) Quali sono i limiti applicativi dei materiali compositi naturali selezionati?
- (ii) Quali sono i requisiti che deve avere il legno affinché sia efficace un intervento di rinforzo con i materiali compositi naturali?
- (iii) In quali condizioni ambientali è garantito il perdurare dell'intervento di rinforzo con i materiali compositi naturali e quali invece ne causano un rapido degrado?

(iv) I materiali compositi naturali rappresentano una valida alternativa a quelli tradizionali?

Nella prima parte, quella di analisi dello stato dell'arte sono emerse le criticità più frequenti nell'utilizzo di materiali compositi applicati ad un substrato di natura organica come il legno, che ben si distingue da altri materiali costruttivi già sottoposti a rinforzo con compositi fibrorinforzati.

Le problematiche nell'ottenere una buona adesione composito-legno e nel garantire la durata sia del materiale composito sia dell'intervento di rinforzo nel suo complesso sono legate principalmente a fattori quali l'umidità e la temperatura ambientali ed il contenuto di acqua del substrato. Alla luce di ciò è stato stilato un programma sperimentale, determinando in che modo replicare in laboratorio quelle condizioni reali di temperatura, umidità e contenuto d'acqua che possono potenzialmente rappresentare delle limitazioni nei termini sopra citati e selezionando le metodologie più idonee per analizzare le questioni fin qui sollevate e rispondere agli interrogativi posti.

I parametri di condizionamento scelti per ricreare artificialmente in laboratorio specifiche condizioni ambientali sono state molteplici, quindi per semplicità sono stati raggruppati in "fasi di condizionamento", in ognuna delle quali sono state mantenuti fissi alcuni parametri e variati altri. Ogni fase ha avuto l'obiettivo di indagare una specifica problematica, ossia:

Fase 0 - Condizioni standard di riferimento;

Fase 1 - Influenza di elevati contenuti di umidità nel legno sulla riuscita dell'adesione dei materiali compositi (solo in questo caso il supporto in legno è stato condizionato prima dell'applicazione degli FRP);

Fase 2 - Valutazione degli effetti combinati di umidità relativa e temperatura sulla durabilità materiali compositi e sulla loro adesione al legno;

Fase 3 - Valutazione degli effetti causati dall'esposizione a riscaldamento sulla durabilità materiali compositi e sulla loro adesione al legno;

Fasi 4 e 5 - Valutazione degli effetti causati da una prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità sulla durabilità materiali compositi e sulla loro adesione al legno.

In *tabella 1.1* sono riportati più in dettaglio i parametri di condizionamento selezionati, le simbologie adottate è T = temperatura ambientale, RH = umidità relativa ambientale e MC = contenuto d'acqua nel legno, quest'ultimo è stato segnato tra parentesi perché valido solo per indagare l'adesione composito-legno.

Le fasi 4 e 5, apparentemente identiche, variano per la durata di mantenimento delle specifiche condizioni.

Tabella 1.1: Parametri di condizionamento.

	Parametri fissi	Parametri variabili	Fenomeno indagato
Fase 0	T=22±4 °C; RH=64±10% (MC = 10 ± 2%)	-	Caratteristiche materiali di base; adesione; efficacia meccanica
Fase 1	T=22±4 °C; RH=64±10%	MC=20±2%, 30±2%, 40±2%	Adesione
Fase 2	(MC=10±2%)	T e RH variate ciclicamente	Caratteristiche materiali di base; adesione
Fase 3	RH<30%; (MC=10±2%)	T=50±4, 60±4, 80±4, 100±4, 120±4, 140±4 °C	Caratteristiche materiali di base; adesione
Fasi 4 e 5	T=22±4 °C	MC=20±2%, 30±2%, 40±2%; RH dipendente da MC	Caratteristiche materiali di base; adesione

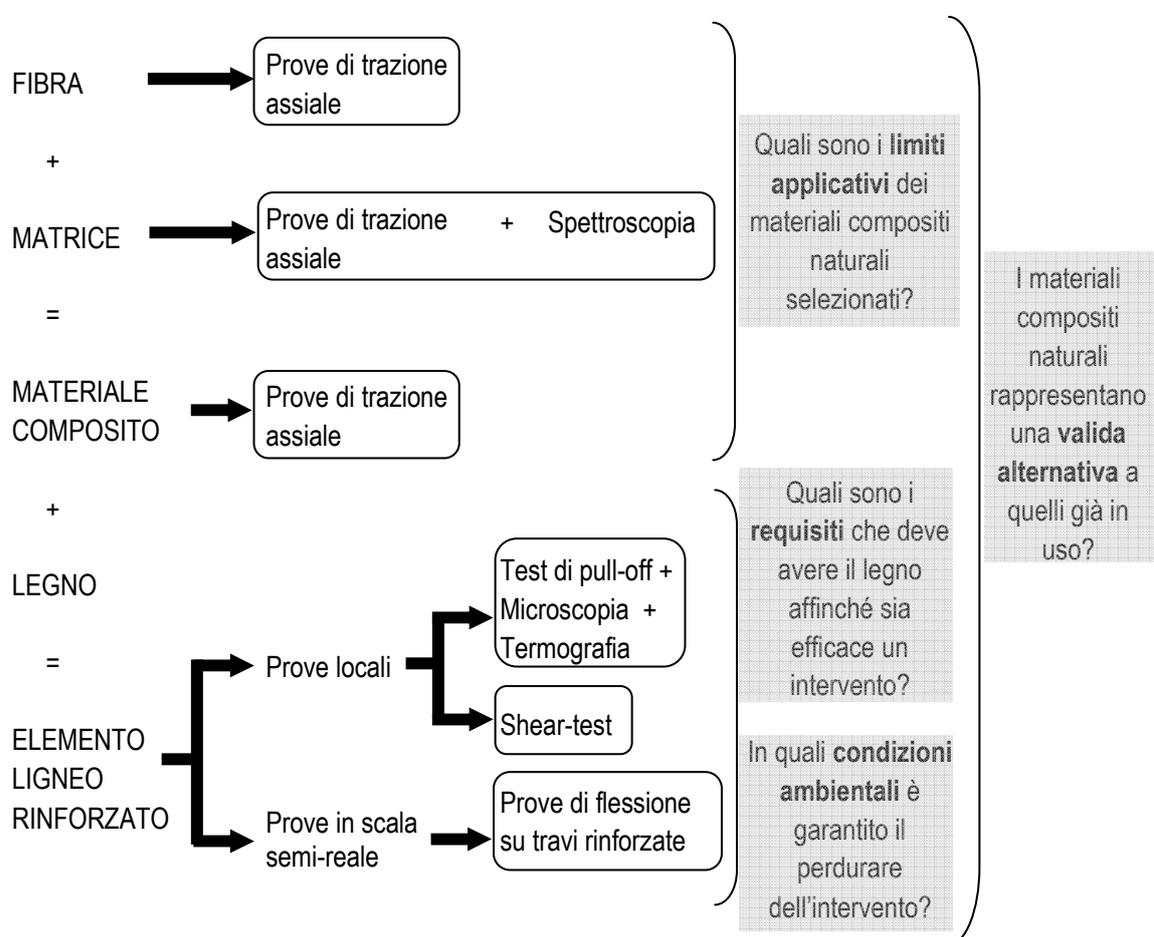


Figura 1.1: Metodologie sperimentali.

Le metodologie selezionate allo scopo di quantificare in che misura tali parametri siano rilevanti sono state molteplici ed hanno permesso un'analisi complessiva dal dettaglio fino agli aspetti più generali (figura 1.1).

1.3 Organizzazione della tesi

La tesi si presenta strutturata in nove capitoli e può essere divisa in due macroaree. I primi quattro capitoli hanno lo scopo di presentare ampiamente le problematiche di studio, i materiali selezionati e le metodologie adottate, i restanti mirano a presentare la ricerca sperimentale condotta ed i risultati cui si è approdati.

Nel secondo capitolo viene introdotta la questione del restauro, attraverso un breve percorso storico-normativo, in cui si delinea la tendenza assunta nell'ambito della conservazione dei beni culturali e viene proposta una panoramica più specifica sugli studi sperimentali sin qui prodotti che maggiormente hanno influenzato questo lavoro, sono state inoltre presentate le caratteristiche peculiari e le problematiche dei materiali oggetto di studio.

Nel terzo capitolo vengono discussi specificatamente i materiali utilizzati.

Il quarto capitolo costituisce la presentazione dell'intero programma sperimentale: sono proposti i parametri di condizionamento scelti per ricreare artificialmente in laboratorio critiche condizioni ambientali che possono compromettere l'efficacia di un intervento di rinforzo e le metodologie investigative selezionate per indagare i fenomeni di interesse.

I capitoli seguenti presentano in dettaglio quella che è stata l'attività di laboratorio, dall'analisi degli elementi costitutivi, al comportamento in scala semi-reale di elementi in legno rinforzati.

Nel quinto capitolo sono presentate le prove di caratterizzazione dei singoli materiali studiati, ossia le fibre, le matrici e i materiali compositi con esse prodotti (prove di trazione assiale).

Il sesto capitolo tratta il fenomeno di aderenza composito-legno, analizzato mediante prove di strappo (test di pull-off) e di taglio (shear test).

Le prove in scala semi-reale di flessione su travi fibrorinforzate sono proposte nel settimo capitolo.

Sono stati anche utilizzati test chimico-fisici non-distruttivi o semi-distruttivi, per validare e approfondire i risultati ottenuti nelle prove già menzionate, discussi nell'ottavo capitolo, infine nell'ultimo vengono riepilogate le conclusioni cui si è giunti.

Stato dell'arte

2.1 Restauro: carte, norme e convenzioni

Il concetto di restauro dei monumenti è un traguardo moderno, legato all'interesse del manufatto, ma anche ad una acquisita sensibilità storico-artistica.

Nel passato, mancando una coscienza dell'opera d'arte, gli interventi hanno avuto esclusivamente carattere pratico, finalizzati ad un miglioramento della funzionalità o alle modifiche richieste da nuove esigenze d'uso. In epoca cristiana parte del patrimonio antico è stato distrutto perché testimonianza di un passato retaggio pagano e parte è stato rimaneggiato per divenire o arricchire edifici sacri.

Tra il Medioevo e il Rinascimento si continuano a praticare pesanti rifacimenti e adattamenti delle opere del passato, ma nel 1462 papa Pio II impone un veto al riutilizzo dei materiali di edifici esistenti per nuove costruzioni: i primi passi verso una concezione del passato come bene da salvaguardare (*Amoroso, 2002*).

I primi interventi volti a valorizzare un monumento non solo per una migliore funzionalità, ma anche perché elemento d'arte e avente valenza storica, iniziano nel periodo neoclassico. A questo periodo risalgono i primi scavi ad Ercolano e Pompei, nonché la spedizione napoleonica in Egitto; ma soprattutto nella neonata repubblica francese nasce la prima, embrionale legislazione sul restauro. Le attività di questo periodo vengono indicate con il termine *restauro empirico*, per la quasi totale mancanza di teorie al riguardo.

Nel periodo seguente, tra la metà del XIX e i primi decenni del XX secolo dominano due tendenze opposte, opera di due teorici stranieri.

La teoria di **Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc** (1814-1879) ha il suo cardine nella volontà di riportare l'opera alla purezza stilistica del progetto originale dell'artista (da cui il nome *restauro stilistico*). Le parti del primitivo organismo di un edificio antico vanno conservate ed integrate, qualora mancanti, mentre quelle risalenti ad epoche posteriori vanno distrutte. Le integrazioni vengono effettuate indipendentemente da una loro reale pre-esistenza, per similitudine con elementi dell'edificio stesso o con altri edifici coevi o analoghi. Secondo tale criterio sono stati eseguiti numerosi interventi in Francia, ma anche in Italia, come il completamento della facciata incompiuta di S. Maria del Fiore a Firenze (Emilio de Fabris, 1875-1887) o il rifacimento stilistico della già compiuta facciata di S. Babila a Milano (Paolo Cesa - Bianchi, 1905).

Di contro si trova la teoria del non intervento di **John Ruskin** (1819-1900), secondo cui l'attività del restauratore va ridotta al minimo, lasciando il monumento alla sua naturale morte, pur continuando una costante pratica di manutenzione (*restauro romantico*) (Perogalli, 1977).

Verso la fine del XIX secolo si è fatta strada una nuova posizione, ancora legata al principio dell'intervento ampio e massiccio tipico del restauro stilistico, ma che abbandona il criterio di ricavare la forma degli elementi per analogia. Il principale sostenitore di questa ideologia del *restauro storico* è **Luca Beltrami** (1854 - 1933), gli interventi devono fondarsi su testimonianze certe, derivate da fonti letterarie o iconografiche (Bonelli, 1977).

A partire dal secolo scorso il dibattito sul restauro si è quindi fatto sempre più intenso e vivace, le carte, le norme e le convenzioni che sono state redatte per sancire i principi fondamentali e per regolamentare l'attività di restauro e conservazione sono numerose, alcune particolarmente significative perché enunciano principi e raccomandazioni innovativi. Nel panorama internazionale spiccano in particolare la Carta di Atene, l'atto di fondazione dell'UNESCO, la Carta del Restauro di Venezia ed infine la Dichiarazione di Washington.

La **Carta di Atene** (1931) raccomanda la continua occupazione degli edifici di interesse, affinché questo ne favorisca la sopravvivenza, purché la nuova destinazione d'uso rispetti le peculiarità e il valore storico-artistico dell'opera stessa. Il restauro deve avvenire solo qualora si riveli assolutamente indispensabile e deve rispettare il valore dell'opera in tutte le sue parti, anche quelle di altra epoca. Per la prima volta viene auspicata la multidisciplinarietà degli interventi di restauro, a cui dovrebbero partecipare conservatori e architetti, insieme ad esperti delle scienze fisiche, chimiche e naturali (Amoroso, 2002).

L'**UNESCO** (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura) è una delle istituzioni intergovernative in cui è articolata l'Organizzazione delle Nazioni Unite (ONU). La fondazione formale avviene a Parigi nel 1946, naturale conseguenza dell'Atto costitutivo redatto e accettato da una ventina di paesi l'anno precedente a Londra, durante una conferenza organizzata per invito dei Governi di Gran Bretagna e Francia [2]. La Conferenza di Londra si riunisce quando ancora la II Guerra Mondiale non è terminata, ma già sono evidenti nel settore culturale le perdite considerevoli che essa ha provocato: monumenti distrutti, opere d'arte e biblioteche bruciate o saccheggiate, perdite insanabili per il patrimonio artistico mondiale (*Gazzola, 1977*).

La Carta internazionale sulla conservazione ed il restauro dei monumenti e dei siti (**Carta del Restauro di Venezia**) del 1964 sottolinea l'interdisciplinarietà che deve caratterizzare un intervento di restauro. Nel caso di utilizzo di innovativi metodi di conservazione, l'efficienza deve necessariamente essere dimostrata da dati scientifici (*Amoroso, 2002*).

La Carta internazionale per la salvaguardia delle città storiche, anche detta **Dichiarazione di Washington**, nasce nel 1987 a completamento della Carta del Restauro di Venezia (1964) e pone come obiettivo la tutela delle città storiche, che può esplicarsi solo attraverso il coinvolgimento della popolazione residente (*Amoroso, 2002*). Gli interventi su aree storiche devono essere attuati con metodo e rigore, la pianificazione deve derivare da studi multidisciplinari e deve comprendere l'analisi delle evidenze archeologiche, storiche ed architettoniche, senza tralasciare gli aspetti più tecnici, sociologici ed economici. Il tutto finalizzato a definire un'articolazione armoniosa dei quartieri storici nell'insieme della città.

Anche l'attività a livello nazionale risulta particolarmente fervente, già nel 1883 con la **Prima Carta del Restauro**, Camillo Boito enuncia i principi di quello che diverrà il restauro inteso in senso moderno, estrapolando e rielaborando alcuni punti fondamentali delle dottrine del restauro stilistico, romantico e storico che fino ad allora avevano animato il dibattito internazionale. I punti cardine del suo pensiero sono essenzialmente quattro, ossia (i) l'importanza dei monumenti quali documenti della storia dei popoli, la cui alterazione può causare errate deduzioni sul passato; (ii) la preferenza del consolidamento alla riparazione ed al restauro; (iii) l'ammissibilità di aggiunte solo se necessarie e purché siano distinguibili dal monumento originale, ma al contempo in armonia con esso; ed infine (iv) la considerazione di elementi aggiunti in seguito come parte integrante del monumento (*Bonelli, 1977*).

Nel 1931, lo stesso anno dell'internazionale Carta di Atene, il Consiglio Superiore per le Antichità e Belle Arti emana la **Carta del Restauro Italiana**, che espone la teoria di Camillo Boito e Gustavo Giovannoni. I concetti fondamentali sono l'assoluta importanza delle opere di

manutenzione e consolidamento, che possono esplicitarsi attraverso il ripristino solo qualora sia innegabile la legittimità nonché l'utilità di tale intervento. Le aggiunte di elementi, qualora necessarie, devono essere evidenziate con diversità di materiale rispetto a quello di origine o segnalate in altro modo. La destinazione d'uso dei monumenti, nel caso di riutilizzo, non deve essere troppo diversa da quella iniziale, al fine di evitare evidenti alterazioni dell'opera a causa degli adattamenti necessari (*Giovannoni, 1977*). Le **Istruzioni per il restauro dei monumenti** (1938) ad opera del Ministero della Pubblica Istruzione sanciscono per la prima volta l'arbitrarietà della demolizione e ricostruzione in altro luogo di un monumento, che può causare un'alterazione dei rapporti spaziali e ambientali e viene richiamata l'attenzione sul carattere troppo retorico e scenografico di talune "valorizzazioni" di edifici monumentali (*De Angelis D'Ossat, 1977*).

In seguito ad una complessa riflessione riguardo la necessità in Italia di un modello organizzativo e metodologico multidisciplinare innovativo, l'**Istituto Centrale del Restauro** viene istituito nel 1939 a Roma su progetto di Giulio Carlo Argan e Cesare Brandi, primo direttore. Nel 1942 viene avviata l'innovativa scuola per l'insegnamento del restauro, rivoluzionando la vecchia concezione del restauratore - artigiano.

La **Carta Italiana del Restauro** (1972) riguarda la salvaguardia ed il restauro delle antichità; la condotta dei restauri architettonici; l'esecuzione dei restauri pittorici e scultorei e la tutela dei centri storici. Aspetto fondamentale della carta è la raccomandazione all'utilizzo di materiali e tecniche il più reversibili possibile, affinché sia possibile effettuare ulteriori interventi di restauro nel futuro; vengono inoltre proibiti invasivi come il completamento analogico, il ricollocamento in altri luoghi o la rimozione di elementi conseguenti alla creazione dell'opera che ormai ne sono parte integrante (*Carunchio, 1996*). Due anni dopo l'emanazione di tale documento viene istituito il **Ministero per i beni culturali e per l'ambiente**. Con il decreto-legge 14 dicembre 1974, n. 657 viene sancita dal governo italiano l'indipendenza organizzativa ed economica per le funzioni relative alla conservazione, divulgazione e ricerca in ambito culturale. Si forma perciò un dicastero autonomo per i beni culturali, scindendo le competenze specifiche e relative ai beni culturali dal ministero della pubblica istruzione.

Nonostante la vastità e la diversificazione delle tematiche affrontate dai documenti redatti sia in ambito internazionale che nazionale, manca quasi completamente la trattazione di questioni, come la reversibilità e la durabilità degli interventi, che sono ormai parte integrante della ricerca nel settore conservativo. Il tema della durabilità viene affrontato, seppur in maniera superficiale nei documenti redatti dal Comitato Nazionale per la Prevenzione del Patrimonio Culturale dal Rischio Sismico, ossia le Raccomandazioni per gli

interventi sul patrimonio monumentale a tipologia specialistica in zone sismiche del 1986 e le Istruzioni generali per la relazione dei progetti di restauro nei beni architettonici di valore storico-artistico in zona sismica del 1996.

Gli interventi sul patrimonio monumentale sono stati numerosi a seguito degli eventi sismici distruttivi del Friuli e della Campania e Basilicata, nonché di altri eventi meno violenti ma pur sempre dannosi. Le raccomandazioni del 1986 evidenziano le notevoli difficoltà di intervento legate a diversi fattori tra cui l'intrinseca delicatezza dei monumenti interessati e alla poca chiarezza normativa, aggravata dall'assenza di modelli di calcolo e verifica validi per il patrimonio culturale. Si è inoltre evidenziato il conflitto tra le esigenze di conservazione e la protezione del costruito e delle vite umane. La soluzione proposta è l'attuazione di interventi sul patrimonio monumentale mirati al miglioramento tramite un aumento di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche senza però essere rigidamente vincolati dalle verifiche formali previste per le nuove costruzioni. Si auspica inoltre un rigoroso e sistematico approccio interdisciplinare in tutte le fasi progettuali a seguito di un'attenta ricostruzione della storia sismica del manufatto ed il ricorso a tecniche e materiali il più possibile vicini agli originali. Le Istruzioni del 1986 mirano a fornire indicazioni per un'idonea progettazione degli interventi di restauro nei beni architettonici di valore storico-artistico esistenti in zona sismica. Vengono regolamentati gli interventi di miglioramento e di adeguamento antisismico, al fine di salvaguardare l'identità estetica e storica del complesso edilizio, riducendo al minimo l'introduzione di elementi estranei e stravolgenti rispetto la configurazione storico-architettonica.

2.2 Introduzione dei materiali compositi per il rinforzo di elementi in legno nel consolidamento delle strutture

La sensibilità e la coscienza alle problematiche della conservazione dei beni culturali si è formata nel tempo come dimostrato dalle numerose carte e convenzioni che hanno trovato stesura nell'ultimo secolo. Ciononostante la reale attuazione di tutti i provvedimenti auspicati per garantire la salvaguardia del nostro patrimonio storico-culturale non è progredita con la stessa velocità con cui sono stati stilati i suddetti documenti.

In particolare gli eventi naturali, primi tra tutti i terremoti, che hanno caratterizzato la storia italiana dell'ultimo cinquantennio hanno messo in evidenza la necessità di mettere in atto una serie di interventi che non solo rallentino l'avanzare del tempo sulle strutture architettoniche,

ma che le rendano adeguatamente protette da episodi gravi come un sisma. Le tecniche di rinforzo testate ed adottate negli anni per l'adeguamento ed il consolidamento delle strutture esistenti sono state molteplici, soprattutto per la varietà di elementi costruttivi che richiede ciascuno uno specifico approccio ed una metodologia dedicata.

L'adozione applicativa dei materiali compositi a matrice polimerica (altrimenti detti FRP) quale metodologia di rinforzo statico è apparsa assai attrattiva in quei contesti in cui il peso della struttura ha costituito un elemento di rilevanza nella buona riuscita dell'intervento (CNR-DT 200/2004).

Già noti e studiati nell'immediato dopoguerra in ambito spaziale ed aeronautico, gli FRP sono entrati nella vita quotidiana di tutti grazie al loro impiego nei settori dell'automobili e dello sport (Minguzzi, 1998), fino ad arrivare in tempi recenti a costituire un elemento costruttivo a sé stante.

Questi materiali, in virtù delle loro caratteristiche di leggerezza, alta resistenza e costi sempre più accessibili, sono ormai ritenuti valide alternative agli interventi tradizionali per il consolidamento del patrimonio edilizio. L'interesse scientifico che queste innovative applicazioni hanno destato, hanno motivato l'avvio di numerose campagne investigative mirate a determinare l'effettiva efficacia degli interventi e la loro durabilità (Borri e Castori, 2009).

2.3 Materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (Fiber Reinforced Polymers – FRP)

L'utilizzo di mattoni di argilla rinforzati con paglia nell'antichità rappresenta un primitivo esempio di uso di materiali compositi, poiché i due elementi insieme hanno concorso allo scopo, che non avrebbero raggiunto separatamente (Kaw, 2006).

Con il termine materiale composito si indica una *“miscela di due o più componenti che, pur conservando ciascuno la propria identità chimica, contribuiscono mutuamente a fornire proprietà meccaniche e fisiche complessivamente molto superiori a quelle dei singoli elementi come entità separate”* (Fonseca e Pirollo, 1994).

I costituenti principali sono essenzialmente due, ossia la fase fibrosa (il rinforzo) e la fase continua (la matrice). La prima ha lo scopo di sopportare le sollecitazioni, quindi determina maggiormente le prestazioni meccaniche del materiale composito, la seconda trasferisce gli sforzi al rinforzo e lo mantiene nella posizione voluta, proteggendolo dagli agenti esterni

(Minguzzi, 1998). I vantaggi che maggiormente hanno determinato il largo impiego nel consolidamento e nel rinforzo delle strutture dei materiali compositi sono la leggerezza, le elevate proprietà meccaniche e le caratteristiche anticorrosive. Essi sono molto versatili poiché disponibili in diverse geometrie ed in tessuti che possono essere facilmente adattati alla forma dell'elemento da rinforzare prima della fase di impregnazione (CNR-DT 200/2004). I materiali compositi possono essere classificati secondo la geometria del rinforzo (particolato, scaglie o fibre) o più frequentemente secondo il tipo di matrice: (i) di carbonio, (ii) cementizia, (iii) ceramica, (iv) metallica e (v) polimerica (Kaw, 2006). I materiali utilizzati nel presente studio sono compositi a matrice polimerica con rinforzo fibroso, chiamati anche FRP, dalla dicitura inglese **Fiber Reinforced Polymers**, presentati in dettaglio successivamente.

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

	Modulo di elasticità normale	Resistenza a trazione	Deformazione a rottura	Coefficiente di dilatazione termica	Densità
	E	σ_r	ϵ_r	α	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 – 5,4	2,5 – 2,6
Fibre di vetro S	85 – 90	3500 – 4800	4,5 – 5,5	1,6 – 2,9	2,46 – 2,49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0,5 – 0,8	-1,45	1,85 – 1,9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1,6 – 1,73	-0,6 – -0,9	1,75
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1,9 – 5,5	-2	1,44 – 1,47
Matrice polimerica	2,7 – 3,6	40 – 82	1,4 – 5,2	30 – 54	1,10 – 1,25
Acciaio da costruzione	206	250 – 400 (snervamento) 350 – 600 (rottura)	20 – 30	10,4	7,8

Come già evidenziato in precedenza, l'utilizzo più o meno consapevole di materiali compositi avviene dall'antichità, ma è nell'immediato dopoguerra che lo studio degli FRP ha trovato una forte spinta soprattutto nello sviluppo dei settori spaziale ed aeronautico. In breve tempo gli evidenti vantaggi, soprattutto in termini di rapporto resistenza/peso hanno favorito l'introduzione degli FRP anche in altri settori, quali quello delle automobili e delle attrezzature sportive, che hanno permesso che i compositi a matrice polimerica trovassero largo impiego anche nella vita quotidiana (Minguzzi, 1998). I materiali compositi risultano particolarmente attrattivi soprattutto in quei casi in cui il peso della struttura sia rilevante grazie alla loro resistenza specifica (resistenza/densità) che può assumere valori fino a quattro volte superiori rispetto a quelli esibiti dai materiali tradizionali ed il loro modulo di elasticità normale specifico (modulo/densità) fino al doppio (tabella 2.1).

Per ottenere un composito ad elevata resistenza meccanica è anche indispensabile garantire una buona adesione tra la matrice ed il rinforzo. L'aderenza è favorita dall'utilizzo di una terza componente (detta anche interfase), che rende la fibra maggiormente compatibile con la matrice organica (figura 2.1). L'interfase normalmente riveste la superficie del rinforzo (per uno spessore monoatomico) e pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali del composito, risulta fondamentale per la buona collaborazione tra matrice e fibre garantendo il successo del sistema complessivo nelle applicazioni strutturali (CNR-DT 200/2004).

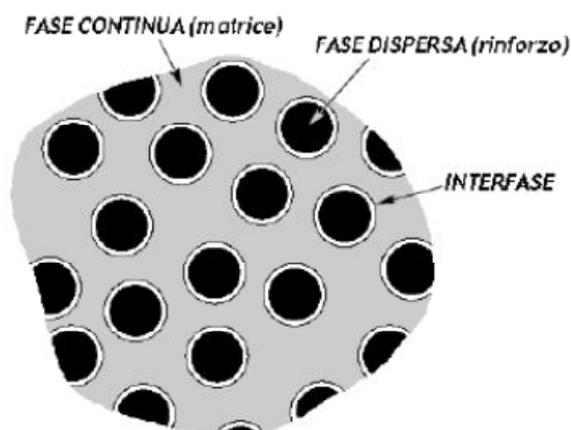


Figura 2.1: Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito (CNR-DT 200/2004).

Le fibre e relativi compositi che hanno trovato maggiore utilizzo sono quelle di carbonio, vetro e arammide, applicate con matrice polimerica (Minguzzi, 1998).

La maggior parte dei prodotti utilizzati per il confezionamento dei materiali compositi sono derivati del petrolio, quindi non degradabili per decenni in condizioni ambientali normali e ricavati da una risorsa in esaurimento. Questo aggrava i problemi ecologici e ambientali già esistenti, con un numero sempre crescente di applicazioni di tali materiali, lo smaltimento dopo la loro durata di vita prevista sta diventando critico e costoso. Poiché gli FRP sono formati da costituenti dissimili tra loro non possono essere facilmente riciclati o riutilizzati e la maggior parte finisce nelle discariche o negli inceneritori dopo l'uso, due alternative costose ed inquinanti. Recentemente una rinnovata sensibilità ambientale unita ad una crescente preoccupazione per l'esaurimento delle risorse petrolifere ha favorito la ricerca di nuovi prodotti e processi compatibili con l'ambiente. I materiali compositi non fanno eccezione a questo nuovo paradigma di 'chimica verde'. L'introduzione di fibre vegetali biodegradabili e rispettose dell'ambiente è stata una scelta naturale per rendere "verde" i materiali compositi (*tabella 2.2*); inoltre la disponibilità mondiale di fibre a base vegetale a basso costo ha, in parte, alimentato il loro utilizzo negli ultimi anni (*Netravali e Chabba, 2003*).

Tabella 2.2: Confronto tra fibre naturali e di vetro (Wambu et al., 2003).

	Fibre naturali	Fibre di vetro
Densità	Bassa	Doppia rispetto alle fibre naturali
Costo	Basso	Basso, ma superiore rispetto a quello delle fibre naturali
Rinnovabilità	Sì	No
Riciclabilità	Sì	No
Consumo di energia	Basso	Alto
Distribuzione	Ampia	Ampia
CO₂ neutralità	Sì	No
Abrasione dei macchinari	No	Sì
Rischi per la salute in caso di inalazione	No	Sì
Smaltimento	Biodegradabile	Non biodegradabile

Con l'affermarsi di nuovi prodotti sempre più eco-friendly è necessario fare alcune specificazioni: con la dicitura **materiale composito naturale** o **NaturalFRP - NFRP** si intende generalmente un materiale composito costituito da una fibra naturale legata a qualsiasi tipo di matrice polimerica (termoplastica o termoindurente, naturale o sintetica), mentre i **compositi completamente biodegradabili** o **biocompositi** si riferiscono a fibre naturali in matrici biodegradabili.

Uno dei principali fattori che frenano lo sviluppo dei biopolimeri è il loro costo, essi infatti sono più costosi dei tradizionali compositi derivati dal petrolio, per questo sono maggiormente diffusi compositi naturali semi-smaltibili (spesso solo attraverso incenerimento) il cui ciclo di vita è comunque soddisfacente (*Wambua et al., 2003*). Un'alternativa all'incenerimento dei materiali compositi da smaltire è la loro macinazione in particolati destinati ad essere utilizzati come rinforzi eco-friendly nelle malte polimeriche (*Grozdanov et al., 2010*).

Sebbene inizialmente i compositi si differenziassero più frequentemente per il tipo di matrice, come già specificato, recentemente si è reso necessario la differenziazione per tipo di fibra (*figura 2.2*).

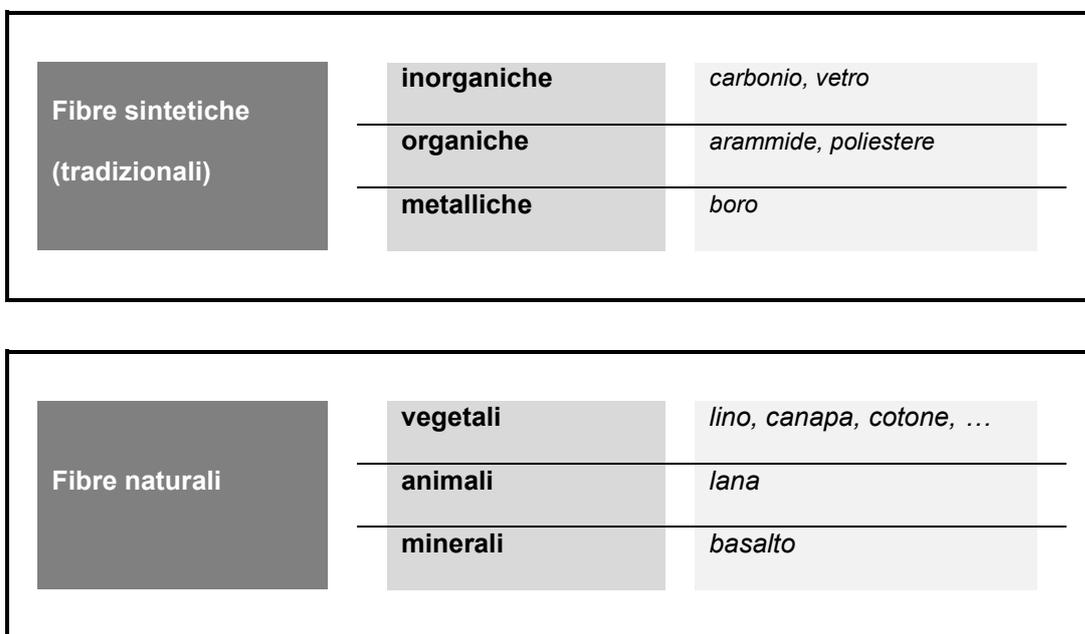


Figura 2.2: Differenziazione dei tipi di fibra.

2.3.1 Fibre sintetiche

Il rinforzo è la parte del composito che sopporta le sollecitazioni ed è costituito da fibre, entità multiple diffuse all'interno della matrice.

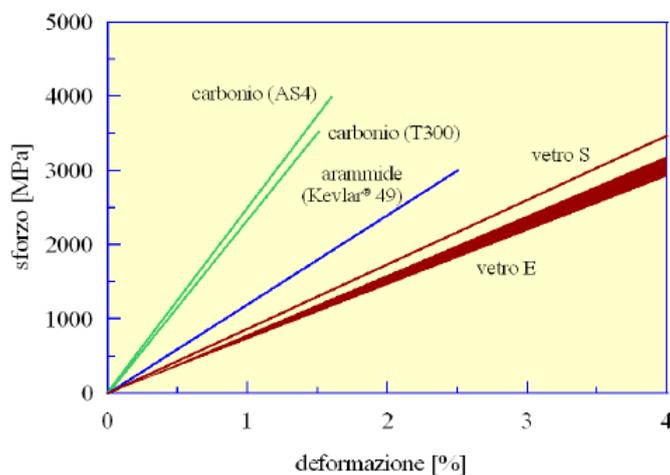


Figura 2.3: Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale (CNR-DT 200/2004).

Le fibre presenti in commercio sono varie e si differenziano per materiale costituente, per lunghezza e per forma. I prodotti più utilizzati sono le fibre di vetro, di carbonio e di arammide. La loro geometria filiforme le rende molto versatili e il diverso materiale di base conferisce loro diverse proprietà meccaniche (figura 2.3).

2.3.2 Fibre naturali

Le fibre naturali si suddividono in base alla loro provenienza, ossia vegetale, animale o minerale. Le fibre vegetali, indipendentemente dalla pianta di derivazione sono materiali a base di cellulosa e quelle animale a base di proteine (Maya e Sabu, 2008).

Storicamente non è noto con precisione quando l'uomo iniziò ad utilizzare fibre vegetali o animali nella produzione di manufatti, le fibre tessili più antiche giunte sino a noi risalgono al V millennio a.C. e provengono dall'Egitto. Queste fibre, ottenute dalla pianta di lino, erano utilizzate nei bendaggi delle mummie, per l'abbigliamento e per vele e cordami delle imbarcazioni. I reperti più antichi di cotone, invece, risalgono al IV-III millennio a.C. e provengono da scavi nella valle dell'Indo, nell'attuale Pakistan. Sebbene già note a

popolazioni quali Fenici e Babilonesi, l'introduzione di queste fibre tessili in Europa avvenne intorno al 350 a.C. ad opera degli Arabi, che le diffusero in Grecia. In epoca medievale la coltivazione di lino e cotone si estese a tutta l'Europa, sebbene la produzione di tessuti tessili in lino rimase quella prevalente fino all'inizio del XIX secolo, quando il cotone da merce di pregio divenne un prodotto di massa (Caneva et al., 2005).

Recentemente le fibre naturali hanno destato interesse per il loro utilizzo nel confezionamento di materiali compositi grazie alla loro relativa economicità, alla possibilità di essere riciclate ed infine al fatto che sono competitive in termini di rapporto resistenza/peso (Maya e Sabu, 2008).

Le fibre vegetali

Le fibre vegetali possono essere ottenute dal fusto, dalle foglie o dai semi delle piante di origine. Quelle che si ricavano dal fusto vengono anche chiamate *fibre liberiane*, tra cui si annoverano il lino, la canapa e la juta. Le fibre derivate dalle foglie sono generalmente più grossolane rispetto a quelle del fusto, le più comuni sono la sisal e la cosiddetta canapa di Manila (estratte rispettivamente dall'agave e dall'abacà), la prima utilizzata nella produzione di corde e prodotti tessili in generale, la seconda per cordami e reti da pesca, grazie alla sua comprovata resistenza all'acqua di mare.

Anche le fibre ottenute dai semi sono più grossolane, ma anche più fragili di quelle liberiane e le più note sono il cotone ed il coir (ottenuto dal cocco).

Nelle diverse fasi di produzione delle fibre vegetali possono intervenire specifici fattori che influenzano la qualità del prodotto finito. Nella fase iniziale di crescita della pianta, i fattori discriminanti sono la specie vegetale, la posizione, il clima e la posizione delle fibre all'interno della pianta. I tempi di raccolta influenzano le caratteristiche del prodotto finale, poiché con la maturazione della pianta si inspessisce la parete secondaria delle cellule, aumentando la resistenza, ma le fibre diventano più grossolane e l'estrazione diventa più difficoltosa. Nella fase finale i fattori influenzanti la qualità dell'elemento finito sono i metodi di macerazione o decorticazione con cui le fibre vengono separate dal resto della massa non utilizzabile. Ulteriori fattori che influenzano le caratteristiche delle fibre, ma non relativi alla fase produttiva sono le condizioni di trasporto e stoccaggio (Dittenber e Ganga Rao, 2012).

Il crescente interesse verso le fibre di origine vegetale è dovuto principalmente alle caratteristiche di economia ed ecologia. L'aspetto più interessante di tali fibre è il loro basso impatto ambientale, derivando da una risorsa rinnovabile che richiede scarsa energia di lavorazione. Lo scambio di anidride carbonica con l'ambiente è prossimo allo zero, poiché

non c'è rilascio di CO₂ in caso di compostaggio o combustione, inoltre l'ambiente di lavoro per gli operatori è più salutare con una riduzione di irritazioni cutanee e delle vie respiratorie. Esse possiedono anche elevata resistenza elettrica e buone proprietà di isolamento acustico (Maya e Sabu, 2008).

A fronte di numerosi vantaggi, queste fibre ed i compositi da esse derivati hanno diversi problemi come la scarsa bagnabilità, l'incompatibilità con alcune matrici polimeriche e l'alto assorbimento di umidità. Il problema principale è l'adesione fibra-matrice poiché in un composito il ruolo della matrice è la distribuzione dei carichi alle fibre e ciò richiede una buona collaborazione tra le due parti; una scarsa adesione significa compromissione di tutte le funzionalità del composito. Alcune proprietà meccaniche delle fibre possono però essere incrementate grazie a trattamenti fisici o chimici (Wambua et al., 2003). Un altro svantaggio delle fibre vegetali è la bassa resistenza al calore, infatti la temperatura di degrado - nella maggior parte dei casi - è pari a circa 200 °C, fattore che restringe fortemente la scelta della matrice e l'applicazione dei compositi naturali in specifiche condizioni (Sgriccia et al., 2008). L'origine naturale di queste fibre le rende soggette a biodeterioramento, che avviene prevalentemente ad opera di specie microbiche cellulolitiche, la suscettibilità agli attacchi è connessa sia alla pianta di provenienza, sia ai processi di lavorazione adottati (Caneva et al., 2005). La sensibilità al degrado biologico delle fibre risulta essere un problema anche per i compositi da esse derivati. Numerosi studi hanno evidenziato la crescita di funghi e batteri su compositi naturali che ne hanno compromesso le caratteristiche meccaniche (Dittenber e Ganga Rao, 2012).

Per ovviare a questo inconveniente sono attualmente in fase di studio specifici pretrattamenti superficiali volti a migliorare le caratteristiche delle fibre naturali, in particolare la loro resistenza e la loro adesione interfacciale con la matrice, tra cui si annoverano la mercerizzazione (trattamento con soda caustica o agli alcali attivi), acetilazione (trattamento con anidride acetica), eterificazione, trattamento con perossidi ed anche con i raggi ultravioletti e molti altri (Kalia et al., 2009). Ad esempio il trattamento con alcali rimuove sostanze incrostanti come cere, pectina, sali minerali e lignina, producendo una superficie più ruvida con un maggior numero di punti di ancoraggio ed è la più praticabile dal punto di vista economico (Stocchi et al., 2007).

2.3.3 Matrici

Come già specificato i materiali compositi vengono spesso classificati secondo il tipo di matrice, che può essere di diversa natura (*Kaw, 2006*). Nel presente studio si sono utilizzati i cosiddetti FRP, materiali compositi a matrice polimerica, pertanto verranno presentate e discusse esclusivamente le matrici composte da polimeri.

I polimeri sono macromolecole a catena molto lunga costituite da unità di base dette monomeri, che si uniscono tra loro tramite reazioni chimiche. A causa della lunghezza e delle architetture complesse che le catene possono assumere in fase di polimerizzazione, è difficile che ci sia un loro ottimale impaccamento in una struttura ordinata, per questo i polimeri allo stato solido sono composti da zone a struttura cristallina (ordinate) e da zone a struttura amorfa (disordinate). La percentuale di fasi ordinate e disordinate può variare anche sensibilmente a seconda delle condizioni di formazione e dei monomeri di partenza. Essendo i polimeri per lo più semicristallini, sono caratterizzati da una temperatura di transizione vetrosa T_g , al di sotto della quale mostrano un comportamento simile al vetro. La T_g può essere superiore o inferiore alla temperatura ambiente T_{amb} o di utilizzo, nel primo caso ($T_g > T_{amb}$) abbiamo polimeri rigidi, che vengono utilizzati nel loro stato vetroso e sono pertanto duri e fragili, nel secondo ($T_g < T_{amb}$) possiamo avere due diversi tipi di polimeri, ossia gli elastomeri e i polimeri flessibili e tenaci. Gli elastomeri hanno consistenza gommosa e presentano un comportamento elastico, caratterizzato da un elevato allungamento prima della rottura e non sono utilizzati nella produzione di materiali compositi, gli altri hanno una consistente fase cristallina che conferisce loro una maggiore resistenza alla deformazione. Nei polimeri con struttura generalmente compatta e regolare si misura invece la temperatura di fusione T_m , ossia la temperatura alla quale fondono i cristalliti (*Brown, 2001*).

Nella produzione dei polimeri vengono spesso addizionate sostanze aggiuntive alle componenti di base, le quali permettono di abbattere i costi e migliorare le prestazioni del prodotto, affinché risponda esattamente alle necessità. Nella miscela possono essere inseriti particolati (detti anche riempitivi) o additivi. Nel primo caso lo scopo principale è di ridurre i costi, quindi i particolati devono essere inerti per causare la minima modificazione possibile delle proprietà fisiche e chimiche del polimero. Gli additivi, invece, sono inseriti per variare e/o incrementare una specifica proprietà del polimero e spesso se ne utilizzano diversi contemporaneamente (i più utilizzati sono agenti di polimerizzazione, fluidificanti, antiossidanti, modificatori delle proprietà meccaniche, ignifuganti, elasticizzanti, coloranti e conservanti).

I materiali polimerici si differenziano tra termoplastici e termoindurenti. I polimeri termoplastici hanno la proprietà di poter essere fusi e formati più volte, grazie alla linearità

delle catene che li compongono, le loro caratteristiche principali sono la resistenza alle alte temperature, tenacità e resistenza all'impatto ed allungamento a rottura. I polimeri termoindurenti (spesso chiamati resine) sono duri, insolubili e infusibili poiché si formano grazie all'azione di un catalizzatore che favorisce la polimerizzazione definitiva. Se riscaldati nuovamente dopo la polimerizzazione subiscono la decomposizione della struttura. Essi hanno buona resistenza meccanica, buona rigidità, elevata stabilità dimensionale, bassa resistenza all'urto ed un allungamento a rottura di molto inferiore rispetto a i termoplastici. (AIMAT, 1996, Minguzzi, 1998).

Attualmente le matrici più utilizzate nella fabbricazione dei materiali compositi fibrorinforzati sono le resine termoindurenti, che sono disponibili in forma liquida o pastosa a temperatura ambiente. La polimerizzazione avviene grazie ad un opportuno reagente con funzione di catalizzatore e può essere accelerata agendo sulla temperatura. Le principali caratteristiche che hanno incoraggiato l'utilizzo di queste resine sono la bassa viscosità che favorisce l'impregnazione delle fibre, le ottime capacità adesive e la buona resistenza agli agenti chimici, oltre alla possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente, applicabili quindi anche *in situ*. Le resine termoindurenti presentano anche alcuni svantaggi, quali l'ampiezza del campo di temperature di esercizio (dipendente dalla T_g), il comportamento fragile e la sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura. Le resine maggiormente utilizzate sono quelle epossidiche, sebbene anche quelle poliestere o vinilestere trovino impiego. I limiti delle resine termoindurenti, ha favorito in anni recenti lo sviluppo di compositi a matrice termoplastica. (CNR-DT 200/2004).

2.4 Legno

L'utilizzo di tecniche di intervento sul legno, di qualunque natura siano, non possono prescindere da un'approfondita conoscenza del substrato.

Sin dall'antichità il legno è stato utilizzato come materia prima naturale per numerosi scopi come produrre calore mediante combustione, creare utensili ed armi e costruire strutture. La diffusione di questo materiale è stata favorita dalla sua facile reperibilità in natura, leggerezza, flessibilità e facilità di lavorazione (Galletti, 2004)..

Già nella preistoria era utilizzato per pali verticali, mentre per la realizzazione di vere e proprie pareti si dovrà attendere l'età del ferro (Cagnana, 2000).

Il Medioevo vede un ampio utilizzo del legno in edilizia, sia come elemento principale, sia misto ad altri materiali, nelle realtà rurali e urbane. Sebbene nelle campagne l'utilizzo del legno per scopi costruttivi si sia protratto per svariati secoli, nelle città esso perse progressivamente di importanza e il suo uso venne ridotto solo a specifiche funzioni.

Numerose sono le testimonianze che parlano del legno come materiale da costruzione utilizzato nell'edilizia residenziale o monumentale, in particolare le fonti legislative offrono informazioni sulle strutture insediative e sui materiali costruttivi. Le leggi di diritto germanico (V-VII sec.) offrono una panoramica sullo stretto legame tra le popolazioni e l'ambiente naturale circostante, che ne ha influenzato gli stili di vita ed ha favorito tradizioni costruttive ed architettoniche specifiche (Galletti, 2004)..

I due sistemi costruttivi principali per la costruzione di pareti di legno sono il *fachwerk* e il *block bau* (dal ted. rispettivamente *costruzione a scomparti* e *costruzione a blocchi*). Il primo è un sistema a telaio in cui i pali verticali posti a breve distanza l'uno dall'altro costituiscono l'ossatura della struttura; il tipo di tamponatura degli spazi fra i pali varia a seconda della regione o del periodo storico. Durante il Basso Medioevo questa tipologia costruttiva si diffuse in tutta Europa, ma in Italia - dove ci fu l'avvento delle costruzioni in pietra - venne sfruttata prevalentemente per la realizzazione di muri divisorii interni. La seconda tipologia è caratterizzata dall'uso di tronchi sovrapposti orizzontalmente e incastrati agli angoli. Tale tecnica è stata lungamente utilizzata nell'area alpina ed il ritrovamento di resti di un edificio afferibile a questa tipologia costruttiva presso la val di Ledro in Trentino - Alto Adige (VI-VII sec.) costituisce una testimonianza. Grazie alle sue notevoli caratteristiche meccaniche, il legno è stato utilizzato anche per gli elementi orizzontali come i solai e per le coperture. L'archeologia del sottosuolo è spesso misera di prove tangibili, ma quella dell'elevato permette di apprezzare ancora numerosi esempi di utilizzo del legno ancora in opera.

In ragione della sua resistenza all'acqua, il legno è stato utilizzato già dal II millennio per le strutture di fondazione, come testimoniano i ritrovamenti di resti di numerosi abitati palafitticoli (Cagnana, 2000).

Dopo il periodo medievale il legno ha mantenuto la sua centralità come materiale strutturale principale o complementare soprattutto nella tradizione costruttiva del nord Europa (Galletti, 2004).

2.4.1 Struttura e composizione

L'accrescimento di un albero è di due tipi, ossia primario (in altezza) e secondario (diametrico). L'allargamento del fusto si manifesta con la formazione stagionale di anelli concentrici, utilizzati per determinare l'età della pianta, ma anche per la datazione dendrocronologia di manufatti in legno.

Osservando una sezione radiale di un tronco di albero, come quella in *figura 2.4*, si riconoscono dall'esterno verso l'interno, diverse strutture tipiche quali la corteccia esterna ed interna, il cambio cribro-vascolare, l'alburno, il duramen ed il midollo.

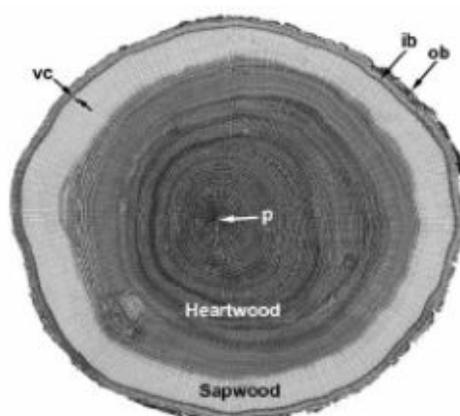


Figura 2.4: Sezione radiale di un tronco in cui si riconoscono la corteccia esterna (ob) ed interna (ib), il cambio cribro-vascolare (vc), l'alburno (sapwood), il duramen (heartwood) ed il midollo (p) (USDA, 2010).

La corteccia esterna limita la perdita di acqua per evaporazione e fornisce protezione alla più morbida corteccia interna, che è il tessuto attraverso il quale avviene il trasporto della linfa elaborata dalle foglie alle radici (USDA, 2010). Il cambio cribro-vascolare è un anello di cellule meristematiche, che determina l'accrescimento diametrico, producendo la corteccia verso l'esterno e lo xilema verso l'interno, il quale ha funzione di sostegno e trasporto della linfa grezza dalle radici alle chiome. Lo xilema è costituito dal durame e dall'alburno, ossia rispettivamente la parte più vecchia del legno, caratterizzata da un colore scuro e da maggiore durabilità e resistenza meccanica perché costituito da sostanze accumulate negli anni e la porzione legnosa relativamente più giovane, più chiara e meno resistente. Le cellule prodotte dall'attività cambiale variano a seconda della stagione: durante la primavera sono più grandi per far fronte al risveglio vegetativo, a fine estate-autunno sono più piccole, ma con le pareti cellulari più spesse e più scure. Il contrasto di colore tra legno primaverile e legno tardivo si ripete con l'alternarsi delle stagioni e mette in evidenza gli anelli di

accrescimento annuali. A livello anatomico le cellule possono formare una struttura omogenea, nel caso del legno omoxilo delle gimnosperme (conifere), o eterogenea, nel caso del legno eteroxilo delle angiosperme (latifoglie), come si osserva in *figura 2.5*. A differenziamento completato si osservano cellule morte, con funzione di conduzione o sostegno, e cellule vive con funzione di riserva. Nelle conifere le cellule morte (chiamate tracheidi) sono indifferenziate e svolgono contemporaneamente le funzioni di sostegno e conduzione, nelle latifoglie invece la conduzione è svolta dai vasi, mentre le fibre provvedono al sostegno.

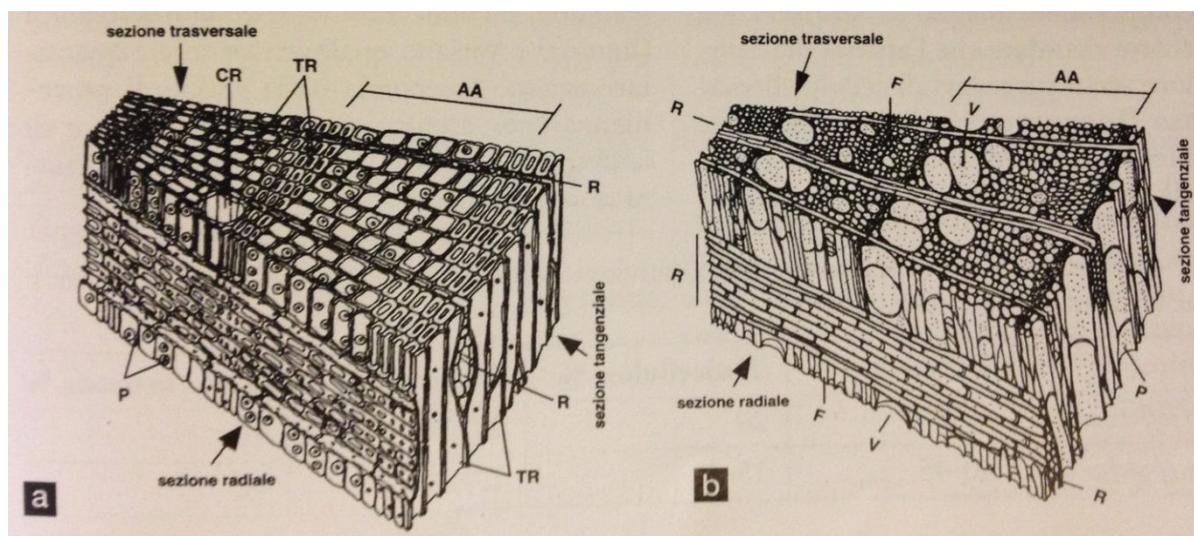


Figura 2.5 Sezioni trasversali di (a) legno omoxilo, (b) legno eteroxilo (Caneva et al, 2005).

Le cellule, indipendentemente dalla loro funzione, sono caratterizzate da una parete propria, che le distingue l'una dall'altra, ma allo stesso tempo sono saldamente unite grazie ad una parete comune detta lamella mediana. La parete cellulare è formata da diversi strati di vario spessore e composizione: la parete primaria costituita prevalentemente da emicellulose e la parete secondaria, la più consistente in spessore e a sua volta suddivisa in tre strati, la quale invece è costituita quasi esclusivamente da cellulosa (*figura 2.6*). Le sostanze incrostanti, come ad esempio la lignina, aumentano in concentrazione allontanandosi dal centro della cellula, infatti la lamella mediana che si trova più esternamente ne è costituita al 90%.

I tre elementi appena citati, costituiscono le componenti essenziali del legno e la loro concentrazione varia tra conifere e latifoglie (*tabella 2.3*).

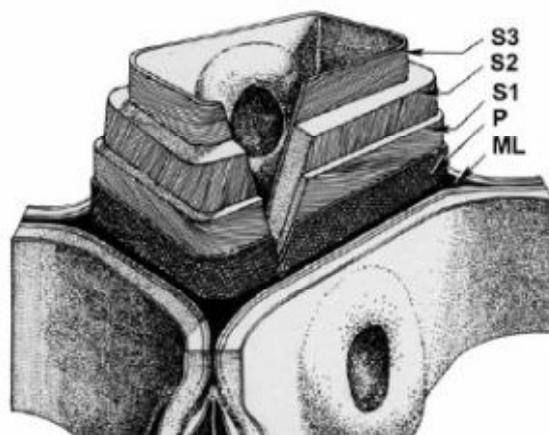


Figura 2.6: Struttura cellulare in cui si riconoscono la lamella mediana (ML), la parete cellulare primaria (P) e i tre strati della parete secondaria (S1, S2, S3) (USDA, 2010).

Tabella 2.3: Composizione chimica percentuale di legni di conifera e latifoglie (Caneva et al., 2005).

Legno	Cellulosa (%)	Emicellulose (%)	Lignina (%)	Altre sostanze(%)
Conifere	40 - 45	20	25 - 35	< 10
Latifoglie	40 - 45	15 - 35	17 - 25	< 10

La cellulosa è un polimero costituito da molecole di β -D-glucopiranosio (ottenute dalla chiusura ad anello del D-glucosio), le quali formano legami glicosidici fra l'ossidrile anomero di un monomero e il gruppo O-H sul quarto carbonio dell'unità successiva (figura 2.7). Le catene di glucosio sono lineari e mostrano un grado di polimerizzazione variabile tra 8000 e 10000 unità (figura 2.7). Le catene mostrano notevole tendenza a formare legami intra- e intermolecolari a formare allineamenti di catene chiamati microfibrille, le quali si organizzano in fibrille e poi in fibre.

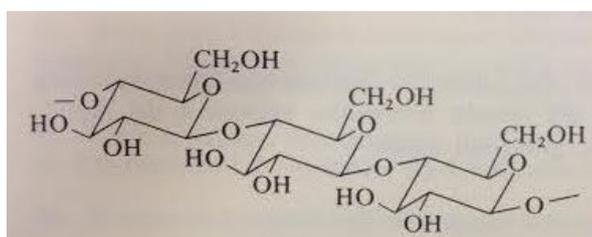


Figura 2.7: Cellulosa (Allinger et al., 1981).

La struttura della cellulosa non è però omogenea, a regioni altamente ordinate, caratterizzate da un elevato grado di compattezza (dette cristalliti), si alternano regioni amorfe, più facilmente attaccabili da agenti di degrado.

Le emicellulose sono eteropolisaccaridi a catena breve e ramificata (con grado di polimerizzazione di circa 200 unità), costituiti da diversi monosaccaridi (D-glucosio, D-mannosio, D-xilosio, L-arabinosio). Esse si trovano posizionate tra cellulosa, a cui è legata da legami a idrogeno e forze di Van der Waals, e lignina con la quale forma legami covalenti.

La lignina è un polimero fenolico la cui struttura molecolare non è ancora stata completamente determinata per la difficoltà ad estrarla, risulta comunque essere un insieme di sostanze amorfe di composizione chimica simile e di natura aromatica, la cui struttura è però diversificata (*Caneva et al., 2005*)

2.4.2 Proprietà fisico-meccaniche

Le principali proprietà fisiche del legno sono il contenuto di acqua (o contenuto di umidità), il ritiro e la massa volumica. Esse sono strettamente dipendenti le une dalle altre ed influenzano fortemente le proprietà meccaniche come ad esempio la resistenza agli sforzi (compressione, trazione, flessione e taglio), il modulo di elasticità e la durezza (*Amerio e Canavesio, 1999*).

Contenuto di acqua (contenuto di umidità) e ritiro

La natura chimico-fisica del legno lo rende un materiale estremamente igroscopico, può infatti contenere una quantità variabile di acqua. La pianta in piedi ha le cellule legnose completamente sature di soluzione acquosa (variabile dal 20% al 50% del peso complessivo a seconda della specie legnosa, della zona di crescita, del periodo di abbattimento), quando il legno viene tagliato inizia l'evaporazione dei liquidi, che progredisce in funzione delle condizioni ambientali, della grandezza dei pezzi e del modo in cui sono esposti all'aria, fino a stabilizzarsi intorno a valori dall'8 al 20% (*tabella 2.4*).

Il desorbimento dell'acqua comporta variazioni dimensionali (il materiale si ritira per l'avvicinamento delle fibre) e delle proprietà fisico-meccaniche. Il processo di perdita dell'acqua è reversibile ed attraverso l'adsorbimento il legno può tornare alle condizioni di umidità iniziali.

La variabilità del contenuto d'acqua nel legno rende necessario che per utilizzi ingegneristici venga stabilizzato il più possibile, al fine di evitare consistenti modificazioni dimensionali e prestazionali in opera. Per questo assume grande importanza l'operazione di stagionatura, che tende a ridurre l'umidità entro determinati limiti. Per ottenere le migliori prestazioni del legno, la stagionatura dovrebbe portare il contenuto di acqua in equilibrio con lo stato igrometrico dell'ambiente in cui esso verrà posto in opera. Ovviamente, essendo di solito ignote le destinazioni del legname e le caratteristiche igrometriche del luogo di posa, si opera con valori di umidità medi (Amerio e Canavesio, 1999 e Giordano, 1999).

Tabella 2.4: Contenuto di umidità del legno in diversi ambienti (Amerio e Canavesio, 1999).

Ambiente	Umidità [%]
Legno immerso in acqua o fango umido	> 32
Legno esposto alle intemperie, ma non permanentemente a contatto con il suolo umido	18 – 20
Legno al riparo di tettoia o tetto non a contatto col suolo umido	15 – 18
Legno in locali non riscaldati d'inverno e con facile accesso di aria più o meno umida	14 – 18
Legno in locali sani, riscaldati d'inverno, ma con facile accesso di aria umida	12 – 15
Legno in locali sani, molto riscaldati d'inverno e con accesso scarso o nullo di aria umida	8 – 12

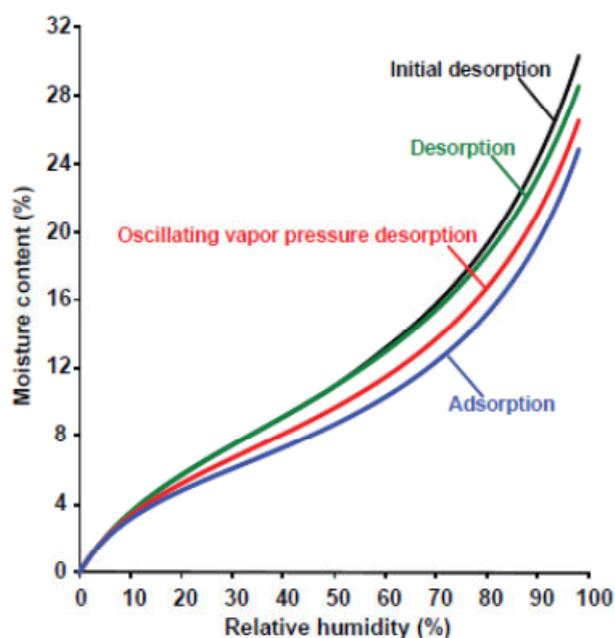


Figura 2.8: Isteresi igroscopica del legno (USDA, 2010).

Va inoltre sottolineato che il legno è caratterizzato da isteresi igroscopica, non esiste una correlazione univoca tra il contenuto d'acqua del legno e l'umidità relativa a temperatura costante, come osservabile in *figura 2.8*. A causa di questa particolarità i valori tabulati di contenuto d'acqua del legno per le diverse specie risulta un compromesso adeguato e pratico per l'uso quando la direzione di assorbimento/desorbimento non è nota (*USDA, 2010*).

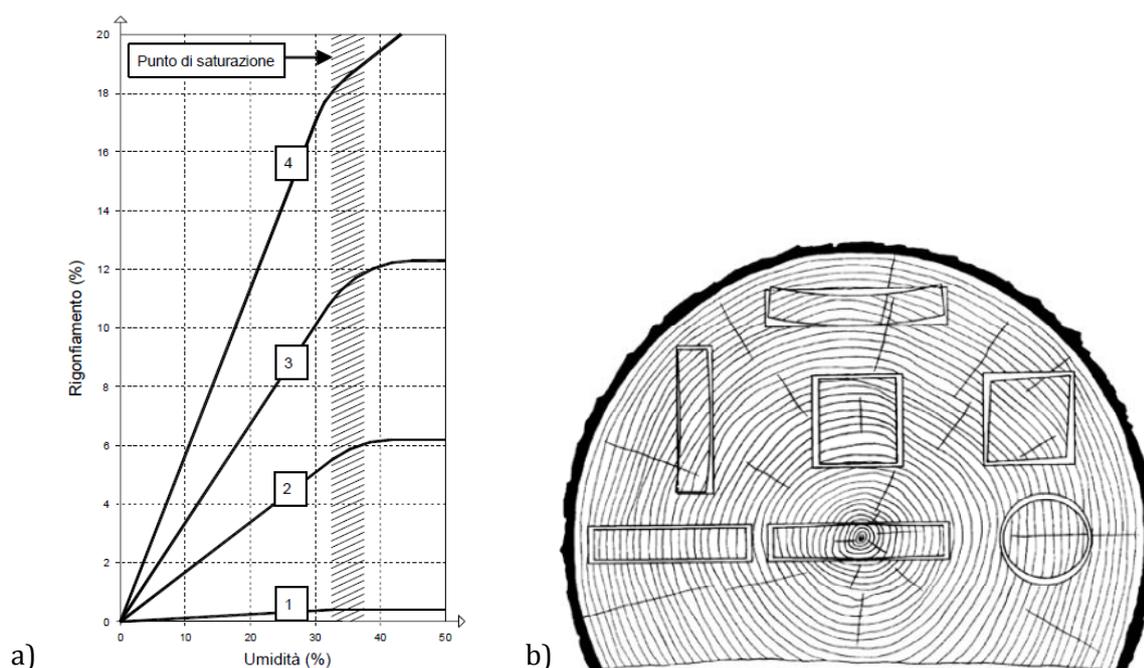


Figura 2.9: (a) rigonfiamento volumetrico (4) e nelle tre direzioni: assiale (1), radiale (2), trasversale (3) (CNR-DT 201/2005); (b) principali fessurazioni e deformazioni in relazione alla direzione degli anelli di accrescimento (USDA, 2010).

Il legno è un materiale anisotropo quindi anche le alterazioni dimensionali del legno dovute alle variazioni di contenuto di umidità non sono omogenee in tutte le direzioni. Il fenomeno del ritiro è minimo lungo le fibre (ritiro totale assiale: 0,2 - 0,5%), mentre è notevole in senso radiale (ritiro totale radiale: 3 - 6%) e ancora più rilevante lungo gli anelli di accrescimento (ritiro totale trasversale: 6 - 12%). Gli effetti combinati del ritiro radiale e tangenziale causa una deformazione del legno, che dipende dalla sezione del tronco da cui deriva (*figura 2.9*).

Massa volumica

Il legno è un materiale estremamente disomogeneo e la massa volumica varia in dipendenza dell'essenza legnosa considerata e di altri parametri quali il contenuto di umidità, la quantità di nodi e la velocità di crescita. Essendo costituito da cellule cave si differenzia la densità del legno da quella della pura sostanza legnosa pari a 1500 kg/m^3 (tabella 2.5).

Tabella 2.5: Valori medi della massa volumica (in kg/m^3) di alcune specie legnose, con contenuto di umidità pari al 12% (Amerio e Canavesio, 1999).

Conifere	Massa vol.	Latifoglie	Massa vol.	Latifoglie	Massa vol.
Abete rosso	440	Acero	700	Afromosia	760
Cipresso	620	Castagno	580	Doussié	800
Larice	630	Faggio	750	Iroko	660
Pino silvestre	570	Noce	720	Mogano d'Africa	610
Douglas	530	Olivo	950	Palissandro d'Asia	950
Hemlock	450	Olmo	620	Teck	650
Pitch Pine	620	Rovere	760	Wengé	840

Proprietà meccaniche del legno

Il comportamento anisotropo dipende dalla struttura interna del legno, la sua organizzazione cellulare è alla base di marcate differenze nelle proprietà meccaniche: il materiale mostra maggiore resistenza e rigidità nel senso della fibratura ed è meno efficiente nelle altre direzioni. La resistenza a compressione è maggiore per le sollecitazioni che agiscono in direzione parallela alle fibre ed è influenzata dal contenuto d'acqua. Anche la resistenza agli sforzi di trazione è maggiore in direzione parallela alle fibre, ed è superiore di quella a compressione, ma è pressoché insignificante in direzione perpendicolare alle fibre.

La resistenza a flessione come le altre proprietà è strettamente legata alla direzione della fibratura ed è influenzata dalla presenza di nodi e spaccature longitudinali e dalla distanza degli anelli di crescita, oltre che dal tenore di umidità del legno. Al pari di altri materiali da costruzione sottoposti a carichi di lunga durata, il legno è soggetto al fenomeno chiamato *fluage*, ossia scorrimento delle fibre che nelle travi inflesse può assumere valori particolarmente elevati (Amerio e Canavesio, 1999).

Il modulo di elasticità è fortemente influenzato da parametri quali il contenuto di umidità, la temperatura e la massa volumica (tabella 2.6).

Tabella 2.6: Variazioni del modulo di elasticità E (in N/mm²) parallelamente alla fibratura, in dipendenza dell'umidità, a temperatura fra 10 e 20 °C (Amerio e Canavesio, 1999).

Essenza legnosa	Umidità			
	10%	20%	25%	> 35%
Abete rosso	11500	10600	9200	8500
Larice	14300	12800	12000	10000
Pino silvestre	12000	11000	9500	8700
Rovere	13600	12000	11300	10000
Castagno	9200	8000	7600	7000

2.4.3 Degrado del legno

In condizioni adeguate, il legno garantirà secoli di servizio; tuttavia in condizioni particolari, la natura organica del legno lo rende un substrato estremamente adatto ad attacchi biotici di molti organismi eterotrofi, che ne sfruttano i composti per ottenere sostanze nutritive. L'attacco può provocare danni più o meno importanti a secondo dell'organismo da cui è promosso, quelli che possono degradare il legno sono principalmente funghi, insetti e batteri. Gli insetti possono attaccare il legno, nutrendosi delle sostanze cellulosiche o scavando gallerie, ma il loro attacco avviene per lo più sulle piante in piedi, fatta eccezione per alcune specie di coleotteri (i cosiddetti tarli) che provocano danni anche importanti ai legni in opera. La maggior parte delle muffe si insedia solo in superficie e benché la loro presenza sia esteticamente sgradevole non creano problemi a livello strutturale. Esistono invece altre specie fungine che attraverso la loro crescita riescono a penetrare all'interno del legno, compromettendone la resistenza. Questi funghi si propagano per accrescimento di tessuti filamentosi, detti ife, che demoliscono il tessuto legnoso per via enzimatica. La colonizzazione si manifesta in alcuni casi attraverso la crescita del corpo fruttifero (quello che viene comunemente chiamato fungo), in altre attraverso la comparsa di macchie, le quali a differenza delle muffe possono provocare danni gravi (Caneva et al., 2005).

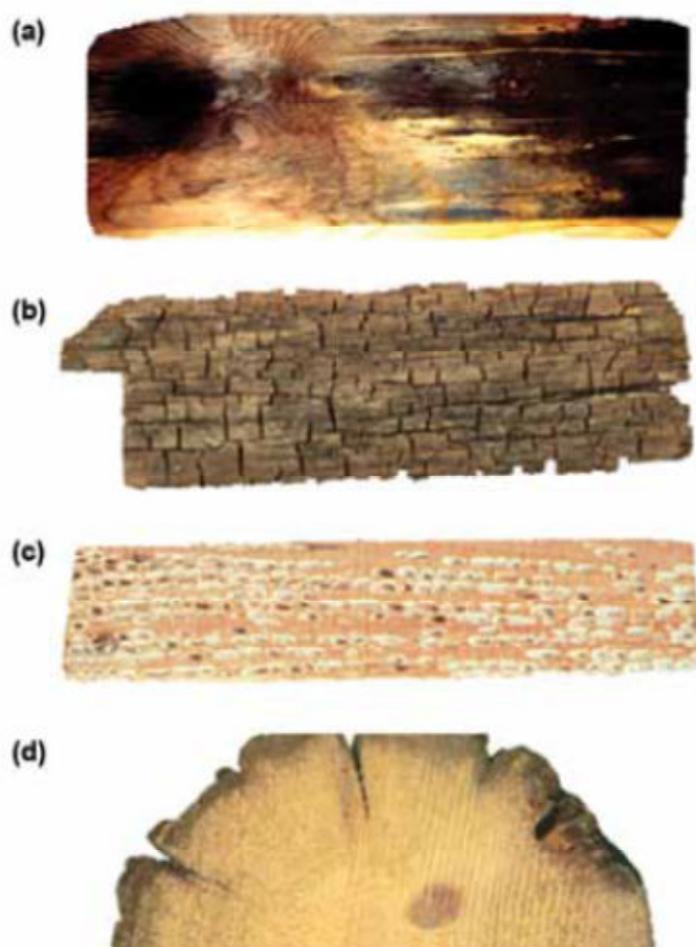


Figura 2.10: (a) muffa, (b) carie bruna, (c) carie bianca e (d) carie soffice (USDA, 2010).

A seconda dell'aspetto della macchia si possono dividere gli organismi fungini in tre categorie, cioè (i) funghi della carie bruna che attaccano principalmente cellulosa ed emicellulose, rendendo la zona interessata di colore bruno-rossastro e caratterizzata da fessurazioni perpendicolari tra loro; (ii) funghi della carie bianca che attaccano tutti i costituenti del legno e la zona si schiarisce e diventa filamentosa ed infine (iii) funghi della carie soffice, i quali degradano più o meno tenacemente tutte le componenti del legno, ma richiedono elevati contenuti di umidità e azoto e il materiale diviene di consistenza spugnosa (figura 2.10).

2.5 Studi sperimentali sui materiali compositi sintetici e naturali

La modesta fiducia riservata al legno come materiale strutturale ha comportato un ritardo nell'adozione di pratiche che ne favorissero il consolidamento in sfavore della sostituzione e di conseguenza anche l'utilizzo degli FRP è stato posticipato (CNR-DT 201/2005). Molto spesso, seppur ancora recuperabili, elementi statici a matrice legnosa, vengono sostituiti integralmente, andando a perdere in tale operazione il valore storico ed a volte artistico dell'elemento.

Benché l'accoppiamento tra materiali compositi a matrice polimerica e legno sia apparso subito particolarmente proficuo, grazie soprattutto alla possibilità di mantenere la peculiare leggerezza di una struttura in legno e riuscire a conferirgli comunque la ricercata resistenza e rigidità, non è possibile soprassedere su quelle che sono evidenti incompatibilità tra i due materiali. Particolarmente critica risulta essere la differente sensibilità rispetto a variazioni di temperatura e umidità ambientali (CNR-DT 201/2005).

Sebbene con un certo ritardo, sono stati condotti molteplici studi per comprendere al meglio la durabilità del consolidamento di elementi architettonici in legno con materiali compositi polimerici.

Già un decennio fa *Broughton e Hutchinson* (2001) si occupavano degli effetti del contenuto di umidità del legno sulla resistenza delle barre di connessione in FRP. I risultati ottenuti hanno evidenziato come l'aspetto delle condizioni del substrato rappresenti una criticità se non attentamente valutato. Le prestazioni delle connessioni hanno subito un evidente calo per contenuti di umidità superiori al 22%, arrivando ad una perdita dell'efficienza del 60% per campioni con umidità superiori al 30%.

Il fenomeno dell'aderenza FRP-legno è stato affrontato da *Raftery et al.* (2009), con un approccio rigoroso e metodico, focalizzano l'attenzione sulla qualità dell'adesione all'interfaccia. Il rinforzo è stato applicato su legni danneggiati mediante un trattamento estremamente spinto di bagnamento e asciugatura ed in seguito ne è stata determinata la resistenza a taglio mediante shear test. I risultati hanno messo in evidenza come in presenza di un buon legame si possano ottenere i medesimi risultati da legni danneggiati e sani.

A distanza di qualche anno dall'avvio delle sperimentazioni sui materiali compositi a matrice polimerica applicati al legno, *Custodio e Cruz* (2009) propongono una panoramica molto esaustiva sui diversi fattori che influenzano la durabilità negli interventi di consolidamento, soprattutto avvalendosi del contributo di numerosi studi effettuati nel tempo. I fattori che maggiormente influenzano la durabilità dei legami con il legno nel tempo sono stati

raggruppati in tre categorie: (i) l'ambiente cui appartengono principalmente umidità e temperatura, (ii) i materiali, inteso come globalità delle caratteristiche delle componenti coinvolte nel consolidamento e (iii) gli stress, ossia gli sforzi cui il legame è sottoposto.

L'acqua è uno degli agenti degradanti più aggressivi nei confronti delle resine epossidiche. Poiché la sua presenza è inevitabile in tutti gli ambienti naturali, è necessario comprendere in quali condizioni essa diviene pericolosa. La presenza di acqua per tempi prolungati, può innescare processi irreversibili che costituiscono una minaccia alla resistenza dell'adesione, quali l'idrolisi della resina o l'instabilità dell'interfaccia adesivo-supporto. La concentrazione di acqua e la tempistica necessaria affinché si giunga a situazioni critiche dipendono dai materiali utilizzati, dalla temperatura e dagli stress cui è sottoposta la giuntura.

La temperatura è un altro importante fattore che determina la durabilità, soprattutto se associato all'umidità e all'applicazione prolungata di sforzi. Le variazioni di calore possono essere imputabili a cambiamenti naturali delle condizioni ambientali che ricadono in un intervallo compreso tipicamente tra -18°C e $+65^{\circ}\text{C}$ e quelli dipendenti da condizioni estreme, quale la presenza di fuoco (temperature superiori ai 280°C). La scelta del collante con le migliori caratteristiche va effettuata previa determinazione delle condizioni in cui il materiale andrà ad operare. La buona riuscita e la resistenza di un consolidamento sono il risultato anche dei materiali utilizzati e della corretta analisi ambientale; bisogna, infatti, considerare il substrato, l'impregnante, la forma del giunto, le caratteristiche superficiali del substrato e la capacità del collante di impregnarlo.

Riconosciuta la validità dei materiali compositi per il consolidamento di elementi in legno, la frontiera si è spostata verso la ricerca di nuovi prodotti e processi compatibili con l'ambiente anche nell'ambito dell'adeguamento del patrimonio architettonico.

Sebbene già all'inizio degli anni duemila si sia introdotta la questione relativa alla possibile dismissione dei materiali compositi tradizionali in favore di materiali più compatibili con l'ambiente (*Wambua et al., 2003*) è stato nell'ultimo quinquennio che ha avuto luogo una spinta propulsiva molto forte verso lo studio e la sperimentazione di materiali compositi naturali (anche detti NFRP). Con l'introduzione di fibre di origine vegetale sono state condotte alcune verifiche sulla validità di questi prodotti, che risultano biodegradabili, rinnovabili e riciclabili, non sono tossici e la loro produzione richiede minore energia e costi ridotti; inoltre ne esiste una vasta gamma con caratteristiche chimico-fisiche e prestazioni meccaniche diverse, adattabili a numerosissime applicazioni (*Maya e Sabu, 2008*). Le loro proprietà, proposte in numerosi studi, risultano però spesso discordanti come si evince dai valori riportati in *tabella 2.7*.

Dittenber e Ganga Rao (2012) spiegano le incongruenze delle proprietà misurate per diverse fibre vegetali come dipendenti da fattori intrinseci alla pianta di provenienza (specie, provenienza geografica, clima locale, ma anche spessore della parete cellulare, adesione tra le fibre e la struttura circostante), dal processo di lavorazione (momento di raccolta, metodo di macerazione, condizioni di separazione delle fibre) ed anche da condizioni di trasporto e di conservazione.

Gli studi hanno reso evidenti anche le problematiche che caratterizzano queste fibre e necessariamente anche i compositi con esse prodotti. L'origine naturale delle fibre le rende sia particolarmente sensibili all'assorbimento di acqua ed al calore (*Sgriccia et al., 2008*) sia vulnerabili al biodeterioramento operato da microrganismi, tipico dei materiali vegetali (*Dittenber e Ganga Rao, 2012*).

Tabella 2.7: Alcune proprietà delle principali fibre vegetali desunte dagli studi di [1] *Netravali e Chabba, 2003*, [2] *Wambua et al., 2003*, [3] *Dittenber e Ganga Rao, 2012*, [4] *Kalia et al., 2009*.

Proprietà	Rif.	Cotone	Juta	Canapa
Densità [g/cm ³]	[1]	1,5	1,3	-
	[2]	1,51	1,46	1,48
	[3]	1,5	1,3-1,49	1,4-1,5
	[4]	1,5-1,6	1,3-1,45	-
Resistenza a rottura [MPa]	[1]	287-597	393-773	69,0
	[2]	400	400-800	550-900
	[3]	287-800	320-800	270-900
	[4]	287-800	393-773	690
Deformazione a rottura [%]	[1]	7,0-8,0	1,5-1,8	1,6
	[2]	3-10	1,8	1,6
	[3]	3-10	1-1,8	1-3,5
	[4]	7-8	7-8	1,6
Modulo elastico [GPa]	[1]	5,5-12,6	26,5	-
	[2]	12	10-30	73
	[3]	5,5-12	8-78	23,5-90
	[4]	5,5-12,6	13-26,5	-

Uno degli aspetti che ha ricevuto maggiore attenzione ed è stato soggetto ad un'intensa sperimentazione è la ricerca di trattamenti chimico-fisici che siano in grado di ovviare ai problemi citati. I trattamenti chimico-fisici attuabili sulle fibre vegetali per incrementarne le proprietà meccaniche sono numerosi, *Kalia et al. (2009)* ne propone un'ampia panoramica. Il lavoro focalizza l'attenzione su quei pre-trattamenti che favoriscono l'adesione tra fibra e

matrice attraverso l'attivazione di gruppi molecolari specifici. I processi proposti sono molteplici ed alcuni ancora scarsamente indagati, ma molti si basano sull'utilizzo di idrossido di sodio, sia come elemento principale sia in fase di preparazione della fibra ai trattamenti successivi. In effetti la mercerizzazione, ossia il trattamento con alcali (NaOH) è una pratica comune e diffusa proposta da *Ray et al.* (2001) per il miglioramento delle caratteristiche della fibra di juta e riproposta da *Stocchi et al.* (2007) con l'introduzione di uno specifico telaio che mediante un'azione meccanica favorisce l'effetto disincrostante dell'idrossido di sodio.

Altrettanto numerosi sono gli studi effettuati per determinare le caratteristiche e le proprietà delle fibre naturali. In *tabella 2.8* sono riassunte le caratteristiche meccaniche più frequentemente considerate e la composizione chimica relative specificatamente alla fibra di lino.

Tabella 2.8: Alcune proprietà e caratteristiche della fibra di lino dalla letteratura.

	Baley, 2002	Netravali e Chabba, 2003	Wambua, et al., 2003	Kalia et al., 2009	Dittenber & Ganga Rao, 2012
<i>Densità [g/cm³]</i>	-	1,5	1,4	1,5-3	1,4-1,5
<i>Resistenza a rottura [MPa]</i>	600-2000	345-1035	800-1500	45-1100	343-2000
<i>Deformazione a rottura [%]</i>	1-4	2,7-3,2	1,2-1,6	2,7-3,2	1,2-3,3
<i>Modulo elastico [GPa]</i>	12-85	27,6	60-80	27,6	27,6-103
<i>Cellulosa [%]</i>	64,1-73,8	-	-	-	62-72
<i>Lignina [%]</i>	2,0-2,9	-	-	-	2-5
<i>Emicellulose [%]</i>	11-16,7	-	-	-	18,6-20,6
<i>Altre sostanze [%]</i>	10-12	-	-	-	3,8-4,0

Attualmente però risulta molto lacunoso tutto quel segmento di studio che riguarda gli aspetti più strettamente applicativi dei compositi prodotti con le fibre naturali, sebbene essi siano stati elevati a potenziali concorrenti dei tradizionali compositi con fibre di carbonio o vetro.

Ugualmente carente appare la tematica della durabilità, che sebbene estremamente approfondita per quanto riguarda le fibre naturali, non risulta ancora approfondita per quel che riguarda i materiali compositi da esse derivati soprattutto in relazione al substrato su cui possono essere applicati

Infine un aspetto certamente molto interessante ma poco approfondito riguarda l'impatto economico che ha avuto la diffusione di fibre naturali nel confezionamento di materiali compositi naturali. Spesso si esalta l'economicità dei materiali naturali, la cui adozione può aiutare ad abbattere i costi di intervento che altrimenti risulterebbero proibitivi. *Bismarck et al.* (2006) affronta la questione degli effetti socio-economici che l'aumento della richiesta di fibre tessili ha avuto sulle realtà produttrici. Determinare se ed in che modo il boom delle fibre vegetali produca benefici non solo ambientali, ma anche socio-economici, legittima in ultima analisi tutto il fermento che ha caratterizzato la recente ricerca nell'ambito degli NFRPs.

2.6 Normativa di riferimento

La normativa di riferimento ha determinato ed è stata a sua volta influenzata da quella che è stata la tendenza individuata rispetto al legno. Questo materiale ha goduto fino a tempi recenti di una scarsa fiducia come elemento strutturale, mancanza associata ad una specifica normativa nel settore piuttosto lacunosa. Ciò ha quindi determinato un ritardo anche nell'adozione dei materiali fibrorinforzati anche negli interventi che riguardano elementi lignei e lo sviluppo di una propria normativa.

Il Consiglio Nazionale delle Ricerche è stato tra i primi a cercare di rispondere all'esigenza nazionale di conoscenza e standardizzazione del settore dei materiali compositi, emanando una serie di documenti tecnici (DT) per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento con compositi fibrorinforzati, documenti che si distinguono tra loro per il tipo di materiale o struttura verso cui è rivolto l'intervento. Il primo DT emanato riguarda gli interventi su materiali e strutture di cemento armato, cemento armato precompresso e muratura (CNR-DT 200/2004), il secondo quelli su strutture lignee (CNR-DT 201/2005) e l'ultimo su strutture metalliche (CNR-DT 202/2005). Mentre il primo ha assunto carattere normativo ed è stato recentemente revisionato (CNR-DT 200-R1/2004), gli altri due risultano essere studi preliminari finalizzati ad una futura redazione di istruzioni a carattere normativo ed entrambi riportano la specifica che si tratta ancora di un testo di tipo divulgativo, quindi non elevato al rango di raccomandazione.

Attualmente la norma che maggiormente abbraccia la problematica di interventi di consolidamento di strutture in legno è la UNI 11138 (2004) *Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e*

l'esecuzione di interventi. Questa norma definisce la sequenza logica delle attività necessarie alla progettazione, realizzazione e mantenimento di un intervento di rinforzo. Essa prescrive l'obbligo di determinare l'efficacia dell'operazione in fase progettuale sia in termini previsionali, con le classiche metodologie di verifica, sia attraverso simulazione sperimentale. All'interno di questo documento non vi è però alcuna menzione specifica ai materiali adottabili.

Di recente pubblicazione è la norma UNI EN 16245 (2013) *Compositi polimerici rinforzati con fibre. Dichiarazione delle caratteristiche delle materie prime.* Come chiaramente specificato dal titolo la norma riguarda solo le modalità con cui devono essere espresse le caratteristiche delle materie prime per la redazione di schede tecniche.

La normativa riguardante i materiali compositi, intesi in senso generale, appare molto lacunosa e di fatto assente per quanto riguarda l'uso di tali materiali negli interventi di rinforzo dei strutture in legno. Totalmente assente risulta essere anche la normativa relativa ai materiali più recenti ed innovativi, come quelli prodotti con fibre naturali.

Capitolo 3

I materiali

In questo capitolo vengono esposti nel dettaglio i materiali studiati durante il lavoro di tesi: sono presentate le caratteristiche del legno, delle tre fibre (carbonio, vetro e lino) e delle due matrici (resina epossidica e colla vinilica) con cui sono stati prodotti quattro compositi diversi.

3.1 Legno

Nella sperimentazione è stato utilizzato legno di abete rosso di provenienza austriaca (*Picea abies*), fornito dalla ditta Bozza Legnami di Ponte di Brenta (PD). Le travi utilizzate nella loro interezza e da cui sono stati anche ottenuti i diversi provini dimensioni più piccole, hanno sezione pari a 11,5x13,5 cm e lunghezza variabile tra 210 e 240 cm (*figura 3.1*).

Le caratteristiche del legno sono state desunte dalle prove effettuate nel merito di due tesi di laurea svolte presso l'Università di Padova, che hanno utilizzato il medesimo legno di abete. I dati ottenuti dalle prove sperimentali sono stati confrontati con quelli proposti da *Giordano (1999)*.



Figura 3.1: Trave di legno di abete utilizzata nella sperimentazione.

I valori proposti in *tabella 3.1* sono quindi specificatamente tratti da:

- (i) Giordano, G. (1999) *Tecnica delle costruzioni in legno*, Milano, Hoepli
- (ii) Francescato, D. (1995-1996) *Analisi sperimentale e modellazione del comportamento di connettori a taglio in travi composte di legno massiccio*, Tesi di laurea, Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni (Facoltà di Ingegneria), Università degli Studi di Padova
- (iii) Tempesta, P. (1996-1997) *Una proposta per il rinforzo dei solai in legno: indagine teorico sperimentale ed aspetti applicativi*, Tesi di laurea, Dipartimento di Costruzione della Architettura, Istituto Universitario di Architettura di Venezia

Tabella 3.1: Confronto di alcune caratteristiche fisico-meccaniche del legno di abete rosso.

	Giordano	Francescato	Tempesta
Peso specifico [kg/m ³]	460	-	454,9
Resistenza a compressione assiale [MPa]	39	45 ⁽¹⁾	44 ⁽³⁾
Resistenza a flessione [MPa]	70	55 ⁽²⁾	65,54
Resistenza a trazione [MPa]	84	-	-
Resistenza al taglio [MPa]	6,6	-	-
Modulo di taglio [MPa]	-	-	721 652
Modulo elastico a flessione [MPa]	13000	13756 ⁽²⁾	~10000

- (¹) Valor medio calcolato dalle prove eseguite su 4 provini di legno privo di difetti delle dimensioni 20x20x40mm (UNI ISO 3787:85).
- (²) Valor medio calcolato dalle prove eseguite su 2 travi di legno delle dimensioni 12x15x210mm (ISO 8375:85).
- (³) Valor medio calcolato dalle prove eseguite su 15 provini sezione 18x18mm e lunghezza compresa tra 38 e 45mm (UNI ISO 3787:85).

3.2 Materiali compositi a matrice polimerica

I materiali compositi sono costituiti essenzialmente da due costituenti principali, ossia il rinforzo che ha lo scopo di sopportare le sollecitazioni, determinando principalmente le prestazioni meccaniche del sistema composito e la matrice, la quale trasferisce gli sforzi al rinforzo e lo mantiene nella posizione voluta, proteggendolo dagli agenti esterni (Minguzzi, 1998).

I materiali compositi studiati sono prodotti a partire da diversi costituenti di base, secondo le combinazioni proposte in *tabella 3.2*.

Tabella 3.2 Combinazioni di fibre e matrici che costituiscono gli FRP oggetto di studio.

ID	Fibra	Matrice
CFRP	carbonio	resina epossidica
GFRP	vetro	resina epossidica
FFRP	lino	resina epossidica
FFRP(V)	lino	colla vinilica

3.2.1 Fibra di carbonio

La fibra di carbonio è utilizzata per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si caratterizza per l'alto modulo di elasticità normale e per l'elevata resistenza. Utilizzata già da Edison alla fine del XIX sec. per la produzione della prima lampadina, ebbe il maggiore sviluppo negli anni '50 nel settore dell'aeronautica.

La grafite, di cui è costituita ha struttura cristallina di tipo esagonale; gli atomi di carbonio sono organizzati in strutture essenzialmente planari, connessi nel piano mediante legami covalenti, e mediante forze di Van der Waals a livelli interplanare. Questa struttura definisce il comportamento fortemente anisotropo della fibra in cui il modulo elastico e la resistenza sono molto più elevati nelle direzioni contenute nei suddetti piani, piuttosto che in direzione trasversale. La tecnologia mediante cui si ottengono le fibre di carbonio è la pirolisi controllata a temperature variabili tra 1000 e 2000 °C, cioè la decomposizione termica in assenza di ossigeno di sostanze organiche contenenti carbonio. I precursori più largamente sfruttati sono fibre di poliacrilonitrile (PAN), di rayon e ottenute dal catrame. Il processo di carbonizzazione avviene a temperature comprese tra 1100 e 1500 °C e la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio, presenti nel precursore, vengono eliminati. Le fibre così carbonizzate possono essere sottoposte ad un trattamento di grafitizzazione a 3000 °C. Con il termine *fibre di carbonio* si indicano le fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l'80 ed il 95% e con struttura non completamente cristallina come quella della grafite, comunemente utilizzate per il confezionamento di materiali compositi. Il termine *fibre di grafite*, sebbene spesso utilizzato come sinonimo, indica quelle con un contenuto di carbonio maggiore del 99%.

Le principali caratteristiche delle fibre di carbonio sono (i) elevate proprietà meccaniche, (ii) bassa resistenza all'impatto, (iii) elevata resistenza alle alte temperature, (iv) coefficiente di dilatazione termica lineare praticamente nullo, (v) impermeabilità all'acqua, (vi) buona conducibilità elettrica e termica, (vii) elevata resistenza alla corrosione e (viii) basso allungamento a rottura. Poiché tali fibre presentano difficoltà di impregnazione da parte di molte resine, attualmente vengono attuati procedimenti produttivi specifici per ovviare al problema, come l'ossidazione della superficie che provoca un corrugamento che facilita l'adesione o il ricoprimento delle fibre con un film epossidico che favorisce l'adesione con la resina e contemporaneamente previene l'abrasione e facilita la lavorabilità (CNR-DT 200/2004, Minguzzi, 1998).

Gli FRP a base di fibre di carbonio si denotano usualmente con l'acronimo *CFRP* da *CarbonFRP*.

Nel presente studio viene utilizzata la fibra di carbonio *MBrace Fibre Alta resistenza*, prodotta dalla BASF S.p.A. (cfr. Allegato). Si presenta di colore nero lucido, liscia al tatto e abbastanza rigida (figura 3.2). Essa è stata indicata con la lettera **C** e il composito con essa prodotto viene designato con la sigla **CFRP** o **EP_C** (cfr. §4.7).

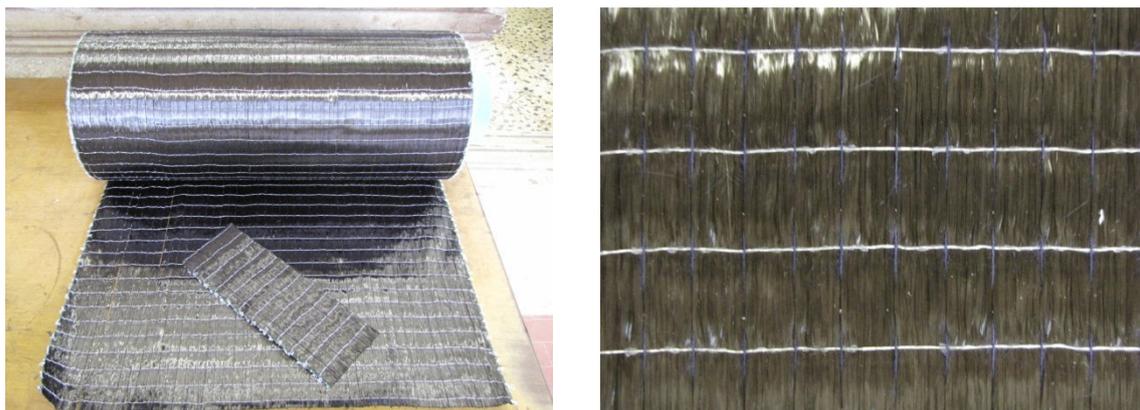


Figura 3.2: Fibra di carbonio MBrace, utilizzata nella sperimentazione.

3.2.2 Fibra di vetro

La fibra di vetro si sviluppò negli anni '30 al fine nella produzione di isolanti elettrici, ora sono comunemente usate in campo navale ed industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte, grazie alla loro elevata resistenza.

Esse sono ottenute per fusione a 1550 °C e filatura di una miscela (batch) costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare da cui si ottengono gli ossidi inorganici abitualmente impiegati nell'industria del vetro (quali SiO_2 , CaO , MgO e Al_2O_3). La miscela fusa viene fatta raffreddare fino a 1250° C e lavorata in una filiera, alla cui uscita viene raffreddata ottenendo filamenti molto sottili ed estremamente resistenti, raggruppati, con l'imposizione eventuale di una leggera torsione, a formare una treccia o fibra. I filamenti ottenuti sono sottoposti a trattamenti di ensimaggio, altrimenti detto sizing che funge da lubrificante, previene l'abrasione, facilita il legame con la resina e risulta essere molto utile ai fini della durabilità e della resistenza a fatica (statica e dinamica) del materiale composito. Come nel classico vetro, anche nella produzione delle fibre, i componenti possono essere variati per natura e quantità, ottenendo materiali che hanno esattamente le caratteristiche desiderate, le fibre di vetro più diffuse sono il vetro E ed il vetro S (*tabella 3.3*).

In generale le fibre in vetro sono caratterizzate da (i) buona resistenza meccanica, (ii) buona resistenza alla fatica, (iii) buona stabilità dimensionale, (iv) discreta resistenza al calore, (v) elevata resistenza alla corrosione, (vi) buone proprietà di isolamento termico ed elettrico e (vii) limitata resistenza all'umidità.

Tabella 3.3: Composizione tipica delle fibre di vetro (% in peso) (CNR-DT 200/2004).

	Vetro E	Vetro S
Ossido di silicio	54,3	64,20
Ossido di alluminio	15,2	24,80
Ossido di ferro	-	0,21
Ossido di calcio	17,2	0,01
Ossido di magnesio	4,7	10,27
Ossido di sodio	0,6	0,27
Ossido di boro	8,0	0,01
Ossido di bario	-	0,20
Varie	-	0,03

Per le loro caratteristiche ma anche grazie al loro vantaggioso rapporto prestazioni/costo e alla loro compatibilità con molte resine le fibre di vetro sono quelle che trovano maggiore applicazione nella produzione dei compositi a matrice polimerica (CNR-DT 200/2004, Minguzzi, 1998).

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

La fibra di vetro utilizzata nella sperimentazione è la *MBrace Fibre vetro* della BASF S.p.A. (cfr. Allegato) e si presenta di consistenza simile alla fibra di carbonio, rigida e liscia al tatto (figura 33). Essa è stata indicata con la lettera **V** e il composito con essa prodotto viene designato con la sigla **GFRP** o **EP_V** (cfr. §4.7).



Figura 3.3: Fibra di vetro MBrace, utilizzata nella sperimentazione.

3.2.3 Fibra di lino

La fibra si ricava dalla fibratura floematica dello stelo del lino (*Linum usitatissimum*), pianta appartenente alle Linaceae. La raccolta viene effettuata nel periodo tra la sfioritura e la maturazione del frutto e la fibra mostra diverse caratteristiche a seconda della precocità in cui avviene la mietitura. Quando il fusto è ancora verde si ottiene il cosiddetto *lino azzurro*, una fibra molto sottile, ma scarsamente resistente, per questo utilizzata nella fabbricazione di merletti e ricami. Il *lino bianco*, maggiormente resistente ma meno fine, si ottiene quando il fusto è giallo ed il frutto giallo-verdastro. Ed infine quando fusto e frutto sono scuri, la fibra ottenuta è molto resistente, ma molto grossolana. In seguito alla raccolta, gli steli di lino vengono lasciati ad essiccare, poi a macerare nell'acqua ed infine vengono battuti al fine di eliminare i residui legnosi, prima di essere filati. Le singole fibre così ottenute hanno forma cilindrica e mostrano un sottile lume al centro (Canev et al., 2005). Il ciclo di coltivazione del lino è breve e dura solo 100 giorni dalla semina in marzo alla raccolta nel mese di luglio.

Il più grande produttore ed esportatore di lino in tutto il mondo è il Canada dal 1994, anche Francia, Belgio e Paesi Bassi sono paesi leader nella produzione, grazie alle condizioni climatiche particolarmente adatte alla coltivazione.

Come il cotone, anche il lino è costituito prevalentemente da cellulosa, la cui struttura però è più cristallina e ordinata e quindi più resistente. In figura 3.4 si può osservare il lino dalla scala macroscopica a quella microscopica.

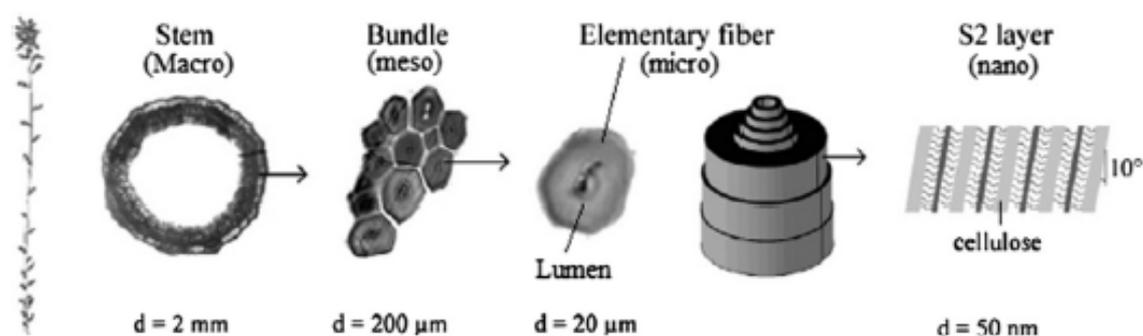


Figura 3.4: Struttura del lino dalla pianta alle fibrille di cellulosa (Yan et al., 2014).

La pianta di lino arriva fino a 90 cm di altezza e lungo tutto il fusto è costituita da forti fibre con diametro medio di 12-16 μm di. A livello macroscopico, il gambo di lino è costituito - dall'esterno verso l'interno - da corteccia, floema, xilema e una cavità centrale. La sezione

trasversale di un fascio contiene 10-40 fibre collegate tra loro principalmente da pectina. Su scala microscopica, ciascuna fibra elementare è costituita da pareti concentriche, che differiscono le une dalle altre per lo spessore e le componenti costitutive. Al centro della fibra elementare troviamo un piccolo canale aperto chiamato il lumen, che contribuisce all'assorbimento dell'acqua.

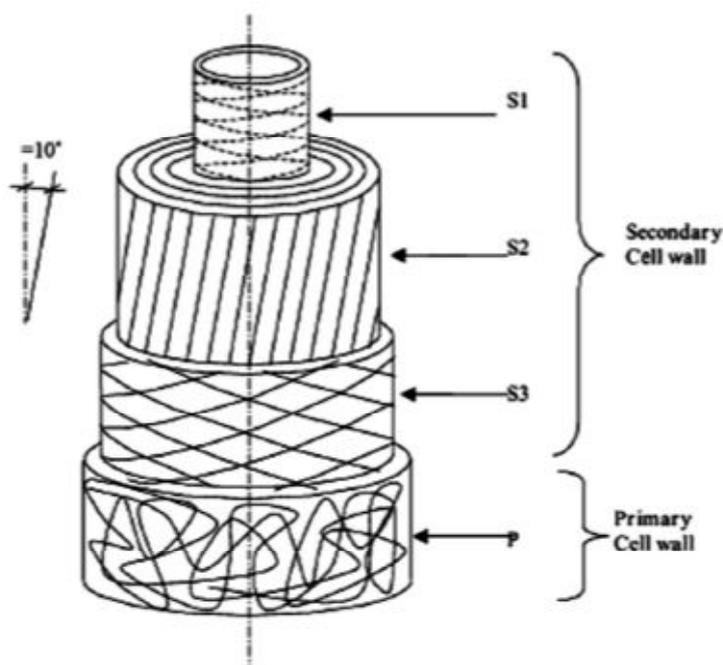


Figura 3.5: Micro-struttura di una cellula di fibra di lino (Yan et al., 2014).

All'esterno troviamo la parete cellulare primaria spessa $0,2 \mu\text{m}$ ed internamente una spessa parete cellulare secondaria che è responsabile della resistenza della fibra e racchiude il lumen. La maggior parte della fibra è essenzialmente costituita dallo strato S2 della parete secondaria, composta da microfibrille di cellulosa cristallina ed emicellulosa amorfa orientate a 10° rispetto all'asse della fibra, che forniscono un'elevata resistenza alla trazione (figura 3.5). Una microfibrilla è costituita da catene di cellulosa (zone cristalline) incorporate in una matrice amorfa prevalentemente di pectine ed emicellulose. L'angolo tra l'asse della fibra e le fibrille può influenzare la resistenza del lino (Yan et al., 2014).

I principali costituenti delle fibre di lino sono cellulosa, emicellulose, lignina, cera e pectina, in quantità variabili. Le prime tre sono le componenti principali che determinano le caratteristiche fisiche proprie del lino. La cellulosa è l'elemento organico della fibra più rigido e solido, ma essendo un polisaccaride semicristallino con una grande quantità di gruppi ossidrilici è responsabile della natura idrofilia del lino, che se abbinato ad una matrice

idrofobica mostra una pessima adesione fibra-matrice. Le emicellulose sono legate alle catene di cellulosa grazie a legami ad idrogeno e la loro struttura chimica le rende solubili in acqua e favorisce l'igroscopicità della fibra. La lignina e le pectine fungono principalmente da leganti, mentre le cere possono influenzare la bagnabilità e le caratteristiche di adesione delle fibre. Il lino è ricco di cellulosa (circa il 70% della composizione chimica totale), ma le percentuali dei diversi costituenti possono variare anche significativamente nei diversi materiali. Tali variazioni sono imputabili principalmente dalla specie e dalla varietà di pianta in studio, ma anche da fattori di coltivazione e produzione delle fibre e possono influenzare le proprietà fisiche e meccaniche del prodotto (Yan *et al.*, 2014).

Gli FRP a base di fibre di lino si denotano usualmente con l'acronimo *FFRP* da *FlaxFRP*.

Nella sperimentazione è stata usata la fibra di lino *FIDFLAX UNIDIR 430 HS43*, fornita da FIDIA srl, un tessuto unidirezionale ad alta resistenza, di colore grigio, ruvido al tatto e non rigido. (figura 3.6). Essa è stata indicata con la lettera **L** e i compositi con essa prodotti sono stati designati con le sigle **FFRP** o **EP_L** (se la matrice è epossidica) e **FFRP(V)** o **V_L** (se la matrice è vinilica), cfr. §4.7.



Figura 3.6: Fibra di lino FIDFLAX, utilizzata nella sperimentazione.

3.2.4 Resina epossidica

La resina epossidica è un polimero caratterizzato dalla presenza di un anello epossidico a tre atomi nella propria struttura (figura 3.7).

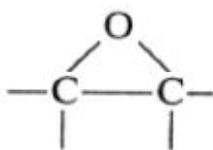


Figura 3.7: Gruppo epossidico.

I sistemi epossidici sono per lo più ottenuti da bisfenolo A ed epichloridina, uniti ad una diammina che favorisce il legame tra le catene, attraverso una reazione di *policondensazione*, ossia tramite una reazione tra due gruppi funzionali e formazione di nuovi legami ad ogni stadio. In *figura 3.8* è proposta la formula generale di reazione tra bisfenolo A ed epichloridina per la formazione del diepossido, ossia una catena lineare alle cui estremità si trovano i gruppi epossidici (-C-O-C-), i quali reagiscono successivamente nella formazione della resina epossidica.

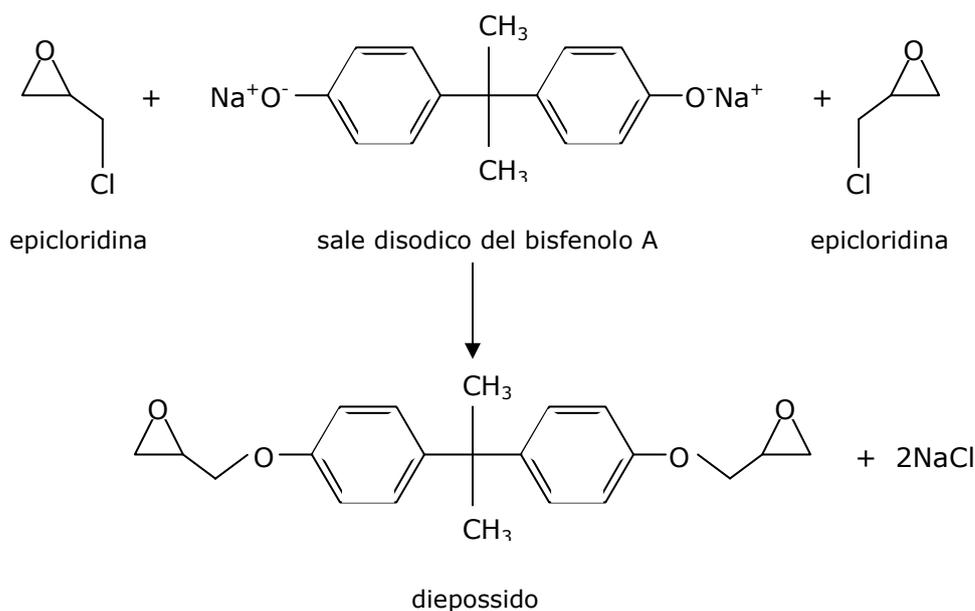


Figura 3.8: Reazione di formazione del diepossido.

La resina epossidica si ottiene per reazione del diepossido con una diammina in cui i gruppi amminici $-NH_2$ sono la parte attiva della reazione di polimerizzazione (*figura 3.9*). La restante parte della catena (genericamente indicata con -R) possono variare a seconda della casa produttrice del prodotto, modificando più o meno sensibilmente le caratteristiche finali della resina (*Brown, 2001*).

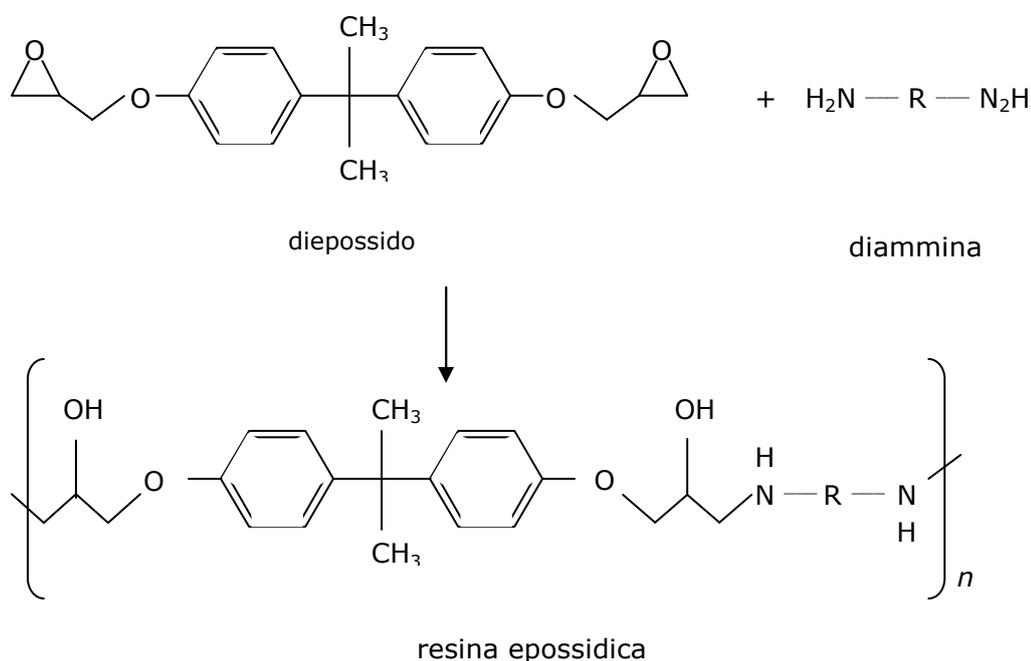


Figura 3.9: Reazione di formazione della resina epossidica.

La differenza di formulazione dei reagenti può influire sulla temperatura di transizione vetrosa T_g delle diverse resine, ma tendenzialmente si attesta intorno ai 60 °C. In caso di utilizzo a temperature di esercizio superiori è fondamentale valutare attentamente le possibili variazioni delle caratteristiche meccaniche, non esistono invece particolari limiti per la temperatura minima di esercizio (CNR-DT 200/2004).

La resina epossidica utilizzata nel presente studio è la *FIDSATURANT HM*, prodotta da FIDIA srl (cfr. Allegato). Il prodotto viene fornito come bicomponente: la componente A è di colore bianco lattescente e consistenza viscosa, la componente B è trasparente e poco viscosa e nel caso specifico si tratta di una isoformondiammina (3-amminometil-3,5,5-trimetilcicloesilamina). La polimerizzazione della resina si ottiene miscelando i due reagenti (A e B) in rapporto 2:1 di peso, come indicato dalla scheda tecnica (figura 3.10).

Per praticità negli ID dei provini essa è stata indicata con la lettera **EP** (cfr. §4.7).

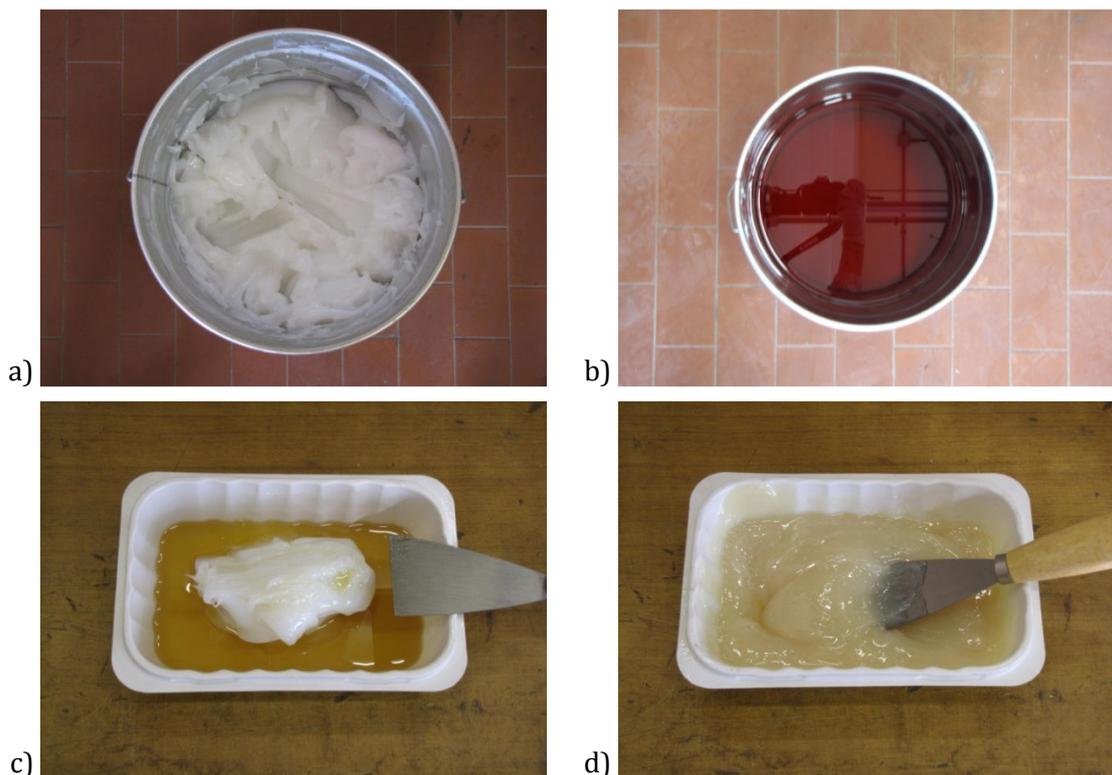


Figura 3.10: (a) componente A (diepoxido), (b) componente B (diammina), (c, d) resina epossidica.

La ditta produttrice propone l'utilizzo associato di un *primer* per la preparazione della superficie di incollaggio del composito. Il prodotto usato è anch'esso a base epossidica e bicomponente ed è denominato *FIDPRIMER* della FIDIA srl (cfr. Allegato). La componente A è incolore, trasparente e maggiormente viscosa, la componente B è trasparente, di colore giallo paglierino e meno viscosa e si miscelano in rapporto 2:1 come per la resina epossidica (figura 3.11). Il composto di consistenza liquida è stato steso con un pennello.

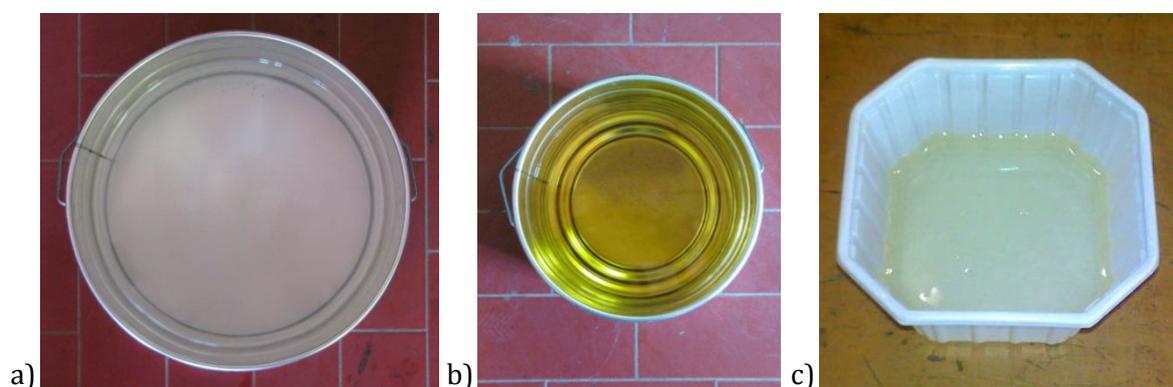


Figura 3.11: (a) componente A, (b) componente B, (c) primer.

3.2.5 Colla vinilica

La colla vinilica è un dispersione acquosa di polivinilacetato o PVAc (*Liewellyn e Williams, 1972*). Grazie alla sua buona capacità adesiva, il polivinilacetato viene utilizzato in vernici, pitture, adesivi e apretti per tessuti. (*Brydson, 1995*).

Il polivinilacetato si ottiene dall'acetato di vinile, di cui si ha notizia per la prima volta in un brevetto nel 1912, dove risulta come sottoprodotto nella preparazione di un altro estere. L'interesse commerciale per questo polimero inizia nel 1925, quando i processi di produzione industriale per ottenerlo vengono sviluppati e migliorati (*Federici & Giannotta, 1991*). Originariamente l'acetato di vinile veniva prodotto a livello industriale attraverso la reazione di acetilene con acido acetico (*figura 3.12*).

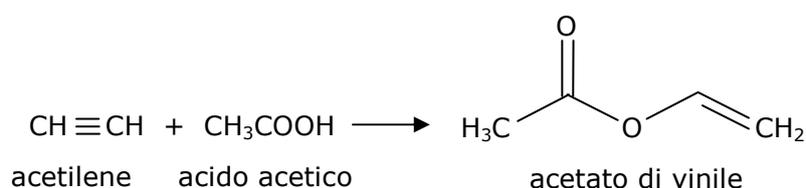


Figura 3.12: Reazione di formazione dell'acetato di vinile a partire da acetilene ed acido acetico.

In tempi recenti esso viene prodotto in grandi quantità attraverso l'ossidazione dell'etilene, facendo passare quest'ultimo in una soluzione di cloruro di palladio in acido acetico, contenente sodio acetato (*figura 3.13*).

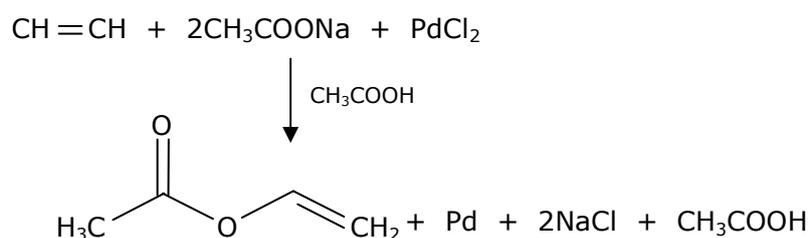


Figura 3.13: Reazione di formazione dell'acetato di vinile per ossidazione dell'etilene.

L'acetato di vinile viene polimerizzato in bulk, soluzioni, emulsioni o sospensioni (*Brydson, 1995*), più frequentemente in emulsioni costituite per circa il 55% da PVAc disperso in acqua e piccole quantità di agenti disperdenti, che si presentano come liquidi lattiginosi (*Federici e Giannotta, 1991*). Per produzioni industriali, la polimerizzazione degli esteri

vinilici avviene generalmente con il metodo del radicale libero. Le reazioni di inizializzazione e propagazione sono presentati in *figura 3.14*.

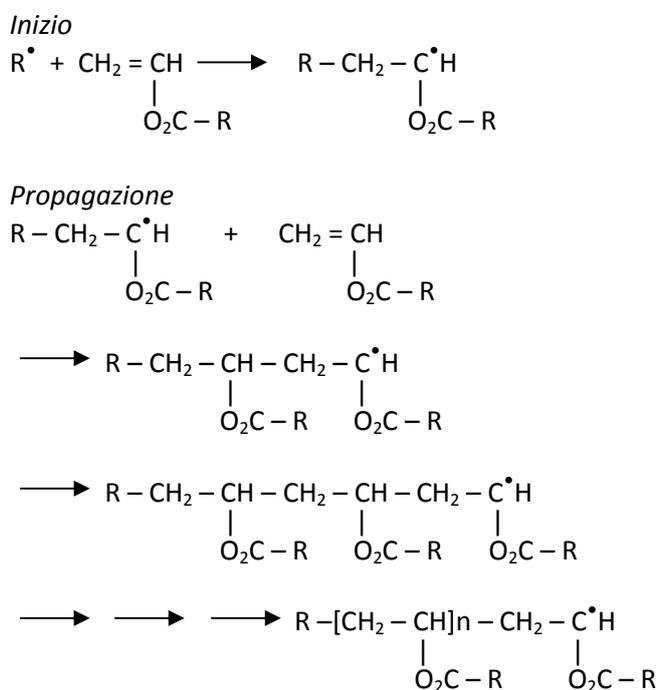


Figura 3.14: Polimerizzazione dell'acetato di vinile in polivinilacetato (il simbolo \bullet indica il radicale).

La terminazione della crescita della catena avviene per disattivazione del radicale libero. Ciò può accadere per la combinazione di due catene in crescita o per l'unione con una molecola di solvente, come un inibitore o un agente di trasferimento (*Liewellyn e Williams, 1972*)

Il PVAc ha proprietà variabili a seconda del peso molecolare (variabile tra 5000 e 20000 u) e per questo ha una temperatura di rammollimento compresa tra i 35 e i 50 °C (*Federici e Giannotta, 1991*). A causa delle scarse proprietà meccaniche del PVAc, esso non viene usato come materia plastica, ma viene impiegato in soluzione o dispersione per plastificanti, inerti e pigmenti in pittura, adesivi, leganti e cementi. Le dispersioni di PVAc sono ottimi collanti per legno, carta e materiali porosi in genere. Poiché la reazione di incollaggio avviene per perdita di acqua, le superfici non porose non sono buoni substrati di applicazione, poiché il processo risulta estremamente lento se l'acqua, oltre ad evaporare non viene assorbita anche dal substrato (*Liewellyn e Williams, 1972*).

La colla vinilica usata durante la sperimentazione si chiama *COSMO D3* ed è fornita dalla Weiss Chemie+Technik GmbH & Co.KG (cfr. Allegato). Si presenta della medesima consistenza delle colle viniliche comunemente in commercio, bianca, lucida e viscosa (*figura 3.15*).

Per praticità negli ID dei provini essa è stata indicata con la lettera **V** (cfr. §4.7).



Figura 3.15: Colla vinilica.

Il nome del prodotto (D3) deriva dalla sua classificazione secondo la normativa *UNI EN 204 (2002)* che descrive gli adesivi termoplastici per il legno in base alla loro durabilità rispetto alle condizioni di esercizio (*figura 3.16*)

Descrizione delle classi di durabilità

Classi di durabilità	Esempi di condizioni climatiche e campi di applicazione
D1	Interni in cui il contenuto di umidità del legno non è maggiore del 15%.
D2	Interni con occasionale esposizione a breve termine all'acqua corrente o condensata e/o occasionale umidità elevata a condizione che il contenuto di umidità del legno non sia maggiore del 18%.
D3	Interni con frequente esposizione a breve termine all'acqua corrente o condensata e/o notevole esposizione a umidità elevata. Esterni non esposti alle intemperie.
D4	Interni con frequente esposizione a lungo termine all'acqua corrente o condensata. Esterni esposti alle intemperie ma protetti mediante adeguato rivestimento superficiale.

Figura 3.16: Classi di durabilità della norma UNI EN 204 (2002).

3.3 Normativa di riferimento

La normativa consultata ed in parte adottata è divisibile in tre macroaree: (i) relativa al legno ed alle sue strutture, (ii) relativa ai materiali compositi e loro costituenti e infine (iii) relativa ai materiali compositi applicati al legno.

Al primo gruppo appartengono normative atte a classificare il legno strutturale e determinarne valori caratteristici ed a regolamentare gli interventi sulle strutture in opera:

UNI EN 13183-1 (2003) *Umidità di un pezzo di legno segato. Determinazione tramite il metodo per pesata;*

UNI EN 13183-2 (2003) *Umidità di un pezzo di legno segato. Stima tramite il metodo elettrico.*

UNI 11119 (2004) *Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera;*

UNI 11138 (2004) *Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi;*

UNI EN 338 (2009) *Legno strutturale. Classi di resistenza;*

UNI EN 384 (2010) *Legno strutturale. Determinazione dei valori caratteristici delle proprietà meccaniche e della massa volumica;*

UNI EN 408 (2010) *Strutture di legno. Legno massiccio e legno incollato. Determinazione di alcune proprietà fisiche e meccaniche utilizzata per la prova a flessione su travi;*

UNI EN 1912 (2012) *Legno strutturale. Classi di resistenza. Assegnazione delle categorie visuali e delle specie;*

Per quanto riguarda i materiali compositi la normativa non sempre è specifica e spesso si fa ricorso a normativa analoga:

UNI 8269 (1981) *Materie plastiche. Formatura a bassa pressione di lastre o pannelli stratificati ottenuti con resine termoindurenti rinforzate con fibre di vetro (o eventualmente altre fibre) per scopo di prova;*

UNI EN ISO 527 (da 1 a 5) *Materie plastiche. Determinazione delle caratteristiche a trazione*, la norma 527-2 è stata utilizzata per le prove di trazione sulle matrici, la 527-5 per la prova di trazione di strisce impregnate di tessuto ed infine la 527-1 per il calcolo dei moduli elastici;

UNI EN ISO 5079 (1998) *Tessili. Fibre. Determinazione della forza di rottura e dell'allungamento di rottura di fibre singole* utilizzata per la prova di trazione su singoli fili di lino;

UNI EN ISO 14126 (2001) *Compositi plastici rinforzati con fibre. Determinazione delle caratteristiche a compressione nel piano.*

Anche l'applicazione di materiali compositi al legno risulta ancora scarsamente normata nello specifico:

UNI 9595 (1990) *Determinazione della rapidità di presa a freddo di adesivi per legno mediante prove di taglio per trazione;*

UNI EN 204 (2002) *Classificazione degli adesivi termoplastici per legno per applicazioni non strutturali;*

UNI EN 302-3 (2006) *Adesivi per strutture portanti di legno. Metodi di prova. Parte 3: Determinazione dell'effetto dell'attacco acido alle fibre del legno, dovuto ai trattamenti ciclici di temperature e di umidità, sulla resistenza alla trazione trasversale* utilizzata per definire i criteri di condizionamento della fase 2.

Programma sperimentale

4.1 Introduzione

L'obiettivo di questa ricerca è comprendere quali siano i materiali compositi naturali a matrice polimerica che meglio si prestano ad un intervento di rinforzo di elementi in legno appartenenti a strutture di interesse storico-artistico. Nell'ampiezza del tema si è scelto di focalizzare l'attenzione sulla compatibilità e la durabilità dei materiali anche in condizioni ambientali critiche.

Inizialmente è stata effettuata una selezione delle matrici e delle fibre da studiare tra quelle disponibili sul mercato ed utilizzabili senza particolari accorgimenti presso il laboratorio dell'Università. Nel paragrafo 4.2 verranno brevemente riportate le prove che hanno condotto alla scelta dei prodotti studiati, sebbene il lavoro sia stato svolto nell'ambito della tesi dal titolo "Una tecnica di rinforzo innovativa per il miglioramento sismico di solai in legno con biocompositi" (*Tiozzo Pezzoli, 2011*), a cui si rimanda per una trattazione più ampia ed approfondita.

L'attività di laboratorio è stata articolata in quattro diversi momenti, che hanno permesso di determinare l'efficacia e la durabilità di possibili interventi di rinforzo mediante NFRP, partendo dall'analisi del dettaglio fino agli aspetti più generali. Poiché la questione della durabilità dei materiali compositi risulta di primaria importanza la maggior parte delle prove

sono state condotte anche su campioni sottoposti a specifici parametri di condizionamento, presentati nel paragrafo 4.5.

4.2 Selezione dei materiali

I materiali oggetto di sperimentazione sono state due fibre naturali e quattro diverse matrici, per un totale di otto possibili combinazioni di NFRPs (*tabella 4.1*).

Tabella 4.1: Combinazioni di fibre e matrici tra cui è stata effettuata la selezione dei materiali.

Matrice	Fibra
Resina epossidica	Lino
	Canapa
Colla vinilica	Lino
	Canapa
Resina fenol-resorcinica	Lino
	Canapa
Colla poliuretanic	Lino
	Canapa

Fibra di canapa

La fibra di canapa si ottiene dalla pianta della *Cannabis sativa*, appartenente alle Cannabaceae, pianta originaria dell' Asia e coltivata in Cina, India, nell'ex URSS e in Europa. La lavorazione della pianta per ottenere le fibre è analoga a quella del lino. Allo scopo di ottenere un filato fine ed omogeneo, la canapa viene sottoposta al processo di cotonizzazione che la riduce in fiocchi come il cotone. Come tutte le fibre di origine vegetale, anche la fibra di canapa è costituita essenzialmente da cellulosa.

Nella sperimentazione è stata usata la fibra di canapa *FIDHEMP UNIDIR 240 HS22*, fornita da FIDIA srl, un tessuto unidirezionale ad alta resistenza, di colore grigio, ruvida al tatto e non rigida. (*figura 4.1*)

Resina fenol-resorcica

La resina fenol-resorcica, altrimenti detta *red glue*, è una colla marina, ossia un adesivo resistente all'acqua di mare. Essa è costituita da resorcina $C_6H_4(OH)_2$, fenolo C_6H_4OH e formaldeide CH_2O e si presenta in forma liquida, densa e dal colore rosso scuro, da cui il nome. Per avviare la polimerizzazione deve essere miscelata con un agente indurente in polvere.

Il prodotto testato è fornito dalla ditta Commerciale Chimica Colori s.r.l, ed appartiene alla linea Sistemi Vernicianti per la Nautica (*figura 4.1*).

Colla poliuretana

La colla poliuretana appartiene alla famiglia di prodotti polimerici termoindurenti caratterizzati da legami uretanici $-NH-(CO)=O-$. La polimerizzazione del prodotto avviene in presenza di gruppi ossidrilici che permettono lo sviluppo di anidride carbonica che fa schiumare il prodotto.

La colla poliuretana utilizzata è la *COSMOPUR* della Weiss Chemie+Technik GmbH & Co.KG (*figura 4.1*).



Figura 4.1: (a) fibra di canapa, (b) resina fenol-resorcica, (c) colla poliuretana.

Per un approfondimento riguardo agli altri prodotti studiati, quali resina epossidica (*FIDSATURANT HM*, applicata con primer *FIDPRIMER*), colla vinilica (*COSMO D3*) e fibra di lino (*FIDFLAX UNIDIR 430 HS43*), si rimanda al capitolo 3 di questo lavoro. La fibra di lino considerata inizialmente nella selezione, differisce da quella utilizzata nel presente studio (trattasi di *FIDFLAX UNIDIR 300 HS44* di FIDIA srl), sebbene le caratteristiche principali di interesse nello studio non mostrino marcate differenze.

Per la scelta dei materiali ci si è avvalsi di due distinte prove, che hanno portato ad escludere alcuni prodotti: (i) prova preliminare di incollaggio, (ii) su campioni di matrice e (iii) test di trazione assiale su singoli fili di fibra.

Prove preliminari di incollaggio

Le prove preliminari di incollaggio hanno previsto l'applicazione delle quattro diverse matrici con la fibra di canapa su campioni di legno per valutarne le capacità adesive e di impregnazione del rinforzo (*figura 4.2*). La colla poliuretanicca ha reagito con l'umidità del legno provocando un aumento di volume causato dalla liberazione di anidride carbonica, che è proseguito nonostante si sia cercato di limitare l'espansione della colla con un peso (*figura 4.3*). La tendenza della colla poliuretanicca ad aumentare di volume costituisce una limitazione al suo impiego nel rinforzo.

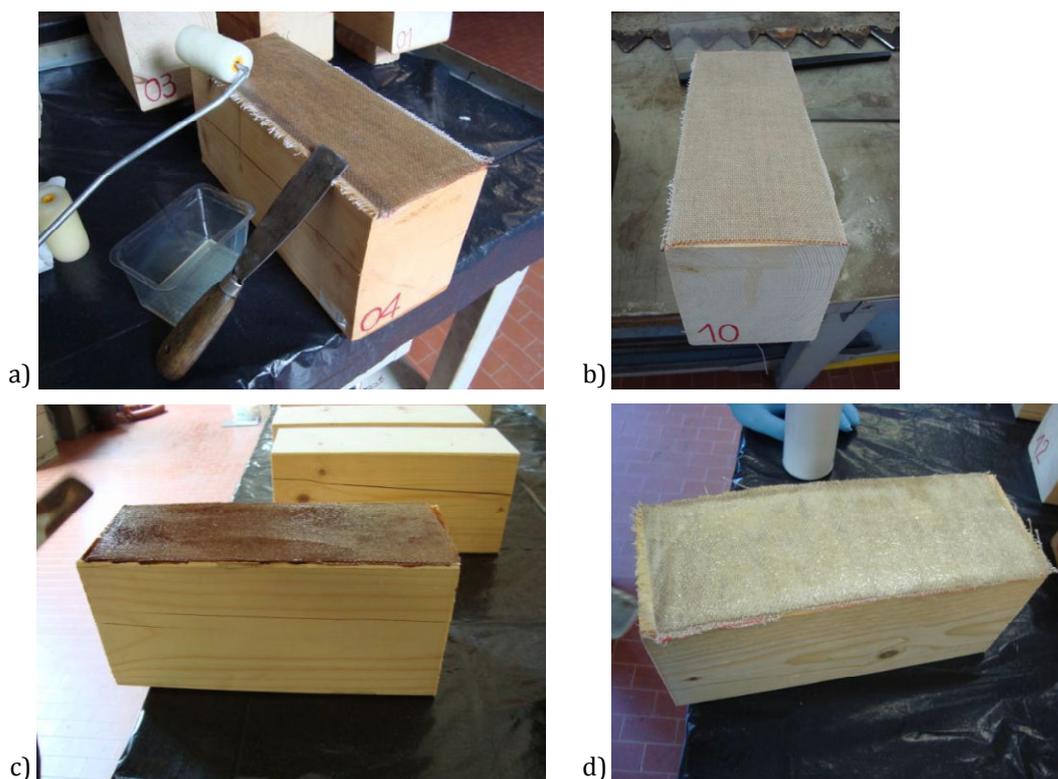


Figura 4.2: (a) resina epossidica, (b) colla vinilica, (c) resina fenol-resorcinicca, (d) colla poliuretanicca.



Figura 4.3: Aumento volumetrico riscontrato nella colla poliuretana.

Prove di trazione assiale su campioni di matrici

Per effettuare i test di trazione assiale su matrici sono stati preparati 6 provini di colla vinilica e 6 di resina fenol-resorcinica, i dati sulla resina epossidica (ed il primer) sono stati desunti da test precedenti nell'ambito del programma sperimentale del comitato Rilem (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages). Di seguito sono riportati i dati ottenuti (figura 4.4).

	larghezza media [mm]	spessore medio [mm]	P_{\max} medio [N]	$\sigma_{P_{\max}}$ medio [MPa]	f_{fk} (scheda tec.) [MPa]	$\varepsilon_{P_{\max}}$ medio	ε_f (scheda tec.)	$E_{(10-40)}$ [MPa]	$E_{(30-60)}$ [MPa]	$E_{(scheda\ tec.)}$ [MPa]
Primer	13,0	4,0	2729	52,5	45	3,60%	3,80%	241	2193	2500
Saturant HM	13,0	4,0	1713	32,9	70	3,77%	6,00%	1860	1415	2500

ID. CAMPIONE	larghezza media [mm]	spessore medio [mm]	P_{\max} [N]	$\sigma_{P_{\max}}$ [MPa]	$\varepsilon_{P_{\max}}$	$E_{(5-10)}$ [MPa]	$E_{(10-30)}$ [MPa]	$E_{(30-60)}$ [MPa]
1	12,5	3,0	106	2,8	240,90%	30	14	1
2	12,8	2,8	124	3,5	265,30%	35	11	1
3	12,1	2,7	115	3,5	255,30%	44	16	1
4	12,1	2,8	114	3,4	210,20%	75	47	24
5	12,0	2,8	104	3,1	226,80%	50	40	16
6	12,3	2,9	134	3,7	211,40%	73	57	43
<i>val. medio</i>	12,3	2,8	116	3	234,98%	51	31	14
<i>standard dev.</i>			11,3	0,3	0,228	19,0	19,6	17,0
<i>c.o.v.</i>			0,097	0,098	0,097	0,372	0,637	1,189

Figura 4.4: Valori finali dei test di trazione assiale su resina epossidica (sopra), desunti da prove Rilem e di colla vinilica (sotto).

I provini di resina fenol-resorcica non sono stati testati a causa della deformazione acquisita in fase di asciugatura (*figura 4.5*), presumibilmente a causa della reticolazione non omogenea alle due interfacce (aria/resina e resina/supporto). Tale comportamento ha comportato l'esclusione di questa matrice, tra quelle da studiare.



Figura 4.5: Deformazione osservata nei campioni di resina fenol-resorcica.

Prove di trazione assiale su singoli fili di fibra

Sono stati testati anche 6 fili di fibra di canapa e 6 di lino, in *figura 4.6* sono riportati dati ottenuti nella prova.

ID. CAMPIONE	[mm/min]	P_{max} [N]	per n' medio di fili	P_{max} medio fibra impr. [N]	ϵ_{Pmax}
c_01	10	106			6,00%
c_02	10	94			7,20%
c_03	10	93	34	4071	7,20%
c_04	10	112			6,90%
c_05	10	94			7,20%
c_06	10	98			7,30%
	<i>val.medio</i>	100	3400	4071	6,97%
	<i>dev.standard</i>	7,8			0,005
	<i>c.o.v.</i>	0,078			0,071

ID. CAMPIONE	[mm/min]	P_{max} [N]	per n° medio di fili	P_{max} medio fibra impr. [N]	ϵ_{Pmax}
I_01	10	74			8,00%
I_02	10	78			7,70%
I_03	10	83	33	3112	6,90%
I_04	10	88			8,10%
I_05	10	90			8,30%
I_06	10	74			7,20%
	<i>val.medio</i>	81	2673	3112	7,70%
	<i>dev.standard</i>	6,9			0,005
	<i>c.o.v.</i>	0,086			0,071

Figura 4.6: Valori finali dei test di trazione assiale su singoli fili di fibra di canapa (sopra) e lino (sotto).

L'esclusione della fibra di canapa dalla sperimentazione non è stata causata da inefficienza o incompatibilità del materiale, ma dall'impossibilità di reperirla sul mercato, in quanto uscita dalla produzione della ditta fornitrice.

Tabella 4.2: Combinazioni di fibre e matrici selezionate per la sperimentazione.

ID	Matrice	Fibra	Numero di strati di fibra	Trattamento
FFRP	resina epossidica	lino	1	-
FFRP(V)	colla vinilica	lino	1	-
FFRP(M)	resina epossidica	lino	1	mercerizzazione
CFRP	resina epossidica	carbonio	1	-
GFRP	resina epossidica	vetro	1	-
multiFFRP_2S	resina epossidica	lino	2	-
multiFFRP_2S(FT)	resina epossidica	lino	2	-
multiFFRP_3S	resina epossidica	lino	3	-
multiFFRP_4S	resina epossidica	lino	4	-
multiFFRP_4S	resina epossidica	lino	4	-
multiFFRP(V)_2S	colla vinilica	lino	2	-
multiFFRP(V)_2S(FT)	colla vinilica	lino	2	-
multiFFRP(V)_3S	colla vinilica	lino	3	-
multiFFRP(V)_4S	colla vinilica	lino	4	-
multiFFRP(V)_4S	colla vinilica	lino	4	-

Ricapitolando, le matrici selezionate sono resina epossidica e colla vinilica e la fibra naturale è quella di lino, cui sono state affiancate le fibre tradizionali di carbonio e vetro per una comparazione diretta (tabella 4.2).

4.3 Preparazione dei campioni di legno fibrorinforzati

I campioni in legno testati hanno forme e dimensioni molto diverse tra loro, nonostante ciò sono stati prodotti in maniera analoga, indipendentemente dalla geometria specifica necessaria nella singola prova.

La superficie di incollaggio è stata trattata con carta abrasiva a grana 60, al fine di pulire lo strato di legno esposto all'aria da eventuali depositi di materiale incoerente e rimuovere la patina di ossidazione che tipicamente si forma sulla superficie (Custodio et al., 2009), come si può osservare in figura 4.7. Inoltre tale trattamento contribuisce a rendere piana e sufficientemente scabrosa la superficie, evitando la formazione di eventuali bolle d'aria all'interfaccia e favorendo la penetrazione della resina nel legno.



Figura 4.7: Rimozione con carta abrasiva dello strato di ossidazione superficiale.

L'incollaggio degli FRP è avvenuta seguendo il più scrupolosamente possibile le schede tecniche dei diversi prodotti utilizzati (cfr. §Allegato).

Prima del posizionamento delle fibre dei compositi a matrice epossidica è stato steso un primer, la cui funzione è quella di migliorare l'adesione resina-legno. In assenza di specifiche raccomandazioni riguardo al tempo di attesa tra la stesura del primer e l'applicazione delle fibre si è deciso di utilizzare la medesima metodologia adottata in un lavoro precedente (Nardon, 2010). Le tempistiche di applicazione del composito possibili sono due: *a fresco*,

ossia entro 30 minuti dalla stesura del primer e *fuori tatto*, cioè in un tempo compreso tra le 4 e le 24 ore dalla stesura. Per la maggior parte dei campioni si è scelta la seconda opzione, fatta eccezione per i campioni della fase 1. Il primer ha consistenza piuttosto liquida ed è stato steso con un pennello, la resina epossidica invece con una spatola. La superficie del campione è stata ricoperta con una porzione di resina, sulla quale è stato posizionato il lembo di fibra, che è stata fatta aderire mediante un rullo, facendo penetrare la matrice tra i fili costituenti il rinforzo. Infine è stato steso un ultimo strato di resina con la duplice finalità di migliorare l'impregnazione della fibra e proteggerla dagli agenti esterni (*figura 4.8*).

I campioni con matrice vinilica sono stati preparati nella medesima maniera, ad eccezione dell'applicazione del primer, preparativo che per questo tipo di adesivo non è previsto.

I campioni sono stati lasciati a maturare circa 10 giorni prima del condizionamento o del test.



Figura 4.8: Realizzazione di un campione rinforzato con FRP (resina epossidica).

Preparazione dei campioni multistrato

Sono stati confezionati anche campioni con molteplici strati di fibra. I campioni indicati con le sigle _2S, _3S, _4S e _4S sono stati prodotti ripetendo – alternate - la stesura della matrice e l'applicazione della fibra fino all'ultimo lembo di fibra (per i campioni con la resina epossidica è stato comunque steso un film di primer sul legno). Alcuni campioni, riconoscibili dalla sigla _2S(FT), ossia fuori tatto, sono stati preparati diversamente. Il secondo strato di composito è stato applicato su un primo già asciutto al fine di comprendere se le diverse modalità di preparazione del composito multistrato possono avere degli effetti sull'efficacia dell'incollaggio e sulle prestazioni del composito.

I campioni multistrato sono stati lasciati a maturare per un periodo più lungo a causa del consistente spessore del materiale composito (*figura 4.9*).



Figura 4.9: Spessori dei materiali compositi con (a) 3 strati, (b) 4 strati e (c) 5 strati di fibra.

4.4 Metodologie investigative

L'attività di laboratorio è stata ampia e varia e si è articolata in: (i) prove di caratterizzazione dei materiali costituenti il sistema di rinforzo, (ii) prove di aderenza condotte mediante test di pull-off e shear test, (iii) analisi chimico-fisiche quali microscopia ottica, spettrofotometria infrarossa e termografia ed infine (iv) prove a flessione su travi rinforzate.

4.4.1 Prove di caratterizzazione dei materiali utilizzati

Le prove di caratterizzazione dei materiali utilizzati hanno previsto test sia sui singoli elementi costitutivi (fibre e matrici), sia sui materiali compositi.

La prova di trazione di singoli fili di lino è stata eseguita secondo normativa UNI EN ISO 5079 (1998) ed ha permesso di ottenere:

- (i) P e P_{max} [N]: carico,
- (ii) ε e ε_{Pmax} [%]: allungamento percentuale.

Si parla di allungamento e non di deformazione poiché non è stato possibile applicare un estensimetro che misurasse precisamente la deformazione del materiale, il dato è stato desunto dalla corsa della macchina di prova.

La prova di trazione delle due matrici è stata eseguita secondo normativa UNI EN ISO 527-2 (1997) ed ha permesso di ottenere:

- (i) P e P_{max} [N]: carico,
- (ii) σ e σ_{max} [N/mm²]: tensione,
- (iii) ε e $\varepsilon_{\sigma max}$ [%]: deformazione percentuale.

Dopo aver sottoposto a test gli elementi costitutivi e stato testato il materiale composito con la medesima prova secondo normativa UNI EN ISO 527-5 (2009), per poter confrontare i dati, ossia:

- (i) P e P_{max} [N]: carico,
- (ii) σ e σ_{max} [N/mm²]: tensione,
- (iii) ε e $\varepsilon_{\sigma_{max}}$ [%]: deformazione percentuale,
- (iv) E [GPa]: modulo elastico.

4.4.2 Prove di aderenza: test di pull-off e shear test

L'aderenza è un fenomeno fondamentale che garantisce l'efficienza dell'intervento di rinforzo (CNR-DT 201/2004), è quindi di particolare importanza studiarlo mediante idonee metodologie.

Il test di pull-off è una prova relativamente semplice, che al contempo fornisce utili informazioni sull'aderenza del materiale oggetto di studio, attraverso la valutazione della resistenza a trazione e la posizione della superficie di frattura (Bonaldo et al., 2004). È un metodo parzialmente distruttivo che agisce vicino alla superficie (Ramos et al., 2012). In assenza di una specifica norma per tale prova effettuata sul legno, si è fatto riferimento allo standard americano ASTM C 1583 - 04 pensato specificatamente per il calcestruzzo.

Le informazioni ottenute sono:

- (i) P_{max} [N]: carico massimo,
- (ii) σ_{max} [N/mm²]: tensione massima,
- (iii) modalità di rottura.

Anche lo shear-test - come la prova precedente - è una metodologia estremamente valida, sebbene non opportunamente normata, per valutare il fenomeno dell'aderenza. La fabbricazione dei campioni è relativamente semplice e lo strumento di prova è un a macchina a trazione, tuttavia la grande quantità di fattori in gioco possono portare ad una scorretta analisi del fenomeno di aderenza (Cognar et al., 2011). Il comportamento dei campioni sottoposti a sforzo di taglio non dipende esclusivamente dalle caratteristiche dei materiali studiati, ma anche da parametri geometrici, come la lunghezza della parte adesiva, la lunghezza totale dei due aderenti ed i loro spessori (Kafkalidis e Thouless, 2002) e dalla configurazione di prova (Guo et al., 2006).

I dati ottenuti sono molteplici, ossia:

- (i) P e P_{max} [N]: carico,

(ii) S e $S_{P_{max}}$ [mm]: spostamento,

(iii) modalità di rottura.

Rispetto alle prove precedenti, non si ricava la tensione dal carico e non si misura la deformazione del composito, bensì il suo scorrimento rispetto al legno.

4.4.3 Prove di flessione su travi fibrorinforzate

L'obiettivo delle prove di flessione su travi fibrorinforzate è di indagare il comportamento dell'elemento in scala semi-reale, nell'ottica di confermare quanto riscontrato con i test effettuati in scala locale e valutare le capacità dei materiali compositi naturali in sostituzione di quelli tradizionali. Inizialmente sono state eseguite prove su travi non rinforzate, per avere un termine di confronto e determinare l'effettivo miglioramento apportato dal rinforzo. La normativa di riferimento per tale prova è la UNI EN 408 (2010).

I dati ottenuti sono:

(i) P e P_{max} [N]: carico,

(ii) S e $S_{P_{max}}$ [mm]: spostamento,

(iii) modalità di rottura.

4.4.4 Analisi chimico-fisiche

Le analisi chimico-fisiche hanno lo scopo di supportare quanto determinato con i test meccanici, infatti le condizioni all'interfaccia ed il degrado dei materiali possono compromettere l'efficacia dell'intervento di rinforzo dell'elemento in legno. Sono state utilizzate sinergicamente tre metodologie per avere una visione completa d'insieme, tali metodi sono (i) la microscopia ottica, (ii) la spettrofotometria infrarossa e (iii) la termografia. La microscopia ottica è una tecnica semplice, se comparata ad altre tecniche, economica ed immediata. Il campione da sottoporre ad analisi non necessita di particolari trattamenti preventivi e le informazioni cercate sono immediate e spesso non necessitano ulteriori post-elaborazioni. Con essa è stata osservata l'interfaccia FRP/legno, per determinare la presenza di difetti che siano responsabili dei distacchi del materiale composito dal legno. Questa prova presenta però una limitazione, infatti oltre ad essere estremamente puntuale, senza la possibilità di avere una visione di insieme, può essere effettuato solo dopo i test meccanici, è quindi impossibile determinare la natura del difetto (introdotto dall'operatore o causato dai

condizionamenti). In questo senso la termografia ha sopperito a tale mancanza, infatti essendo una prova non distruttiva permette l'analisi del campione in diversi momenti della sperimentazione. Essa però richiede specifica strumentazione ed una fase complessa di post-elaborazione delle immagini.

Mediante la spettrofotometria IR sono state analizzate le matrici dei compositi per determinare un eventuale degrado intervenuto a causa dei condizionamenti e che possa spiegare le modalità di rottura ottenute nelle prove di aderenza.

Nessuna di queste metodologie è stata applicata seguendo specifiche norme di riferimento.

4.5 Parametri di condizionamento

I parametri di condizionamento indicano i valori di temperatura (T), umidità ambientale relativa (RH) e, nei casi che lo prevedevano, contenuto di umidità del legno (MC) che sono stati variati al fine di replicare in laboratorio le condizioni critiche in cui può trovarsi a lavorare il materiale composito applicato all'elemento strutturale. Il programma sperimentale è stato diviso in cinque fasi, ognuna delle quali mira ad approfondire uno specifico aspetto tra quelli individuati. Come già specificato per la preparazione dei provini, anche in questo caso pur variando le dimensioni e geometrie dei campioni testati, i condizionamenti effettuati sono i medesimi, salvo quando esplicitamente riportata una variazione alla procedura.

4.5.1 Fase 0 (F0) – Condizioni standard di riferimento.

La normativa UNI EN 408 (2010) riguardante la determinazione di alcune proprietà fisiche e meccaniche del legno, riporta come condizioni ambientali normali $T = 20 \pm 2 \text{ °C}$ e $RH = 64 \pm 4\%$. Quindi le condizioni standard di riferimento scelte sono quelle che tipicamente si sono rilevate nel Laboratorio per le Prove sui Materiali Strutturali del Dipartimento ICEA dove sono stati effettuati i test, il range di accettazione è superiore a quello della norma poiché la sperimentazione è stata condotta durante tutto l'anno:

- (i) $T = 22 \pm 4 \text{ °C}$,
- (ii) $RH = 64 \pm 10\%$.

La normativa UNI EN 384 (2010), regola la determinazione di altre proprietà meccaniche e la massa volumica del legno. Il testo riporta che il contenuto di umidità va

misurata quando il legno è in equilibrio con l'ambiente ($T = 20^{\circ}\text{C}$ e $\text{RH} = 64\%$) ed il valore più tipico misurato per le conifere è pari al 12%, pertanto si è scelto il range:

(iii) $\text{MC} = 10 \pm 2\%$,

sebbene la percentuale più frequentemente riscontrata è pari a circa 9-10%. Per quanto riguarda i test sugli elementi costitutivi il sistema composito (fibre e matrici) e sugli FRPs, sono state rispettate le suddette condizioni ambientali di temperatura e umidità, considerando i campioni pronti al test al raggiungimento di massa costante.

Tabella 4.3: Condizioni standard di riferimento per i diversi materiali.

Provino	T [°C]	RH [%]	MC [%]
Singoli fili di lino	22 ± 4	64 ± 10	Raggiungimento massa costante
Matrici	22 ± 4	64 ± 10	Raggiungimento massa costante
FRPs	22 ± 4	64 ± 10	Raggiungimento massa costante
Provini per pull-off test, shear test e prove di flessione su travi	22 ± 4	64 ± 10	10 ± 2

Tabella 4.4: Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 0.

Tipo di provino	N° prove	Tipo di provino	N° prove
Singoli fili di lino	6	<i>FFRP(M)*</i>	8
Matrici		<i>multistrato</i>	30
<i>EP</i>	6	Provini per shear test	
<i>V</i>	6	<i>FFRP</i>	3 x 14 mm
FRPs		<i>FFRP</i>	3 x 30 mm
<i>FFRP</i>	6 x 1 strato	<i>FFRP</i>	3 x 40 mm
<i>FFRP</i>	3 x 3 strati	<i>FFRP(V)</i>	3 x 30 mm
<i>FFRP</i>	3 x 4 strati	<i>FFRP(V)</i>	3 x 40 mm
<i>FFRP(V)</i>	6 x 1 strato	<i>FFRP(V)</i>	3 x 40 mm
<i>FFRP(V)</i>	3 x 3 strati	Travi	
<i>FFRP(V)</i>	3 x 4 strati	<i>FFRP</i>	2 x 3 strati
<i>CFRP</i>	3 x 1 strato	<i>FFRP</i>	2 x 4 strati
Provini per test di pull-off		<i>FFRP(V)</i>	2 x 3 strati
<i>FFRP</i>	12	<i>FFRP(V)</i>	2 x 4 strati
<i>FFRP(V)</i>	36	<i>CFRP</i>	2 x 1 strato
<i>CFRP</i>	8	<i>NR**</i>	2
<i>GFRP</i>	8		

* Con questa sigla si indicano i provini preparati con lino mercerizzato (cfr. §4.6).

** Travi non rinforzate (cfr. §4.4.3).

La massa costante si considera raggiunta quando i risultati di due pesate successive, eseguite in un intervallo di 6 h, non differiscono in misura maggiore dello 0,1% rispetto alla massa del provino (*tabella 4.3*).

I provini sottoposti a questi parametri sono numerosi poiché rappresentano i termini di confronto per condizioni maggiormente aggressive (*tabella 4.4*).

4.5.2 Fase 1 (F1) - influenza di elevati contenuti di umidità nel legno sulla riuscita dell'adesione degli FRP

Questa fase è stata pensata con lo scopo di valutare quanto le condizioni iniziali del legno siano influenti nella riuscita dell'adesione del composito.

A tal fine i campioni di legno sono stati imbibiti fino al raggiungimento di specifici valori di MC:

- (i) $MC_{20} = 20 \pm 2\%$,
- (ii) $MC_{30} = 30 \pm 2\%$,
- (iii) $MC_{40} = 40 \pm 2\%$

ed in seguito gli FRP sono stati applicati sulla superficie umida, precedentemente asciugata, per eliminare tutta l'acqua in eccesso sulla superficie.

Gli interventi su elementi in legno con contenuti di acqua superiori al 30% sono una pratica estremamente rara. Questi valori di umidità così elevati (30 e 40%) sono stati simulati per scopi di studio, sebbene poi nell'applicazione pratica degli FRP si attende l'asciugatura del legno prima di operare.

Avendo questa fase lo scopo ben preciso di indagare l'influenza delle condizioni del substrato sull'incollaggio, sono stati condizionati solo i provini delle prove di aderenza, ossia test di pull-off e shear test (*tabella 4.5*).

Tabella 4.5: Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 1.

Tipo di provino	MC ₂₀ = 20%	MC ₃₀ = 30%	MC ₄₀ = 40%
Test di pull-off	FFRP	8	8
	FFRP(V)	18	18
	CFRP	8	8
	GFRP	8	8
Shear test	FFRP	-	3
	FFRP(V)	-	3

I provini sono stati preparati nel modo seguente, sono stati levigati e puliti, pesati ed è stata misurata la MC, sono stati messi a bagno in vasche di dimensioni adatte ed il peso è stato monitorato con regolarità. I valori di MC desiderati sono stati calcolati con il metodo per pesata, poiché l'igrometro elettrico risulta meno preciso all'aumentare della MC misurata. Ci si è avvalsi della curva di imbibizione raccolta in un lavoro precedente (Nardon, 2010) per calcolare i tempi approssimativi di raggiungimento del contenuto di umidità voluto (figura 4.10).

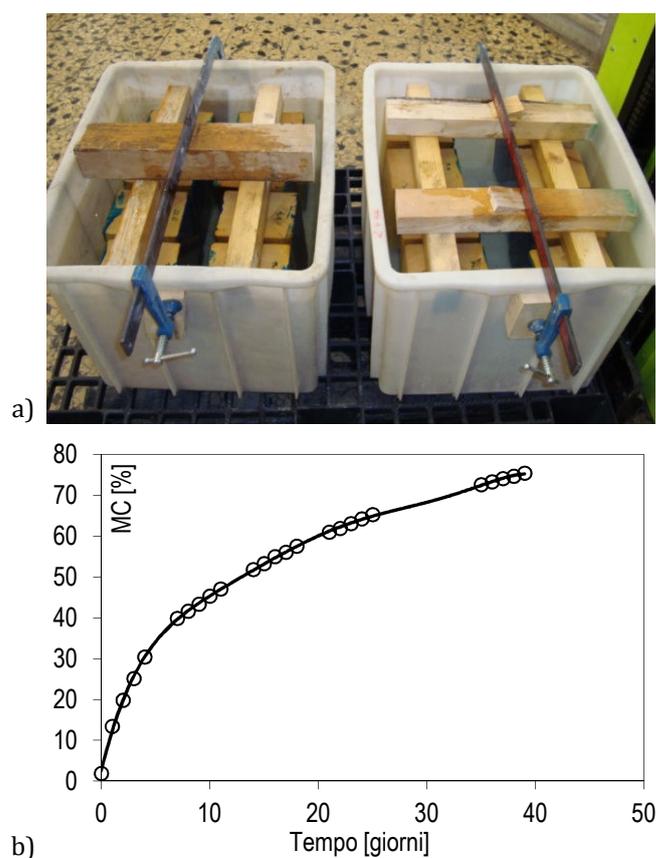


Figura 4.10: (a) campioni a bagno, (b) curva di imbibizione (Nardon, 2010).

4.5.3 Fase 2 (F2) - valutazione degli effetti combinati di umidità relativa e temperatura sull'adesione degli FRP

La fase 2 mira a favorire la comprensione dell'effetto combinato di umidità relativa e temperatura sugli FRPs applicati al legno.

I parametri di T e RH e le loro oscillazioni cicliche sono stati selezionati seguendo i criteri della norma *UNI EN 302-3 (2006)*.

Il trattamento dei campioni previsto è composto di quattro cicli, ognuno diviso in tre parti, sebbene siano state scrupolosamente seguite le indicazioni della norma riguardanti le modalità con cui ricreare le condizioni richieste, ci sono alcune variazioni da notare (*tabella 4.6*).

Tabella 4.6: Parametri di condizionamento.

Parte	Durata [h]	UNI EN 302-3 (2006)		Parametri effettivi di condizionamento	
		T [°C]	RH [%]	T [°C]	RH [%]
A	24	40 ± 2	87,4 ± 2,4	40 ± 2	~ 100
B	8	10 ± 2	87,4 ± 2,4	20 ± 2	~ 100
C	16	40 ± 2	< 20	40 ± 2	< 20

Tra un ciclo e l'altro i campioni sono stati mantenuti in condizioni ambientali normali (T = 20°C e RH = 64%) fino al raggiungimento di massa costante.

Le parti A e B sono state ottenute (come consigliato da normativa) posizionando i provini in un contenitore parzialmente riempito di acqua (avendo cura che non arrivasse a toccare il legno) e poi sigillato (*figura 4.11*).

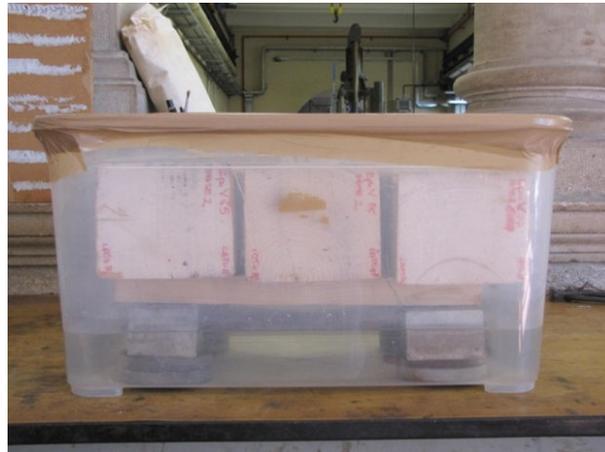


Figura 4.11: Contenitore sigillato utilizzato nella fase 2.

La parte A è stata completata ponendo il contenitore sigillato in forno a 40 °C., il riscaldamento ha, infatti, favorito l'evaporazione dell'acqua, causando l'aumento dell'umidità relativa. Nella parte B ci si è limitati ad estrarre il recipiente dal forno e lasciarlo a

temperatura ambiente (non avendo la possibilità di raffreddarlo a 10 °C). La condensa sviluppata all'interno si è mantenuta grazie alla chiusura ermetica.

Per la parte C i campioni sono stati posti in forno senza contenitore. Al termine di ogni ciclo i campioni sono stati fatti stabilizzare alle condizioni ambientali fino all'inizio del ciclo successivo.

In *tabella 4.7* è riportato il numero di campioni sottoposti a tale condizionamento.

Tabella 4.7: Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 2.

Tipo di provino	N° prove	Tipo di provino	N° prove
Provini per test di pull-off*		Matrici	
<i>FFRP</i>	24	<i>EP</i>	3
<i>FFRP(V)</i>	17	<i>V</i>	3
<i>CFRP</i>	12	Provini per shear test	
<i>GFRP</i>	12	<i>FFRP</i>	3
		<i>FFRP</i>	3

4.5.4 Fase 3 (F3) - valutazione degli effetti causati dall'esposizione a riscaldamento sull'adesione degli FRP

Le variazioni di temperatura, soprattutto se consistenti, causano deformazioni nel legno.

Tabella 4.8: Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 3.

Tipo di provino		T = 50 °C	T = 60 °C	T = 80 °C	T = 100 °C	T = 120 °C	T = 140 °C
Matrici	<i>EP</i>	-	-	-	3	-	3
	<i>V</i>	-	-	-	3	-	3
FRPs	<i>FFRP</i>	-	-	-	3	-	3
	<i>FFRP(V)</i>	-	-	-	3	-	3
	<i>FFRP</i>	8	8	8	8	8	8
	<i>FFRP(V)</i>	12	12	8	8	12	12
	<i>FFRP(M)</i>	-	-	4	4	4	-
Test di pull-off	<i>CFRP</i>	4	8	8	8	8	8
	<i>GFRP</i>	4	8	8	8	8	8
	<i>FFRP(M)</i>	-	-	4	4	4	-
Shear test	<i>FFRP</i>	-	-	-	3	-	3
	<i>FFRP(V)</i>	-	-	-	3	-	3

È fondamentale valutare se esse possano costituire un serio problema all'adesione dei compositi e se la temperatura possa causare degrado del materiale composito o di uno dei suoi costituenti.

I diversi campioni sono stati sottoposti a riscaldamento a specifiche temperature per 24 ore in un forno ventilato (*tabella 4.8*).

4.5.4 Fase 4 (F4) e fase 4 (F4) - valutazione degli effetti causati da una prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità sull'adesione degli FRP

Il legno è un materiale facilmente attaccabile da parte di organismi che trovano ideali condizioni di proliferazione, laddove l'umidità è elevata, in questo senso è di grande importanza comprendere se la diffusione di tali organismi può arrivare ad intaccare anche il materiale composito, compromettendone le proprietà ed inficiando l'aderenza all'interfaccia. Queste due fasi mirano, quindi, ad investigare gli effetti di una prolungata esposizione dei campioni ad elevati valori di umidità relativa e contenuto di acqua del legno. Esse si sono svolte secondo le medesime modalità, la differenza tra le due fasi è costituita dai tempi di permanenza in condizioni di elevata umidità, cioè:

- (i) 30 giorni per la fase 4,
- (ii) 60 giorni per la fase 4.

I provini sono stati imbibiti, con il composito già applicato, in maniera analoga a quelli della fase 1:

- (i) $MC_{20} = 20 \pm 2\%$,
- (ii) $MC_{30} = 30 \pm 2\%$,
- (iii) $MC_{40} = 40 \pm 2\%$.

Una volta raggiunta la MC desiderata, i campioni sono stati asciugati con un panno e sigillati, ancora bagnati in sacchi chiusi ermeticamente. L'impossibilità di evaporazione dell'acqua assorbita ha creato condizioni di elevata umidità relativa negli immediati contorni dei provini. Le *tabelle 4.9 e 4.10* riportano il numero di campioni sottoposti ai condizionamenti.

Tabella 4.9: Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 4.

Tipo di provino		MC ₂₀ = 20%	MC ₃₀ = 30%	MC ₄₀ = 40%
Matrici	EP	-	-	3
	V	-	-	3
FRPs	FFRP	-	-	3
	FFRP(V)	-	-	3
Test di pull-off	FFRP	12	12	12
	FFRP(V)	18	18	18
	CFRP	12	12	12
	GFRP	12	12	12
Shear test	FFRP	-	-	3
	FFRP(V)	-	-	3

Tabella 4.10: Tipo di provini e numero di prove per il condizionamento della FASE 5.

Tipo di provino		MC ₂₀ = 20%	MC ₃₀ = 30%	MC ₄₀ = 40%
Test di pull-off	FFRP	12	12	12
	FFRP(V)	17	18	18
	FFRP(M)	4	4	4

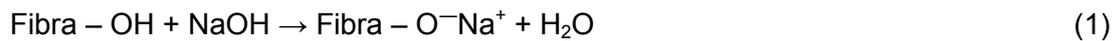
4.6 Mercerizzazione

Come già accennato nel capitolo 2, la mercerizzazione è un metodo utilizzato per ottenere fibre di alta qualità, mediante un trattamento alcalino.

Tale trattamento produce la fibrillazione, ossia la scomposizione del fascio di fibre in fibre con diametro inferiore, aumentando le proprietà specifiche come la ruvidezza della superficie, che migliora l'adesione tra la fibra e la matrice polimerica e migliorando anche le proprietà meccaniche, come resistenza e rigidità.

La mercerizzazione inoltre permette di pulire e modificare chimicamente la superficie della fibra, diminuendo il processo di assorbimento dell'umidità. Essa ha effetto sulla composizione chimica della fibra di lino, sul grado di polimerizzazione e sull'orientamento molecolare dei cristalli di cellulosa, a causa della rimozione di sostanze incrostanti, prima tra tutte la lignina.

La reazione chimica alla base del trattamento è la seguente (1):



La mercerizzazione porta anche ad un aumento della quantità di cellulosa amorfa, a discapito della cellulosa cristallina, e alla rimozione dei legami idrogeno nella struttura reticolata (Kalia et al., 2009).

In questa sperimentazione, la mercerizzazione è stata testata su una porzione di fibra di lino, utile a produrre la fibra per la produzione di materiale composito (la configurazione ed il confezionamento dei provini con il lino mercerizzato sono gli stessi di quelli con lino non trattato).

La procedura di trattamento seguita è quella riportata da Stocchi et al., 2007 in cui la fibra è stata posta in tensione assiale su un telaio (figura 4.12).

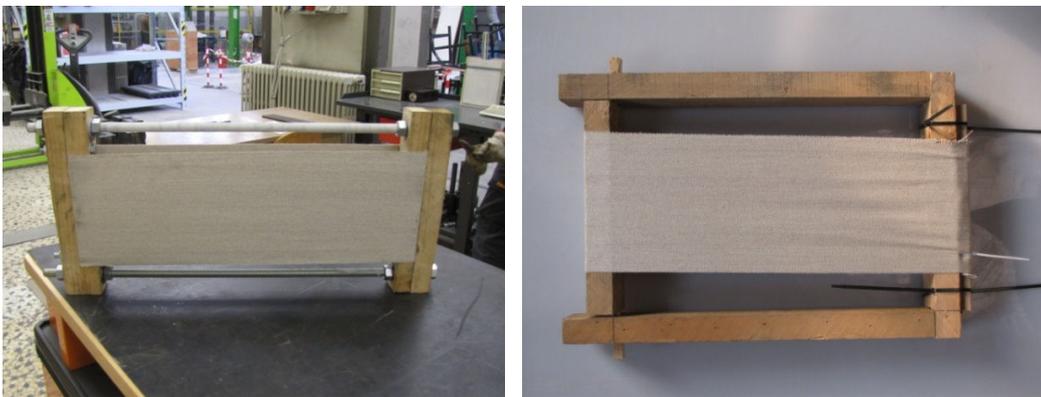


Figura 4.12: Due diversi telai utilizzati per la mercerizzazione della fibra di lino.

La fibra così bloccata è stata quindi immersa in una vasca contenente una soluzione acquosa di NaOH al 4% m/V (cioè 40 di soda ogni litro di acqua), per 4h a temperatura ambiente (figura 4.13).

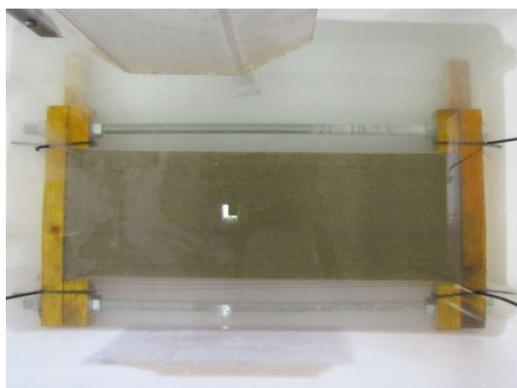


Figura 4.13: Telaio posto all'interno della vasca.

L'acqua è stata mantenuta costantemente movimentata per evitare che la deposizione sul fondo del composto alcalino (figura 4.14). L'agitazione della soluzione è stata praticata montando su un trapano a colonna una barra filettata di alluminio avente all'estremità un elemento a forma di paletta. L'avvio a velocità estremamente blanda del trapano provoca il movimento dell'acqua.



Figura 4.14: Strumentazione adottata per tenere costantemente movimentata la soluzione alcalina.

Al termine delle 4 ore, la fibra è stata rimossa dalla vasca e lasciata per diverse ore sotto un flusso costante di acqua corrente per rimuovere l'eccesso di NaOH e riportarla a pH neutro (il pH è stato visualizzato mediante cartina tornasole).

La fibra è stata infine rimossa dal telaio e lasciata asciugare a temperatura ambiente per 24h. La fibra di lino mercerizzata è stata designata con la lettera **LM** e il composito con essa prodotto viene indicato con la sigla **FFRP(LM)** o **EP_{LM}** (cfr. §4.7).

4.7 Nomenclatura dei campioni

Le sigle, le abbreviazioni e gli acronimi utilizzati per indicare i materiali compositi sono molteplici, per chiarezza si riporta quindi una sintesi.

I diversi materiali compositi a matrice polimerica (detti anche FRPs) sono comunemente indicati con acronimi che indicano il tipo di fibra di cui sono costituiti, dando per scontato l'utilizzo della resina epossidica quale matrice:

- (i) **CFRP**: *materiale composito con fibra di carbonio e resina epossidica (da CarbonFRP),*
- (ii) **GFRP**: *materiale composito con fibra di vetro e resina epossidica (da GlassFRP),*
- (iii) **FFRP**: *materiale composito con fibra di lino e resina epossidica (da FlaxFRP).*

Per necessità sono stati introdotti alcuni acronimi per designare anche gli altri materiali compositi utilizzati:

- (i) **FFRP(V)**: *materiale composito con fibra di lino e colla vinilica,*
- (ii) **FFRP(M)**: *materiale composito con fibra di lino mercerizzata e resina epossidica,*
- (iii) **multiFFRP**: *materiale composito multistrato con fibra di lino e resina epossidica,*
- (iv) **multiFFRP(V)**: *materiale composito multistrato con fibra di lino e colla vinilica.*

Nonostante queste sigle utilizzino i termini inglesi per indicare la fibra caratteristica, nella nomenclatura dei provini testati sono state utilizzate lettere che rimandano al termine italiano del materiale:

- (i) **EP**: *resina epossidica,*
- (ii) **V**: *colla vinilica,*
- (iii) **L**: *lino,*
- (iv) **C**: *carbonio,*
- (v) **V**: *vetro,*
- (vi) **LM**: *lino mercerizzato.*

Quindi il tipo preciso di composito analizzato è determinato con la sigla della matrice, seguita da quella della fibra in pedice (ad es.: **EP_L** indica il materiale composito costituito da fibra di lino e resina epossidica).

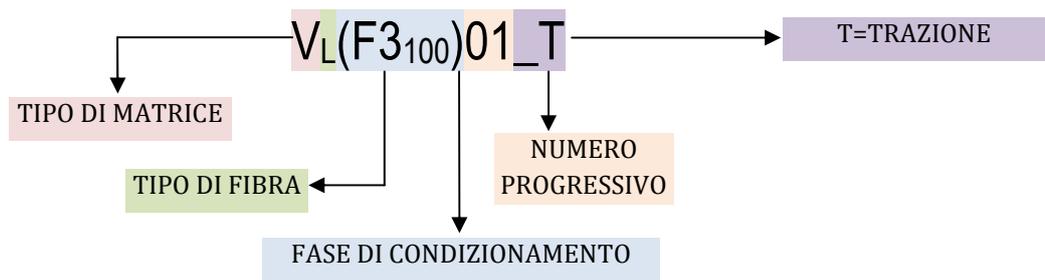
Essendo la fase sperimentale molto ampia e diversificata i provini sono stati denominati, considerando il tipo di fibra e relativo numero di strati, di matrice, ma anche il tipo di condizionamento cui sono stati sottoposti e talvolta il tipo di test effettuato. La sigla che indica i parametri di condizionamento è costituita dall'indicazione della fase (F0, F1, F2, ...) e la specifica del parametro in pedice – se presente (ad es.: **F3₁₀₀** indica la fase 3 a temperatura pari a 100 °C).

Prove di trazione assiale su singoli fili di lino e su matrici

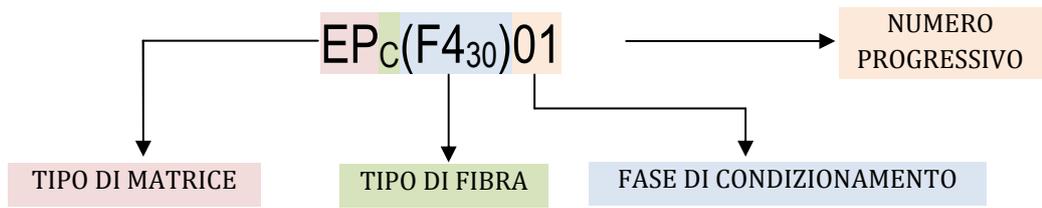
I campioni di lino sottoposti a trazione non sono stati condizionati quindi sono stati indicati esclusivamente con la sigla della fibra e un numero progressivo(ad es.: **L₀₁**).

I provini di resina epossidica e colla vinilica sottoposti a trazione sono invece indicati con la sigla del tipo di matrice, la fase di condizionamento ed un numero progressivo (ad es.: **V(F2)01**).

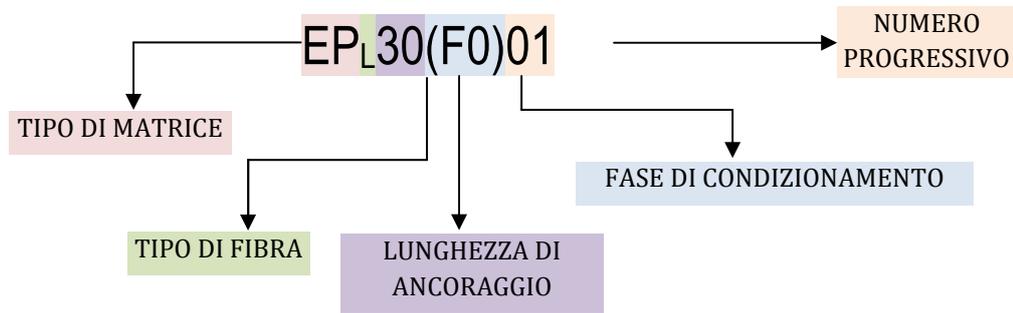
Prove di trazione su FRPs



Test di pull-off

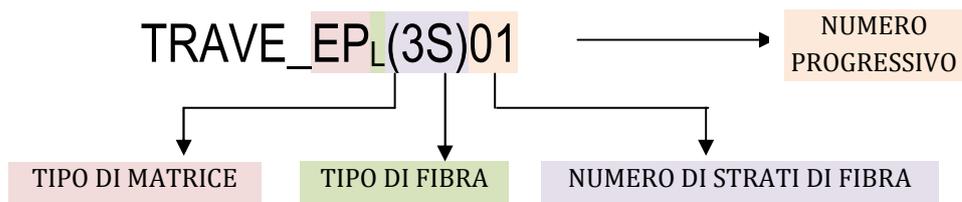


Shear test



I campioni multistrato non sono stati condizionati secondo parametri diversi da quelli di riferimento (fase 0), quindi nelle sigle che li designano il riferimento alla fase di condizionamento è stata sostituita dall'indicazione del numero di strati, designati con la lettera S (ad es.: $V_L(3S)$ indica un campione con 3 strati di fibra).

Prova di flessione su trave



Le travi non rinforzate sono indicate con la sigla **TRAVE_NR** e numero progressivo.

Prove di caratterizzazione dei materiali

In questo capitolo vengono presentati i risultati emersi dalle prove di caratterizzazione dei materiali di base (fibra e matrici) che costituiscono il sistema di rinforzo e dalle prove di trazione assiale sul composito stesso.

5.1 Prove di trazione di singoli fili di lino

Trattandosi di materiali piuttosto innovativi, le fibre di lino sono state testate per valutarne le caratteristiche.

Il test è stato effettuato seguendo la normativa UNI EN ISO 5079 (1998), cui è stata apportata una variazione nella lunghezza del singolo filo, scelta di 500 mm per un confronto con le prove di trazione degli FRP (cfr. §5.3).

Precedenti prove su materiale analogo (*Tiozzo Pezzoli, 2011*) avevano dato percentuali di allungamento a rottura prossimi all'8%, è stata quindi scelta una velocità trazione pari a 4 mm/min; sono stati testati 8 fili.

5.1.1 Metodologia di prova

La strumentazione di prova è composta da:

- (i) macchina di prova universale Galdabini Sun 2500 con cella di carico da 25 kN (*figura 5.1*);
- (ii) software per la gestione della macchina di prova;
- (iii) speciali ganasce per il test su filati.



Figura 5.1: Set up di prova per la trazione di singoli fili di lino.

5.1.2 Risultati

La rottura dei fili avviene per lo più nella parte centrale. I carichi di rottura riscontrati variano da un minimo di 56,2 N ad un massimo di 103,4 N, con valore medio pari a 76,8 N. L'allungamento a rottura varia tra 4,7 e 7,2% con una media del 5,5%.

La *tabella 5.1* riporta i valori ottenuti durante la prova, in *figura 5.2* è osservabile il grafico carico-spostamento.

Per fare un raffronto con i dati della scheda tecnica (tabella 5.2) è stato necessario calcolare la sezione media del singolo filo di lino. Con una bilancia ad alta precisione sono stati pesati 5 diversi fili di lino della lunghezza di 500 mm, ottenendo un peso medio pari a 0,1594 g. Nota la densità del filo da scheda tecnica ($1,5 \text{ g/cm}^3$) è stata calcolata un'area pari a $0,21 \text{ mm}^2$.

Tabella 5.1: Valori delle prove di trazione di singoli fili di lino.

Campione	P_{\max} [N]	$\epsilon_{P_{\max}}$ [%]
L_01	77,7	4,7
L_02	73,2	4,8
L_03	73,4	5,2
L_04	85,8	6,5
L_05	80,7	5,4
L_06	103,4	7,2
L_07	64,0	5,1
L_08	56,2	4,8
val. medio	76,8	5,5
dev. st.	14,2	0,9
co. var.	18,5%	16,9%

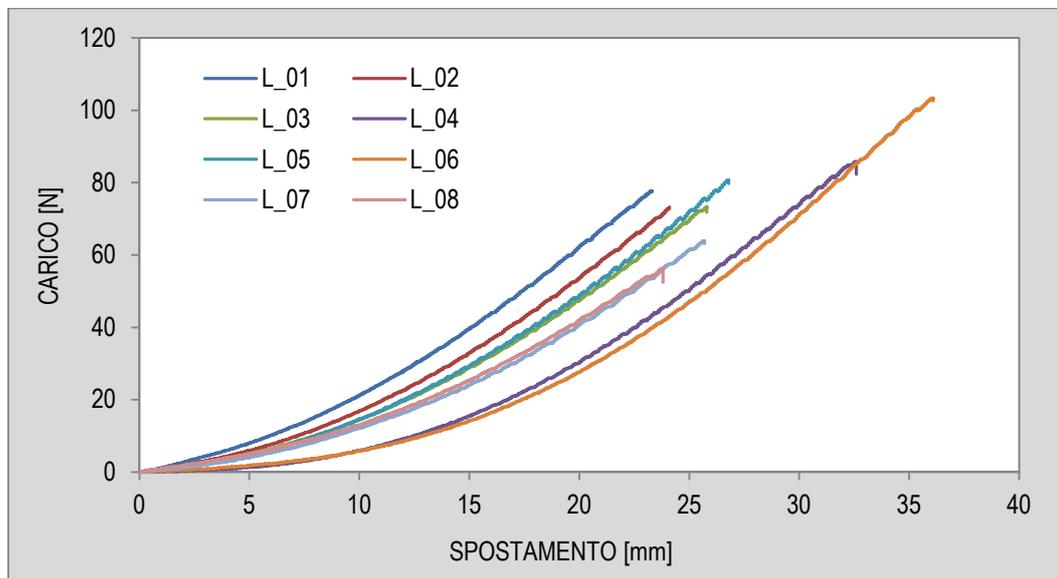


Figura 5.2: Grafico carico-spostamento delle prove di trazione di singoli fili di lino.

Come si può osservare c'è una differenza superiore al 40% tra i valori tabulati e quelli calcolati. Vanno fatte però alcune specificazioni: la sezione del filo e la deformazione a rottura sono misure indirette. Data la sottigliezza del filo non è stato possibile applicare un

estensimetro adatto, quindi l'allungamento percentuale è stato calcolato considerando lo spostamento della testa della macchina direttamente proporzionale alla deformazione del filo.

Tabella 5.2: Confronto tra i dati ottenuti sperimentalmente e quelli tabulati.

	Tensione a trazione	Deformazione a rottura
<i>Laboratorio</i>	361 N/mm ²	5,5%
<i>Scheda tecnica</i>	512 N/mm ²	3,27%
<i>Differenza</i>	+42%	-42%

5.2 Prove di trazione delle matrici

La colla vinilica e la resina epossidica sono state testate a trazione per valutarne le caratteristiche ed evidenziare le sostanziali differenze tra le due dal punto di vista meccanico seguendo la normativa UNI EN ISO 527-2 (1997). Oltre alle matrici in condizioni standard sono stati testati anche campioni condizionati (*tabella 5.3*).

Tabella 5.3: Numero di prove di trazione di matrici per condizionamento.

	Colla vinilica	Resina epossidica
<i>Fase 0</i>	6	6
<i>Fase 2</i>	3	3
<i>Fase 3 – 100 °C</i>	3	3
<i>Fase 3 – 140 °C</i>	3	3
<i>Fase 4 – 40%</i>	3	3

5.2.1 Preparazione dei campioni e metodologia di prova

I campioni per le prove di trazione sono stati preparati colando la colla vinilica e la resina epossidica in appositi stampi e lasciati maturare per alcune settimane (*figura 5.3*).

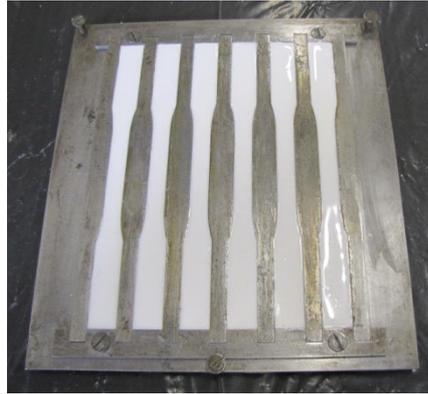


Figura 5.3: Stampo per la preparazione dei campioni da testare.

Inizialmente la colla vinilica, a causa del suo elevato contenuto di acqua, ha presentato problemi di reazione con lo stampo, formando un consistente strato di ruggine nella forma e sui campioni (figura 5.4). Per ovviare al problema è stata utilizzata una base in alluminio ed i campioni sono stati delicatamente sformati ad asciugatura non ancora completa, in modo da ridurre al minimo il contatto con il metallo ed aumentare la superficie a contatto con l'aria per velocizzare l'indurimento.



Figura 5.4: Reazione della colla vinilica.

Alcuni campioni, in seguito all'asciugatura, sono stati condizionati secondo le modalità già illustrate (cfr. §4.3), ma è necessario fare alcune considerazioni sugli effetti dei trattamenti sia sulla colla vinilica, sia sulla resina epossidica.

Fase 3 (100 e 140 °C)

Tutti i campioni hanno cambiato colorazione, diventando più scuri a causa del riscaldamento, risulta però degno di nota l'effetto del calore (140 °C) sulla colla vinilica che si è completamente carbonizzata e deformata.

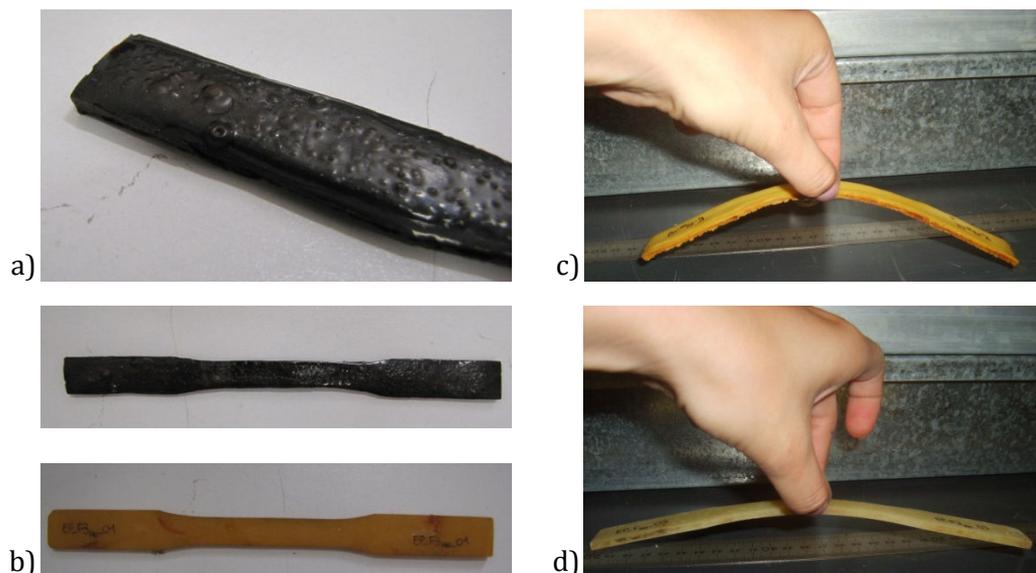


Figura 5.5: (a) degradazione della colla vinilica causata dal calore, (b) imbrunimento delle matrici, (c, d) rammollimento delle matrici.

Inoltre la temperatura di 140 °C supera la T_g caratteristica della resina epossidica, causando un rammollimento dei campioni, i quali a temperatura ambiente sono tornati in breve tempo alla loro caratteristica rigidità (figura 5.5), come accaduto per i campioni di colla vinilica a 100 °C.

Fase 4 (40%)

Nel caso dei campioni della fase 4 si sono riscontrati cambiamenti causati dalla prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità e presenza di acqua (figura 5.6). Su un campione di vinilica si è osservata la comparsa di una macchia rosso-ruggine che è stata in seguito analizzata mediante spettrofotometria infrarossa (cfr. §8.2), mentre i campioni di vinilica mostrano rammollimento e dilatazione causati dall'acqua. I provini sono stati lasciati ad asciugare prima dello svolgimento della prova e quelli vinilici sono tornati alle dimensioni iniziali.



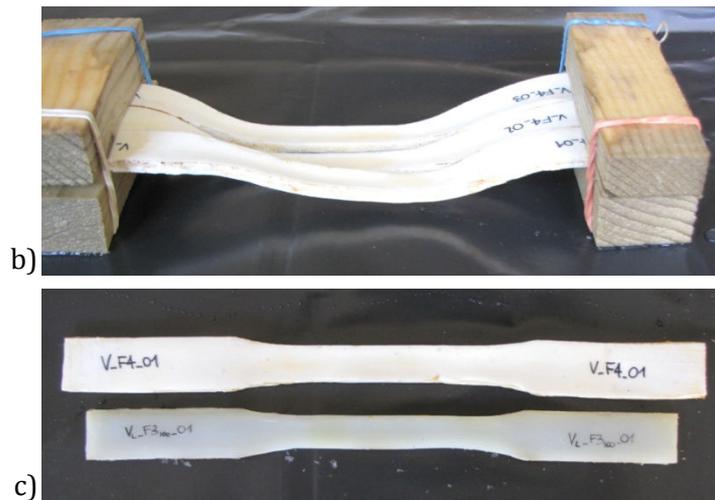


Figura 5.6: (a) macchia rossastra su campione di resina epossidica, (b, c) rammollimento e dilatazione di campioni di colla vinilica.

La strumentazione di prova è composta da (figura 5.7):

- (i) macchina di prova universale Galdabini Sun 2500 con cella di carico da 25 kN;
- (ii) software per la gestione della macchina di prova;
- (iii) apposite ganasce
- (iv) estensimetri.

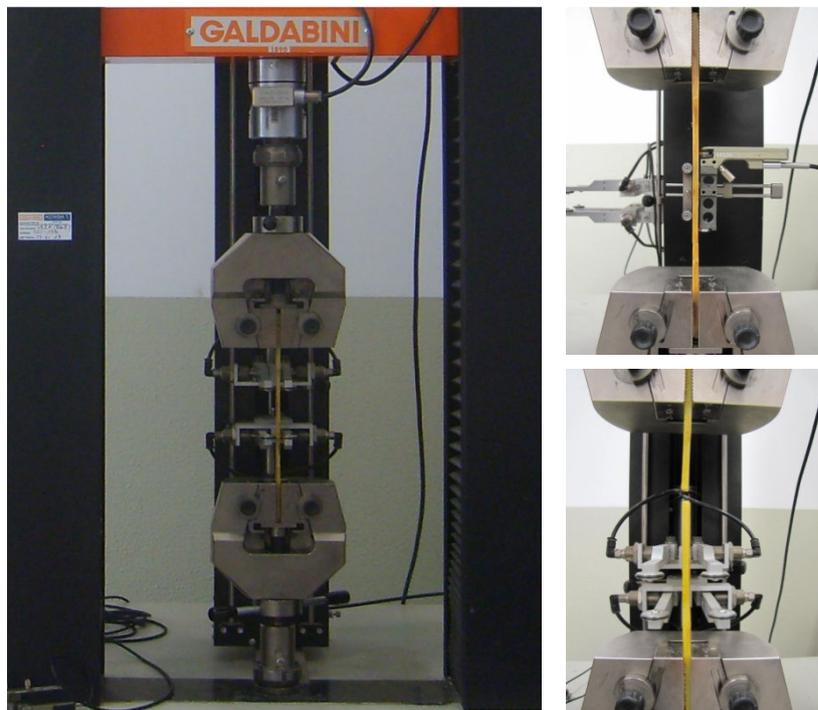


Figura 5.7: Set up di prova per la trazione delle matrici ed estensimetri.

5.2.2 Risultati

Il grafico in *figura 5.8* evidenzia chiaramente ed inequivocabilmente le sostanziali differenze tra le due matrici oggetto di studio.

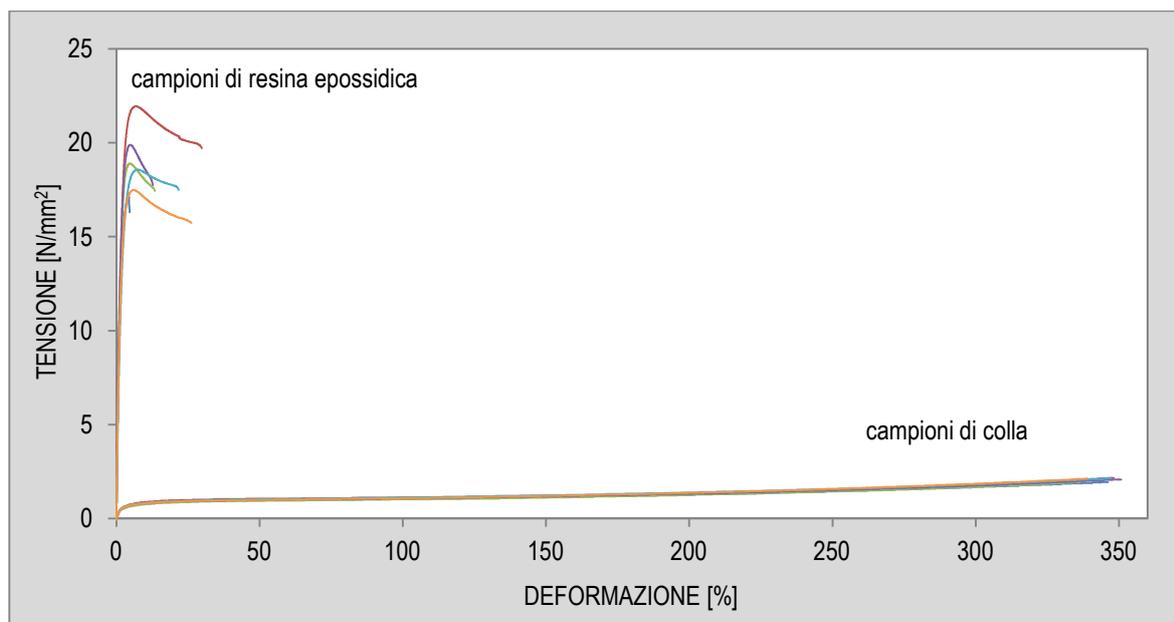


Figura 5.8: Grafico tensione-deformazione delle prove delle matrici della fase 0.

I campioni di resina epossidica sopportano mediamente una tensione massima pari a 19 N/mm² e raggiungono una corrispondente deformazione media del 5,5%.

L'enorme capacità di allungamento della colla vinilica ha reso impossibile la rottura dei campioni, poiché si è giunti alla corsa massima della testa della macchina di prova (*figura 5.9*).

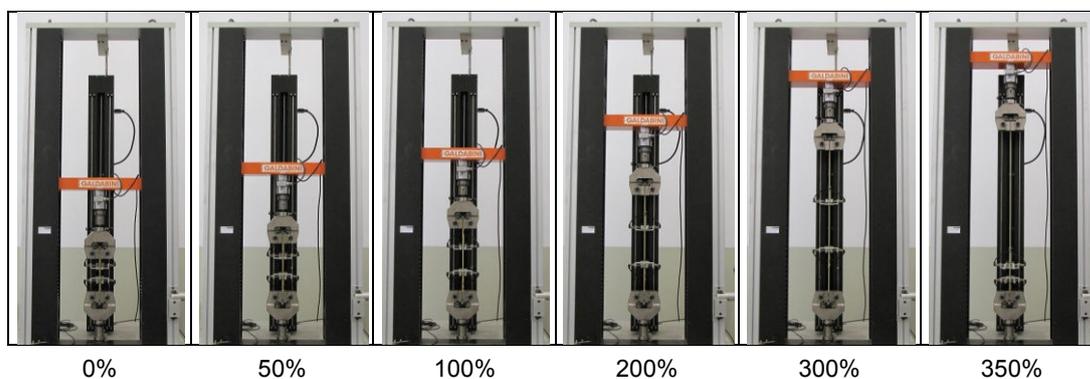


Figura 5.9: Progressione della prova di trazione di campioni di colla vinilica.

La resistenza massima raggiunta prima dell'interruzione della prova è stata pari a circa 2 N/mm², corrispondente ad un allungamento prossimo al 350%.

Una volta rilasciato il campione da una delle due ganasce, si osserva l'arrotolamento del campione su se stesso, il quale entro qualche ora torna alla forma iniziale e mostra un allungamento permanente pari a circa il 6-8%.

Campioni condizionati

I campioni condizionati hanno mostrato una generalizzata sensibilità ai trattamenti.

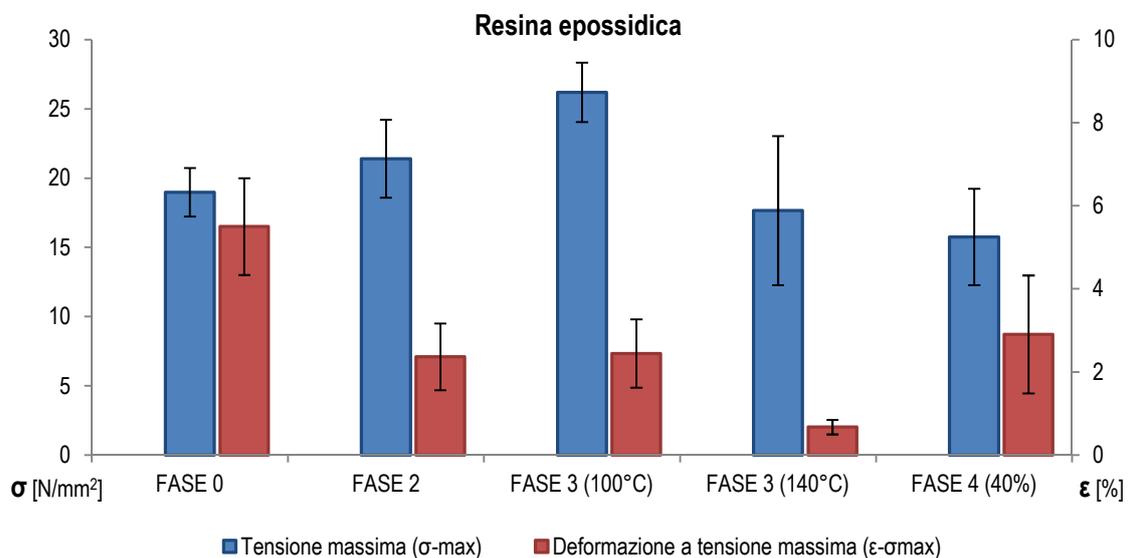


Figura 5.10: Confronto delle tensioni e delle deformazioni dei campioni condizionati di resina epossidica.

I campioni di resina epossidica subiscono gli effetti dei condizionamenti in termini di deformazione. Dal grafico in *figura 5.10* si osserva un irrigidimento della resina - soprattutto se riscaldata a 140 °C (deformazione inferiore dell'88% rispetto ai campioni non condizionati) - che non corrisponde ad un altrettanto accentuato calo prestazionale. In particolare i campioni riscaldati a 100 °C presentano una tensione media superiore del 38% rispetto ai provini della *fase 0*.

I campioni di colla vinilica condizionati sono tutti arrivati a rottura durante la prova, ma hanno fornito dati discordanti (*tabella 5.4*). Essi raggiungono tensioni superiori rispetto ai provini non condizionati e ciò risulta concorde con un aumento della rigidità dovuto alle variazioni di temperatura e umidità, sebbene mostrino una grande variabilità. Le percentuali

di deformazioni invece risultano assolutamente discordi e non trovano alcuna conferma nei test eseguiti in seguito (in particolare con le prove di trazione dei tessuti impregnati, cfr. 5.3).

Tabella 5.4: Risultati delle prove di trazione.

	Colla vinilica				Resina epossidica			
	σ_{max}	dev.st.	$\epsilon_{\sigma_{max}}$	dev.st.	σ_{max}	dev.st.	$\epsilon_{\sigma_{max}}$	dev.st.
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]
Fase 0	2,1	0,1	342,5	5,4	19,0	1,8	5,5	1,2
Fase 2	3,9	0,2	1,0	1,3	21,4	2,8	2,4	0,8
Fase 3 (100 °C)	6,1	0,1	231,0	11,0	26,2	2,1	2,4	0,8
Fase 3 (140 °C)	7,6	0,1	0,7	0,2	17,7	5,4	0,7	0,2
Fase 4 (40%)	17,8	6,2	0,4	0,4	15,7	3,5	2,9	1,4

5.3 Prove di trazione assiale su FRP

In seguito alla determinazione delle proprietà dei materiali costituenti (fibra e matrici) è stato testato anche l'intero sistema di rinforzo in FRP. Sono stati eseguiti test di trazione assiale su strisce di fibra impregnata secondo la normativa UNI EN ISO 527-5 (2009). Le prove sono state effettuate analizzando diverse tipologie di campioni. Le fibre selezionate per questa parte di sperimentazione sono quella di lino e di carbonio, la prima applicata sia con colla vinilica, sia con resina epossidica e la seconda solo con resina epossidica. Inoltre sono stati testati sia alcuni campioni a base di lino condizionati, sia provini multistrato, ossia costituiti da più strisce di fibra impregnate insieme (tabella 5.5).

5.3.1 Preparazione dei campioni e metodologia di prova

I campioni sono stati preparati a partire da strisce di fibra (sia lino che carbonio) di lunghezza pari a 50 cm e larghezza di 5 cm, con la direzione della fibratura parallela al lato lungo. Per l'impregnazione le fibre sono state disposte su una piastra metallica la cui superficie è stata trattata con un agente distaccante e sono state lasciate maturare fino alla completa essiccazione della resina e al raggiungimento di peso costante (figure 5.11 e 5.12).

Tabella 5.5: Riepilogo delle prove di trazione assiale effettuate.

Composito	Numero di strati di fibre	Condizionamento	Numero di campioni
FFRP	1	Fase 0	6
		Fase 3 (100 °C)	3
		Fase 3 (140 °C)	3
		Fase 4 (40%)	3
	3	Fase 0	3
	5	Fase 0	3
FFRP(V)	1	Fase 0	6
		Fase 3 (100 °C)	3
		Fase 3 (140 °C)	3
		Fase 4 (40%)	3
	3	Fase 0	3
	5	Fase 0	3
CFRP	1	Fase 0	3
Totale campioni			45

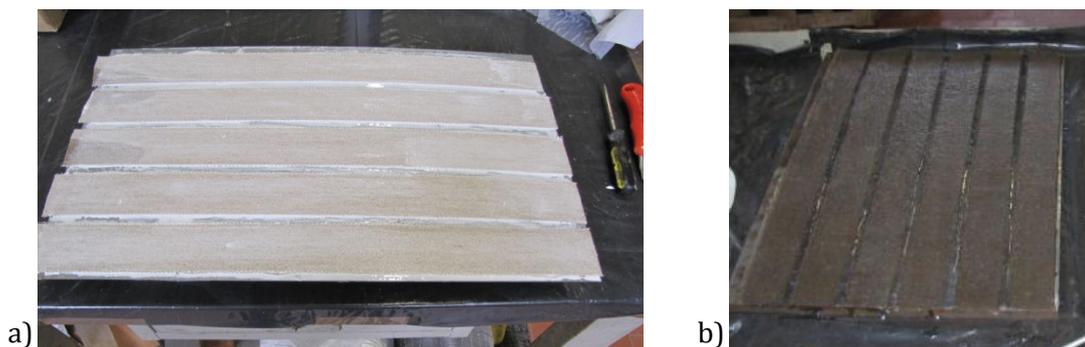


Figura 5.11: Impregnazione della fibra di lino con colla vinilica (a) e resina epossidica (b).



Figura 5.12: Alcuni campioni asciugati (i più chiari sono FFRP(V) e quelli più scuri FFRP).

Diciotto campioni, in seguito all'asciugatura, sono stati condizionati secondo le modalità già illustrate (cfr. §4.5), ma è necessario fare alcune considerazioni sugli effetti dei trattamenti su di essi.

Fase 3 (100 e 140 °C)

Le strisce impregnate sono fortemente influenzate dal tipo di matrice e dalla sensibilità di quest'ultima ai condizionamenti, come osservato nel §5.2.

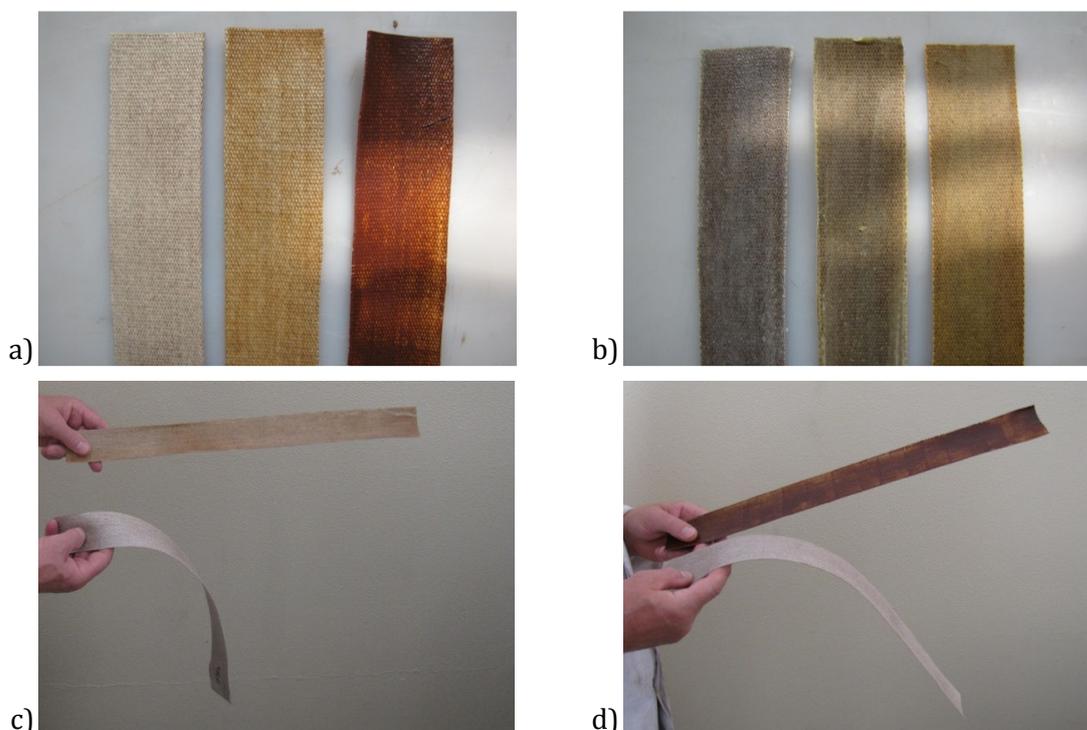


Figura 5.13: Imbrunimento dei campioni con colla vinilica (a) e con resina epossidica (b). Irrigidimento dei FFRP(V) in seguito al riscaldamento a 100 °C (c) e 140 °C (d).

Estrate dal forno sono risultate molli, perché la temperatura era oltre la T_g sia della resina epossidica, che della colla vinilica ed hanno cambiato colorazione. In seguito al raffreddamento a temperatura ambiente hanno subito un consistente irrigidimento particolarmente importante per gli FFRP(V), come si può osservare in (figura 5.13).

Fase 4 (40%)

Anche in questa fase si osserva un'analogia tra il comportamento della sola colla vinilica e delle strisce con essa impregnate. Essi mostrano rammollimento e deformazione a causa della prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità e presenza di acqua (figura 5.14).



Figura 5.14: Deformazione e rammollimento delle strisce di FFRP(V).

Le strisce di FFRP si sono rammollite in seguito alla permanenza in acqua, prima di essere sigillate nei sacchi per 30 giorni sono state – come le strisce di FRP(V) – ben distese, per evitare deformazioni problematiche. Trascorso il tempo previsto, le strisce risultavano nuovamente rigide, sebbene molto bagnate (figura 5.15).

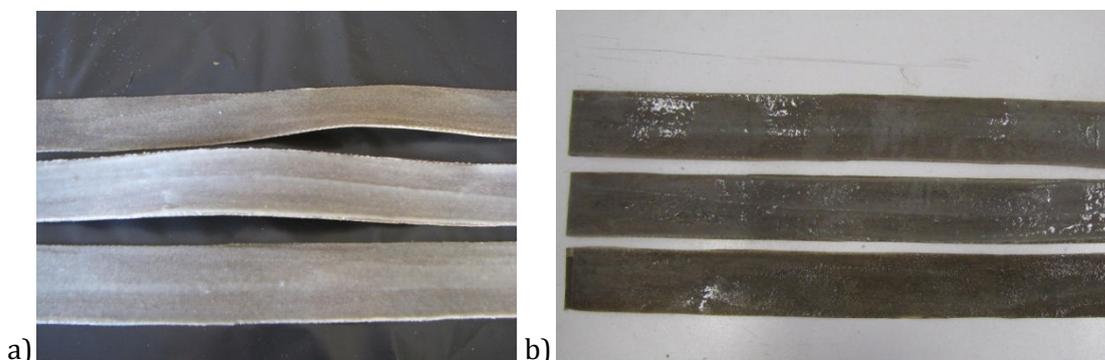


Figura 5.15: (a) deformazione e rammollimento delle strisce di FFRP dopo essere state in acqua, (b).umidità sulla superficie, quando estratte dai sacchi sigillati.

La strumentazione di prova è composta da:

- (i) macchina di prova universale Galdabini Sun 60 con cella di carico da 600 kN (figura 5.16);
- (ii) software per la gestione della macchina di prova;
- (iii) estensimetro;
- (iv) apposite ganasce.



Figura 5.16: Set up di prova per la trazione delle strisce di FRP.

Per l'esecuzione della prova, le strisce di tessuto sono state fissate alle estremità con coppie di placche in alluminio, con lo scopo di favorire un adeguato bloccaggio nelle ganasce della macchina, fissate con il collante epossidico bicomponente e tissotropico FIDSATURANT HMT, che indurisce in 4-5 giorni.

5.3.2 Risultati

Dalle prove si sono ricavati i valori medi dei principali parametri meccanici quali carico massimo P_{max} , resistenza massima σ_{max} , deformazione massima $\varepsilon_{\sigma_{max}}$ e modulo di elasticità assiale E . Quest'ultimo valore è stato calcolato mediante la formula (1)

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1)$$

considerando tre intervalli diversi:

(i) secondo normativa **UNI EN ISO 527-1 (1993)**

σ_1 : sforzo in MPa misurato al valore di deformazione $\varepsilon_1 = 0,0005$;

σ_2 : sforzo in MPa misurato al valore di deformazione $\varepsilon_2 = 0,0025$;

(ii) ε_1 : deformazione misurata allo sforzo $\sigma_1 = 10\%$ di σ_{max} ;

ε_2 : deformazione misurata allo sforzo $\sigma_2 = 40\%$ di σ_{max} ;

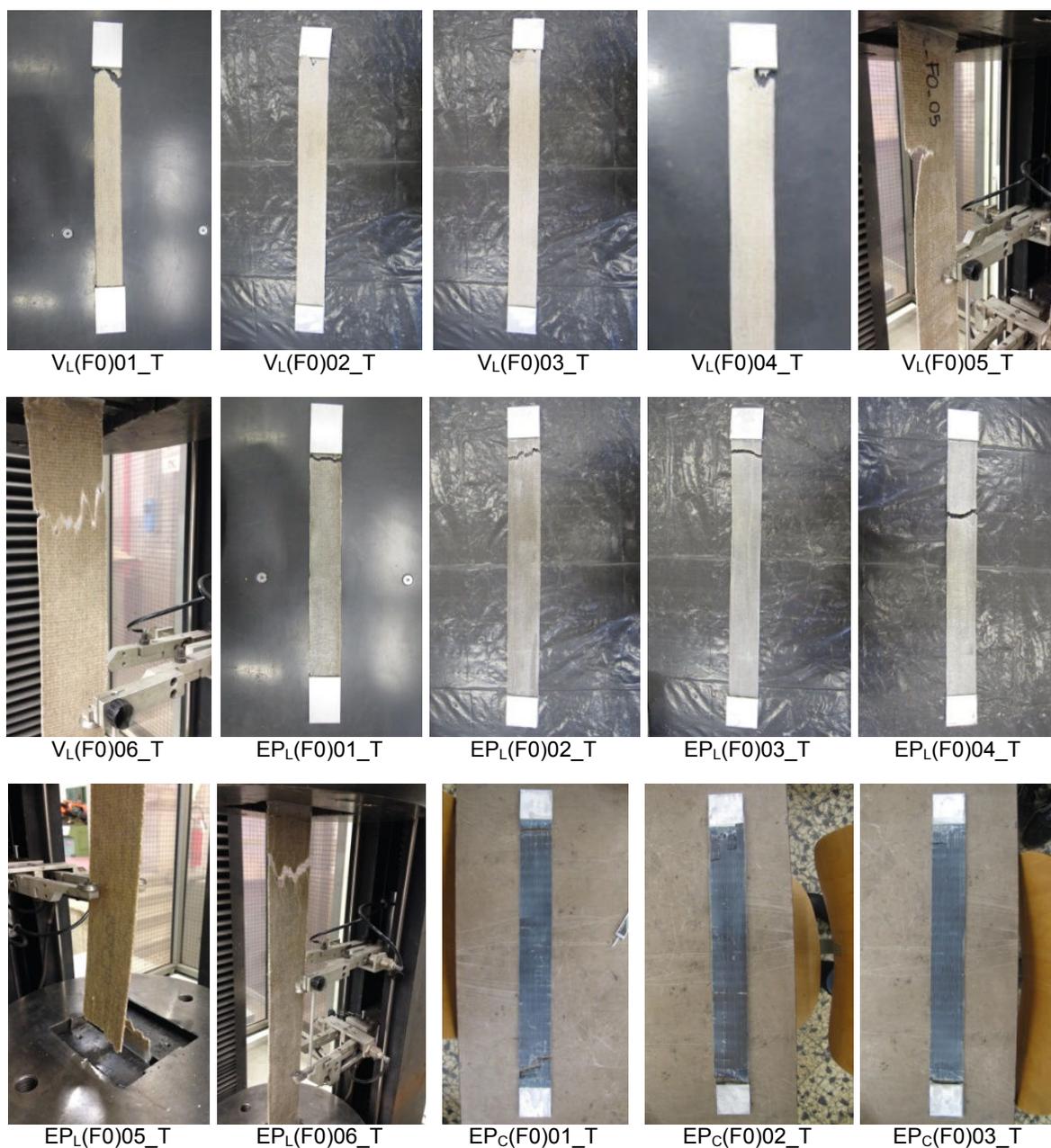
(iii) ε_1 : deformazione misurata allo sforzo $\sigma_1 = 30\%$ di σ_{max} ;

ε_2 : deformazione misurata allo sforzo $\sigma_2 = 60\%$ di σ_{max} ;

Campioni non condizionati (fase 0) – Analisi delle modalità di rottura

La rottura attesa è quella che si presenta nella zona centrale rispetto all'intera lunghezza di fibra impregnata. Taluni campioni hanno riportato rotture in corrispondenza dei tasselli di incollaggio, presumibilmente dovute alla formazione di punte di tensione localizzate agli spigoli dei tasselli, in particolare tutti i campioni di CFRP hanno assunto questo comportamento (*tabella 5.6*).

Tabella 5.6: Modalità di rottura ottenute nelle prove di trazione assiale su campioni non condizionati.



Campioni non condizionati (fase 0) – Analisi delle resistenze

Dall'analisi dei valori dei parametri meccanici ottenuti e calcolati, si possono fare alcune considerazioni sui tre diversi materiali compositi.

Il grafico in *figura 5.17* mostra in maniera inequivocabile le differenti caratteristiche dei tre FRPs sottoposti a trazione.

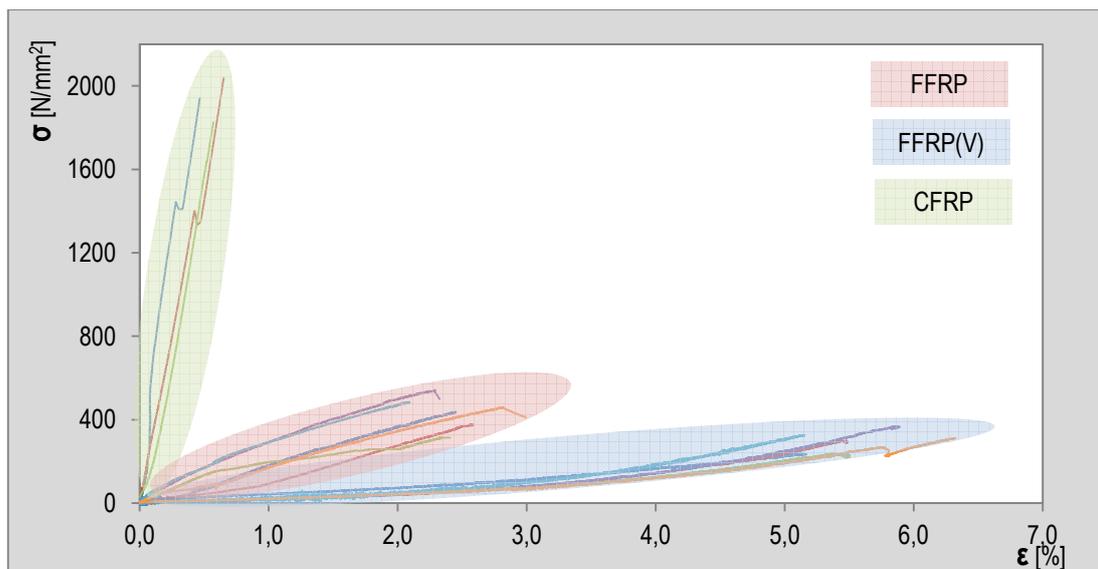


Figura 5.17: Grafico tensione-deformazione di FFRP(V), FFRP e CFRP.

La resistenza a rottura del composito tradizionale è largamente superiore, rispetto ai compositi naturali. Un tale risultato sottolinea marcatamente come gli FRPs tradizionalmente utilizzati, non abbiano ancora concorrenti tra quelli innovativi in termini di resistenza meccanica. È altresì vero che questi parametri rischiano di essere sovradimensionati rispetto alle reali esigenze di lavoro degli elementi in legno rinforzati.

Come si osserva più chiaramente dal grafico in *figura 5.18* e dai relativi valori riportati in *tabella 5.7*, CFRP mostra deformazioni minime rispetto a quelle di FFRP e FFRP(V), soprattutto se considerate in rapporto al carico ultimo.

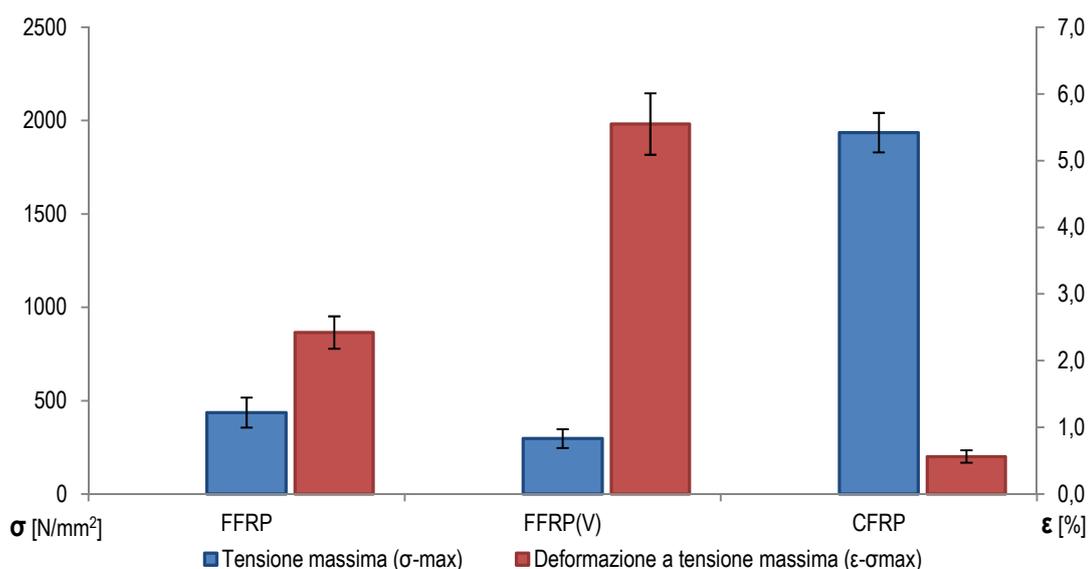


Figura 5.18: Differenze in termini di tensione e deformazione tra FFRP, FFRP(V) e CFRP.

Le prove di trazione su singoli fili di lino sono state effettuate su una lunghezza pari a 50 cm, come le strisce impregnate della prova con lo scopo di poter raffrontare i dati. Un singolo filo di lino sopporta un carico medio pari a 76,8 N, quindi il carico di 45 fili (da scheda tecnica 9 fili/cm) è pari a circa 3456 N. Come si può notare, la quota di resistenza imputabile alla sola colla vinilica risulta piuttosto ridotta, mentre è notevolmente maggiore per FFRP. Le considerazioni fatte, ossia maggiore resistenza della resina epossidica rispetto alla colla vinilica sono concordi con quanto riscontrato nelle prove di trazione sulle matrici (cfr. §5.2).

Tabella 5.7: Valori di carico, tensione e deformazione di FFRP(V), FFRP e CFRP.

ID	P_{max} [N]	σ_{max} [N/mm ²]	$\epsilon_{\sigma_{max}}$ [%]
FFRP(V)	3965	296,98	5,5
FFRP	5819	435,88	2,4
CFRP	15969	1935,60	0,6

Per quanto concerne il modulo elastico E , nel caso di CFRP sono estremamente diversi tra loro., solo quello calcolato rispettando le indicazioni della normativa appare essere concorde con quanto riportato in scheda tecnica. Per FFRP si riscontra maggiore sintonia di valori, ma tutti sono quasi il 100% inferiori a quando tabulato. Per FFRP(V) non esistono valori noti di E , ma si osserva una importante discordanza di valori (*tabella 5.8*).

Tabella 5.8: Modulo elastico E calcolato in tre distinti intervalli.

ID	$E_{norm.}$ [GPa]	$E_{10-40\%}$ [GPa]	$E_{30-60\%}$ [GPa]	$E_{scheda\ tecnica}$ [GPa]
FFRP(V)	2,8	4,1	6,8	-
FFRP	21,6	22,2	20,4	43
CFRP	238,8	308,2	347,0	230

Campioni multistrato (fase 0) – Analisi delle modalità di rottura

Sono stati testati anche campioni di tessuto impregnato costituito da molteplici strati di fibra (3 e 5 strati). La rottura attesa, ossia nella zona centrale rispetto all'intera lunghezza del provino, si è verificata nella maggior parte dei casi (*tabella 5.9*).

Tabella 5.9: Modalità di rottura ottenute nelle prove di trazione assiale su campioni non condizionati.



VL(3S)01_T



VL(3S)02_T



VL(3S)03_T



EPL(3S)01_T



EPL(3S)02_T



EPL(3S)03_T



VL(5S)01_T



VL(5S)02_T



VL(5S)03_T



EPL(5S)01_T



EPL(5S)02_T



EPL(5S)03_T

Campioni multistrato (fase 0) – Analisi delle resistenze

Come si evince dai grafici in *figura 5.19*, la resistenza a trazione dei campioni multistrato è quasi lineare con la resistenza dei campioni a fibra singola. Nel caso di multiFFRP si osserva un aumento della resistenza, seppur minimo nel caso di 3 e 5 strati (rispettivamente 4 e 5%). I campioni multiFFRP(V) invece mostrano un aumento pari a circa il 9% quando gli strati sono 3, mentre con 5 non si osserva alcun beneficio.

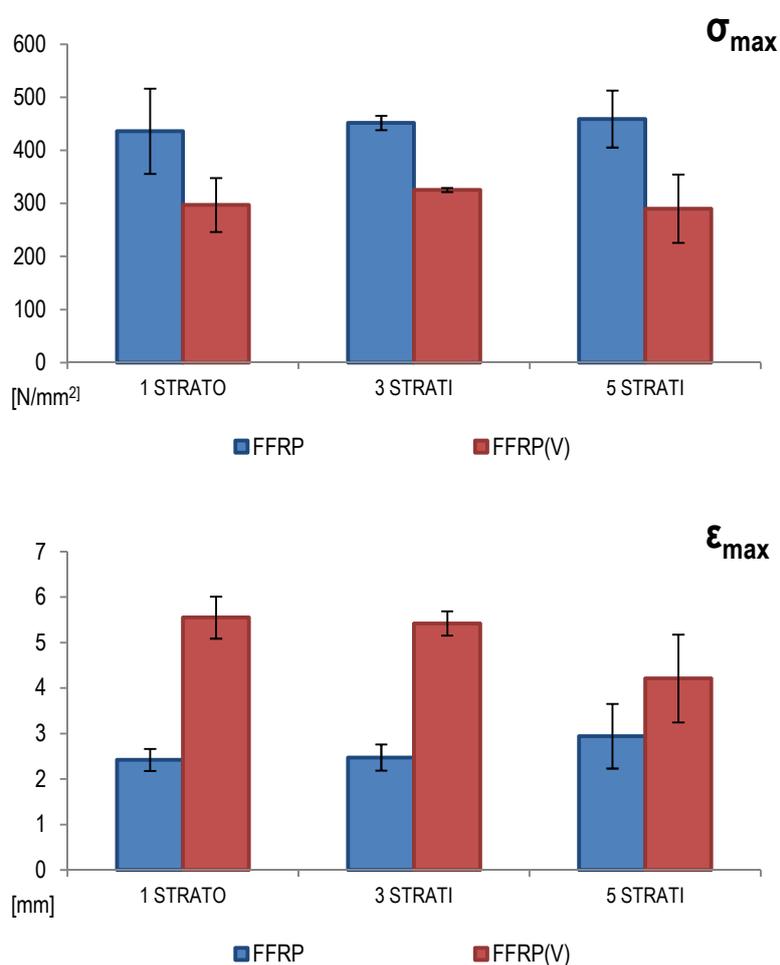


Figura 5.19: Tensioni e deformazioni massime rispetto al numero di strati di fibra.

Campioni condizionati

I campioni FRFP condizionati hanno mostrato una generalizzata sensibilità ai trattamenti (figura 5.20).

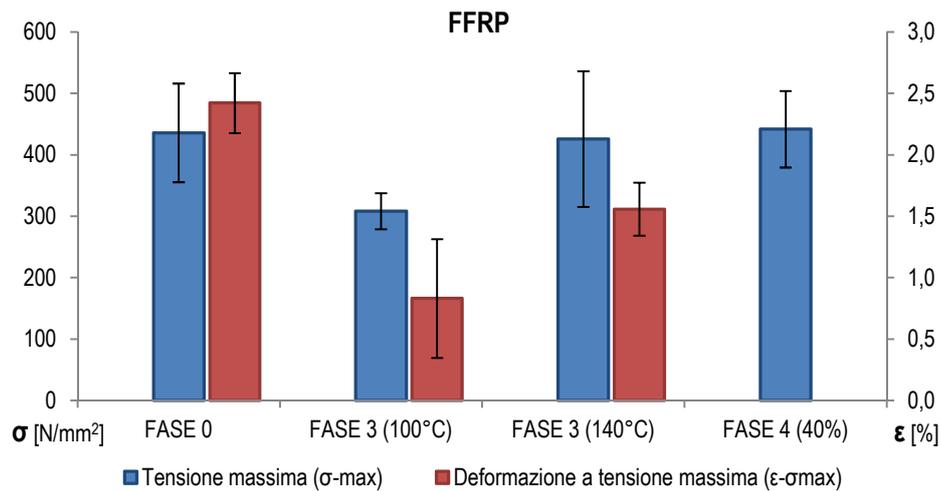


Figura 5.20: Tensioni e deformazioni massime rispetto alla fase di condizionamento (non è presente il dato sulla deformazione dei campioni della F4₄₀ per problemi con l'apparato di misura).

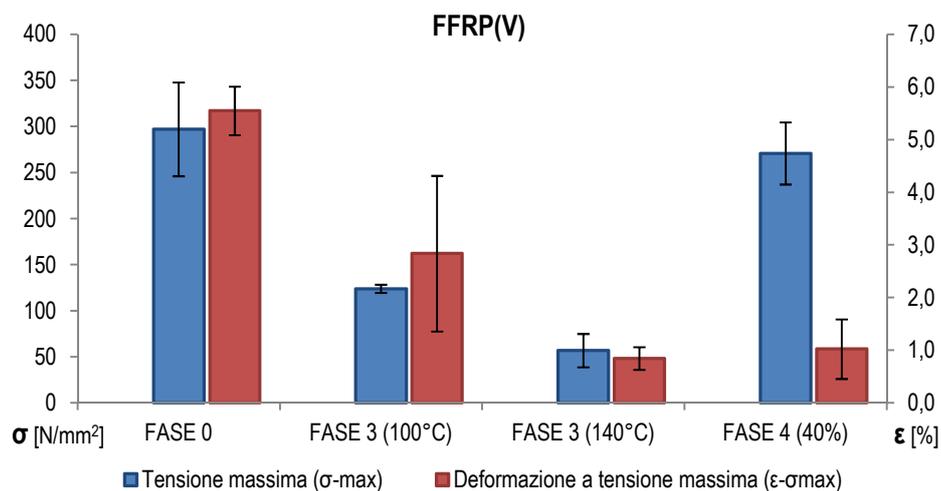


Figura 5.21: Tensioni e deformazioni massime rispetto alla fase di condizionamento.

Come già evinto nelle prove sulle matrici, la resina epossidica risulta molto resistente alle variazioni di temperatura e umidità, caratteristica che si ritrova nei materiali compositi con

essa prodotti. Similarmente a quanto accade per la sola matrice, anche nel tessuto impregnato si osserva come i condizionamenti irrigidiscano il campione, pur non andando ad intaccare le caratteristiche meccaniche.

Non risultano altrettanto resistenti i campioni di FFRP(V). La colla vinilica li rende suscettibili alle variazioni di temperatura e umidità, in particolare dal grafico in *figura 5.21* si osserva come le alte temperature costituiscano un serio problema per questo tipo di composito.

Prove di aderenza

In questo capitolo vengono presentati i risultati emersi dalle prove di aderenza, fenomeno indagato con test di pull-off e shear-test.

6.1 Test di pull-off

Grazie alla sua semplicità e rapidità, il test di pull-off è stato ampiamente utilizzato in questa campagna investigativa. Sono stati preparati 168 campioni di legno rinforzato con diversi materiali compositi oggetto di studio su cui sono stati effettuati 767 test di pull-off. Sono stati testati i campioni condizionati secondo i diversi parametri di umidità e temperatura ed anche provini rinforzati con più strati di fibra impregnata (*tabelle 6.1 e 6.2*).

6.1.1 Preparazione dei campioni e metodologia di prova

Per il test di pull-off si è scelto di preparare i campioni con la geometria proposta in *figura 6.1* (*Valluzzi et al., 2007*), aventi dimensioni di 11,5x13,5x30 cm, ottenuti da travi di lunghezza variabile tra 220 e 240 cm.

Tabella 6.1: Numero di test di pull-off per classe di composito.

	FFRP	FFRP(V)	CFRP	GFRP	FFRP(M)
<i>Fibra</i>	lino	lino	carbonio	vetro	lino
<i>Matrice</i>	resina epossidica	colla vinilica	resina epossidica	resina epossidica	resina epossidica
<i>Trattamento</i>	no	no	no	no	mercerizzazione
<i>Condizionamenti effettuati</i>	F0; F1; F2; F3; F4; F5	F0; F1; F2; F3; F4; F5	F0; F1; F2; F3; F4	F0; F1; F2; F3; F4	F0; F3; F5
<i>Multistrato</i>	si (2-3-4-5 strati)	si (2-3-4-5 strati)	no	no	no
<i>N° di test di pull-off</i>	195	292	124	124	32
<i>N° di test di pull-off totale</i>					767

L'applicazione del rinforzo è stato effettuato sul lato più stretto dei campioni (11,5x30 cm), la faccia con una quantità inferiore di nodi e sacche di resina e quella meno soggetta a variazioni volumiche.

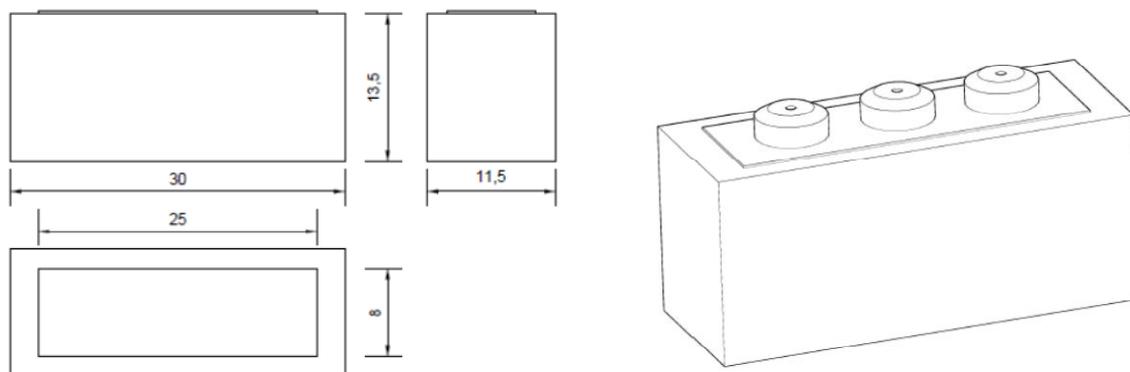


Figura 6.1: Geometria dei campioni per i test di pull-off.

In seguito al condizionamento secondo i parametri delle diverse fasi (cfr.§4.5), i campioni sono stati opportunamente preparati per effettuare la prova. Con un trapano a colonna dotato di punta a tazza è stata effettuata una traccia circolare, con la quale è stata circoscritta l'area di prova. Il solco ottenuto è stato sigillato con stucco da vetro, per evitare che la resina per l'incollaggio dei tasselli vi colasse all'interno, solidarizzando con il legno e sfalsando quindi le misure. Per il fissaggio dei tasselli è stata utilizzata la resina bicomponente Fidsaturant HMT (figura 6.2).

Tabella 6.2: Numero di campioni e test di pull-off effettuati per fase di condizionamento.

Fase di condizionamento	Composito	N° di campioni per fase	N° di test di pull-off per fase
<i>Fase 0</i>	FFRP	3	12
	FFRP(V)	6	36
	CFRP	2	8
	GFRP	2	8
	FFRP(M)	2	8
		15	72
<i>Fase 1</i>	FFRP	6	24
	FFRP(V)	9	54
	CFRP	6	24
	GFRP	6	24
		27	126
<i>Fase 2</i>	FFRP	6	24
	FFRP(V)	3	17
	CFRP	3	12
	GFRP	3	12
		24	65
<i>Fase 3</i>	FFRP	12	48
	FFRP(V)	12	64
	CFRP	11	44
	GFRP	11	44
	FFRP(M)	3	12
		49	212
<i>Fase 4</i>	FFRP	9	36
	FFRP(V)	9	53
	CFRP	9	36
	GFRP	9	36
		36	161
<i>Fase 5</i>	FFRP	9	36
	FFRP(V)	9	53
	FFRP(M)	3	12
		21	101



Figura 6.2: Preparazione dei campioni per la prova.

La strumentazione di prova è composta da:

- (i) dinamometro MATEST modello E142, con cella di carico da 16 kN (*figura 6.3*);
- (ii) snodo sferico;
- (iii) tasselli in alluminio;
- (iv) piastra metallica con foro.



Figura 6.3: Set up di prova per il test di pull-off.

La piastra metallica è stata utilizzata per favorire il giusto appoggio dello strumento. Trattandosi di uno strumento manuale, si è fornito un pre-carico di circa 10-20 N mediante la manopola nera in alto, poi con la rotazione della manovella il campione è stato portato a rottura per trazione. L'apparecchio non permette di memorizzare l'andamento della prova, ma consente solo la registrazione del carico massimo ottenuto.

6.1.2 Risultati - Analisi delle modalità di rottura

Il test di pull-off fornisce una duplice informazione, quantitativa e qualitativa. Oltre al carico massimo, si ottiene la modalità di rottura che fornisce utili indicazioni sul comportamento dei diversi FRPs in seguito ai trattamenti. I tipi di rottura proposti dalla normativa utilizzata sono quattro (figura 6.4).

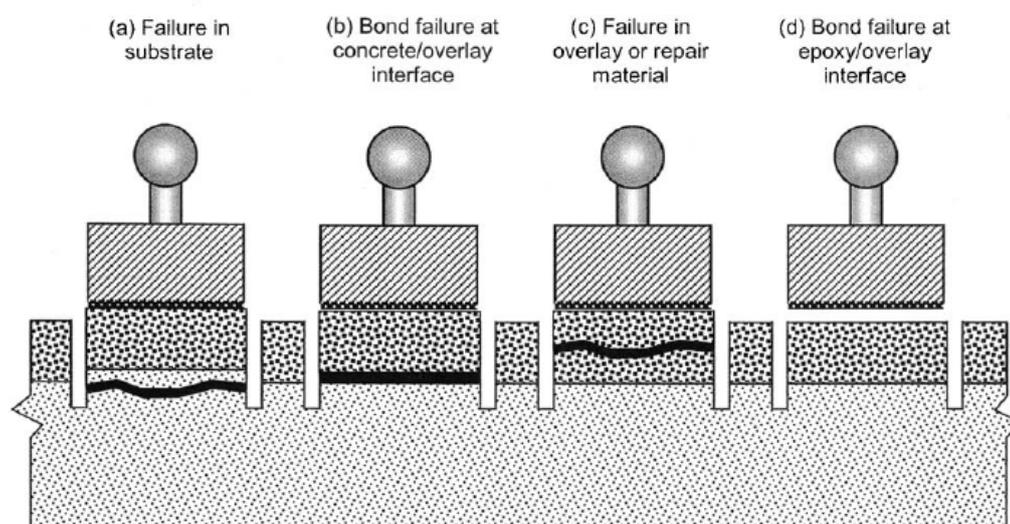


Figura 6.4: Modalità di rottura (ASTM C 1583).

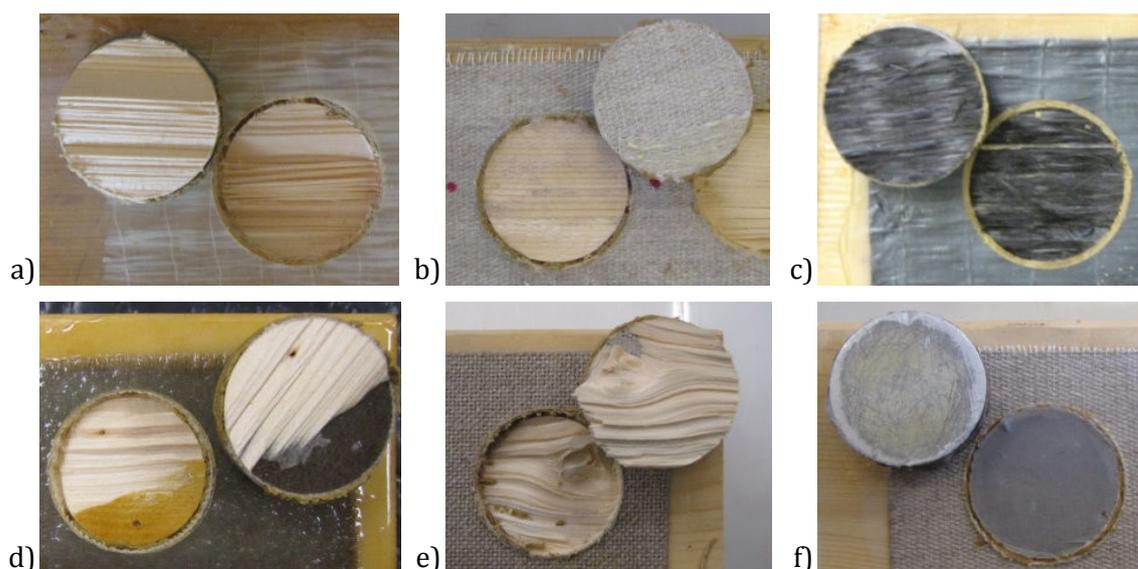


Figura 6.5: (a) rottura A; (b) rottura B; (c) rottura C; (d) rottura M; (e, f) prove non valide.

Quando la coesione del legno è inferiore alla coesione del composito e all'adesione composito-legno, avviene la rottura del substrato (rottura A). In caso contrario possiamo avere un distacco all'interfaccia (rottura B) o la rottura interna del composito (rottura C). Le prove hanno mostrato il verificarsi di rotture in cui non c'è una preponderanza di una delle tre precedentemente citate, chiamate quindi rottura M, cioè mista, non contemplata nella normativa di riferimento. L'eventualità del distacco del tassello di prova (rottura D) viene classificata come prova non valida, insieme ai casi in cui un evidente difetto del legno (grosso nodo o sacca di resina) ha fortemente e palesemente influito sul risultato della prova (figura 6.5).

In generale i test di pull-off ritenuti validi sono 722 su 767, pari al 94,1% delle prove effettuate. Il composito in cui si sono verificate il maggior numero di prove non valide è FFRP (figura 6.6).

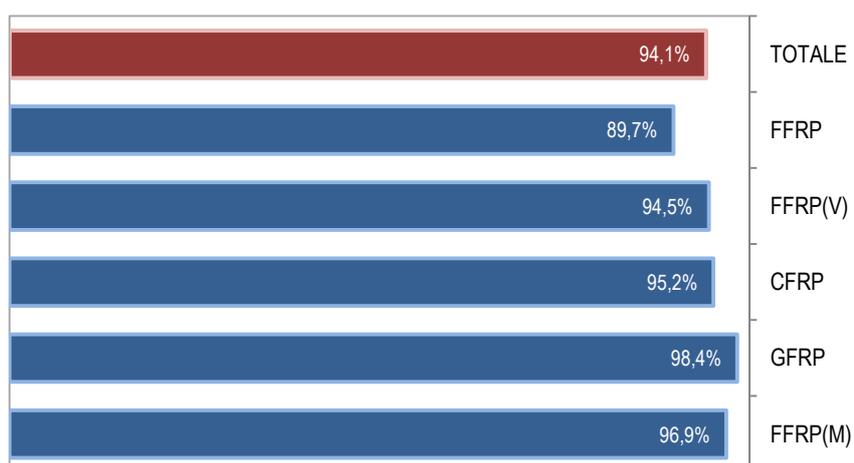


Figura 6.6: Percentuali di prove valide per i diversi materiali compositi.

Le percentuali relative delle quattro rotture individuate (A, B, C ed M) sono state calcolate sul totale delle prove valide.

Poiché le rotture diverse da quella del legno possono essere provocate dal degrado del composito o da problemi all'interfaccia, è utile osservare la loro incidenza rispetto ai diversi materiali ed ai diversi condizionamenti.

La rottura attesa è quella coesiva del legno (A) ed ha un'incidenza dell'80%, la seconda più frequente è la rottura mista (M) avvenuta nel 9% dei casi, seguita dal distacco del rinforzo (B - 7,6%) e dalla rottura del composito (C) con un'incidenza del 3,5%.

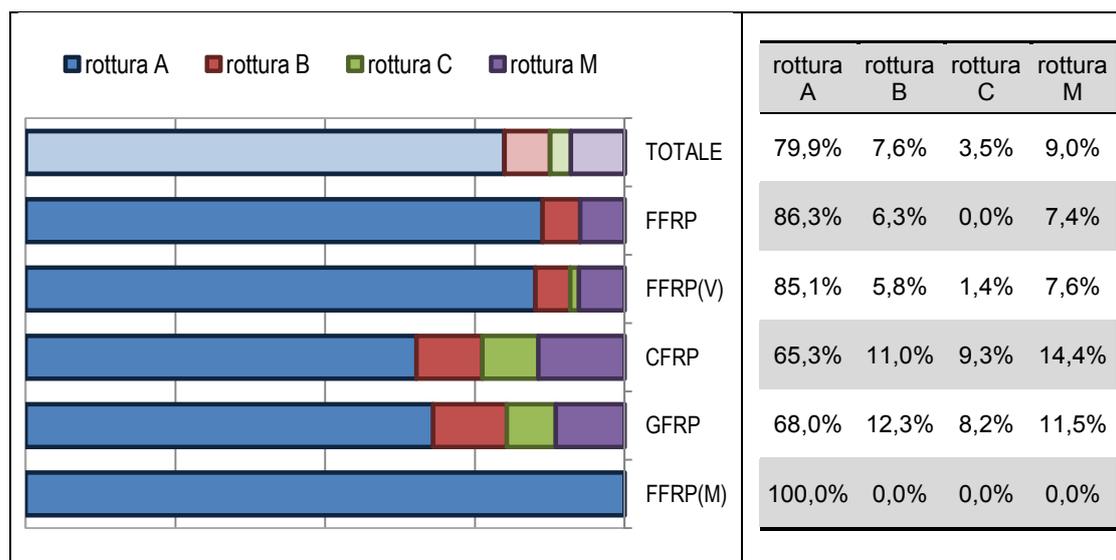


Figura 6.7: Incidenza delle modalità di rottura per tipo di composito.

Dal grafico (figura 6.7) si può osservare che FFRP(M) mostra la totalità di rotture A: tale dato dovrebbe confermare l'efficacia del trattamento di mercerizzazione, ma è doveroso sottolineare che il numero di test di pull-off è molto ridotto e considerevolmente più basso rispetto agli altri compositi; inoltre non sono stati testati tutti i parametri di condizionamento. Per questo motivo nei grafici seguenti i dati relativi ai campioni rinforzati con FFRP(M) non sono stati considerati.

Appare più significativo concentrarsi sui risultati ottenuti negli altri compositi. I materiali tradizionali mostrano un'incidenza della rottura attesa più bassa di oltre il 20% rispetto a quelli naturali.

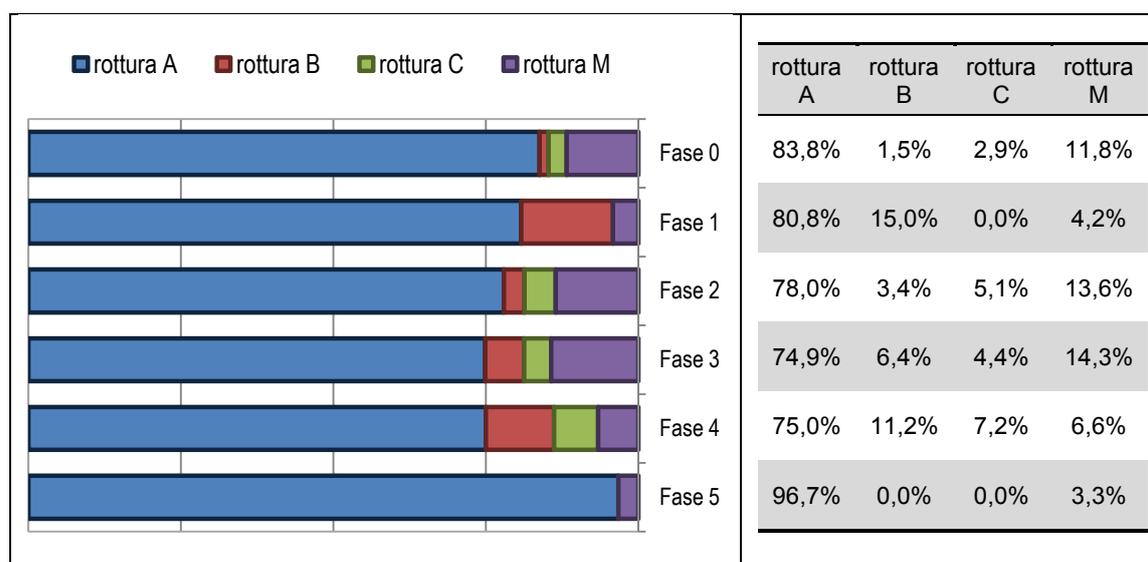


Figura 6.8: Incidenza delle modalità di rottura per fase di condizionamento.

Il distacco dei compositi CFRP e GFRP dal substrato (rottura B) avviene nel doppio dei casi rispetto a FFRP e FFRP(V).

Anche la rottura interna al rinforzo (rottura C) si presenta con una frequenza molto alta nei compositi tradizionali (8-9%), risulta invece pressoché nulla nei compositi di lino. La rottura del composito oltre ad essere favorita dai diversi condizionamenti, dipende fortemente dalla capacità di impregnazione della fibra utilizzata (Nardon, 2010). Dai dati ottenuti si evidenzia che la fibra di lino è più facilmente impregnabile rispetto alle fibre di vetro e carbonio.

In *figura 6.8* è presentata l'incidenza delle diverse modalità di rottura rispetto al condizionamento cui sono stati sottoposti i provini. Come atteso i campioni standard, ossia *fase 0*, sono quelli in cui si è ottenuta maggiormente la rottura A, mentre l'alta frequenza di rotture B nei campioni della *fase 1* è spiegabile con l'inadeguatezza del substrato al momento dell'incollaggio, che essendo bagnato non ha permesso un'adeguata adesione del rinforzo al substrato.

I condizionamenti delle *fasi 3 e 4* risultano i più aggressivi, causando una percentuale di rotture A inferiore agli altri condizionamenti. Sicuramente un aumento intenso e repentino di temperatura o umidità causa variazioni volumetriche importanti che possono causare tensioni all'interfaccia e compromettere l'aderenza del composito al legno. La *fase 5* mostra risultati particolarmente positivi, che verranno analizzati più in dettaglio di seguito.

I grafici in *figura 6.9* mostrano più in dettaglio l'incidenza delle diverse rotture. Una prima considerazione generale è che i compositi tradizionali nella maggior parte dei casi subiscono una sensibilità superiore rispetto ai condizionamenti effettuati.

Si può osservare che le percentuali di MC superiori al 20% della *fase 1* risultano piuttosto critiche per la buona riuscita dell'incollaggio dei tutti i rinforzi, fatta eccezione per FFRP(V). La colla vinilica è un adesivo a base acquosa, quindi la presenza di acqua sulla superficie di incollaggio non va ad inficiare le sue prestazioni, ma varia solo il tempo di indurimento. Essa risulta invece molto sensibile alle alte temperatura (grafico relativo alla *fase 3*, 120 e 140 °C), che causano un crollo delle prestazioni.

La permanenza prolungata in ambiente umido (*fase 4*) è maggiormente problematico per i rinforzi tradizionali di carbonio e vetro. La variabile temporale (*fase 5*) non risulta avere effetti sulle modalità di rottura dei compositi a base di lino, mentre quelli tradizionali non sono stati sottoposti a tale condizionamento.

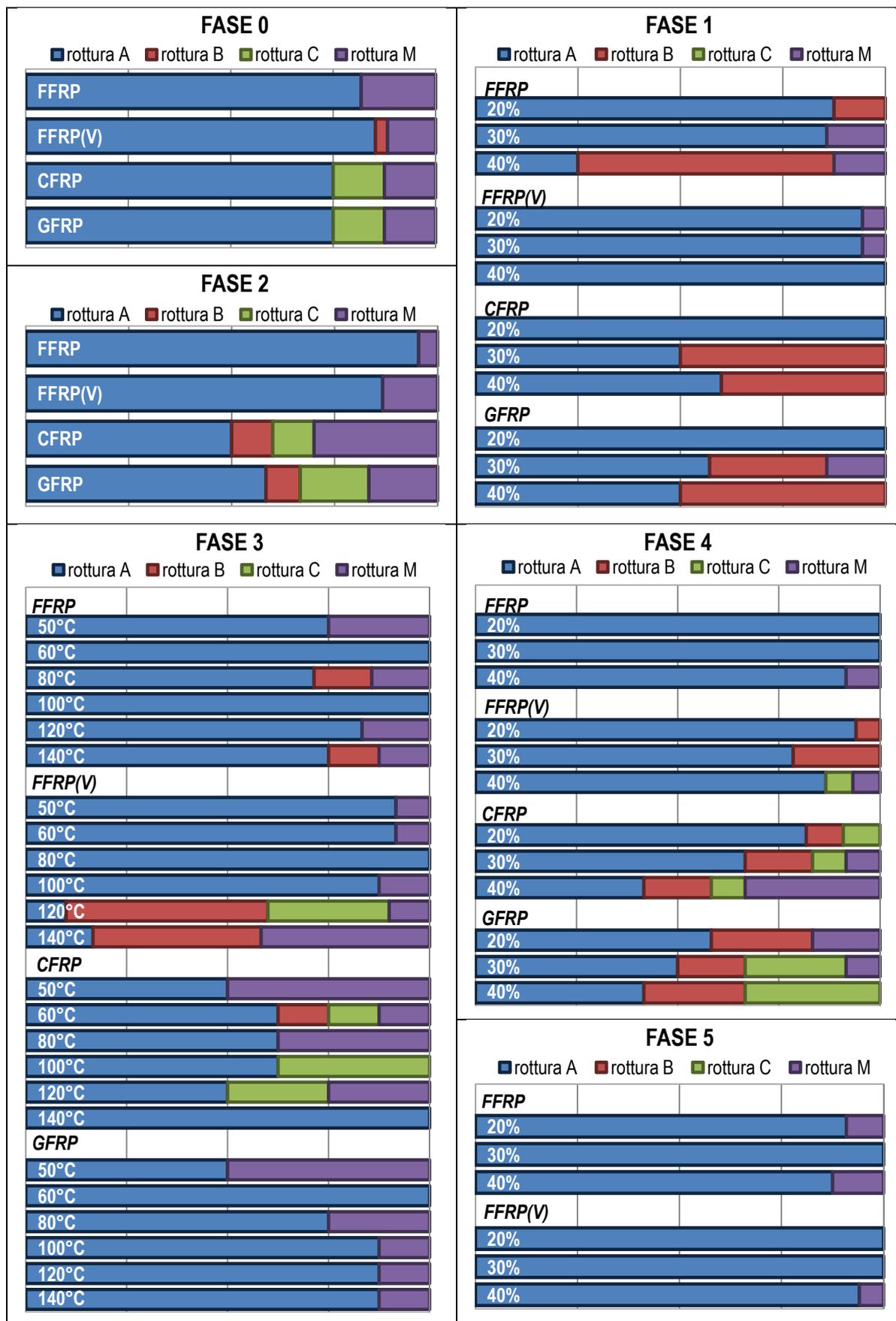


Figura 6.9: Incidenza delle modalità di rottura per fase di condizionamento e tipo di composito.

Nell'ottica di un confronto tra fibre naturali e tradizionali e tra resina epossidica e colla vinilica, si può affermare che la fibra di lino e la colla vinilica risultano più durabili rispetto ai condizionamenti effettuati (figura 6.10).

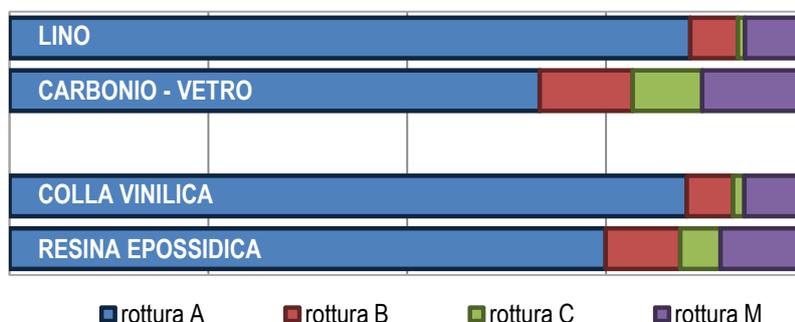


Figura 6.10: Incidenza delle modalità di rottura per tipo di fibra e di matrice.

Campioni multistrato

Anche i campioni multistrato sono stati sottoposti a test di pull-off ed i dati sono riportati in tabella 6.3.

Tabella 6.3: Numero di rotture per tipo.

	rottura A	rottura B	rottura C	rottura M
multiFRP_2S	6	-	-	-
multiFRP_2S(FT)	2	4	-	-
multiFRP_3S	6	-	-	-
multiFRP_4S	6	-	-	-
multiFRP_5S*	2	2-	-	-

* 2 prove non valide

Si può osservare che l'applicazione di più strati di fibra a comporre il composito (2,3 e 4) in generale non va ad inficiare la resistenza del composito stesso, i diversi strati collaborano tra loro e le interfaccia tra l'uno e l'altro non risultano essere un elemento di debolezza.

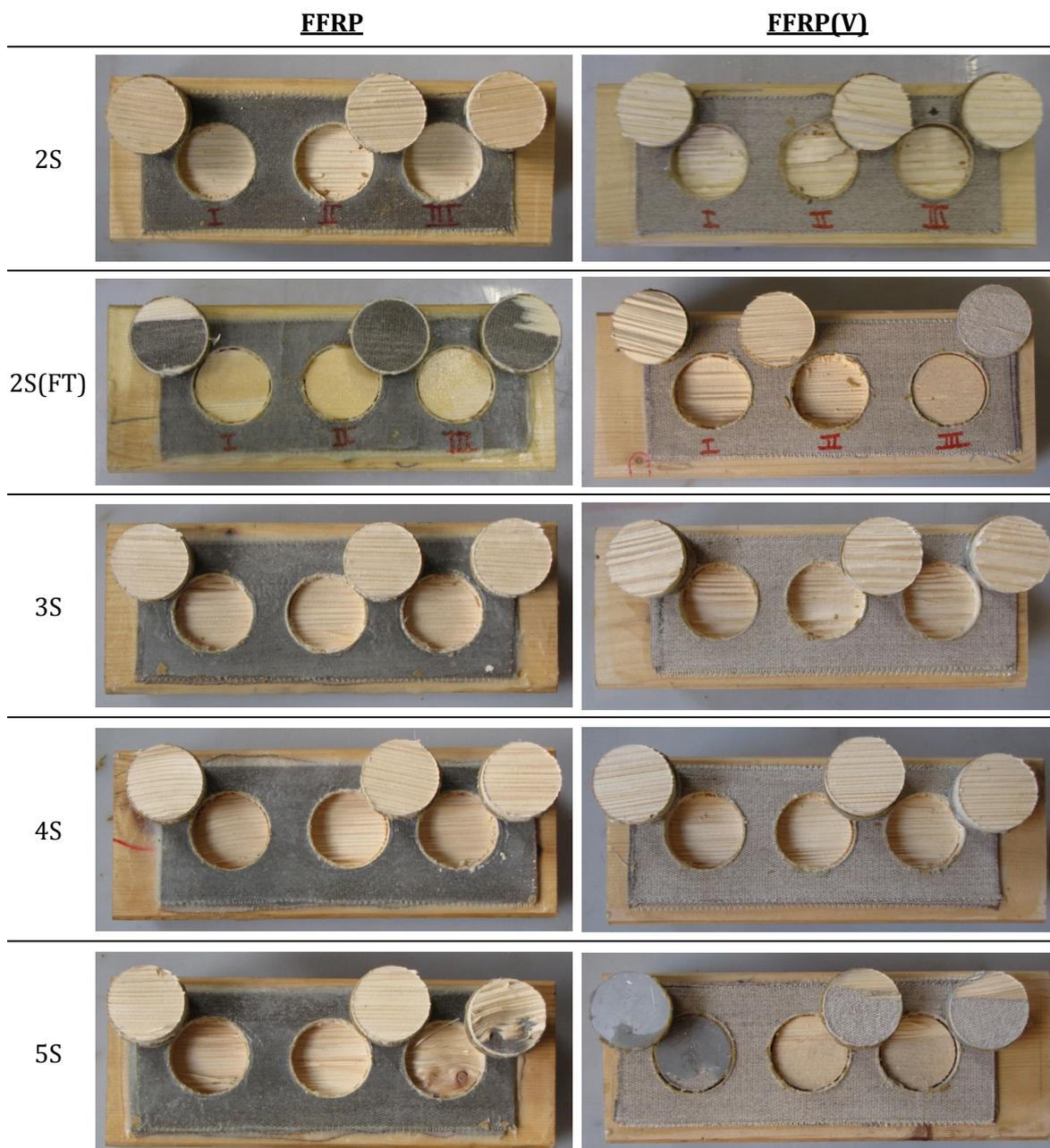


Figura 6.11: Risultati dei test di pull-off sui campioni multistrato.

Nel caso dei campioni multiFRP_2S(FT) invece non si è ottenuto il comportamento atteso. La preponderanza di rottura B però non indica una debolezza interna del rinforzo ma un problema all'interfaccia composito-legno. Il fenomeno non è stato ulteriormente indagato perché il doppio strato applicato a fresco ha comunque dato risultati soddisfacenti.

Per quanto riguarda i multiFRP_5S, due prove sono state invalidate (una per distacco del tassello di prova ed una per la presenza di un nodo) e in altre due si è ottenuto il distacco del composito. Le due rotture B sono avvenute nel composito con cola vinilica (figura 6.11).

6.1.3 Risultati - Analisi delle resistenze

Il macchinario per effettuare la prova fornisce il carico massimo ottenuto (P_{max}), da cui si ricava la tensione massima (σ_{max}) secondo la relazione (1)

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

σ_{max} : tensione massima [N/mm²];

P_{max} : carico massimo [N];

A: area di prova [mm²], che misura mediamente 1963 mm².

Il test di pull-off ha fornito una mole piuttosto ampia di valori numerici relative alle tensioni di rottura su cui è stato possibile fare dell'inferenza statistica. Il programma di statistica utilizzato si chiama MINITAB, per il cui approfondimento si rimanda al manuale on line.

Nella trattazione dei dati si fa riferimento all'intervallo di confidenza (CI), la cui spiegazione richiederebbe una trattazione troppo ampia, che esula dagli scopi di questo lavoro. Brevemente si definisce intervallo di confidenza un parametro che determina la precisione dei valori ottenuti, un CI pari al 95% comprende un intervallo di valori in cui si possa confidare - con un margine di certezza ragionevole (del 95%) - trovarsi il *valore vero* dell'intera popolazione in esame (Ross, 2003)

Le tensioni sono state considerate senza alcuna distinzione tra le diverse modalità di rottura intervenute. Inizialmente sono stati analizzati gli effetti dei diversi condizionamenti rispetto ad ogni materiale composito considerato, in seguito sono stati fatti alcuni confronti per mettere in luce similarità e differenze tra i materiali.

FFRP – fibra di lino e resina epossidica

Fase 0

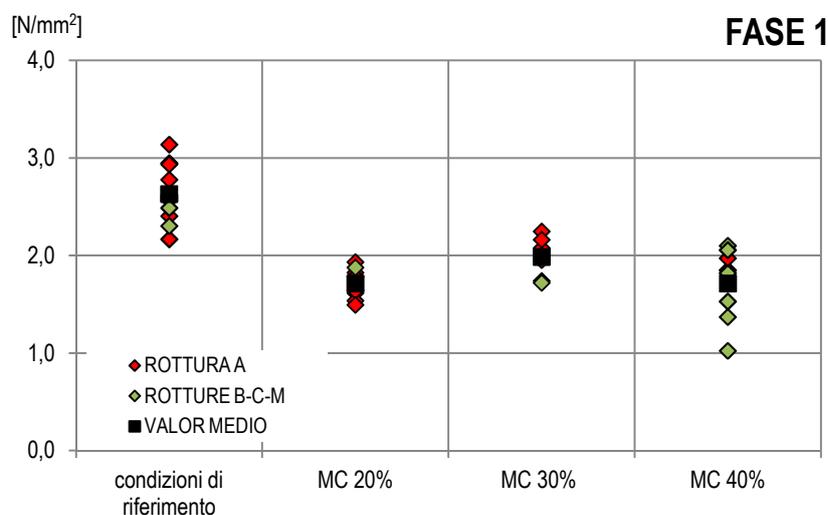
In *tabella 6.4* sono riportati i dati ottenuti per i campioni nelle condizioni di riferimento. La tensione media per la fase 0 è pari a 2,63 N/mm², con un coefficiente di variazione pari all'11,2%.

Tabella 6.4: Valori di tensione per la fase 0.

ID	P_{max} [kN]	σ_{max} [N/mm ²]	Modalità di frattura
$EP_L(F0)01$	6,157	3,14	A
	5,127	2,61	A
	5,081	2,59	A
	-	-	-
$EP_L(F0)02$	5,784	2,95	A
	5,759	2,93	A
	5,451	2,78	A
	5,038	2,57	A
$EP_L(F0)03$	4,880	2,49	M (A+B)
	4,716	2,40	A
	4,252	2,17	A
	4,519	2,30	M (A+B)

Fase 1

Nel grafico in *figura 6.12* si osserva la dispersione dei dati rilevati nella fase 1. Le tensioni relative ai campioni in cui si è verificata una rottura non coesiva nel legno (A), si attestano generalmente sotto al valor medio e risultano più basse di quelle ottenute per la rottura A. Nel caso di MC=40% le rotture B, C ed M costituiscono la maggioranza dei casi ed il ventaglio di valori tende ad essere più ampio rispetto agli altri casi (coefficiente di variazione pari al 22%).



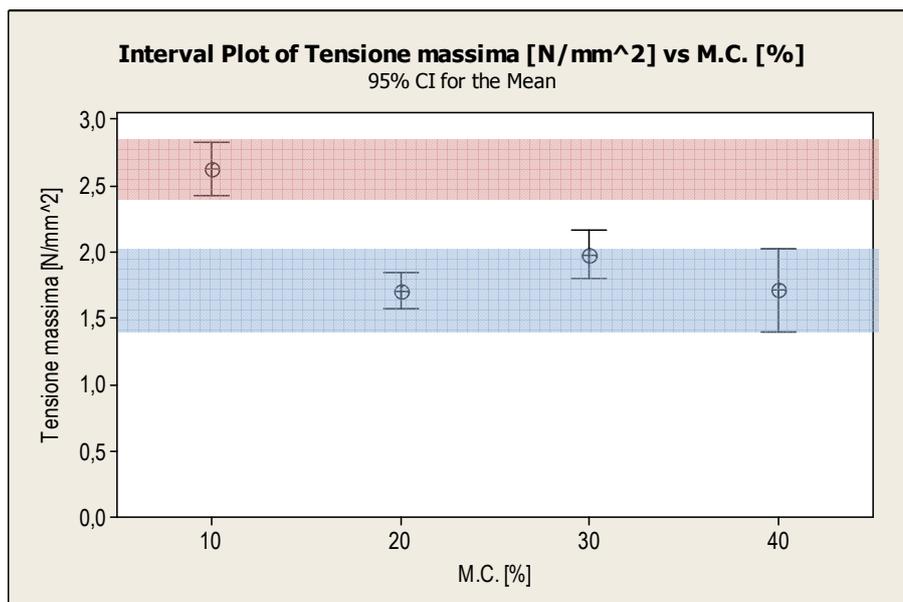


Figura 6.12: Grafici relativi a FFRP – fase 1.

Nel grafico si può vedere che l'intervallo relativo a MC=10% non interseca gli altri intervalli, è quindi corretto affermare che si evince una differenza tra questa condizione di umidità e quelle superiori, che costituiscono un elemento di criticità nella buona riuscita dell'intervento. Non si ravvisa però una difformità tra i diversi valori di MC>10%, che sono ugualmente pericolose.

Fase 2

Per quanto riguarda la dispersione dei dati della fase 2, si osserva che l'unico valore ottenuto in corrispondenza di una rottura non coesiva risulta superiore a tutti gli altri (figura 6.13). La dispersione dei valori si è pari al 17,1%. Il valor medio della fase 2 calcolato è molto vicino a quello delle condizioni di riferimento, ossia 2,39 N/mm² il primo e 2,63 N/mm² il secondo. Questa similitudine riscontrata, che non permette di ravvisare una criticità delle condizioni cicliche della fase 2 è confermata dal grafico in figura 6.13. I due intervalli di confidenza calcolati si sovrappongono, si può quindi affermare che gli effetti delle variazioni cicliche di temperatura e umidità ricreate per questa fase non costituiscono un problema per i campioni di FFRP.

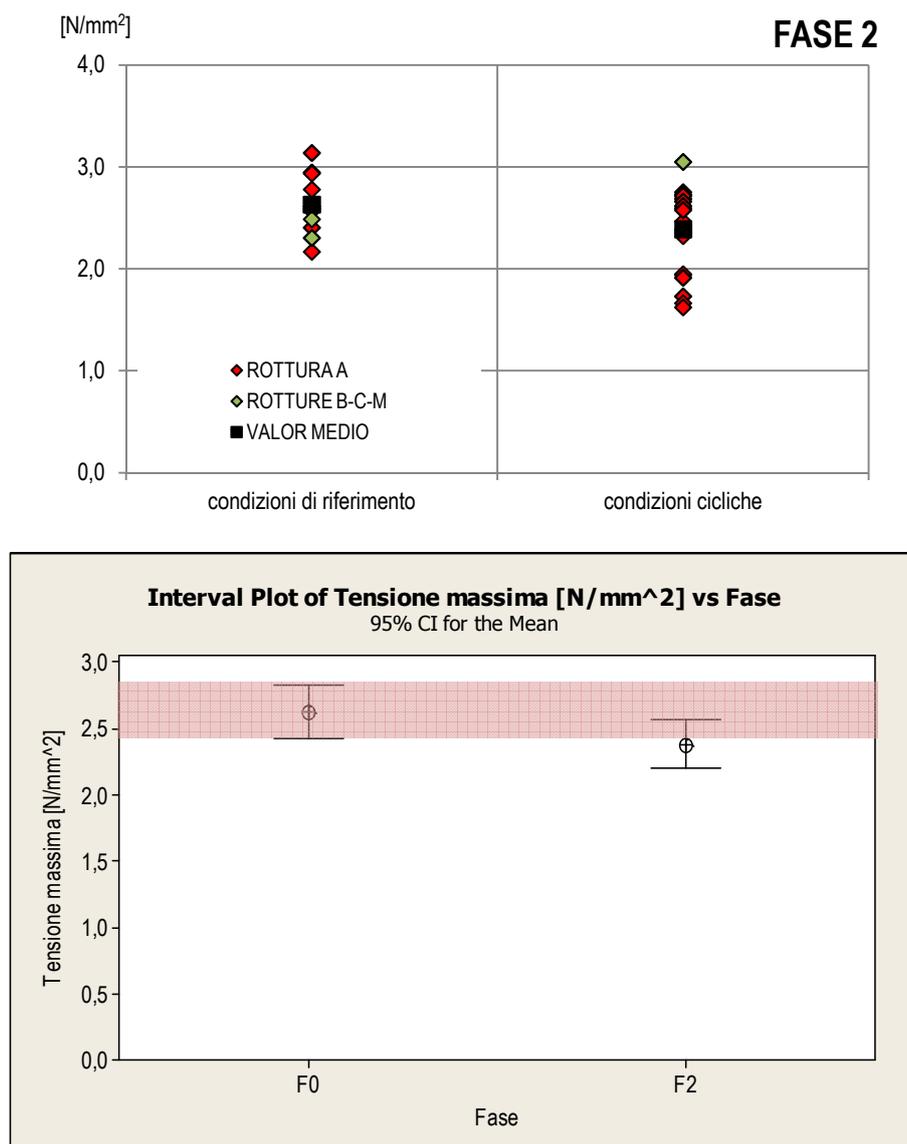


Figura 6.13: Grafici relativi a FFRP – fase 2.

Fase 3

I campioni della fase 3 sono stati riscaldati per 24 ore, tale condizionamento non rappresenta, per questo composito, un aspetto particolarmente sfavorevole, in termini di modalità di frattura intervenute. Risulta però evidente che per elevate temperature ($T=140\text{ °C}$), le tensioni misurate in corrispondenza di fratture non coesive sono estremamente basse, allargando notevolmente il range di valori misurati, i quali mostrano un coefficiente di variazione molto alto, del 41,5%. Anche i valori relativi a $T=60\text{ °C}$ e $T=120\text{ °C}$, appaiono piuttosto dispersi, con coefficienti di variazione intorno al 20% per entrambi (figura 6.14).

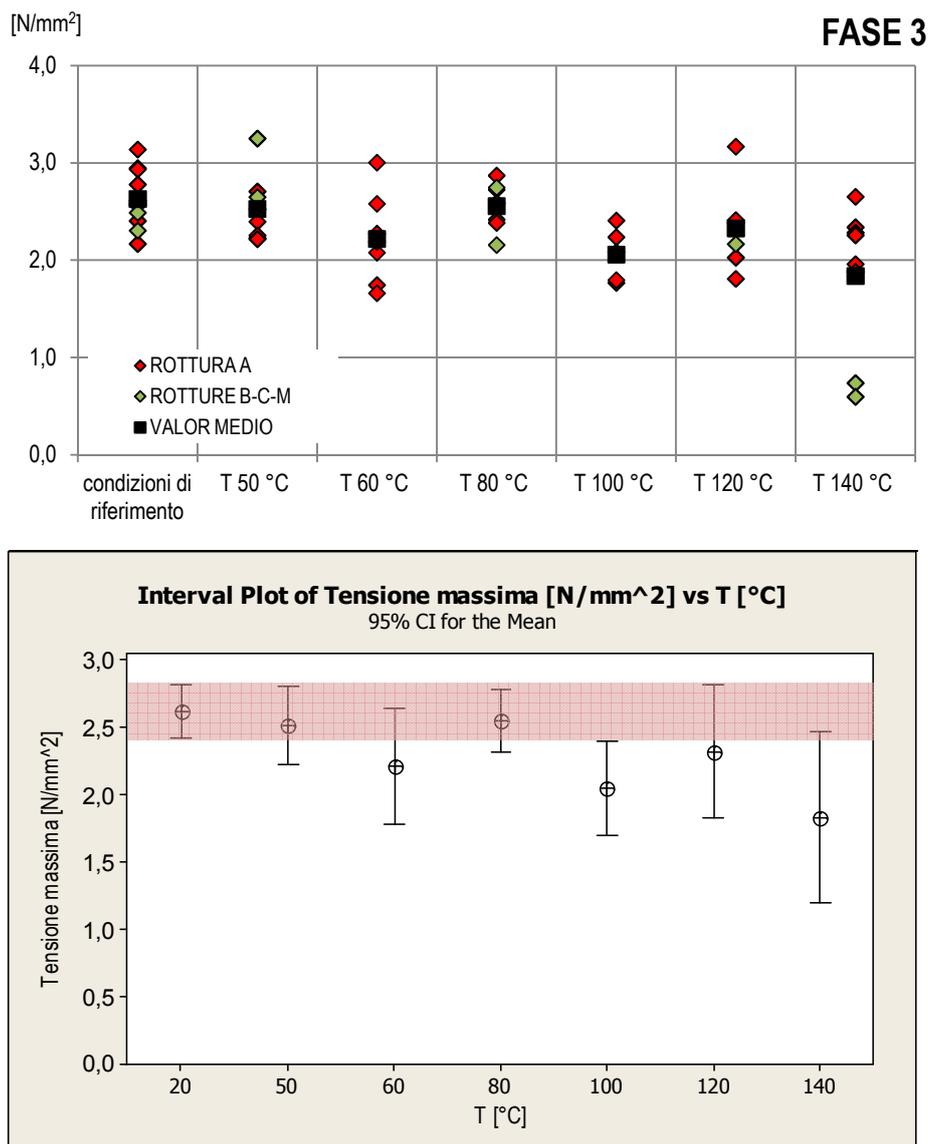


Figura 6.14: Grafici relativi a FFRP – fase 3.

Dal grafico in figura 6.14 non è possibile individuare una chiara ed inequivocabile tendenza al peggioramento delle prestazioni del composito all'aumentare della temperatura. È altresì innegabile che questa impossibilità è causata dall'elevata dispersione dei dati, soprattutto relativi alle altre temperature, che costituisce di per se un indicatore. Essendo il legno un materiale estremamente anisotropo, il ritiro dovuto alla perdita d'acqua è variabile sia rispetto alla direzione della fibratura (la stessa per tutti i provini), sia rispetto alla direzione degli anelli di accrescimento, che cambia per ogni elemento (cfr. §2.4.2, figura 2.9). La diversa contrazione volumica, causata dal riscaldamento è causa di differenti tensioni all'interfaccia, che possono non manifestarsi o risultare fatali all'incollaggio (figura 6.15).

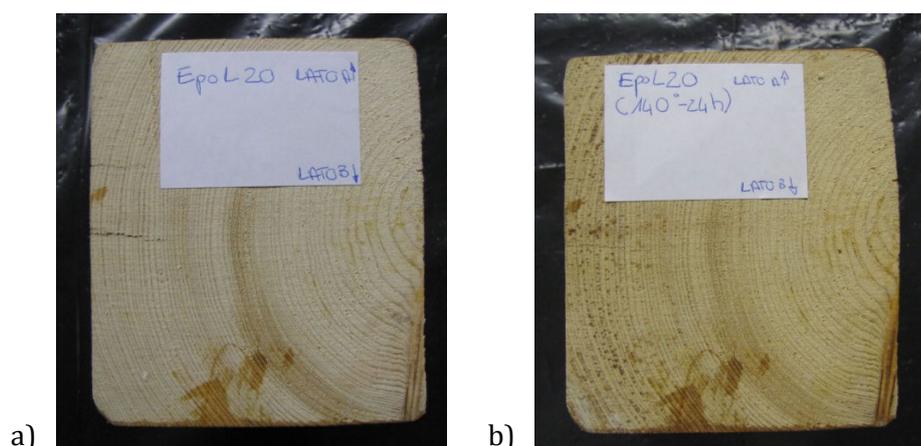


Figura 6.15: (a) prima del riscaldamento, (b) dopo il riscaldamento.

Fase 4

I dati relativi alla fase 4, ossia prolungata permanenza (30 giorni) in presenza di elevati contenuti di umidità, sono quasi tutti ascrivibili a fratture coesive. In presenza di MC=20% e 40% i valori di tensione risultano maggiormente dispersi, con coefficienti di variazione di 17 e 22% rispettivamente, mentre sono più raggruppati nel caso di MC=30% (figura 6.17).

Dal grafico di dispersione si desume una tendenza al calo prestazionale, confermata da quanto riportato in figura 6.16. Sebbene non sia possibile determinare in che misura, i diversi contenuti di umidità influiscano sull'efficacia del rinforzo, è possibile asserire in termini generali che la permanenza prolungata in condizioni di elevata umidità può costituire una criticità, soprattutto quando il campione perde l'umidità in eccesso, in cui è permaso per lungo tempo (figura 6.16).

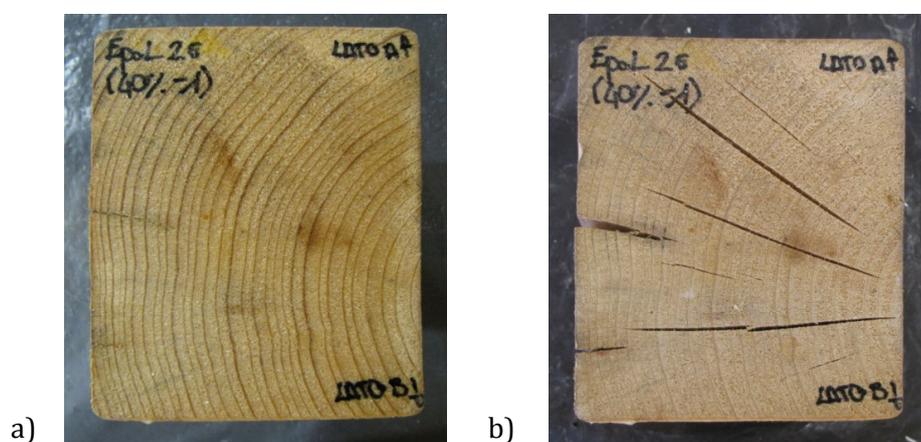


Figura 6.16: (a) campione umido, (b) campione nuovamente in equilibrio con le condizioni standard.

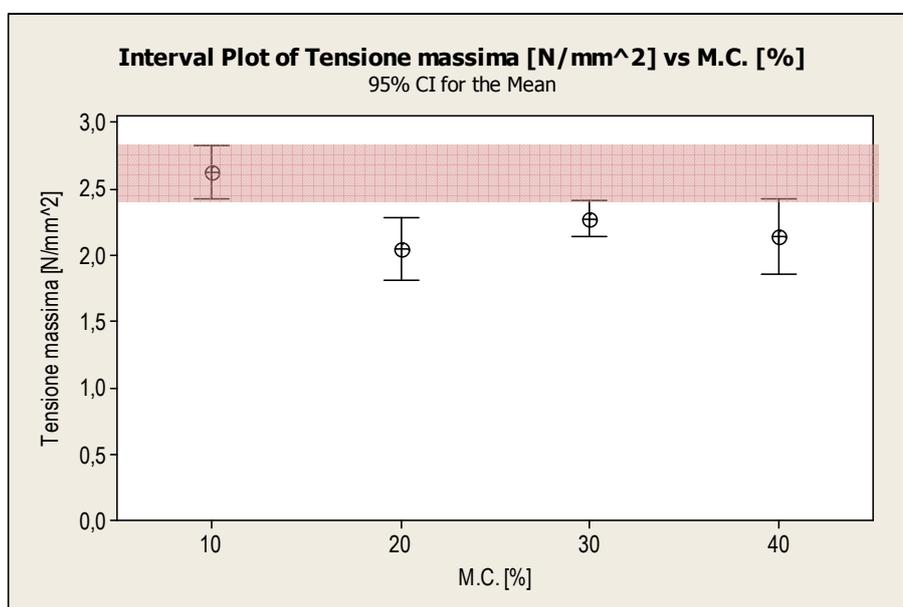
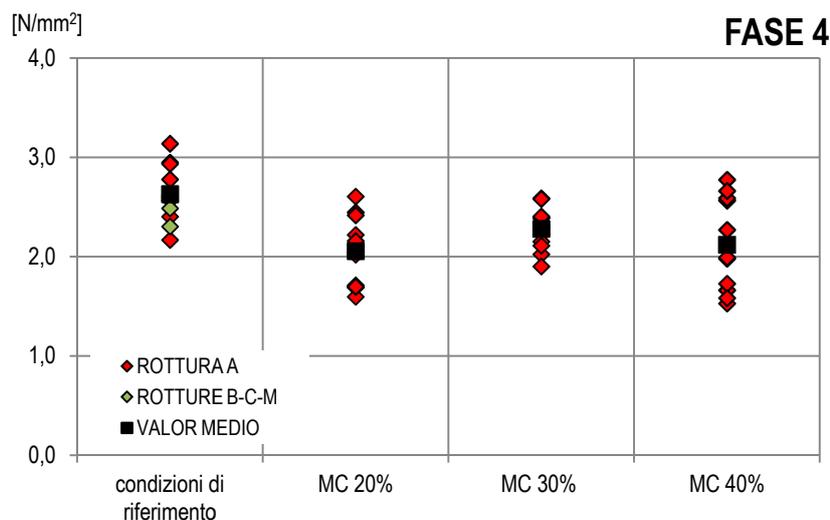


Figura 6.17: Grafici relativi a FFRP – fase 4.

Fase 5

La fase 5, al pari della 4 mira ad indagare gli effetti dell'umidità, per un periodo però lungo il doppio, 60 giorni. anche in questo caso c'è un'incidenza quasi nulla delle rotture B, C ed M. I dati risultano tutti ugualmente dispersi (deviazione standard: 0,30-0,34 N/mm²) e si intravede un calo della resistenza all'aumentare del valore di MC (figura 6.18).

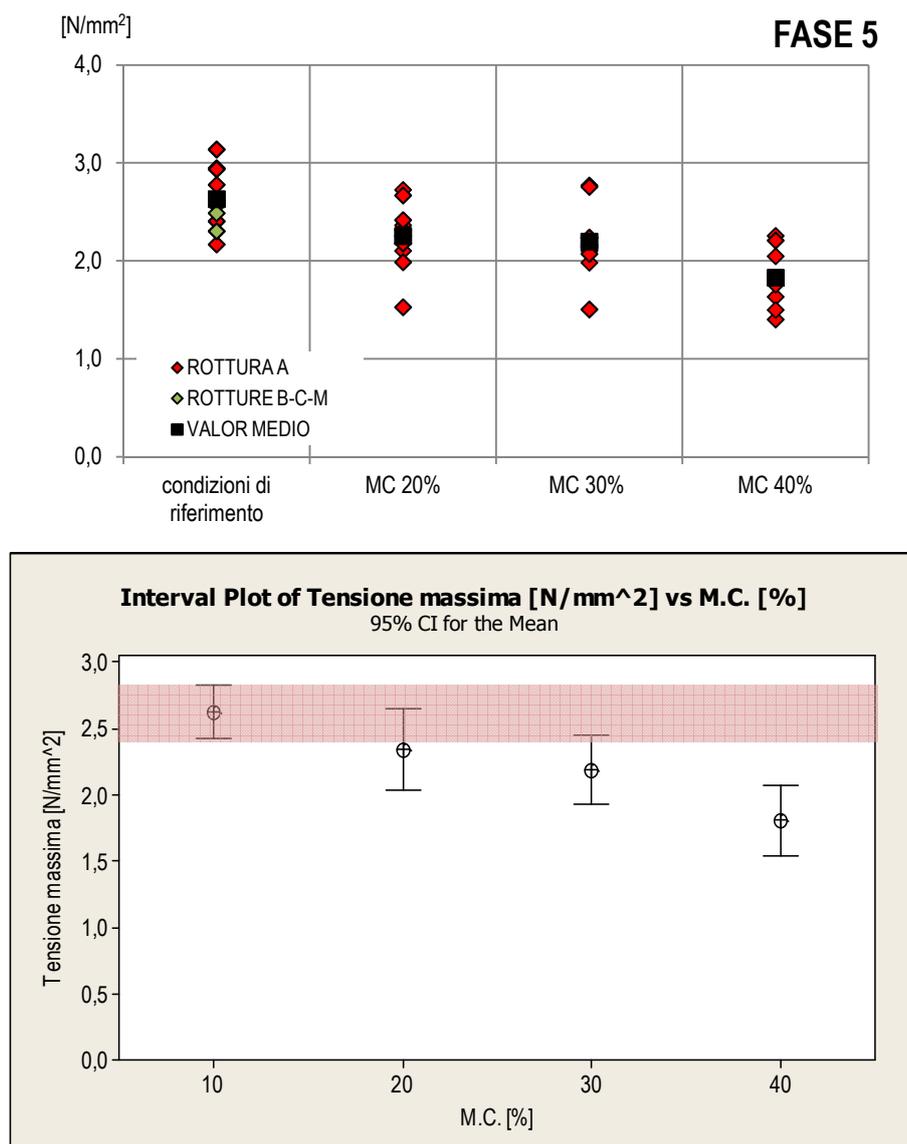


Figura 6.18: Grafici relativi a FFRP – fase 5.

La distribuzione degli intervalli di confidenza non permette di riconoscere un andamento caratteristico legato ai differenti contenuti di umidità, ma si evince una chiara differenza tra i campioni asciutti e quelli con $MC=40\%$ (figura 6.18).

Indipendentemente dai valori di resistenza ottenuti, alcuni campioni hanno mostrato la rottura del composito, causata dalla variazione volumica e la comparsa di muffe sul legno (figura 6.19).

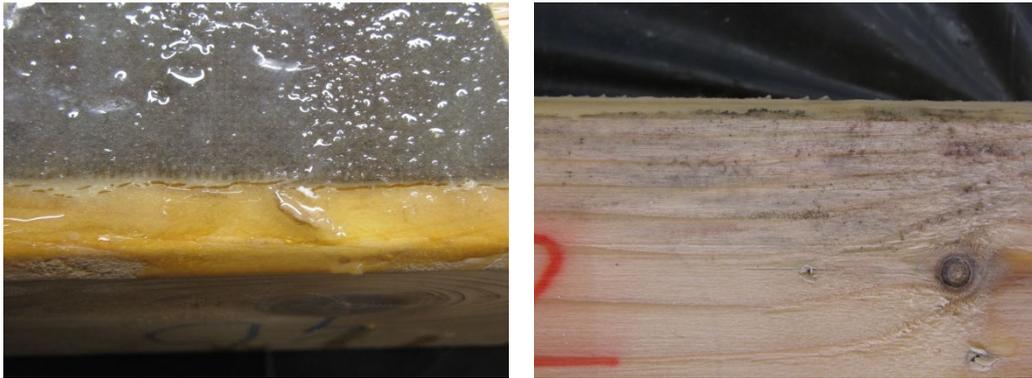


Figura 6.19: Danni causati dalla prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità.

Le fasi 4 e 5 mostrano come la permanenza del legno fibrorinforzato in condizioni di elevata umidità possa essere causa di cali prestazionali, rotture del composito e comparsa di muffe. Non è però evidente dai dati in nostro possesso comprendere quanto la tempistica sia discriminante (figura 6.20).

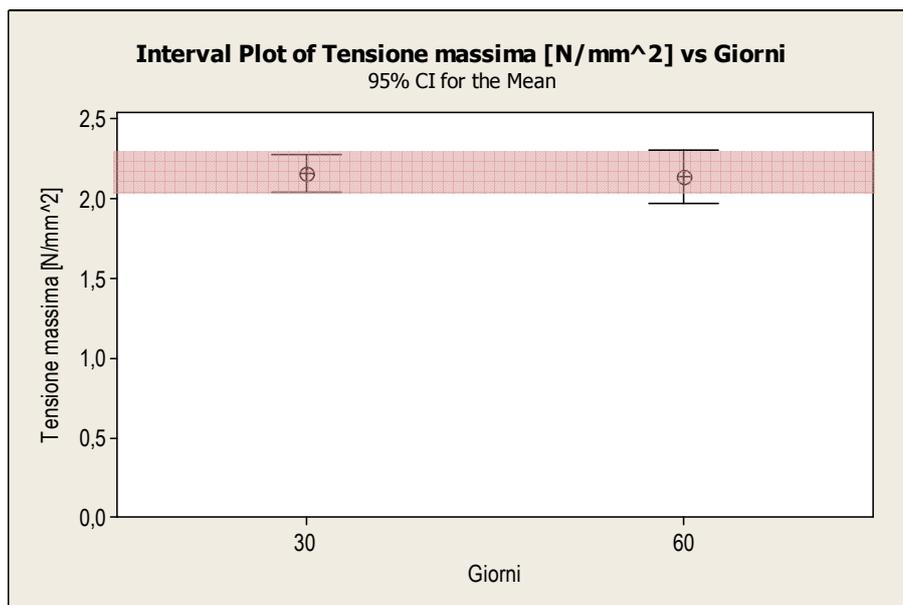


Figura 6.20: Interval plot dei valori delle fasi 4 e 5 (intervallo di confidenza=95%).

FFRP(V) – Fibra di lino e colla vinilica

Fase 0

Le tensioni misurate nei campioni in condizioni standard di riferimento sono riportate in *tabella 6.5*. Il valor medio è pari a 1,98 N/mm² ed il coefficiente di variazione si attesta al 15%. La maggior parte delle rotture ottenute è di tipo coesivo.

Tabella 6.5: Valori di tensione per la fase 0.

ID	P _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Modalità di frattura	ID	P _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Modalità di frattura
V _L (F0)01	4,223	2,15	A	V _L (F0)04	4,442	2,26	A
	3,108	1,58	A		3,599	1,83	A
	3,426	1,74	A		4,456	2,27	A
	3,661	1,86	A		3,922	2,00	A
	3,804	1,94	A		2,336	1,19	B
	4,083	2,08	A		3,626	1,85	A
V _L (F0)02	3,938	2,01	A	V _L (F0)05	3,256	1,66	A
	4,005	2,04	A		3,890	1,98	A
	4,050	2,06	A		3,834	1,95	A
	4,139	2,11	A		2,818	1,44	A
	4,037	2,06	A		4,192	2,13	M (A+B)
-	-			2,501	1,27	A	
V _L (F0)03	-	-		V _L (F0)06	4,453	2,27	M (A+B)
	4,982	2,54	A		5,050	2,57	M (A+B)
	4,245	2,16	A		4,153	2,12	M (A+B)
	3,806	1,94	A		4,216	2,15	A
	3,461	1,76	A		4,048	2,06	A
	4,174	2,13	A		4,024	2,05	A

Fase 1

I dati mostrati nel grafico in *figura 6.21* hanno un andamento piuttosto simile. Le tensioni medie si attestano intorno a 2,00 N/mm², nello specifico: MC 20% = 2,06 N/mm², MC 30% = 1,97 N/mm² ed MC 40% = 1,97 N/mm². Anche i coefficienti di variazione risultano ravvicinati, 11-15%.

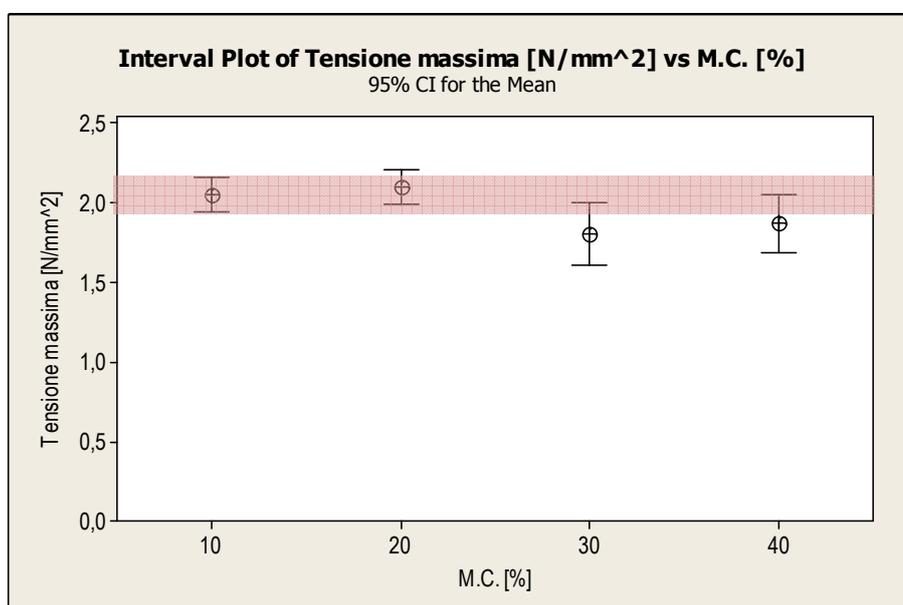
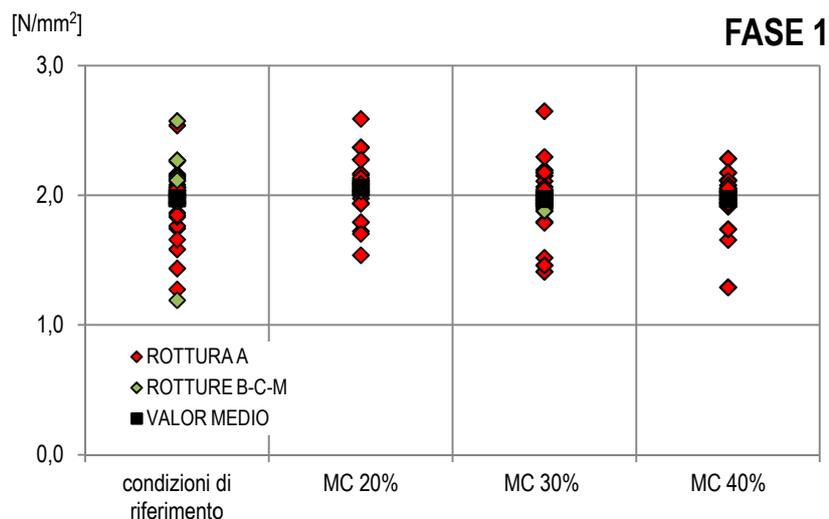


Figura 6.21: Grafici relativi a FFRP(V) – fase 1.

Come già ravvisato dal grafico di dispersione, anche il grafico ad intervalli non mette in luce alcuna differenza tra i diversi valori di contenuto iniziale di umidità nel legno.

L'assenza di effetti da imputarsi alle condizioni iniziali del substrato, in termini di tensioni di resistenza, conferma quanto già osservato relativamente all'incidenza delle modalità di rottura. Si può quindi avvalorare quanto supposto, ossia che la natura acquosa della colla vinilica ben si adegua alla presenza di umidità superficiale del legno senza subire cali prestazionali.

Fase 2

I valori della fase 2 sono molto raggruppati tra loro e ricadono in un range di 0,50 N/mm² ed hanno un coefficiente di variazione dell'8,5% (figura 6.22).

Entrambi i grafici relativi alla fase 2 dimostrano che le variazioni cicliche di temperatura e umidità, cui sono stati sottoposti i provini non hanno avuto effetti problematici sul materiale composito e la sua aderenza al legno.

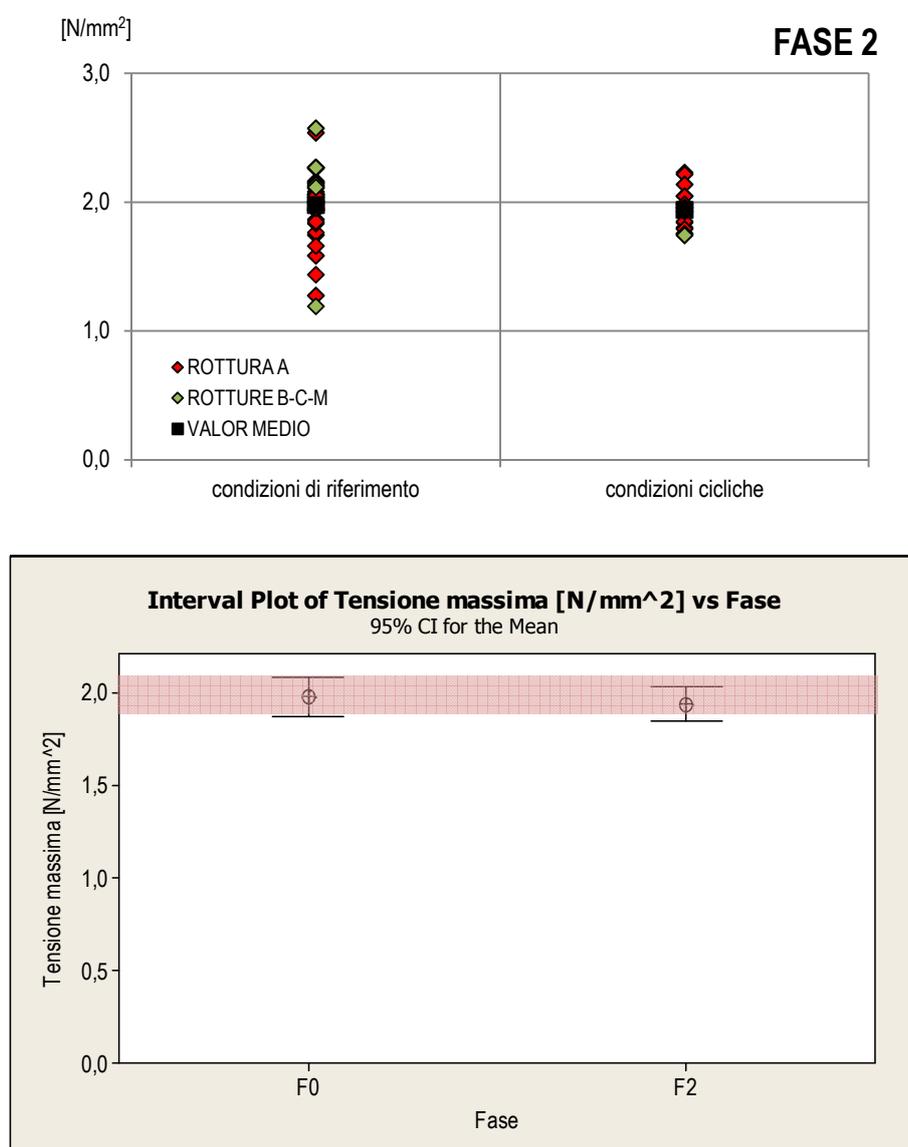


Figura 6.22: Grafici relativi a FFRP(V) – fase 2.

Fase 3

Le prove di caratterizzazione dei singoli materiali hanno evidenziato la sensibilità della matrice vinilica alle alte temperature (T = 120 e 140 °C) è stato quindi di estrema importanza investigare il fenomeno di aderenza in queste specifiche condizioni.

Dal grafico di dispersione in *figura 6.23* si evince chiaramente la variabilità dei valori di tensione calcolati.

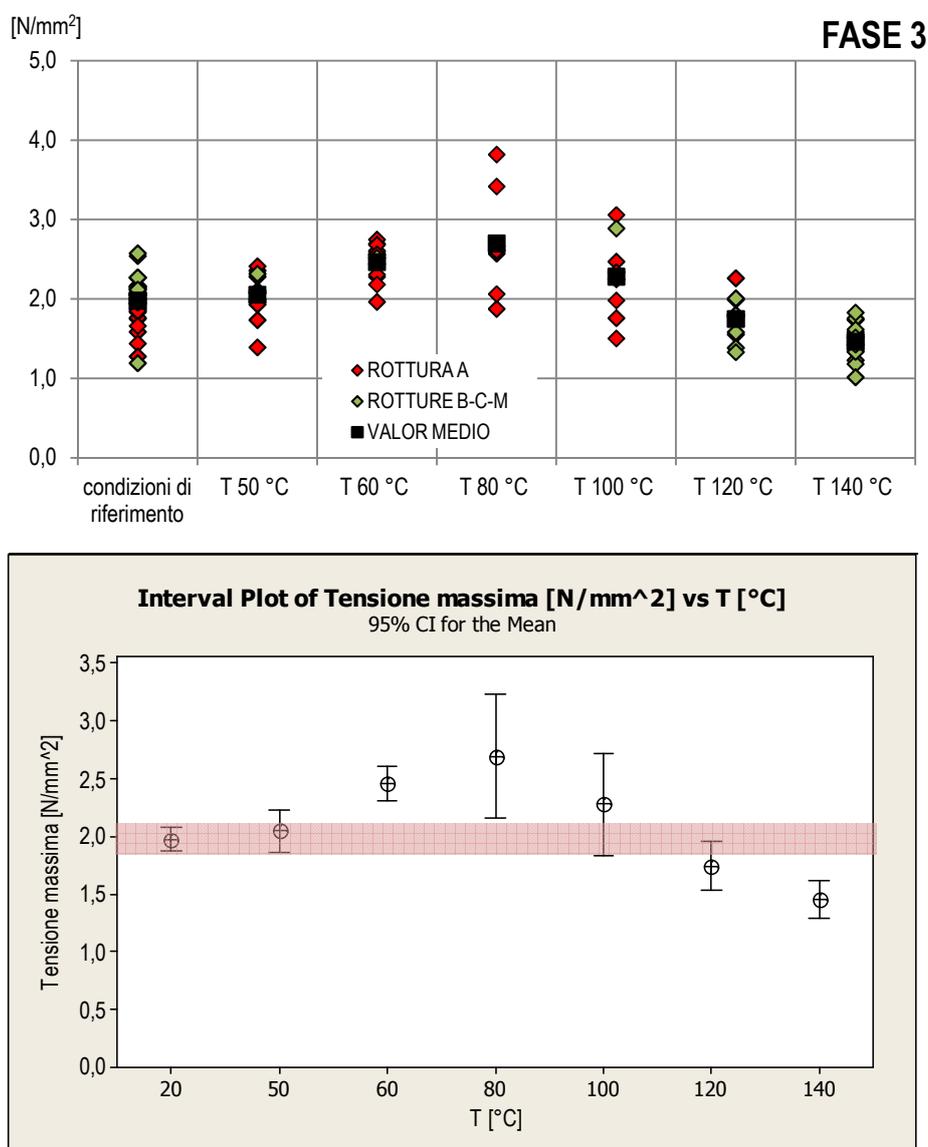


Figura 6.23: Grafici relativi a FFRP(V) – fase 3.

In particolar modo le temperature intermedie (80 e 100 °C) mostrano un ventaglio di valori molto ampio con coefficienti di variazione superiori al 20% e la tendenza non è chiaramente identificabile.

Le considerazioni relative a $T = 60$ e 80 °C, meritano degli approfondimenti, poiché inaspettate. Risulta invece coerente con quanto già evidenziato il valore relativo a $T = 140$ °C, ossia che tale temperatura non causa effetti in termini di tensioni all'interfaccia causata dalla variazione volumica, ma comporta un evidente degrado della matrice (*figura 6.24*).

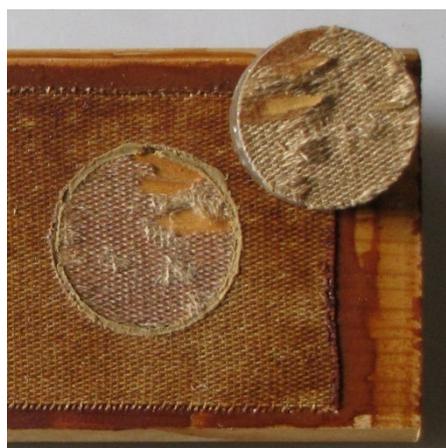


Figura 6.24: Rottura C del campione VL(F3₁₄₀)02 causata dal degrado della colla vinilica.

Fase 4

I campioni della fase 4 hanno fornito dati coerenti tra loro, l'andamento per tutte le percentuali di MC è simile ed il coefficiente di variazione risulta compreso tra l'11 ed il 14%. Nonostante non si riscontrino evidenti differenze in termini di tensione massima, come conferma anche il grafico ad intervalli in *figura 6.25*, si può osservare come le rotture non coesive siano molto diffuse.

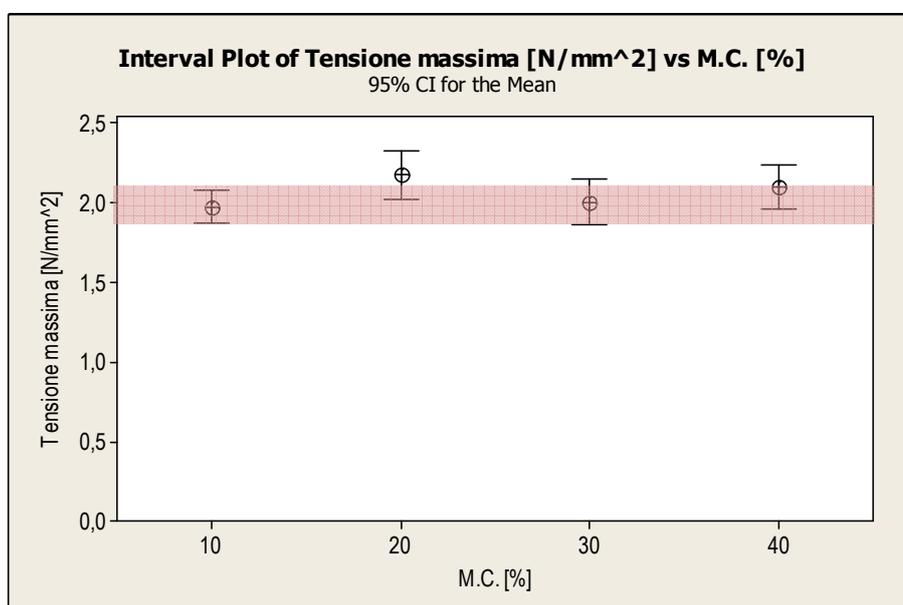
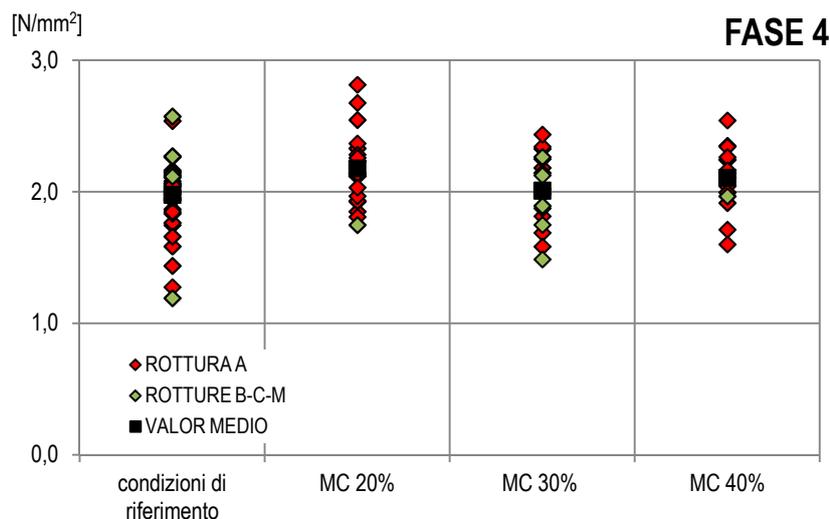


Figura 6.25: Grafici relativi a FFRP(V) – fase 4.

Fase 5

Le considerazioni fatte per i campioni della fase 4 sono valide anche per quelli della fase 5, sia quando si analizza la dispersione dei dati, sia il loro andamento (figura 6.26).

Sebbene i valori di tensione non mettano in luce una criticità causata dalla permanenza prolungata in condizioni di elevata umidità (fasi 4 e 5), i campioni sottoposti a tale condizionamento hanno mostrato la comparsa di muffe e microrganismi. Importante sottolineare come in questo caso la proliferazione non si sia limitata al legno, come per FFRP, ma abbia attaccato anche il composito (figura 6.37). La presenza di organismi biodeteriogeni,

nonostante nell'immediato non abbia causato danni, può essere causa del rapido deterioramento dell'elemento rinforzato, soprattutto se il composito è sensibile agli attacchi e la proliferazione può essere pressoché ubiquitaria su tutta la superficie.

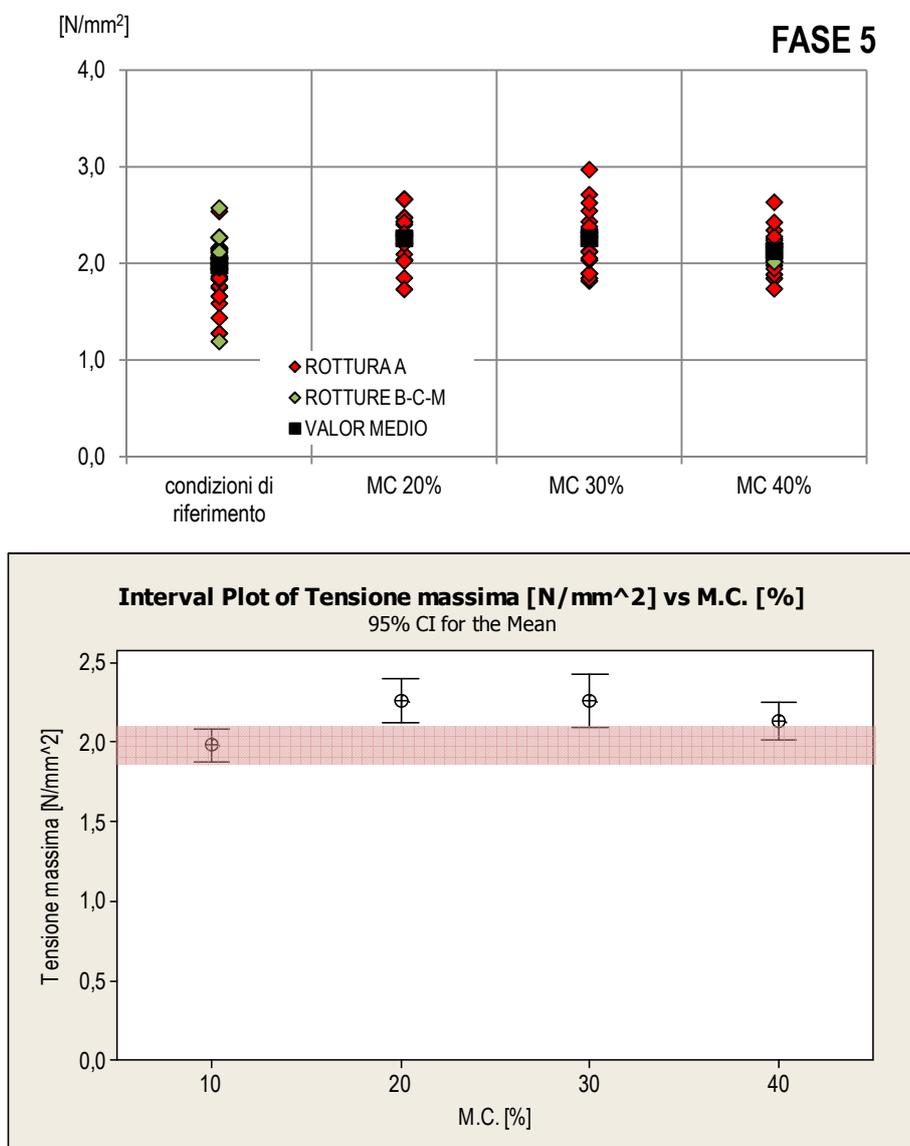


Figura 6.26: Grafici relativi a FFRP(V) – fase 5.



Figura 6.27: Presenza di muffe sia sul legno, sia sul composito.

CFRP – Fibra di carbonio e resina epossidica

Fase 0

I campioni di CFRP in condizioni standard di riferimento mostrano una tensione media pari a 2,38 N/mm² ed un coefficiente di variazione intorno al 14%. In solo due prove sono state ottenute fratture non coesive e nel caso della rottura C del campione EP_C(F0)01, il valore di tensione associato risulta molto basso (tabella 6.6).

Tabella 6.6: Valori di tensione per la fase 0.

ID	P _{max}	σ _{max}	Modalità di frattura
	[kN]	[N/mm ²]	
EP _C (F0)01	3,338	1,70	C
	4,348	2,21	A
	4,617	2,35	A
	4,507	2,30	A
EP _C (F0)02	5,394	2,75	A
	5,009	2,55	A
	5,135	2,62	M (A+B)
	4,979	2,54	A

Fase 1

Le tensioni ottenute dai provini della fase 1 sono molto variabili ed in particolare nel caso di MC = 30 e 40% coprono un range pari a quasi 2 N/mm² con coefficienti di variazione prossimi al 50% (figura 6.28).

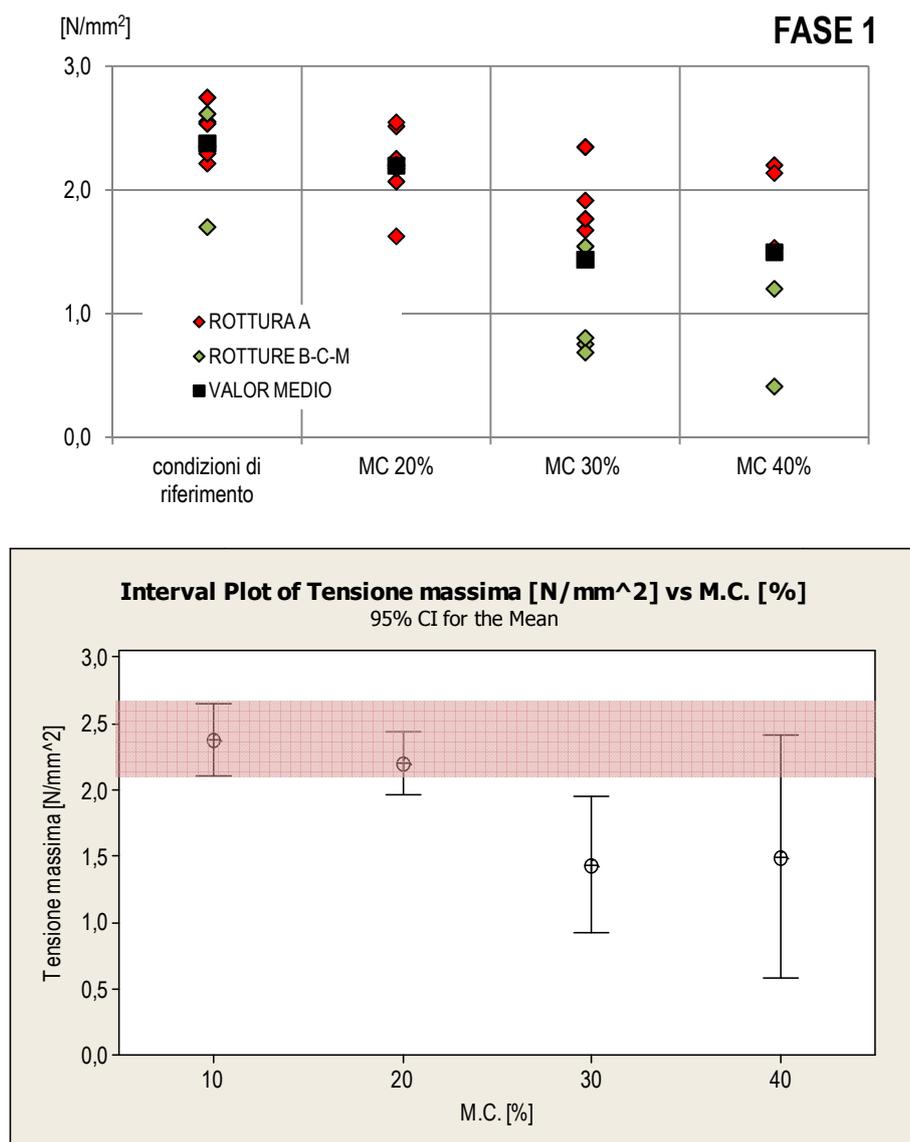


Figura 6.28: Grafici relativi a CFRP – fase 1.

Si nota in particolare come i valori associati a rotture non coesive siano estremamente bassi rispetto a quelli riferiti alla rottura A, indice di come – a differenza dei materiali compositi naturali – il calo prestazionale del rinforzo avvenga a tensioni molto lontane da quelle attese.

Dal grafico in *figura 628* appare evidente che contenuti di umidità pari al 30% siano causa di una mancata adesione ottimale del composito. Per quanto riguarda il valore del 40% non è statisticamente possibile dichiarare che rappresenti una criticità a tutti gli effetti, ma analizzando in sinergia sia le tensioni che le modalità di rottura (il composito si è staccato dal legno nel 40% dei casi) appare evidente che esso costituisca un problema.

Fase 2

Come già osservato per i campioni della fase 1, anche quelli di questa fase mostrano una marcata variabilità di valori tensionali, racchiusi in un intervalli di oltre 2 N/mm².

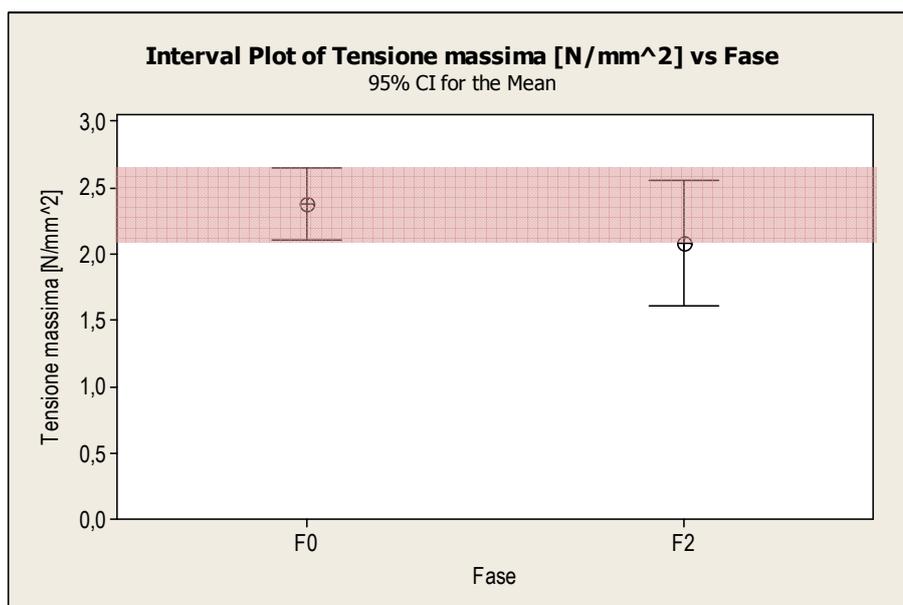
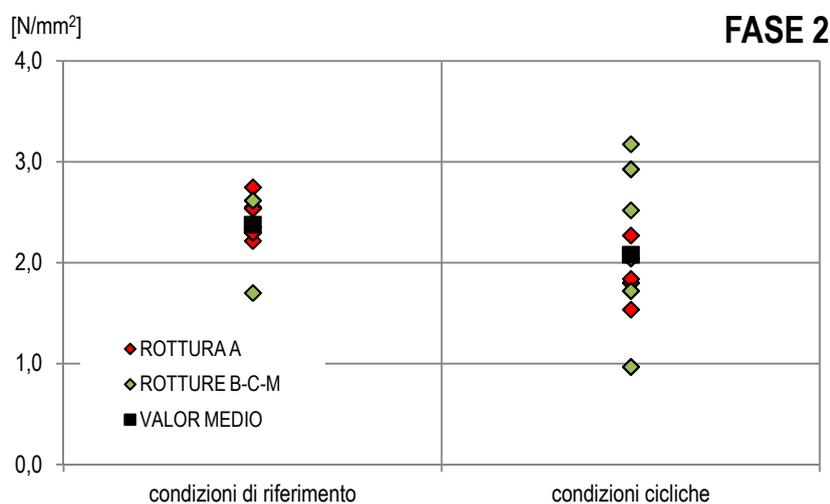


Figura 6.29: Grafici relativi a CFRP – fase 2.

In questo caso i valori delle fratture non coesive sono omogeneamente distribuite all'interno del range ed in alcuni casi risultano anche notevolmente più alti dei valori riferibili alla rottura coesiva del legno.

Sebbene in termini di tensione CFRP risulta stabile rispetto alle condizioni della fase 2, il verificarsi di rotture di tipo B, C ed M in oltre la metà delle prove costituisce un campanello di allarme (figura 6.29).

Fase 3

I dati relativi alle prove sui campioni riscaldati a diverse temperature risultano maggiormente raggruppati rispetto a quelli analizzati fino ad ora.

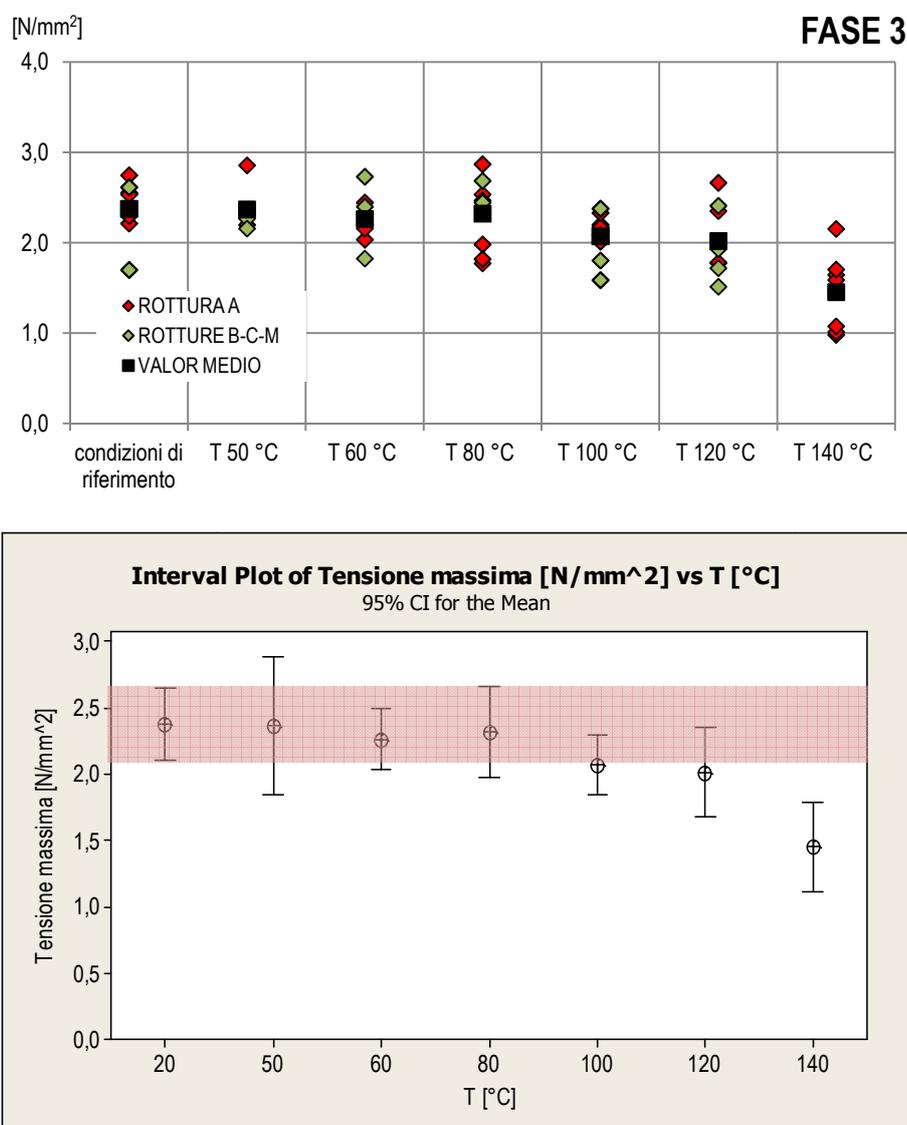


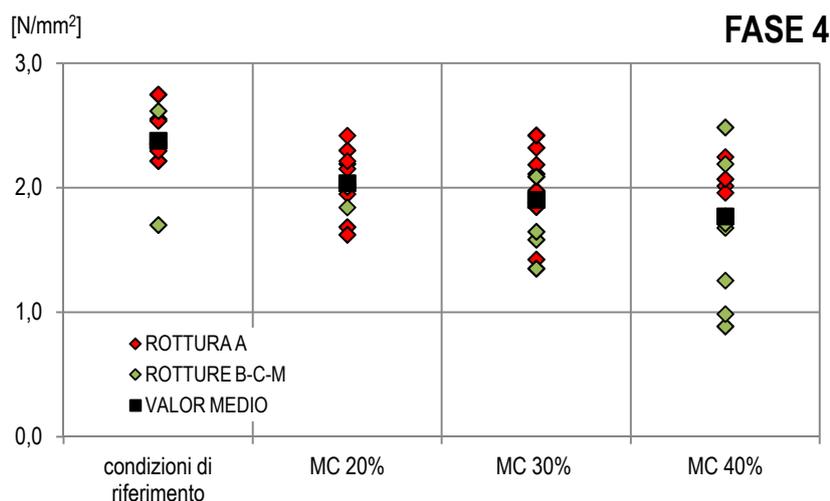
Figura 6.30: Grafici relativi a CFRP – fase 3.

Si denota un'ampia presenza di fratture non coesive, ad eccezione della $T = 140\text{ °C}$, risultato che si discosta da quelli ottenuti nei compositi con fibra di lino. Da quanto emerge dall'analisi del grafico ad intervalli, la temperatura più alta - nonostante l'assenza di fratture non coesive del legno - mostra una tensione media spiccatamente più bassa (figura 6.30). È quindi possibile dedurre che i campioni di legno selezionati casualmente per la prova siano tutti particolarmente sensibili alle alte temperature, per caratteristiche proprie, intrinseche del legno.

Fase 4

La prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità dei campioni rinforzati con CFRP ha fornito valori di resistenza molto variabili, in particolare per MC 40% è stato calcolato un coefficiente di variazione prossimo al 30%. In questa prova i valori attribuiti a fratture non coesive nel legno tendono ad essere prevalentemente più bassi del valor medio.

Il grafico ad intervalli (figura 6.31) non mostra fornisce un'evidenza di criticità, ma si osserva comunque una tendenza al calo prestazionale in termini di resistenza allo strappo, che se considerata in associazione all'analisi delle modalità di rottura, permette di affermare che questo tipo di condizionamento può risultare problematico nella buona riuscita dell'intervento.



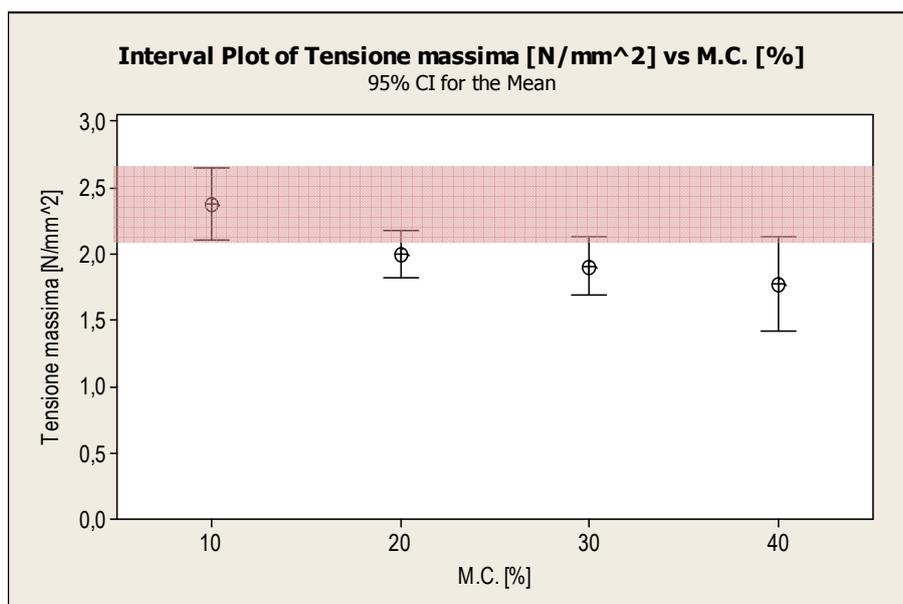


Figura 6.31: Grafici relativi a CFRP – fase 4.

GFRP – Fibra di vetro e resina epossidica

Fase 0

In *tabella 6.7* sono riportate le tensioni ottenute dai campioni rinforzati GFRP nelle condizioni di riferimento. La tensione media per la fase 0 è pari a 2,39 N/mm², con un coefficiente di variazione pari al 12%.

Tabella 6.7: Valori di tensione per la fase 0.

ID	P _{max} [kN]	σ _{max} [N/mm ²]	Modalità di frattura
EP_V(F0)01	4,060	2,07	C
	4,732	2,41	A+B
	5,308	2,70	A
	4,765	2,43	A
EP_V(F0)02	3,969	2,02	A
	5,361	2,73	A
	4,176	2,13	A
	5,148	2,62	A

Fase 1

Come già riscontrato nei risultati dell'altro composito tradizionale, anche per la fibra di vetro si evince un'enorme variabilità delle tensioni misurate nelle prove a strappo.

In particolar modo per contenuti di umidità del 30 e 40% la media risente di alcuni valori di tensione relativi a fratture non coesive del legno che presentano valori inferiore a 0,50 N/mm².

Nonostante l'enorme intervallo in cui si attestano i dati si delinea chiaramente, anche dal grafico ad intervalli (figura 6.32), un calo prestazionale causato da elevati contenuti di umidità nel substrato all'atto dell'incollaggio, che trova conferma anche nell'analisi dell'incidenza e delle modalità di rottura

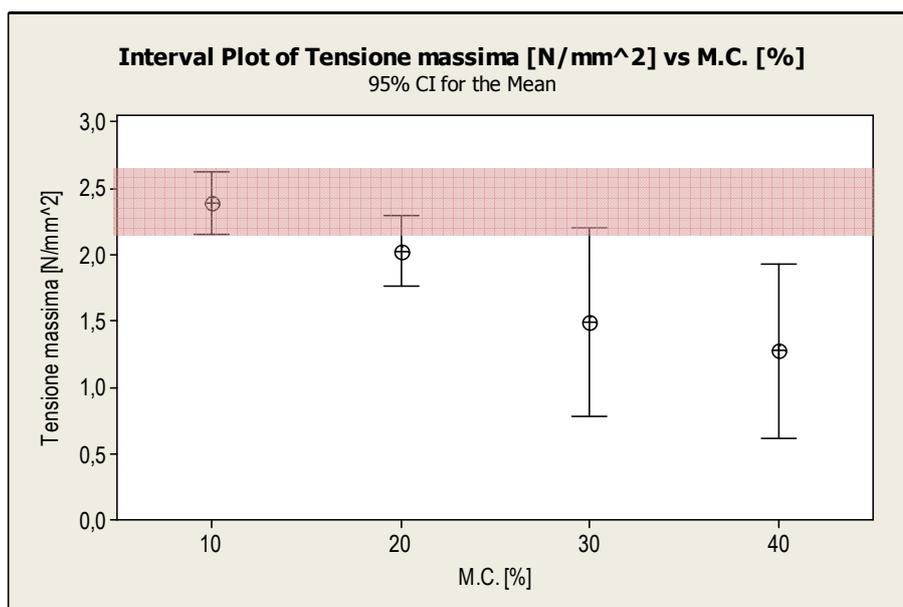
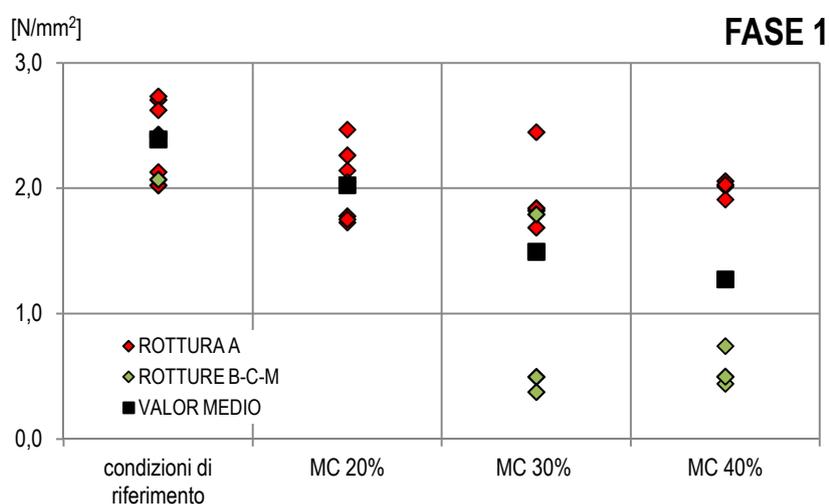


Figura 6.32: Grafici relativi a GFRP – fase 1.

Fase 2

Ciò che colpisce del grafico a dispersione relativo alla fase 2 è la presenza di un valore di tensione relativamente alto ($3,55 \text{ N/mm}^2$) rispetto a tutti gli altri, tanto più dissonante se si considera che è stato ottenuto in una prova in cui c'è stata rottura del composito (*figura 6.33*). Le prove in cui la presenza di un nodo ha chiaramente influito nel risultato sono state eliminate, probabilmente benché non evidente anche questa prova è stata falsata dalla vicinanza di difetto del legno. In ogni caso la compattezza di tutti gli altri risultati ha fatto sì che la media non risentisse di questo valore particolarmente diverso.

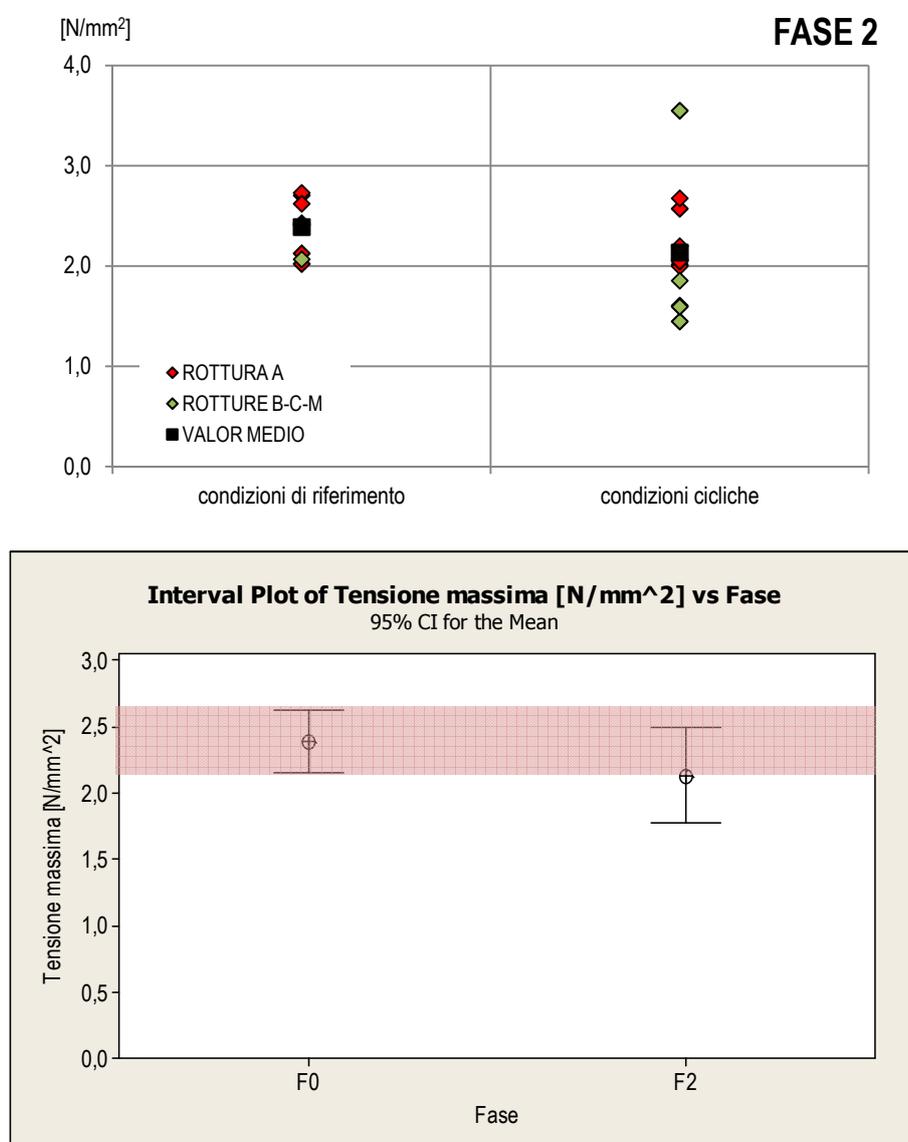


Figura 6.33: Grafici relativi a GFRP – fase 2.

Anche per questo composito non si manifesta una criticità legata al condizionamento effettuato.

Fase 3

Quanto già osservato per i campioni di CFRP sottoposti a riscaldamento torna valido anche per GFRP, infatti il valore che risulta più basso relativo alla condizione maggiormente aggressiva, non presenta una spiccata incidenza di rotture non di tipo A (figura 6.34). Non si evince quindi una particolare e marcata sensibilità alle alte temperature per la fibra di vetro.

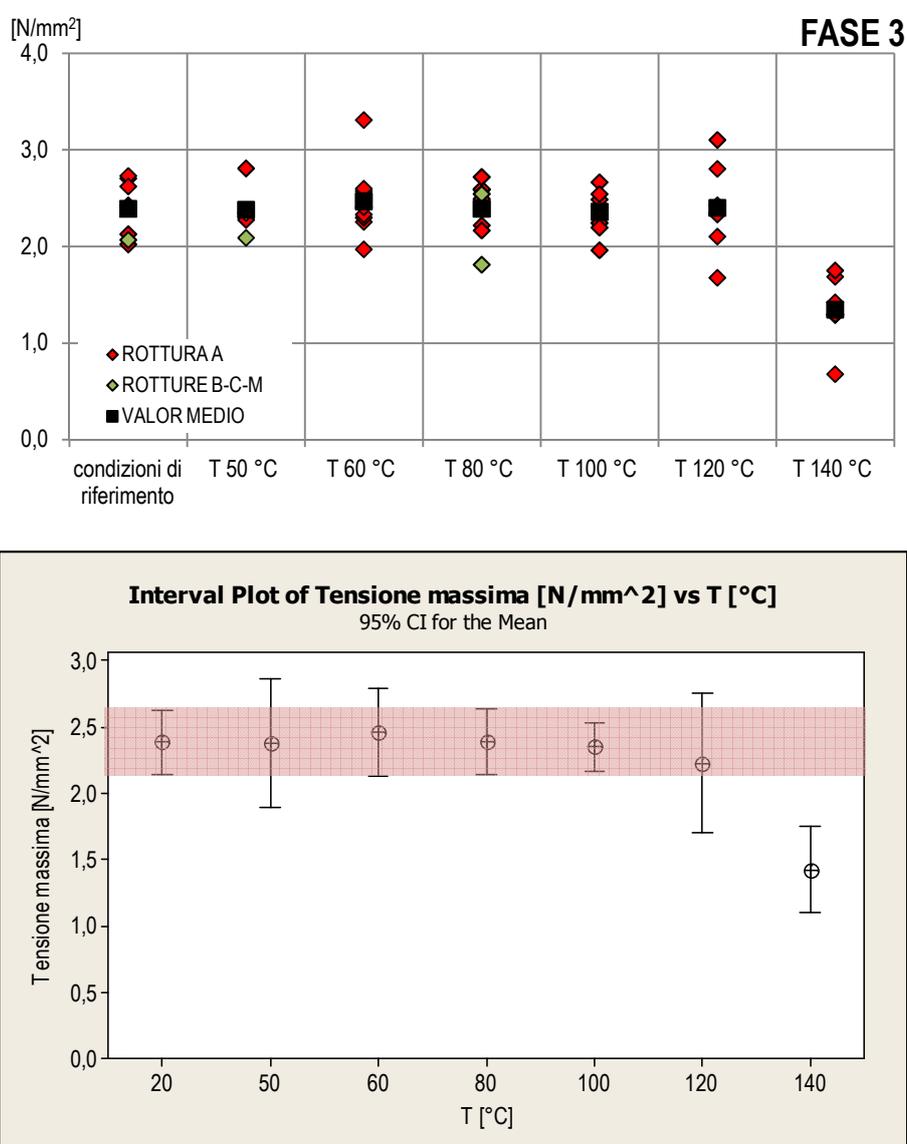


Figura 6.34: Grafici relativi a GFRP – fase 3.

Fase 4

La sola analisi del grafico di dispersione permette di determinare chiaramente come la prolungata permanenza in condizioni di elevata umidità costituisca una seria criticità per il composito di fibra di vetro. La maggioranza di rotture non coesive a cui sono associati valori di tensione spesso più bassi della media ed in alcuni casi inferiori a $0,50 \text{ N/mm}^2$ già di per sé spiegano il fenomeno di degrado che queste condizioni causano. Il grafico in *figura 6.35* sottolinea come $\text{MC} = 40\%$ in particolare modo sia aggressiva nei confronti di GFRP.

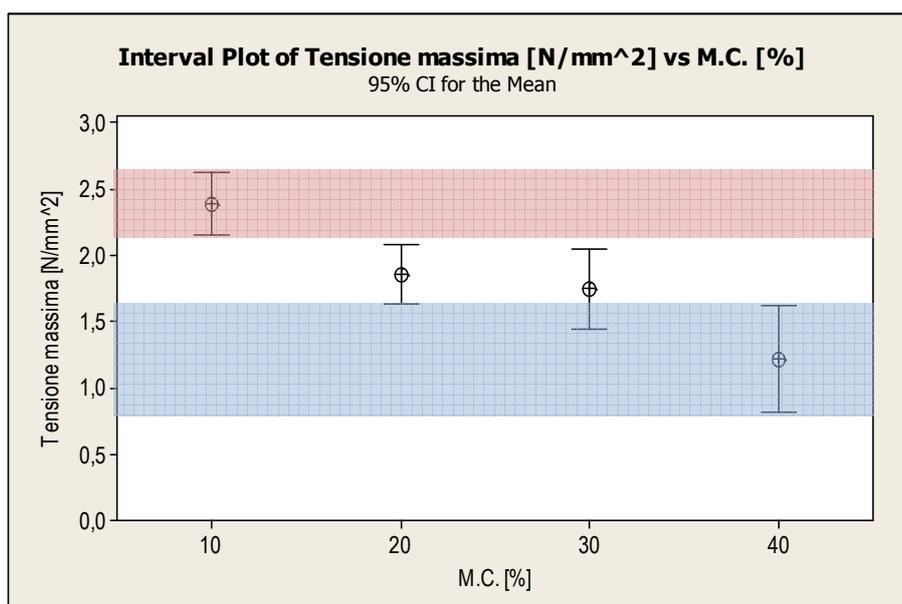
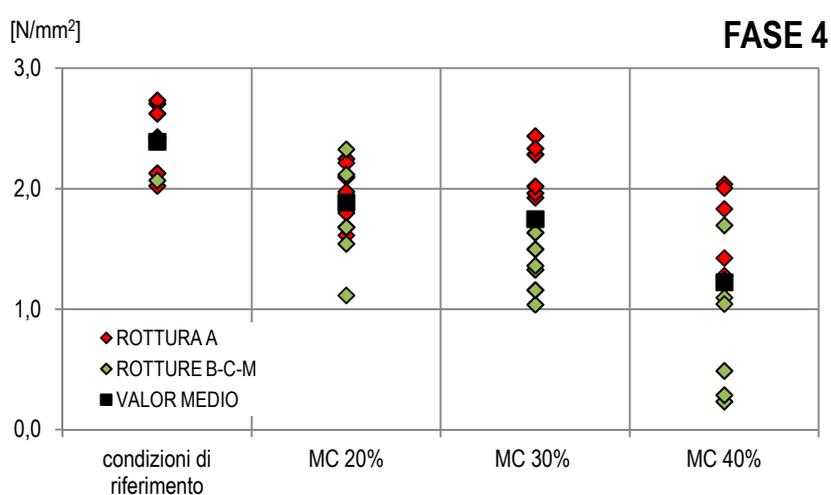


Figura 6.35: Grafici relativi a GFRP – fase 4.

FFRP(M) – Fibra di lino mercerizzato e resina epossidica

Il trattamento di mercerizzazione di 0,4 m² di fibra di lino sono stati utilizzati più di 200 litri d'acqua e circa 4 kg di soda caustica. È stato quindi considerato opportuno testare quanto già preparato, prima di proseguire nel pretrattamento di altra fibra e valutare se il rapporto benefici/costi risultasse vantaggioso da giustificare la mercerizzazione di altro materiale.

Essendo esiguo il numero di campioni che si sono potuti produrre con fibra di lino mercerizzata, si è optato di testarli solamente secondo alcuni parametri della fase 0, 3 e 5, in *tabella 6.8* sono riportati il numero di campioni per tipo di condizionamento ed in *tabella 6.9* i risultati ottenuti.

Tabella 6.8: Numero di campioni e test di pull-off effettuati per fase di condizionamento.

Fase di condizionamento	N° di campioni per fase	N° di test di pull-off per fase
Fase 0	2	8
Fase 3; T 80 °C	1	4
Fase 3; T 100 °C	1	4
Fase 3; T 120 °C	1	4
Fase 4; MC 20%	1	4
Fase 4; MC 30%	1	4
Fase 4; MC 40%	1	4

Tabella 6.9: Risultati delle prove di pull-off su campioni di FFRP(M).

	Fase 0		Fase 3			Fase 5	
	80°C		100°C	120°C	20%	30%	40%
	1,92	2,16	2,28	1,80	2,06	2,20	2,22
	2,40	2,51	2,18	1,73	2,69	2,03	2,21
	2,68	2,99	2,65	2,01	2,62	1,65	3,08
	2,32	2,26	2,35	2,20	2,78	2,19	2,86
	2,48						
	2,38						
	2,78						
<i>val. medio</i>	2,42	2,48	2,36	1,94	2,54	2,02	2,59
<i>dev.st.</i>	0,28	0,37	0,20	0,21	0,33	0,26	0,44
<i>co.var.</i>	11%	15%	9%	11%	13%	13%	17%

Le modalità di rottura ottenute in questo esiguo numero di campioni sono tutte di tipo A, ossia coesive nel legno ed una prova della fase 0 non è stata considerata valida per la presenza di un difetto.

Ciò può essere spiegato dall'azione pulente che la soda caustica attua nei confronti della fibra, migliorando così l'adesione tra quest'ultima e la matrice polimerica, oltre alle proprietà meccaniche, come resistenza e rigidità.

Dato il numero esiguo di campioni testati ed il conseguente numero ridotto di dati da analizzare, si è considerato opportuno non effettuare un'analisi statistica come è stato fatto per gli altri compositi. In *figura 6.36* è proposto un confronto tra i valori di tensione ottenuti in questa parte di sperimentazione e quelli relativi ad i test effettuati sui campioni con fibra di lino non trattata alle medesime condizioni.

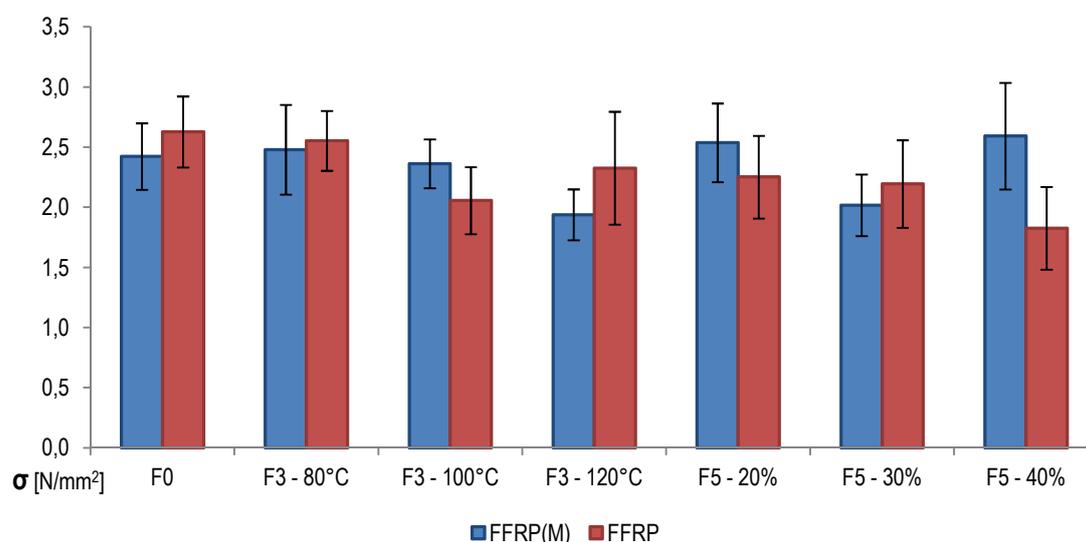


Figura 6.36: Confronto delle tensioni massime misurate per FFRP(M) ed FFRP.

Fase 3

Come si può osservare le tensioni di rottura medie, registrate per i campioni preparati con fibra di lino sottoposta a trattamento di mercerizzazione, assumono valori comparabili a quelli registrati per i campioni rinforzati con fibra di lino semplice.

Come già osservato per gli altri compositi, anche per la fibra di lino pre-trattata è riscontrabile un calo a livello di prestazioni con l'aumentare della temperatura. Il calo

percentuale per $T = 120\text{ °C}$ è prossimo al 20% rispetto ai valori di tensione misurati in condizioni standard (F0).

Fase 5

Come già affermato in precedenza per i campioni appartenenti alla fase 3, anche nel caso della fase 5 non si osservano rilevanti differenze nei valori assunti dalla tensione di rottura media, per quanto riguarda i diversi FRP utilizzati.

Ciò che si attesta invece è una lieve diminuzione delle tensioni medie scaturita dall'aumento del contenuto di umidità presente nel substrato ligneo. Il calo percentuale calcolato per $MC=30\%$ e $MC=40\%$, rispetto al valor medio di tensione per condizioni di umidità standard, oscilla fra il 13 e il 16%.

Considerati i risultati ottenuti da queste prove, in cui la differenza tra le tensioni di rottura rilevate per la fibra di lino semplice e la fibra di lino mercerizzata è lieve e valutata la cospicua necessità di acqua ed NaOH per la mercerizzazione, non sono stati prodotti altri campioni di questo tipo.

6.2 Shear test

Lo shear-test è una prova estremamente valida, sebbene non opportunamente normata, per valutare il fenomeno dell'aderenza, poiché la fabbricazione dei campioni è relativamente semplice e lo strumento di prova è una macchina a trazione; tuttavia la grande quantità di fattori in gioco possono portare ad una scorretta analisi del fenomeno di aderenza (Cognard et al., 2011). Il comportamento dei campioni sottoposti a sforzo di taglio non dipende esclusivamente dalle caratteristiche dei materiali studiati, ma anche da parametri geometrici, come la lunghezza della parte adesa, la lunghezza totale dei due aderendi e i loro spessori (Kafkalidis e Thouless, 2002) e dalla configurazione di prova (Guo et al., 2006).

I risultati delle prove di shear test effettuate nell'ambito della tesi sperimentale "Una tecnica di rinforzo innovativa per il miglioramento sismico di solai in legno con biocompositi" (Tiozzo Pezzoli, 2011) hanno evidenziato come la buona adesione del composito al supporto ligneo comporti il raggiungimento della tensione di crisi del composito (per lunghezze di aderenza L_{ad} di 200, 100 e 50 mm), prima della delaminazione dello stesso dal legno.

L'obiettivo principale è stato dunque determinare un range ristretto in cui ricade la lunghezza di aderenza che costituisce il confine tra la rottura del rinforzo e la delaminazione della striscia di FRP. Una volta selezionata una lunghezza che soddisfacesse il requisito sono stati prodotti dei campioni in seguito condizionati, per determinare gli effetti dei condizionamenti sull'aderenza.

La sperimentazione mediante shear test è stata dunque divisa in due parti con scopi diversi: (i) determinazione un intervallo di lunghezze di adesione L_{ad} al limite tra delaminazione e rottura del composito e (ii) l'indagine degli effetti dei condizionamenti sulla resistenza a taglio dei compositi. Nella prima parte della prova sono state testate le diverse lunghezze L_{ad} , proposte in tabella 6.10.

Tabella 6.10: Numero di test di pull-off per classe di composito e lunghezza di aderenza.

Composito	L_{ad}	N° di campioni
FFRP	15 mm	3
	30 mm	3
	50 mm	3
FFRP(V)	30 mm	3
	40 mm	3
	50 mm	3

Tabella 6.11: Numero di test di pull-off per classe di composito e fase di condizionamento.

Fase	Composito	N° di campioni
Fase 0 *	FFRP	3
	FFRP(V)	3
Fase 1 – 40%	FFRP	3
	FFRP(V)	3
Fase 2	FFRP	3
	FFRP(V)	3
Fase 3 – 100 °C	FFRP	3
	FFRP(V)	3
Fase 3 – 140 °C	FFRP	3
	FFRP(V)	3
Fase 4 – 40%	FFRP	3
	FFRP(V)	3

* Sono i campioni della prima parte di sperimentazione

È stata selezionata una lunghezza comune ($L_{ad} = 30$ mm) che permettesse un'agevole comparazione dei dati ottenuti per il composito con resina epossidica e quello con colla vinilica e sono stati condizionati alcuni campioni secondo i parametri riportati in *tabella 6.11*.

6.2.1 Preparazione dei campioni e metodologia di prova

I campioni per la prova hanno la geometria mostrata in *figura 6.37* e dimensioni di 11,5x7x10 cm.

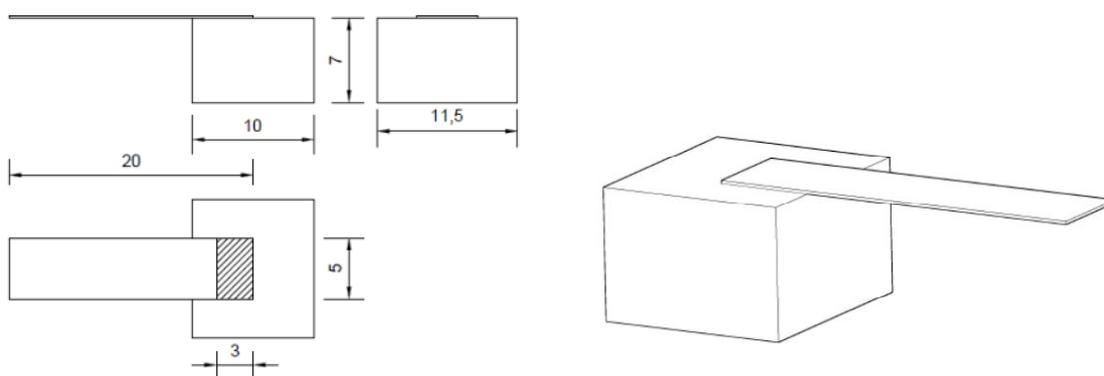


Figura 6.37: Geometria dei campioni per gli shear test.

La strumentazione per la prova di shear test è composta da (*figura 6.38*):

- (i) macchina di prova universale Galdabini Sun 60 con cella di carico da 100 kN;
- (ii) software per la gestione della macchina di prova;
- (iii) sistema di acquisizione dati multicanale (MGC plus);
- (iv) software CATMAN per la gestione del sistema di acquisizione dati;
- (v) potenziometri.

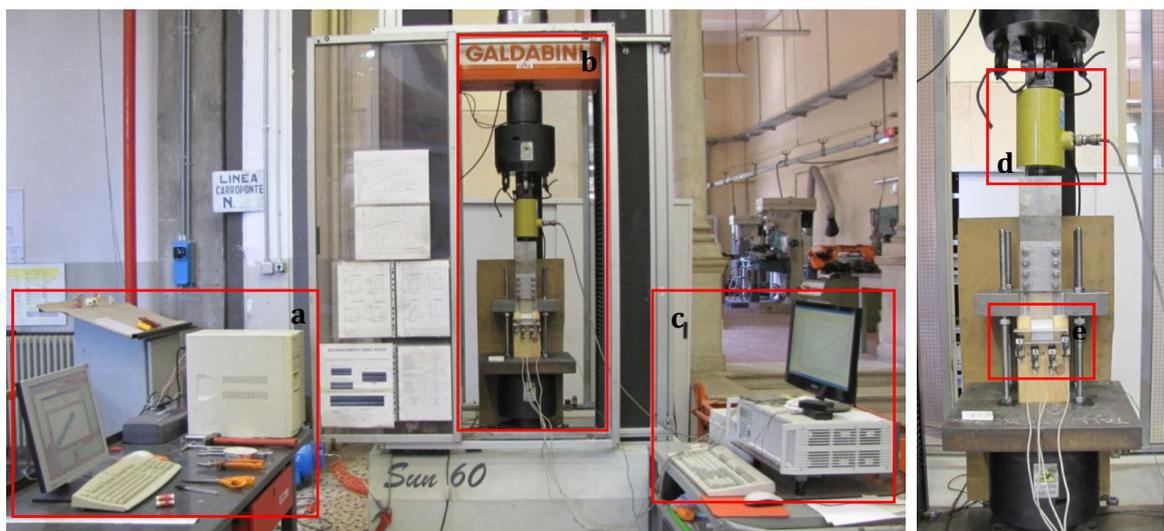


Figura 6.38: (a) computer con il software per la gestione della macchina di prova; (b) macchina di prova universale Galdabini; (c) sistema di acquisizione multicanale con pc associato; (d) cella di carico; (e) potenziometri.

La preparazione dei provini per la prova è costituita da diversi passaggi che prevedono (i) l'incollaggio degli strumenti di misura, (ii) il posizionamento del campione in macchina, con particolare riguardo affinché sia tutto in asse per evitare zone di debolezza ed infine (iii) l'afferraggio del tratto libero di striscia di composito, assicurato con due placche imbullonate ed ulteriormente garantita mediante l'uso di un collante bicomponente a presa rapida (figura 6.39).

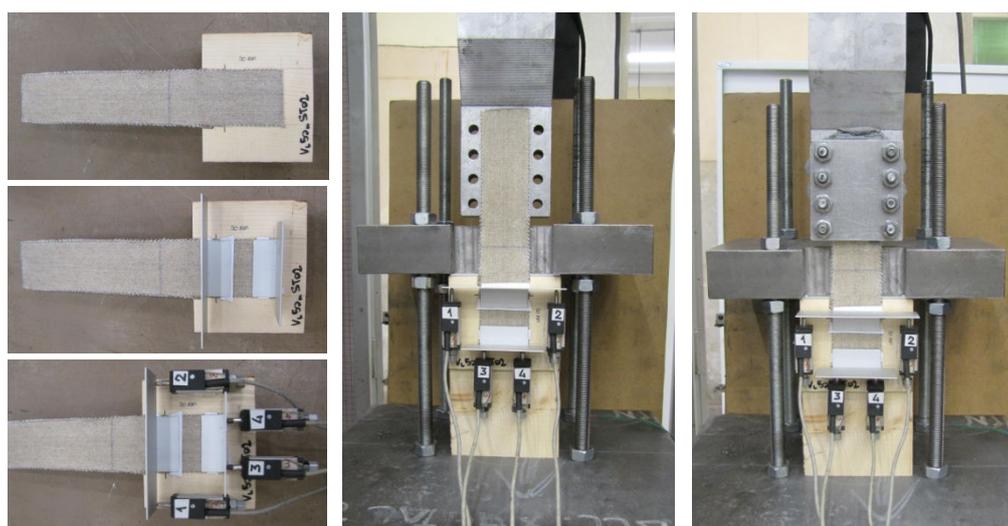


Figura 6.39: Preparazione dei campioni per la prova.

6.2.2 Risultati – Determinazione della lunghezza limite di adesione

Inizialmente sono state preparate due serie di campioni per tipo di composito con $L_{ad} = 30$ e 50 mm e testate, i risultati ottenuti sono proposti in *tabella 6.12* e *6.13*.

Tabella 6.12: Valori ottenuti nelle prove di shear test su FFRP.

CAMPIONE	L_{ad} [mm]	P_{max} [N]	$\epsilon_{P_{max}}$ [mm]	ROTTURA
EP _L 30(F0)01	30	7798,65	0,45317	rottura composito
EP _L 30(F0)02	30	6722,24	0,15678	rottura composito
EP _L 30(F0)03	30	2945,00	0,22806	delaminazione
EP _L 50(F0)01	50	7526,82	0,46748	rottura composito
EP _L 50(F0)02	50	5349,17	0,32742	delaminazione
EP _L 50(F0)03	50	3404,48	0,23136	delaminazione

I campioni rinforzati con il composito FFRP mostrano un'incidenza pari di rotture del composito (3) e delaminazioni (3). I risultati ottenuti sono contrastanti. Si considerino due elementi, ossia (i) i campioni con lunghezza di adesione pari a 50 mm nello studio già citato hanno tutti manifestato rottura del composito ed (ii) i carichi massimi raggiunti in presenza di delaminazione sono molto bassi e certamente non confrontabili con gli altri. Alla luce di ciò è lecito pensare che nessuna delle lunghezze testate sia effettivamente quella limite, ma che il manifestarsi della delaminazione sia stata causata da uno scorretto incollaggio del composito e/o da problematiche superficiali del supporto in legno.

Tabella 6.13: Valori ottenuti nelle prove di shear test su FFRP(V).

CAMPIONE	L_{ad} [mm]	P_{max} [N]	$\epsilon_{P_{max}}$ [mm]	ROTTURA
V _L 30(F0)01	30	2517,71	0,88257	delaminazione
V _L 30(F0)02	30	3647,76	1,03404	delaminazione
V _L 30(F0)03	30	4431,35	0,83449	rottura composito
V _L 50(F0)01	50	3900,05	0,84818	rottura composito
V _L 50(F0)02	50	4258,75	0,94112	rottura composito
V _L 50(F0)03	50	4374,69	1,46923	rottura composito

Nel caso di FFRP(V) appare evidente che $L_{ad} = 50$ mm sia ancora una misura tale per cui la rottura del composito viene raggiunta prima della delaminazione, cosa che invece non avviene in due prove su tre nel caso di $L_{ad} = 30$ mm.

Alla luce delle considerazioni fatte per entrambi i compositi è stata programmata una nuova serie di prove con lunghezze di adesione diverse. Nel caso di FFRP è stata scelta una $L_{ad} = 15$ mm per determinare se la lunghezza limite sia compresa nell'intervallo 15-30 mm o inferiore, per FFRP(V) è stata scelta una lunghezza intermedia tra quelle testate ($L_{ad} = 40$ mm), per ridurre ulteriormente l'intervallo in cui presumibilmente si trova la lunghezza limite. i risultati ottenuti sono in *tabella 6.14*.

Tabella 6.14: Valori ottenuti nella nuova serie di prove di shear test.

CAMPIONE	L_{ad} [mm]	P_{max} [N]	ϵ_{Pmax} [mm]	ROTTURA
EP _L 15(F0)01	15	6627,19	0,27020	delaminazione
EP _L 15(F0)02	15	4724,22	0,25992	delaminazione
EP _L 15(F0)03	15	7156,61	0,59406	delaminazione
V _L 40(F0)01	40	3925,36	2,77423	delaminazione
V _L 40(F0)02	40	3386,35	1,55650	rottura composito
V _L 40(F0)03	40	2738,75	1,74463	delaminazione

Per i campioni di FFRP si è raggiunta una lunghezza $L_{ad} = 15$ mm in cui la resistenza a trazione del composito supera la resistenza adesiva FRP-legno, quindi l'intervallo di confine è 15-30 mm.

Nel caso di FFRP(V) $L_{ad} = 40$ mm al pari di $L_{ad} = 30$ mm rappresenta una lunghezza limite in cui possiamo avere sia delaminazione che rottura del composito e la manifestazione di un esito piuttosto dell'altro è determinato da caratteristiche proprie del supporto ligneo.

Per la seconda parte della sperimentazione è stata quindi scelta una lunghezza di adesione comune per entrambi i compositi pari a 30 mm, misura di compromesso tra i due intervalli individuati.

6.2.3 Osservazioni – Determinazione della lunghezza limite di adesione

La prima osservazione che appare opportuno fare riguarda la distribuzione del punto di frattura del composito. Nella maggior parte dei casi non avviene al centro del tratto libero di striscia, bensì alla fine della zona adesa. Si tratta presumibilmente di un punto di discontinuità dove si concentrano gli sforzi di trazione. In alcuni casi è accaduto che il punto di rottura fosse in prossimità dell'afferraggio, dove probabilmente il fissaggio troppo stretto delle placche ha creato un'area di debolezza (*figura 6.40*)

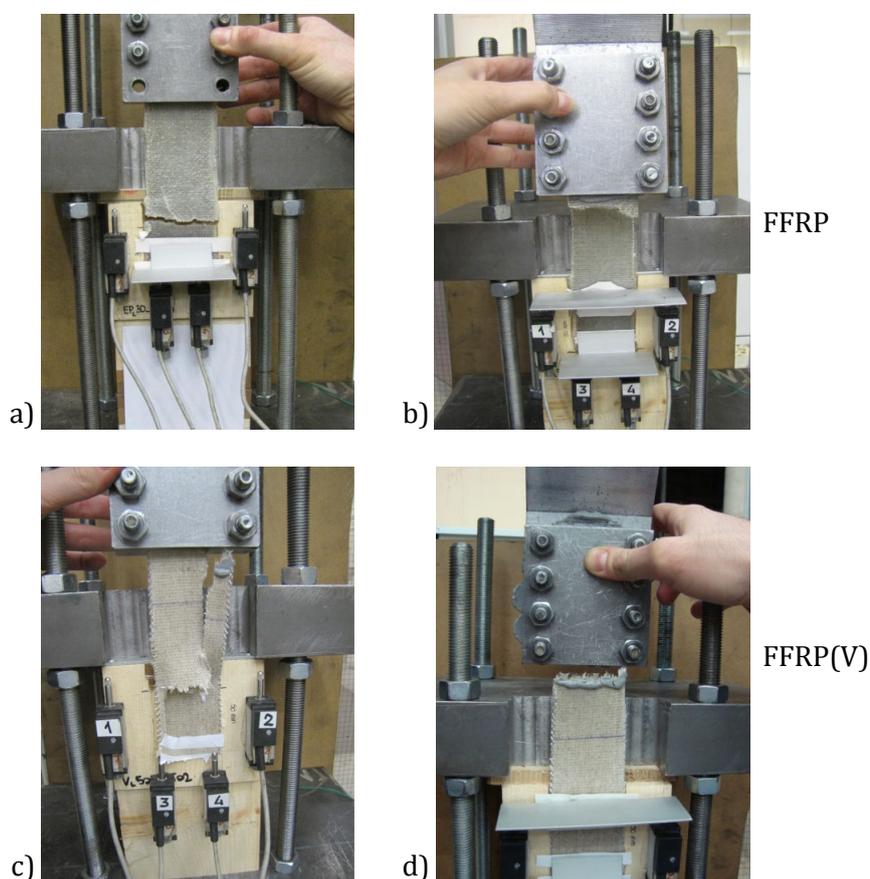


Figura 6.40: (a, c) rottura al limite della zona adesa, (b, d) rottura vicino all'afferraggio.

Le prove di caratterizzazione dei materiali hanno evidenziato le macroscopiche differenze nelle proprietà delle due matrici, difformità che ritroviamo nei compositi con esse prodotti. Questo tipo di prova, per le sue peculiarità, risente e mette in luce le differenze già riscontrate.

L'andamento della prova sottolinea tali difformità, infatti nel caso di FFRP abbiamo per lo più una crisi istantanea, sia che il composito si rompa, sia che si stacchi dal legno; per FFRP(V) invece in entrambi i casi abbiamo la lenta propagazione degli sforzi, accompagnata dall'allungamento della fibra che torna poi alla lunghezza iniziale (figure 6.41, 6.42, 6.43 e 6.44).

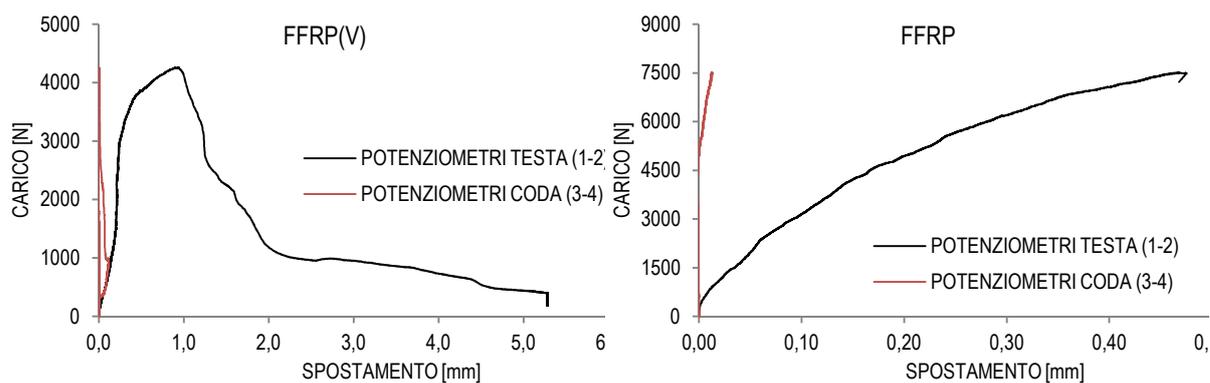


Figura 6.41: Grafici carico-spostamento, rottura del composito.

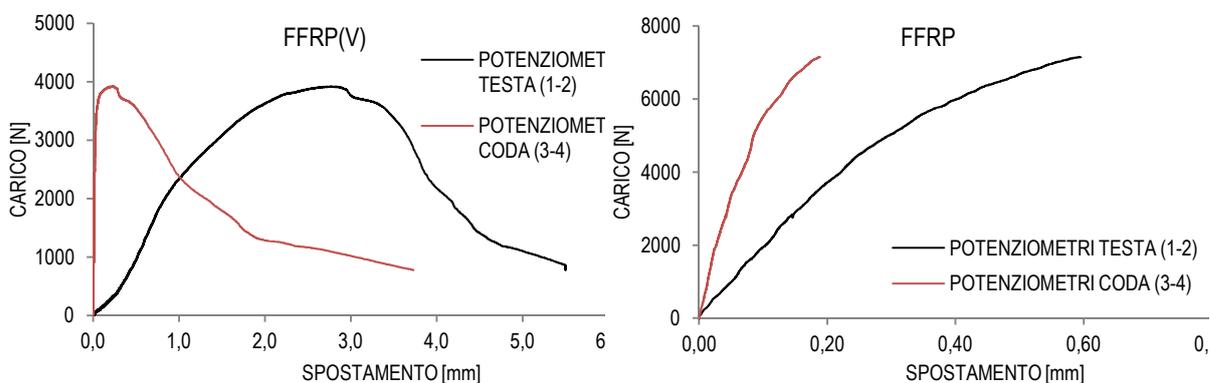


Figura 6.42: Grafici carico-spostamento, delaminazione.



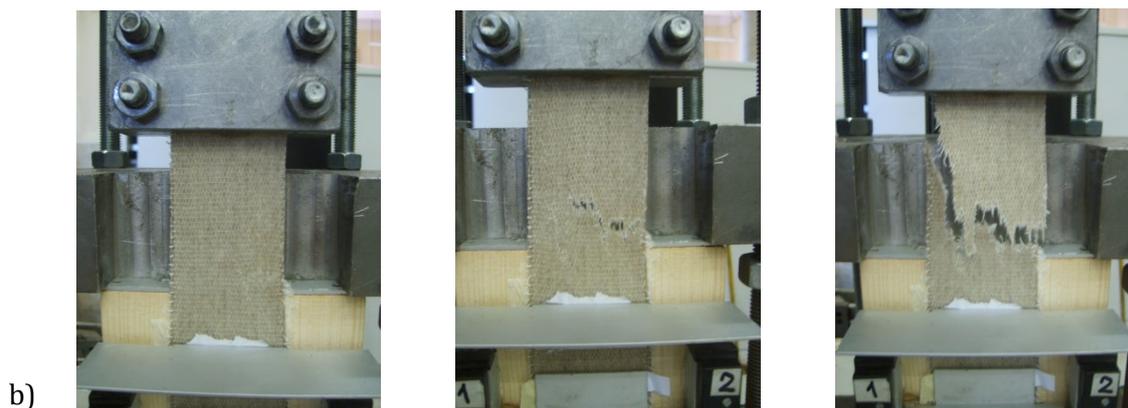


Figura 6.43 Modalità di delaminazione (a) e rottura del composito (b) per FFRP(V).

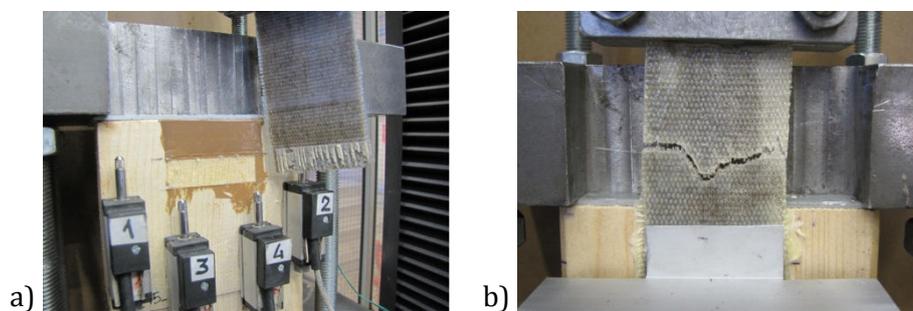


Figura 6.44: Modalità di delaminazione (a) e rottura del composito (b) per FFRP.

6.2.4 Risultati - Influenza dei condizionamenti

Selezionata una lunghezza di adesione $L_{ad} = 30$ mm, i campioni sono stati condizionati secondo le modalità riportate nel §4.5, al fine di comprendere se le condizioni aggressive prescelte maggiormente le prestazioni meccaniche del materiale composito o l'aderenza di questo al substrato.

In figura 6.45 e 6.47, i grafici mostrano i risultati ottenuti in termini di carico massimo P_{max} e tipologia di risposta alle sollecitazioni.

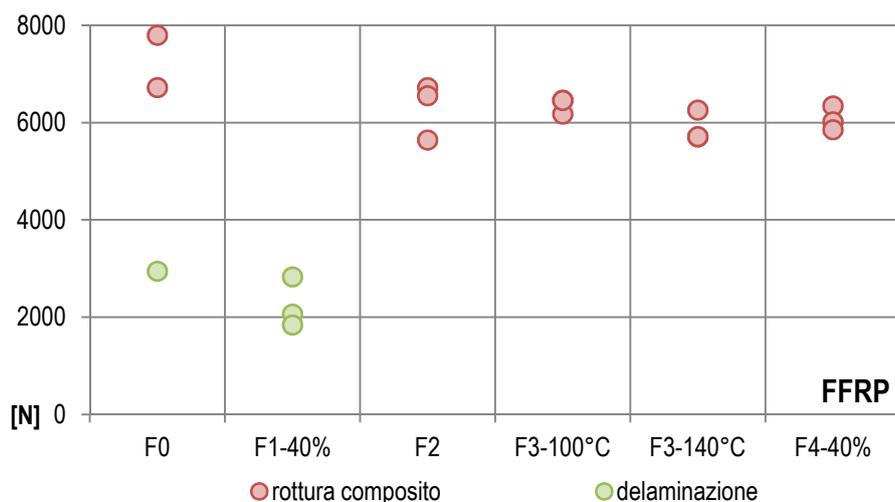


Figura 6.45: Risultati delle prove di shear test - FFRP.

La maggior parte dei test su FFRP ha provocato la rottura del composito, la delaminazione è intervenuta solo in 4 casi, per quanto riguarda quella della fase 0 è già stato specificato come probabilmente sia stata causata da un errore di applicazione del composito.

Gli altri 3 casi sono tutti relativi alle condizioni F1-40% ed i carichi ad essi associati sono sensibilmente più bassi rispetto a quelli misurati per i provini in condizioni di riferimento (F0) e non. Le condizioni iniziali del legno hanno dimostrato di essere critiche per una corretta adesione del composito anche nei test di pull-off. In questa prova, la problematicità di un substrato con un elevato contenuto di umidità è resa particolarmente evidente dalla possibilità di osservare l'interfaccia. I provini condizionati mostrano uno strato di reazione bianco (figura 6.46), il quale dimostra che la resina epossidica non reagisce in modo soddisfacente in presenza di umidità superficiale e ciò comporta una mancata adesione del composito al legno.

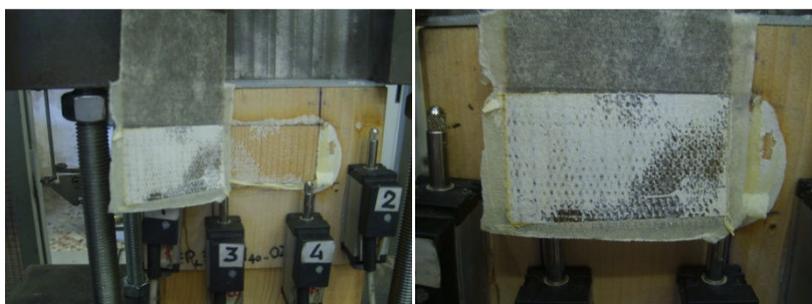


Figura 6.46: Strato di reazione nei campioni FFRP condizionati a F1-40%.

I campioni condizionati secondo le altre fasi non dimostrano di aver subito un danno all'interfaccia tale da causare la delaminazione, ma i carichi massimi risultano generalmente un po' più bassi rispetto alle condizioni di riferimento, segnale che il composito nel tratto libero ha subito le conseguenze del condizionamento.

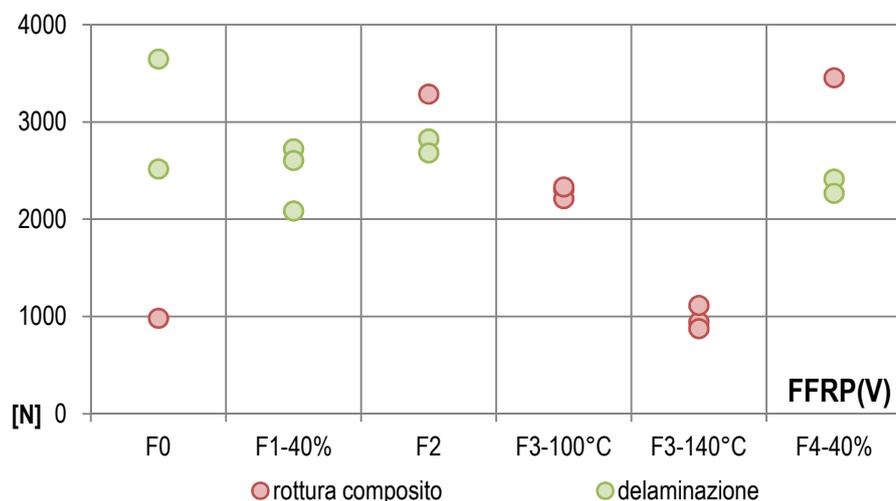


Figura 6.47: Risultati delle prove di shear test – FFRP(V).

Per quanto concerne i provini con FFRP(V), gli esiti della prova hanno un'incidenza pressoché uguale ed i carichi massimi misurati non risultano strettamente connessi ad un comportamento piuttosto che l'altro. A conferma di quanto già dimostrato sia con le prove di caratterizzazione dei materiali, sia con i test di pull-off, le alte temperature costituiscono una grave criticità per il materiale composito con colla vinilica. Nelle prove effettuate sui provini riscaldati a $T = 140\text{ °C}$ si è manifestata sempre la rottura del composito ed i carichi massimi associati risultano essere estremamente bassi, ad indicare una grave compromissione delle prestazioni del materiale composito.

6.2.5 Osservazioni – Influenza dei condizionamenti

Le prove di shear test mettono in luce come il materiale composito applicato al legno abbia le stesse caratteristiche e manifesti le stesse criticità del materiale testato da solo. Si può quindi osservare dai grafici in figura 6.48, che nella maggior parte dei casi i carichi di rottura ottenuti in questa prova siano coerenti con quelli ottenuti nella prova di trazione assiale (cfr. §5.3)

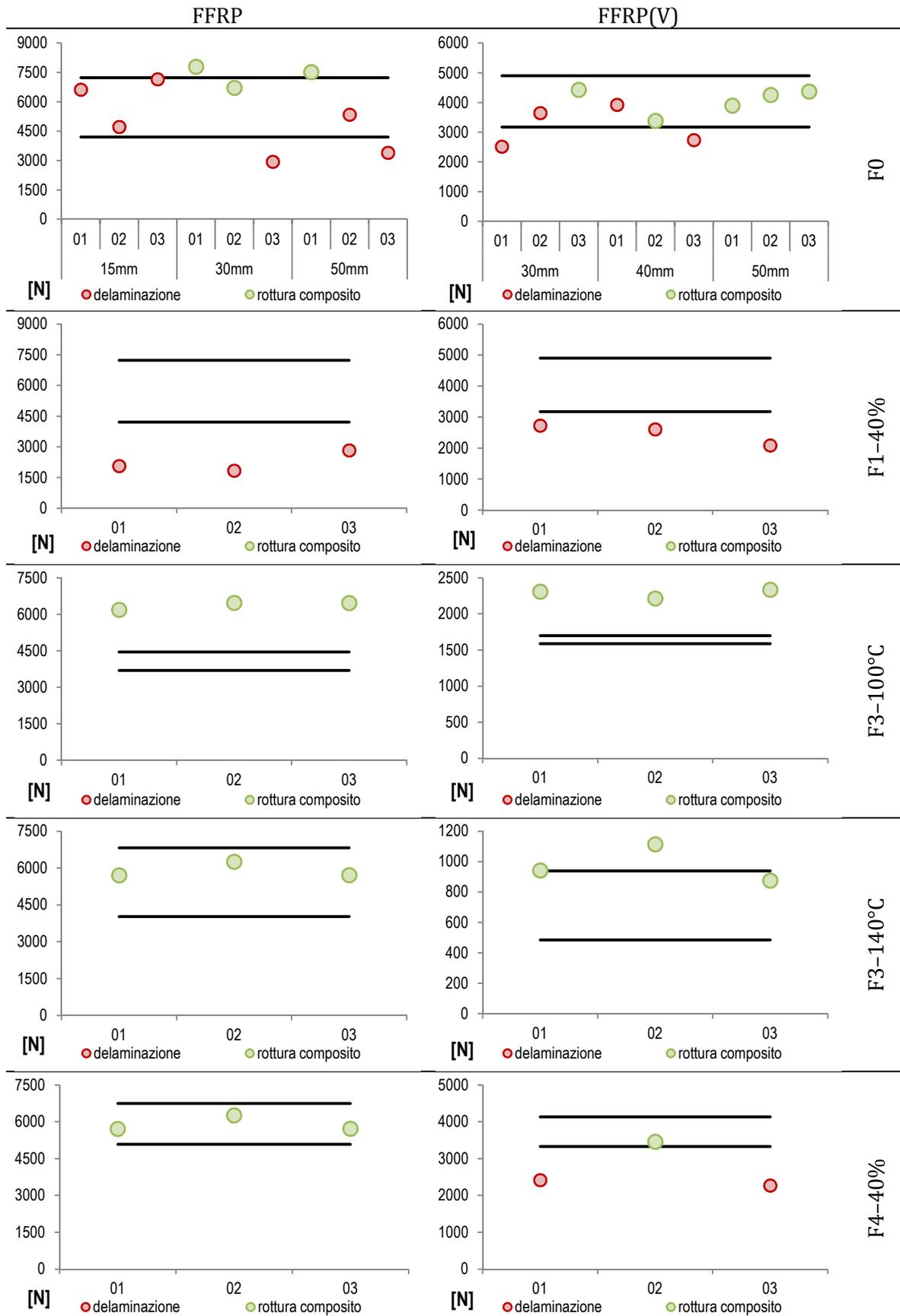


Figura 6.48: Confronto tra P_{max} degli shear test e delle trazioni assiali.

I carichi di rottura dei campioni condizionati secondo la fase 1, MC 40% sono stati confrontati con i carichi di trazione dei campioni di riferimento poiché il condizionamento non va ad agire sul composito ma sull'adesione di quest'ultimo con il legno. La fase 2 non è stata considerata nelle prove di trazione assiale, quindi non è stata fatta la comparazione.

L'unica evidente incongruenza che si evince dai grafici è la differenza di carico per la fase 3 – 100 °C.

Prove di flessione su travi rinforzate

In questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti dalle prove a flessione effettuate sia su travi non rinforzate, sia su travi rinforzate con FFRP, FFRP(V) e CFRP, applicati in vari spessori.

7.1 Introduzione

Le prove a flessione su travi rinforzate in scala semi-reale hanno l'obiettivo di determinare l'incremento di resistenza apportato dall'applicazione del sistema di rinforzo in materiale composito. La prova consiste nel caricare simmetricamente un provino che poggia su due punti, anch'essi simmetricamente disposti. Selezionata tale configurazione di flessione su 4 punti, è stata progettata nel dettaglio secondo quanto proposto dalla norma UNI EN 407 (2010), il cui obiettivo è la determinazione delle proprietà del legno massiccio per strutture, non è quindi specifica per la definizione delle caratteristiche degli elementi rinforzati.

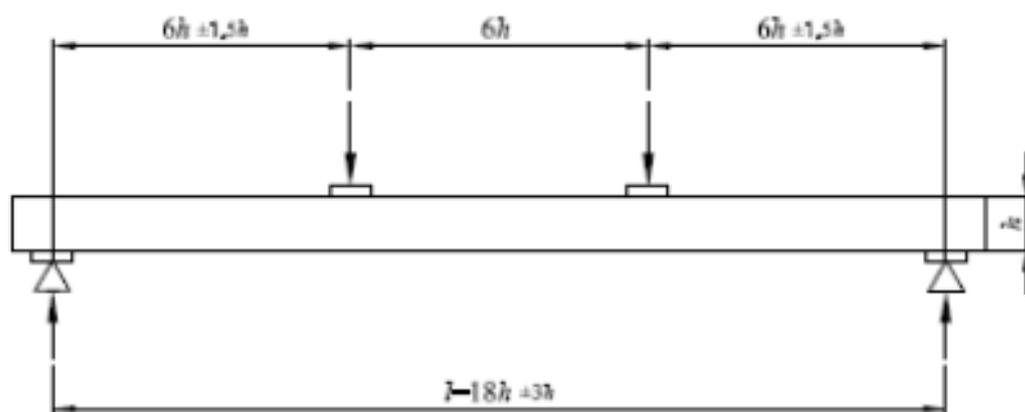


Figura 7.1: Configurazione di prova (UNI EN 407).

Sono state testate due travi non rinforzate di controllo ed altre dieci rinforzate, due per tipo di composito applicato (FFRP, FFRP(V) e CFRP), le cui caratteristiche e dimensioni sono riportate in *tabella 7.1*.

Tabella 7.1: Caratteristiche delle travi sottoposte a flessione.

ID	Composito	N° strati di fibra	Peso [kg]	M.C. [%]	Lunghezza [mm]
TRAVE_NR_01	nessun composito	-	17,5	9,7	2119
TRAVE_NR_02			17,2	14,3	2420
TRAVE_EP _L (3S)_01	FFRP	3	17,3	11,2	2417
TRAVE_EP _L (3S)_02			17,1	11,3	2417
TRAVE_EP _L (5S)_01	FFRP	5	17,0	11,4	2420
TRAVE_EP _L (5S)_02			16,6	11,3	2417
TRAVE_V _L (3S)_01	FFRP(V)	3	17,3	12,0	2421
TRAVE_V _L (3S)_02			17,6	11,5	2420
TRAVE_V _L (5S)_01	FFRP(V)	5	17,0	10,6	2421
TRAVE_V _L (5S)_02			17,4	12,1	2421
TRAVE_EP _C _01	CFRP	1	17,6	11,9	2120
TRAVE_EP _C _02			14,0	11,7	2115

7.2 Set up di prova

7.2.1 Preparazione dei provini

La configurazione specifica dei provini è stata decisa sulla base delle indicazioni della norma e sulle caratteristiche delle travi a disposizione (*figura 7.2*).

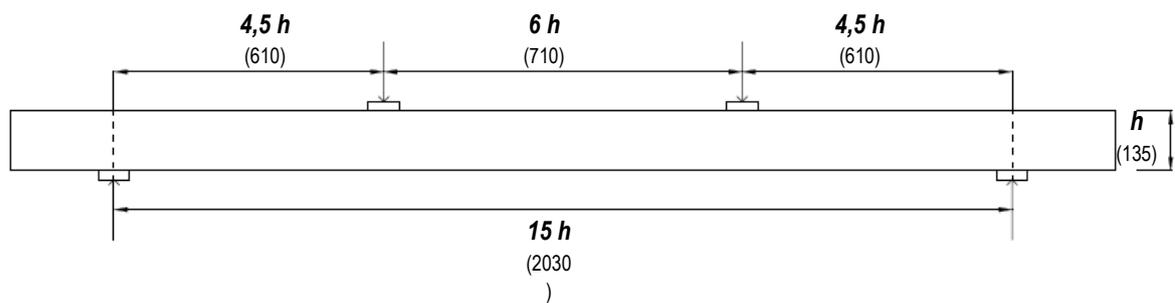


Figura 7.2: Configurazione del provino (misure in mm).

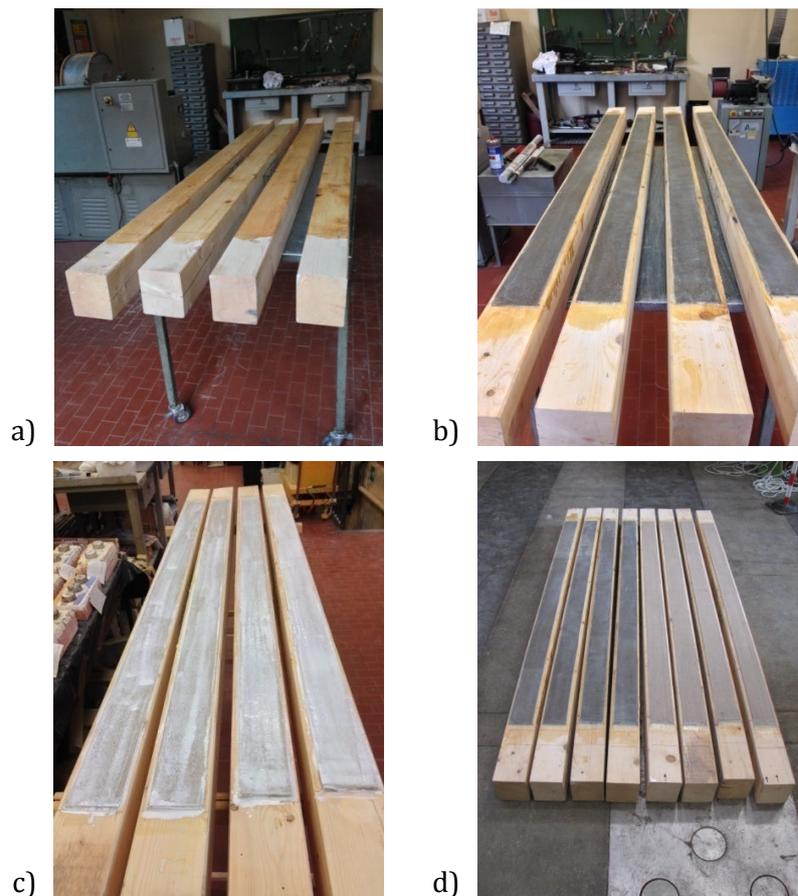


Figura 7.3: (a, b) preparazione travi rinforzate con FFRP, (c) preparazione travi con FFRP(V), (d) travi pronte per essere testate.

Il composito applicato ha lunghezza pari a 1900 mm ed è stato incollato secondo le modalità presentate in §4.3 (*figura 7.3*).

Nei campioni con composito naturale le estremità del rinforzo sono state rastremate con resina epossidica. Tale accortezza è stata adottata per migliorare la distribuzione delle tensioni in gioco ed evitare problematiche dipendenti dalla marcata discontinuità dei bordi, causate dallo spessore del composito (variabile tra 3 e 5 mm a seconda del materiale e del numero di fibre). Anche nei campioni rinforzati con FFRP(V) è stato utilizzato il collante epossidico, poiché la colla vinilica per la sua fluidità non avrebbe permesso di ottenere il medesimo risultato e l'asciugatura completa di uno spessore così consistente avrebbe richiesto un tempo molto lungo (*figura 7.4*).



Figura 7.4: Rastrematura con resina epossidica alle estremità del rinforzo con composito naturale.

Le variabili che si è scelto di analizzare sono (i) il carico, (ii) l'inflessione della trave e (iii) la deformazione del composito in zona tesa. Per la loro misurazione è stata quindi scelta la strumentazione specifica, ossia una cella di carico, dei misuratori di spostamento ed un estensimetro (*figura 7.5*). I misuratori di spostamento sono trasduttori induttivi (LVDT) ed il punto di contatto per la misura è stato ottenuto mediante staffe ad L, incollate sul lato della trave di cui sono estensione. Per una maggiore precisione dei dati, i trasduttori sono stati posizionati su entrambi i lati, specularmente e simmetricamente, cosicché il valore medio calcolato per ogni coppia di strumenti non risenta di possibili torsioni della trave in fase di carico.

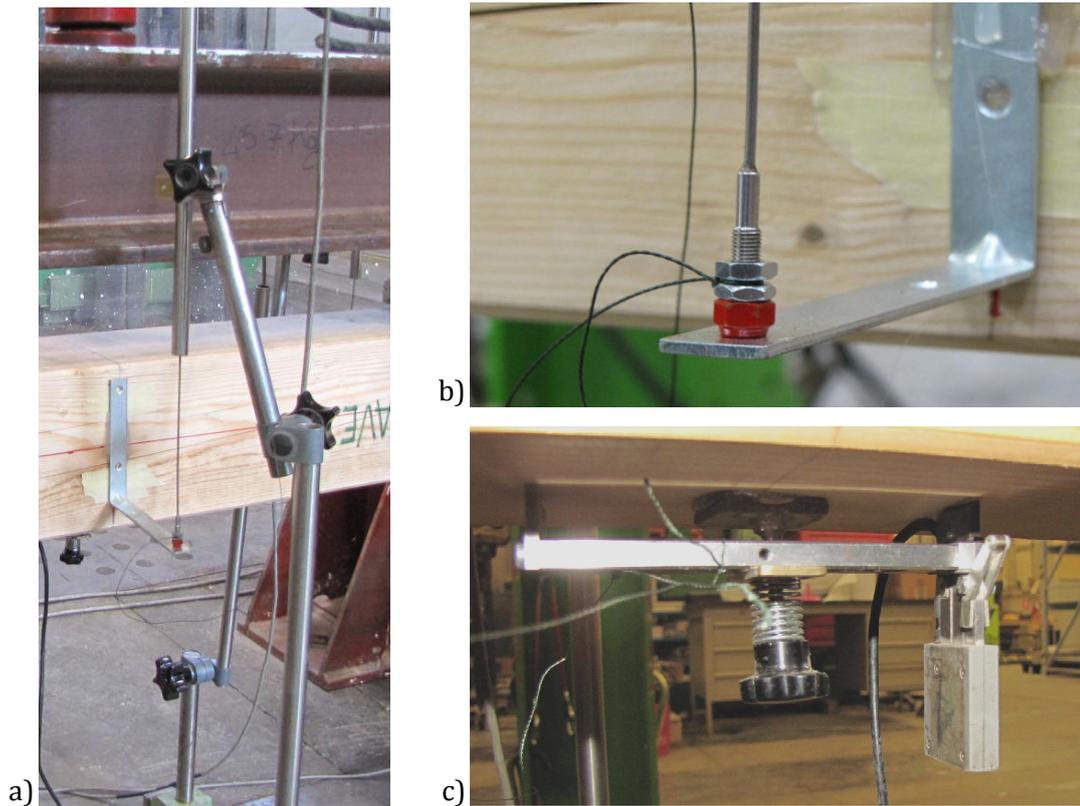


Figura 7.5: (a) LVDT, (b) dettaglio del punto di contatto tra staffa e strumento, (c) estensimetro DD1.

L'estensimetro DD1 è stato incollato dal lato del composito in corrispondenza della metà della lunghezza della trave, ossia dove si suppone verificarsi la maggiore estensione. I sette LVDT per lato sono stati posizionati in corrispondenza dei due punti di appoggio laterali, dei due punti di carico e tra di essi due di controllo ed infine uno nella mezzeria. La loro posizione e le distanze reciproche sono riportate in *figura 7.6*, in cui le distanze sono espresse in mm.

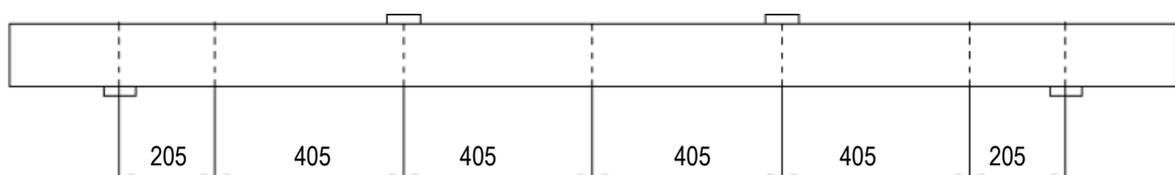


Figura 7.6: Posizione e distanza reciproca degli LVDT.

La denominazione degli strumenti di prova è proposta in (*figura 7.7*) e le loro caratteristiche sono riportate in *tabella 7.2*.

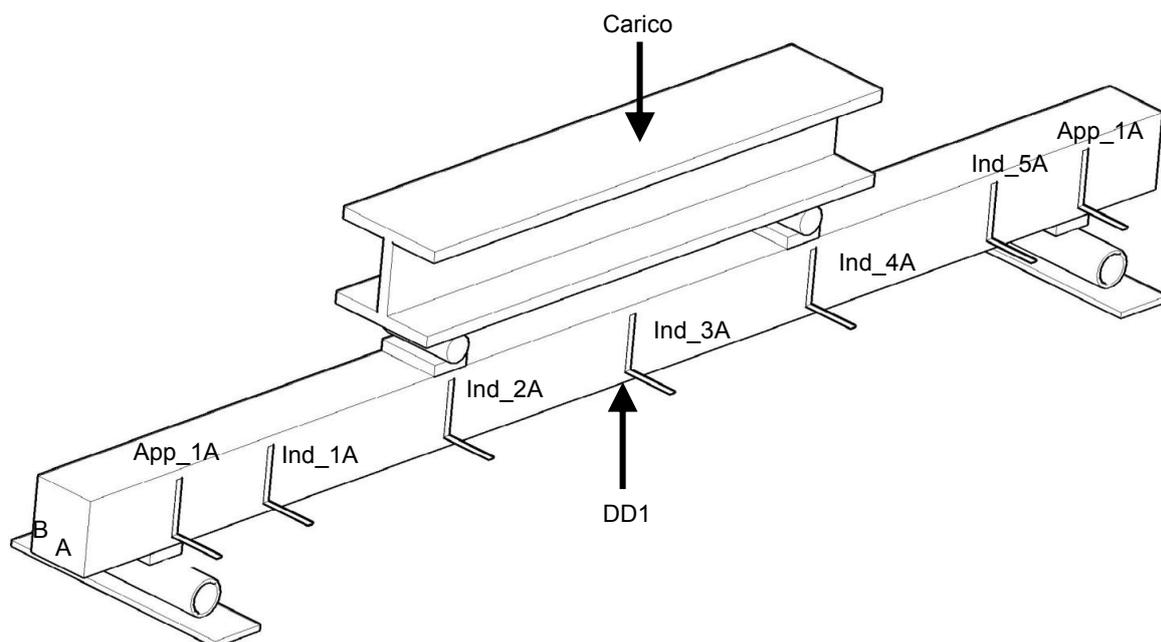


Figura 7.7: Denominazione degli strumenti di misura.

Tabella 7.2: Caratteristiche degli strumenti.

ID	Tipo	Canale	Campo di misura
Carico	Cella	0	+/- 10000 N
App_1A	W20	1	+/- 20 mm
App_1B	W20	2	+/- 20 mm
App_2A	W20	3	+/- 20 mm
App_2B	W20	4	+/- 20 mm
Ind_1A	W50	5	+/- 50 mm
Ind_1B	W50	6	+/- 50 mm
Ind_2A	W100	7	+/- 100 mm
Ind_2B	W100	10	+/- 100 mm
Ind_3A	W100	11	+/- 100 mm
Ind_3B	W100	12	+/- 100 mm
Ind_4A	W100	13	+/- 100 mm
Ind_4B	W100	14	+/- 100 mm
Ind_5A	W50	15	+/- 50 mm
Ind_5B	W50	16	+/- 50 mm
DD1	Base 100 mm	17	+/- 2,5 mm

Gli strumenti di prova indicati con la lettera B, sono disposti specularmente rispetto a quelli indicati con la lettere A ed hanno le medesime caratteristiche.

Il provino è posizionato su appoggi cilindrici (*figura 7.8*), i quali servono a concentrare su una linea il contatto tra la trave ed i supporti e a consentire la libera rotazione delle sezioni ad essi relative, approssimando pertanto nella realtà lo schema di calcolo di trave semplicemente appoggiata. Sono inoltre stati introdotti specifici accorgimenti per ridurre il più possibile attriti parassiti che possano inficiare la corrispondenza con lo schema di calcolo e per distribuire opportunamente le forze sulle superfici della trave evitando cedimenti prematuri dovuti a schiacciamento localizzato. Le accortezze adottate sono l'applicazione di un prodotto lubrificante nelle zone di contatto e l'utilizzo di piastre di acciaio collegate al supporto ligneo.



Figura 7.8: Appoggi cilindrici.

A causa della naturale torsione delle travi è stato necessario posizionare degli spessori in legno, affinché le piastre di acciaio a contatto con il legno e gli appoggi fossero orizzontali ed in bolla e garantissero un soddisfacente contatto tra le parti (*figura 7.9*).



Figura 7.9: Spessori in legno per garantire il perfetto contatto tra le parti.

7.2.2 Posizionamento dei provini

La preparazione delle singole travi per la prova ha richiesto quindi molteplici passaggi (figura 7.10). In primo luogo si è provveduto al fissaggio delle quattro piastre in acciaio di appoggio, mediante avvvitamento e all'incollaggio delle staffe per la misurazione degli spostamenti mediante trasduttori induttivi di spostamento e dell'estensimetro DD1 con colla a caldo. Questi passaggi sono stati effettuati in un'area dove fosse

- (iv) posizionamento e messa in bolla del provino all'interno del telaio di prova;
- (v) caricamento della putrella per la distribuzione del carico e relativa messa in sicurezza;
- (vi) posizionamento della strumentazione di prova.



Figura 7.10: Preparazione della trave per la prova.

7.2.3 Strumentazione di prova

La strumentazione di prova è composta da (figure 7.11 e 7.12):

- (i) telaio di prova;
- (ii) pompa idraulica elettrica a controllo manuale per fornire la pressione necessaria al sistema di azionamento del carico;
- (iii) martinetto idraulico;
- (iv) putrella per la distribuzione del carico;

- (v) due sistemi di acquisizione dati multicanale (Spider7);
- (vi) software CATMAN per la gestione del sistema di acquisizione dati;
- (vii) cella di carico da 100 kN;
- (viii) trasduttori induttivi di spostamento (LVDT);
- (ix) estensimetro DD1.



Figura 7.11: (a) sistema di acquisizione; (b) pompa idraulica; (c) martinetto idraulico con cella di carico e putrella; (d) trasduttori induttivi di spostamento.

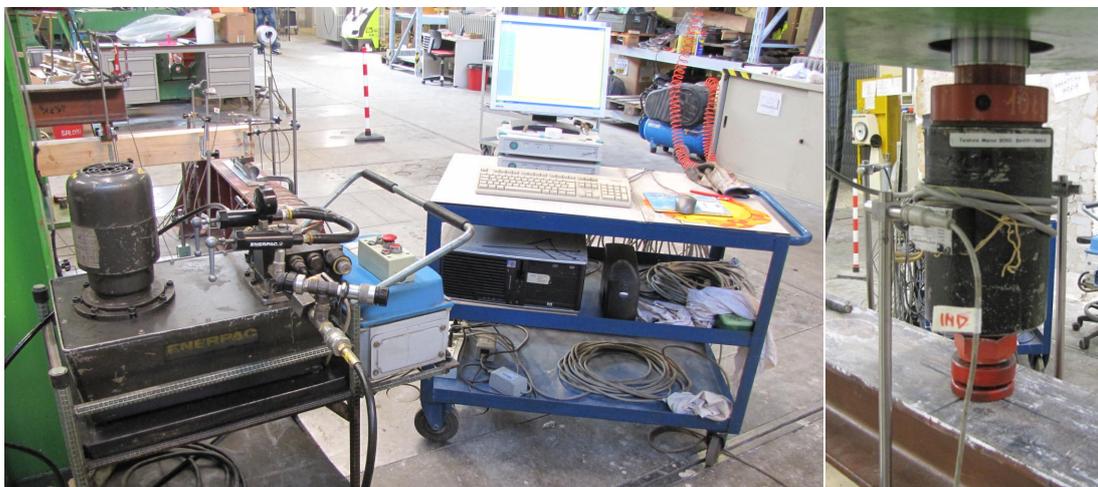


Figura 7.12: Dettaglio del sistema di acquisizione, della pompa idraulica e della cella di carico.

7.3 Risultati

Inizialmente è stata testata una serie di travi costituita dai provini TRAVE_NR_01, TRAVE_VL(3S)_01 e TRAVE_EPL(3S)_02 i cui intervalli di carico hanno permesso di calibrare i cicli di carico-scarico per le prove successive (tabella 7.3).

Tabella 7.3: Intervalli dei cicli di carico (espressi in N).

Intervallo	TRAVE_NR_01	TRAVE_VL(3S)_01 TRAVE_EPL(3S)_02	Altre travi
1	3000	5000	10000
2	6000	10000	20000
3	9000	15000	30000
4	12000	20000	a rottura
5	15000	25000	
6	20000	30000	
7	25000	35000	
7	35000	a rottura	
9	a rottura		

Sebbene la variazione della forza applicata sia stata regolata manualmente, si è cercato di mantenere una velocità di carico e scarico mediamente costante ed anche i plateau hanno avuto durata fissa. La durata dei cicli di carico, scarico e dei plateau è stata monitorata con un cronometro, i dati sono riportati in tabella 7.4.

Tabella 7.4: Tempistica relativa alle prove di flessione.

Provini	Velocità di carico	Velocità di scarico	Plateau (trave carica)	Plateau (trave scarica)
TRAVE_NR_01	2000 N/min	2000 N/min	120 s	40 s
TRAVE_VL(3S)_01 TRAVE_EPL(3S)_02	2000 N/min	4000 N/min	120 s	120 s
Altre travi	2000 N/min	4000 N/min	120 s	120 s

Di seguito sono discusse singolarmente le prove effettuate, di cui si riportano i cicli di carico e scarico, mediante grafico carico-tempo, il loro effetto sulla trave, dimostrato attraverso il grafico carico-spostamento ed infine un grafico in cui è riportata la flessione della trave a diversi valori di forza dell'ultimo ciclo di carico che ha portato alla rottura della trave. In

riferimento a quest'ultimo grafico, i punti di cui si riportano i valori di flessione corrispondono agli strumenti di misura LVDT, come mostrato in figura 7.13.

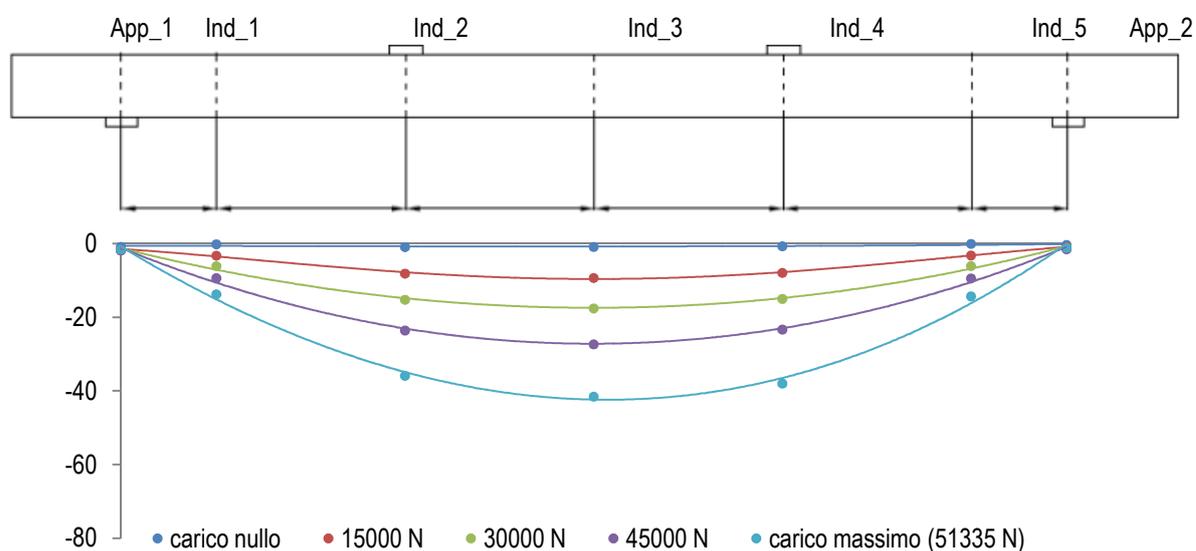


Figura 7.13: Corrispondenza tra gli strumenti di misura ed i valori espressi nel grafico.

L'ordinata del grafico che riporta l'abbassamento della trave (espresso in mm), è stata impostata pari a 70 mm in tutti i grafici, affinché sia immediato il confronto delle flessioni subita dalle diverse travi.

Tabella 7.5: Risultati delle prove di flessione.

ID	P_{max} [N]	S_{Pmax} [mm]
TRAVE_NR_01	49519	-
TRAVE_NR_02	54341	-47,2
TRAVE_EPC_1S_01	90296	-49,6
TRAVE_EPC_1S_02	60994	-41,2
TRAVE_EPL_3S_01	63793	-35,9
TRAVE_EPL_3S_02	72369	-47,7
TRAVE_VL_3S_01	69704	-57,7
TRAVE_VL_3S_02	51335	-34,2
TRAVE_EPL_5S_01	63300	-44,9
TRAVE_EPL_5S_02	47351	-32,9
TRAVE_VL_5S_01	60644	-57,9
TRAVE_VL_5S_02	67245	-50,7

Per evitare danneggiamenti alla strumentazione, l'estensimetro DD1 è stato smontato prima di iniziare la risalita del carico per portare la trave a rottura. Il grafico relativo a questo strumento di misura non è stato riportato nella discussione dei dati, perché scarsamente significativo.

In *tabella 7.5* sono riportati i carichi massimi (P_{max}) ottenuti per ciascuna trave ed il relativo abbassamento in mezzeria ($S_{P_{max}}$).

7.3.1 Travi non rinforzate

Le travi non rinforzate sono quelle di controllo, che confrontate con le travi rinforzate forniscono la dimensione della variazione di comportamento determinata dall'incollaggio del materiale composito.

TRAVE_NR_01

Questa è stata la prima trave testata, i cicli di carico e lo spostamento sono riportati in *figura 7.14*.

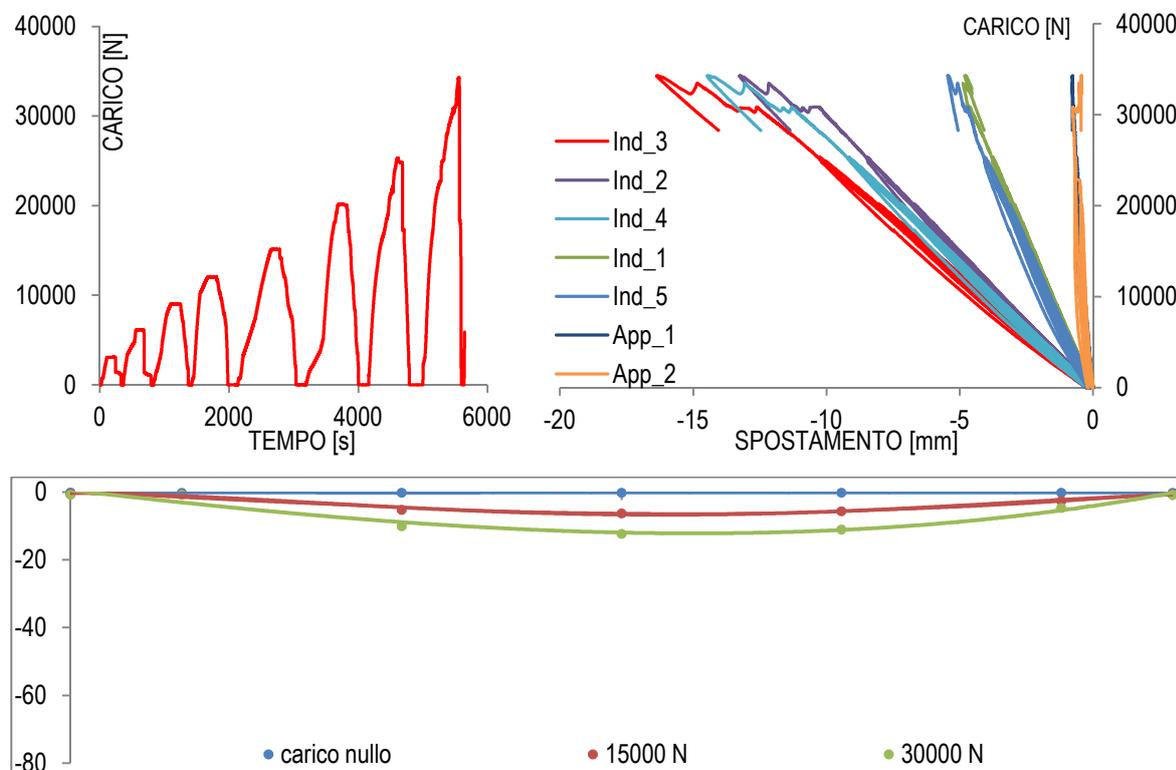


Figura 7.14: Grafici relativi alla prova di TRAVE_NR_01.

Come si osserva dal relativo grafico, gli effetti dei cicli di sforzo non sono apprezzabili, infatti le curve di salita e discesa non si discostano da un intervallo all'altro e ciò significa che il legno recupera la forma e non subisce deformazioni permanenti, rimanendo quindi in fase elastica.

Il grafico relativo alla flessione della trave fa riferimento agli spostamenti misurati durante l'ultimo ciclo di carico, conclusosi a 35000 N, poiché trattandosi della prima prova e non conoscendo il comportamento del legno sotto sforzo, giunti in prossimità della rottura si è proceduto ad allontanare la delicata strumentazione di misura dall'area di prova e si è provveduto in seguito a ricaricare il provino portandolo a rottura (*figura 7.15*), senza monitorare gli spostamenti della trave e rilevare l'abbassamento raggiunto in corrispondenza del carico massimo, pari a 49519 N.

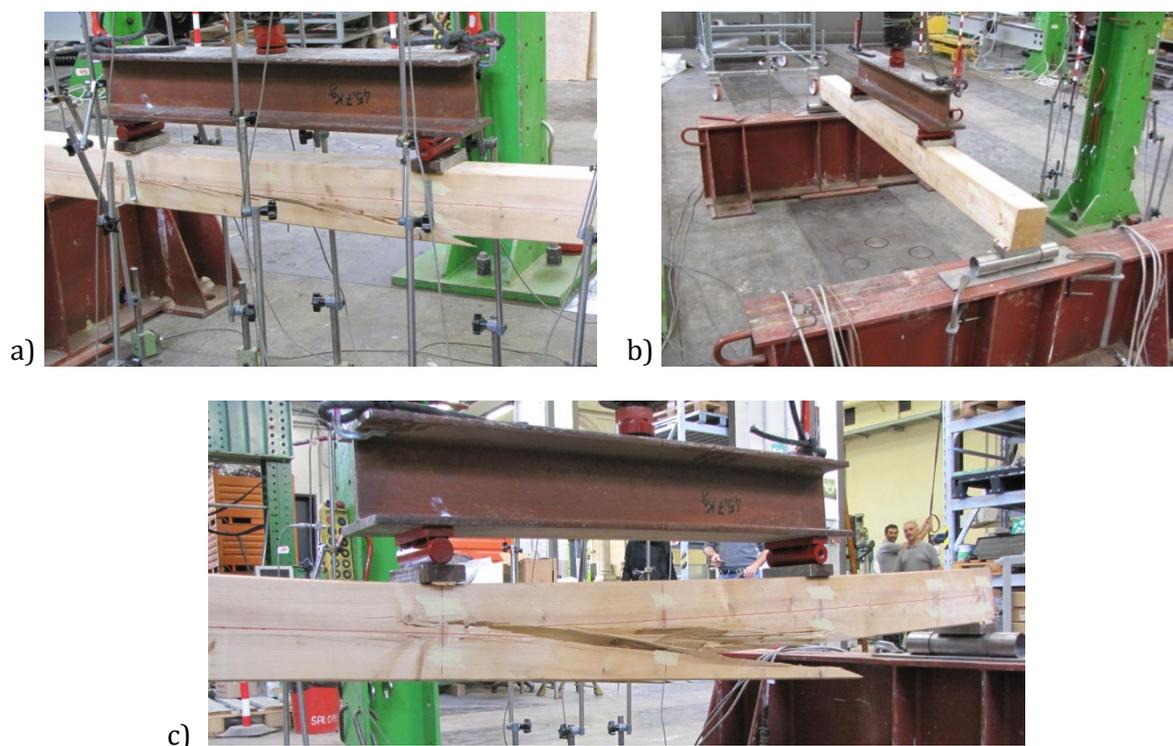


Figura 7.15: (a) primo segno di cedimento; (b) proseguo della prova senza strumentazione; (c) rottura della trave.

TRAVE_NR_02

La seconda trave non rinforzata è stata sottoposta a tre cicli di carico e scarico ed infine è stata portata a rottura, mantenendo sino al termine della prova il monitoraggio degli spostamenti. Come si evince dal grafico, come la prima trave, anche questa non ha subito effetti apprezzabili di tali sforzi applicati, infatti le curve dei diversi intervalli di carico sono sovrapposte.

Il massimo carico di rottura raggiunto è pari a 51930 N, corrispondente ad una flessione in mezzeria di 47,2 mm (figura 7.16).

Dall'immagine in figura 7.17 si osserva come la presenza di un nodo abbia accentuato gli effetti del carico; il collasso delle fibre di legno in zona tesa è accompagnata da un'evidente deformazione in zona compressa.

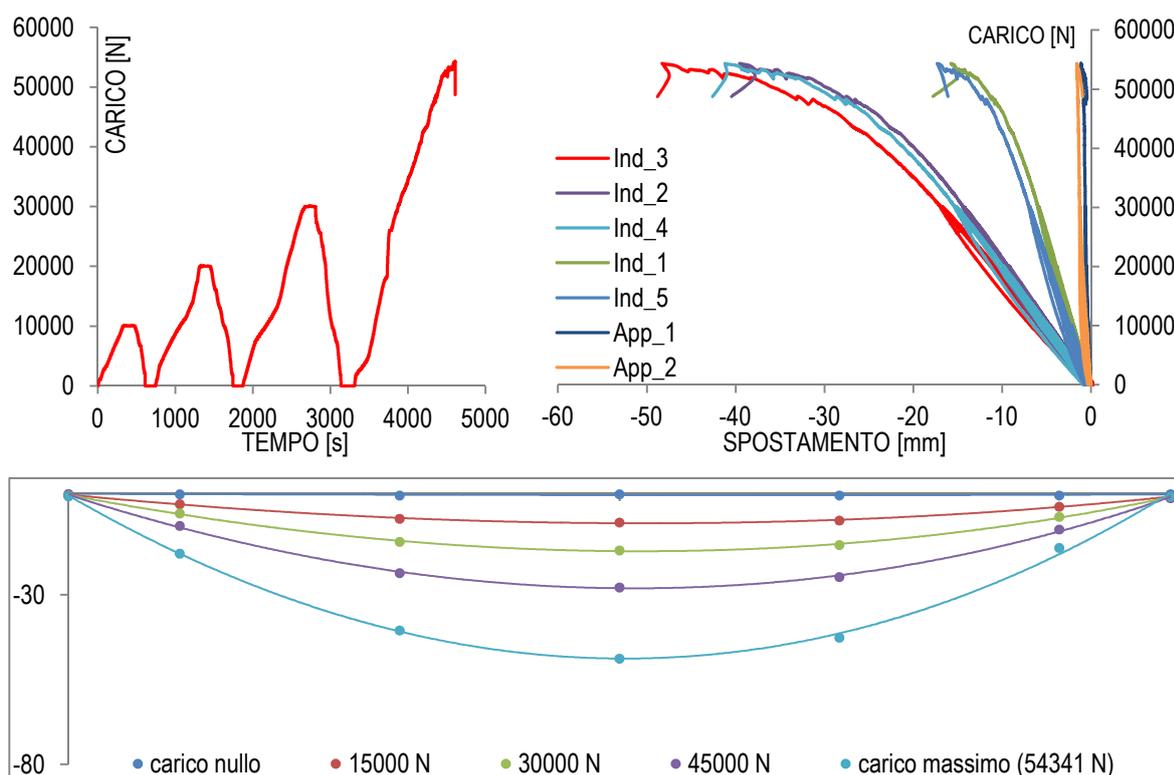


Figura 7.16: Grafici relativi alla prova di TRAVE_NR_02.



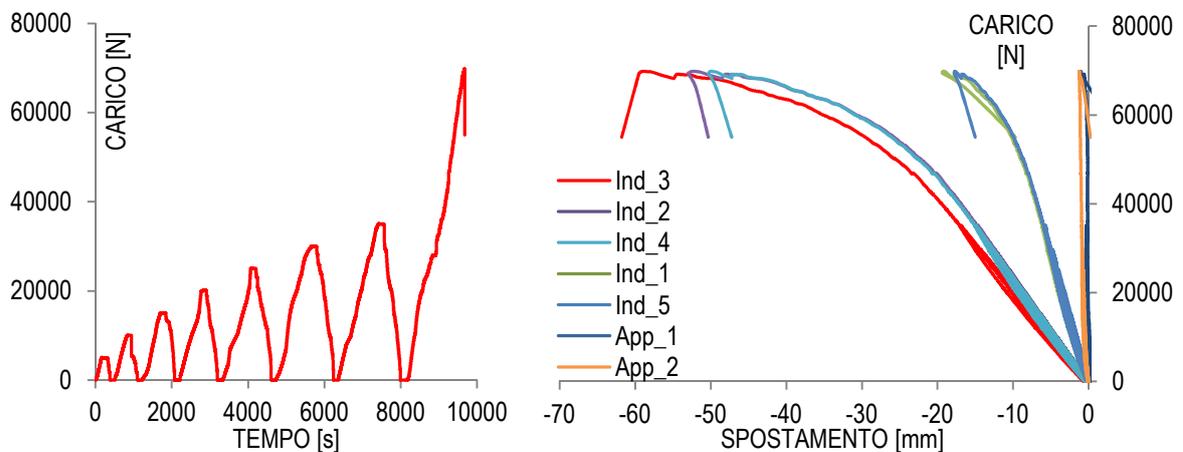
Figura 7.17: Frattura del legno in zona tesa e compressa.

7.3.2 Travi rinforzate con FFRP(V) - 3 strati di fibra

Le seguenti due travi di cui si riportano i risultati sono state rinforzate con triplo strati di fibra di lino, impregnata con colla vinilica.

TRAVE_V_L(3S)_01

La trave non subisce gli effetti dei numerosi cicli di carico e scarico effettuati e ciò si evince dalla sovrapposizione delle curve di aumento e calo del carico che indicano che la trave (per questi livelli di carico) si mantiene sostanzialmente in fase elastica. Inoltre la corrispondenza delle curve relative agli strumenti a destra e sinistra rispetto a quello di mezzeria indica un comportamento simmetrico del provino in reazione agli sforzi applicati (figura 7.18).



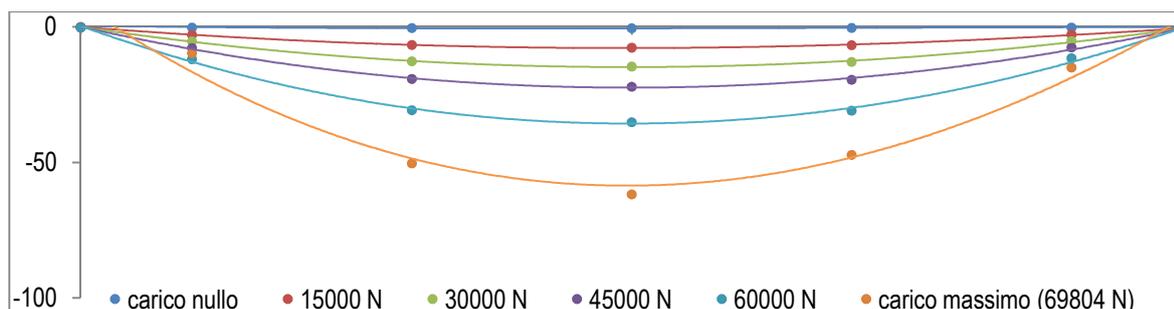


Figura 7.18: Grafici relativi alla prova di TRAVE_VL(3S)_01).

La trave si è rivelata particolarmente deformabile rispetto a tutte le altre, infatti è quella che ha raggiunto la flessione maggiore nel punto centrale, pari a 57,7 mm al momento dell'approssimarsi del carico massimo di 69804 N (figura 7.19).

La trave è stata ricavata dalla parte più centrale della pianta ed infatti si può osservare la presenza del midollo, che essendo una parte meno resistente rispetto al resto del legno subisce un evidente schiacciamento, osservabile in figura 7.20.

Nonostante l'importante flessione cui la trave è stata sottoposta, confermata anche dalla presenza di deformazioni in zona compressa, la rottura è sopraggiunta per scorrimento reciproco delle fibre interne del legno. Il composito non ha quindi subito danni o scollamenti evidenti nonostante la tensione e la presenza di un nodo che ne ha provocato la deformazione (figura 7.21).



Figura 7.19: Forte flessione della trave in prossimità del carico di rottura.

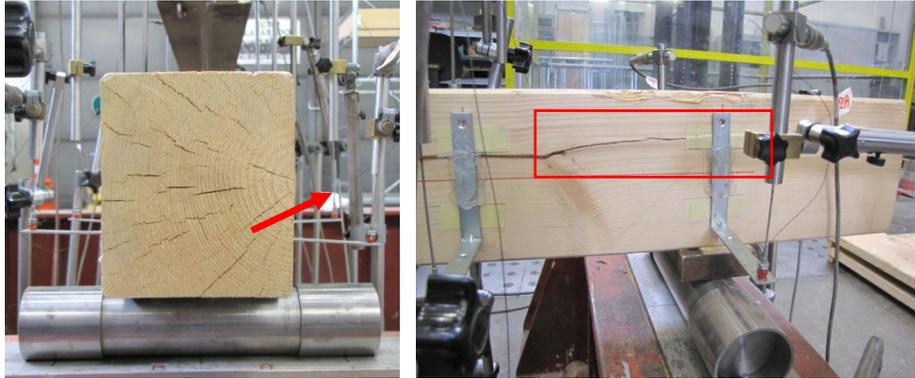


Figura 7.20: Presenza del midollo che subisce uno schiacciamento.



Figura 7.21: Rottura della trave per scorrimento reciproco delle fibre del legno.

TRAVE_V_L(3S)_02

La seconda trave testata, sebbene non risulti danneggiata dai cicli di carico-scarico applicati (in numero inferiore rispetto alla precedente), ha raggiunto un carico massimo ed una flessione inferiori rispetto alla trave V_L(3S)_01, pari a 51335 N e 34,2 mm rispettivamente (figura 7.22).

Il collasso delle fibre tese del legno ha provocato lo strappo del materiale composito, che sebbene danneggiato ha evitato il cedimento totale della trave (figura 7.23).

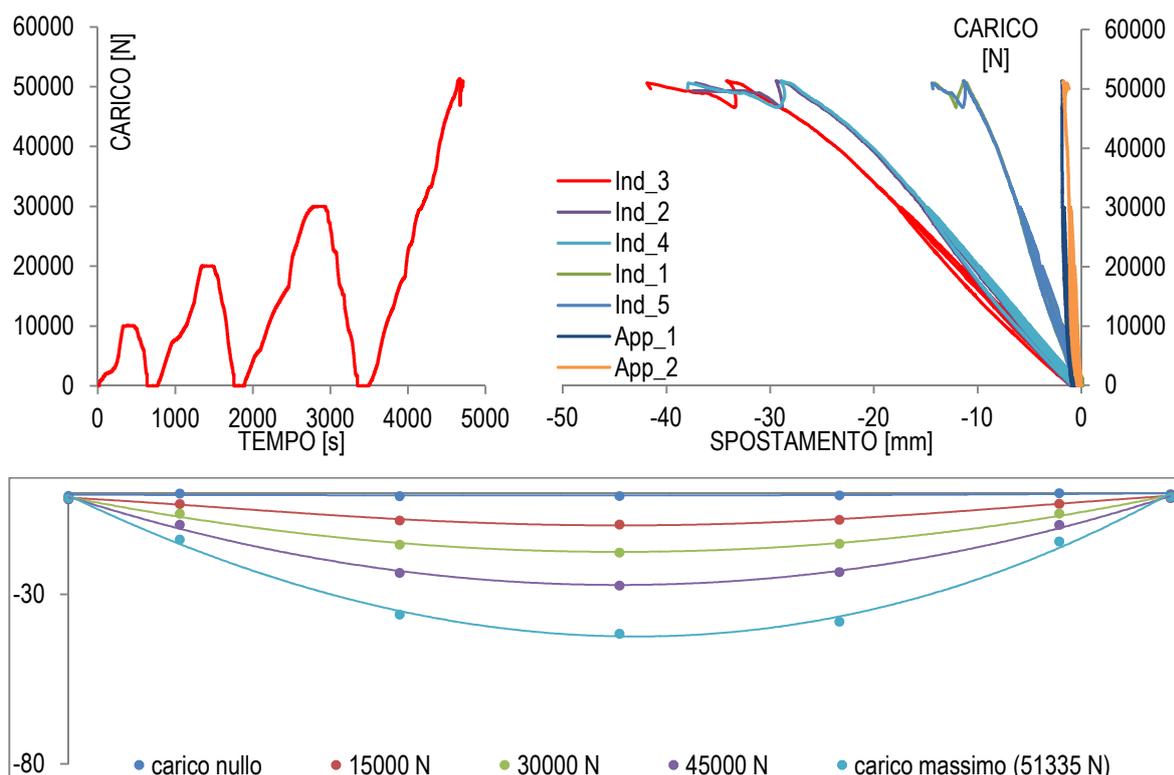


Figura 7.22: Grafici relativi alla prova di TRAVE_VL(3S)_02.



Figura 7.23: Rottura della trave per collasso delle fibre in zona tesa.

7.3.3 Travi rinforzate con FFRP(V) - 5 strati di fibra

Le seguenti due travi di cui si riportano i risultati sono state rinforzate con cinque strati di fibra di lino, impregnata con colla vinilica.

TRAVE_V_L(5S)_01

La trave, nonostante al momento dell'applicazione del composito avesse raggiunto un contenuto di umidità costante e tipico del legno asciutto (MC ~ 10%), durante il tempo atteso per permettere la completa maturazione della matrice ha subito una consistente variazione volumica. Ciò ha provocato l'insorgere di un'importante deformazione, osservabile in *figura 7.24*.



Figura 7.24: Deformazione del legno.

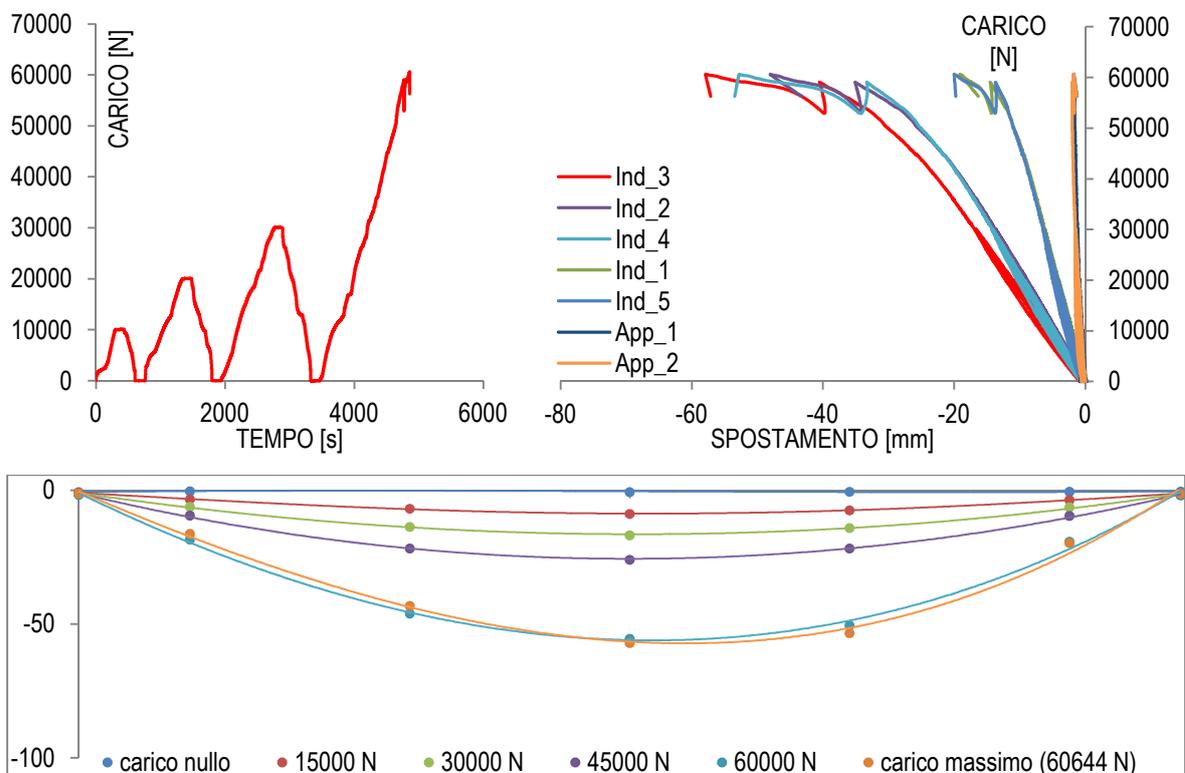


Figura 7.25: Grafici relativi alla prova di TRAVE_V_L(5S)_01.

La presenza di tale problematica non ha compromesso le funzionalità della trave, che come osservabile nel grafico carico-spostamento non risente dei cicli di carico-scarico effettuati (figura 7.25).

La rottura è avvenuta per cedimento delle fibre di legno, intervenuta nella zona tra la mezzeria e l'appoggio del carico corrispondente ai trasduttori Ind_4. L'asimmetria del collasso è osservabile dall'immagine in figura 7.26 ed anche dalla curva di flessione corrispondente al carico massimo prima della rottura.

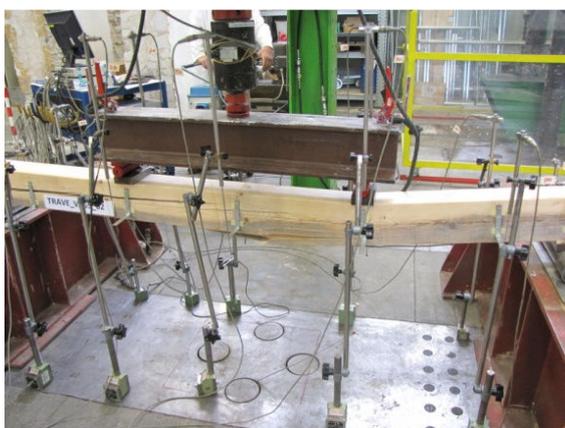


Figura 7.26: Asimmetria della rottura della trave per collasso delle fibre in zona tesa.

Il composito non è stato lesionato né dalla tensione di carico, né dalle fibre di legno, ha subito il distacco nel punto di rottura della trave ed un significativo stiramento, ma ha impedito il collasso della trave (figura 7.27).



Figura 7.27: Scollamento del composito FFRP(V) - 5 strati dal punto di rottura del legno.

TRAVE_V_L(5S)_02

La seconda trave di questo tipo è risultata maggiormente resistente ad al contempo meno deformabile della precedente.

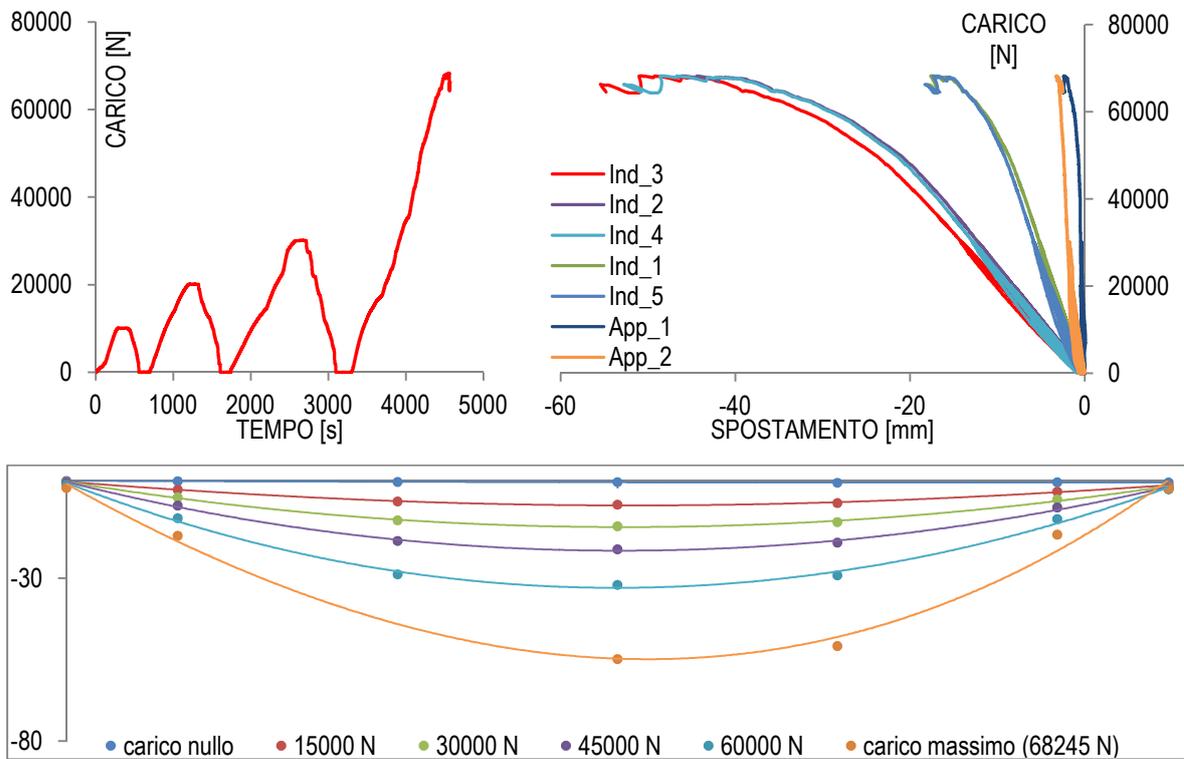


Figura 7.28: Grafici relativi alla prova di TRAVE_V_L(5S)_02.

Non ha subito gli effetti dei ciclo di carico-scarico ed ha raggiunto un carico massimo di 67245 N corrispondente ad una flessione di 50,7 mm (figura 7.28).



Figura 7.29: Rottura della trave per collasso delle fibre in zona tesa e lo scorrimento reciproco.

La rottura è stata mista, ad un cedimento delle fibre di legno ha corrisposto anche un loro scorrimento reciproco (figura 7.29). Il composito non è stato danneggiato e non ha subito evidenti distacchi dal supporto, ad eccezione dell'area di rottura del legno.

7.3.4 Travi rinforzate con FFRP - 3 strati di fibra

Le seguenti due travi di cui si riportano i risultati sono state rinforzate con triplo strati di fibra di lino, impregnata con resina epossidica.

TRAVE_EP_L(3S)_01

La trave rinforzata con il composito a base epossidica appare meno flessibile delle precedenti, sia quelle non rinforzate, sia quelle con il rinforzo a base vinilica. Non suscettibile ai cicli di carico-scarico, sostiene un carico massimo di 63793 N a fronte di un corrispondente abbassamento in mezzeria di soli 35,9 mm (figura 7.30).

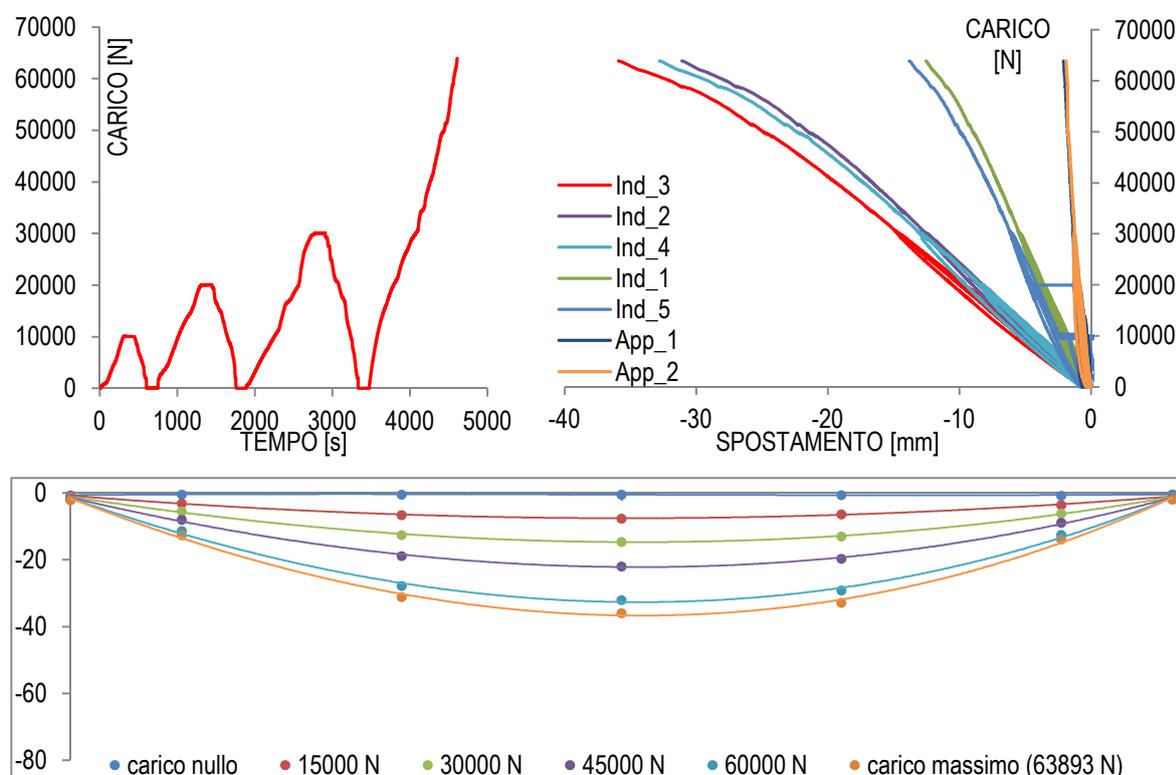


Figura 7.30: Grafici relativi alla prova di TRAVE_EP_L(3S)_01.

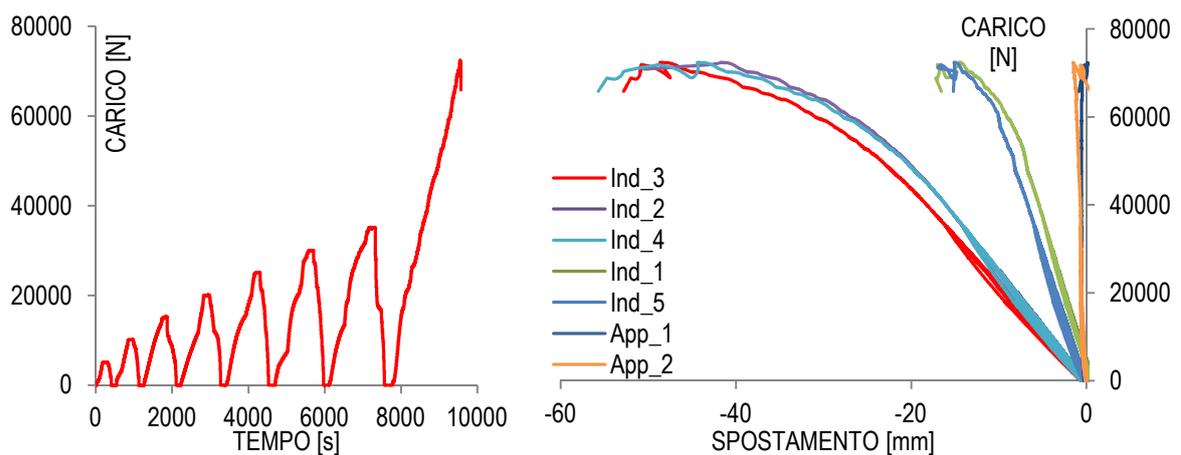
La rottura è sopraggiunta in corrispondenza di uno dei punti di carico superiore, ma non si evince dal grafico di flessione della trave un'evidente asimmetria di resistenza nei diversi punti di misurazione. La frattura è stata infatti istantanea e di tipo fragile, il composito è stato rotto a trazione in corrispondenza del punto di collasso del legno (*figura 7.31*).



Figura 7.31: Rottura della trave per collasso delle fibre.

TRAVE_EP1(3S)_02

La seconda trave rinforzata con FFRP, facente parte della prima serie testata, è risultata più resistente ed anche più elastica della sua omologa, infatti la flessione massima raggiunta è di 47,6 mm corrispondente ad un carico massimo di 72369 N (*figura 7.32*).



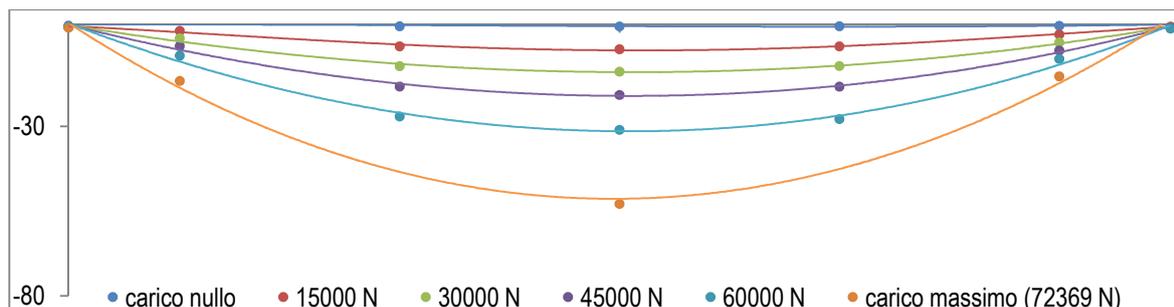


Figura 7.32: Grafici relativi alla prova di TRAVE_EP_L(3S)_02.

Durante questa prova si è osservato l'incastro di uno degli appoggi nel legno, dovuto all'elevato carico raggiunto, come si osserva in figura 7.33.

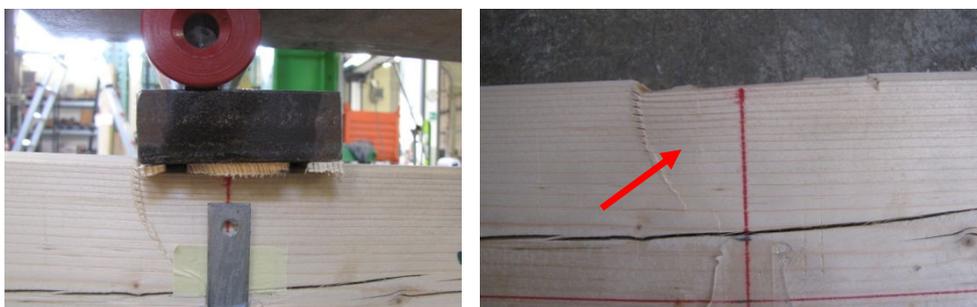


Figura 7.33: Incastro dell'appoggio nel legno.

La rottura è avvenuta per cedimento delle fibre in legno, causato dalla presenza di un nodo in prossimità della superficie di incollaggio ed è stata accompagnata da uno scorrimento reciproco delle fibre. Non è stata mantenuta la continuità del materiale composito che si è lesionato completamente (figura 7.34).



Figura 7.34: Rottura della trave per collasso delle fibre.

7.3.5 Travi rinforzate con FFRP - 5 strati di fibra

Le seguenti due travi di cui si riportano i risultati sono state rinforzate con cinque strati di fibra di lino, impregnata con resina epossidica.

TRAVE_EP_L(5S)_01

Questa trave ha mostrato un andamento similare alle altre, infatti come si osserva dal grafico carico-spostamento non ha sofferto l'applicazione di tre cicli di carico-scarico. Il carico massimo raggiunto è pari a 63300 N e corrisponde ad una flessione di 44,9 mm (figura 7.35). Raggiunta la forza massima, la rottura è stata pressoché istantanea e fragile, ad un collasso del legno è seguita una frattura netta del composito che non ha quindi evitato il cedimento totale della trave (figura 7.36).

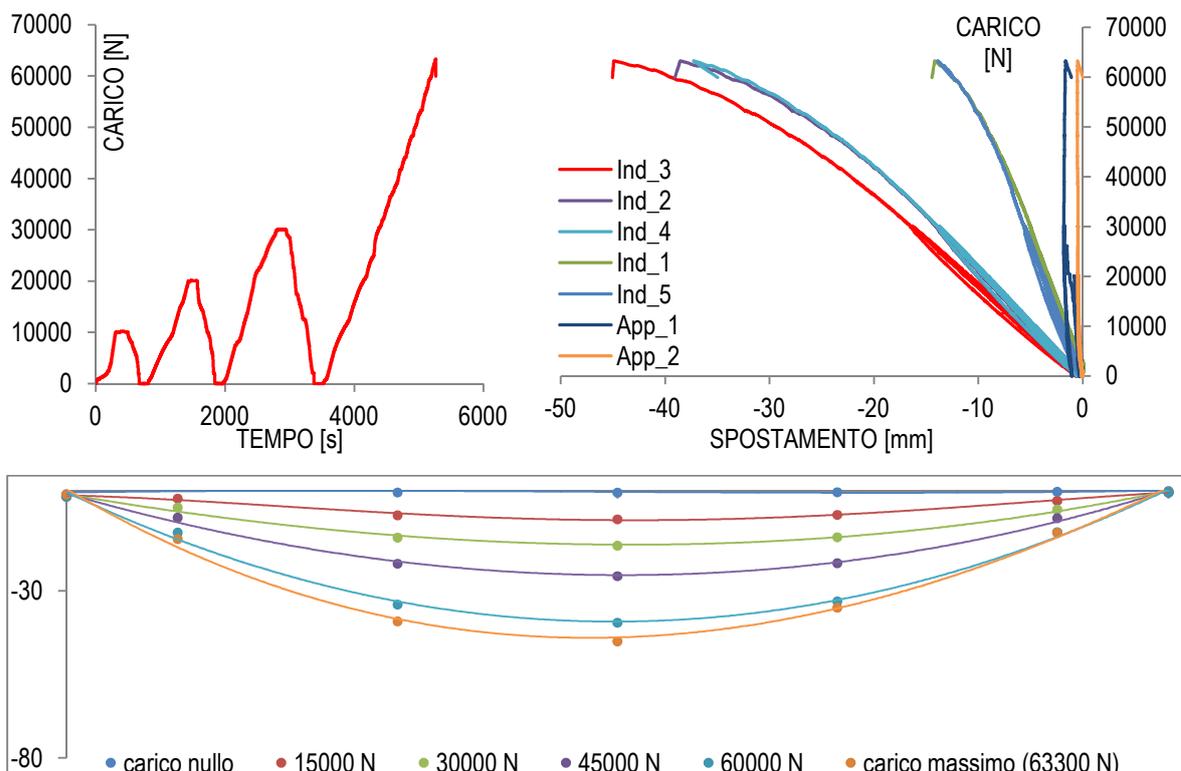


Figura 7.35: Grafici relativi alla prova di TRAVE_EP_L(5S)_01.

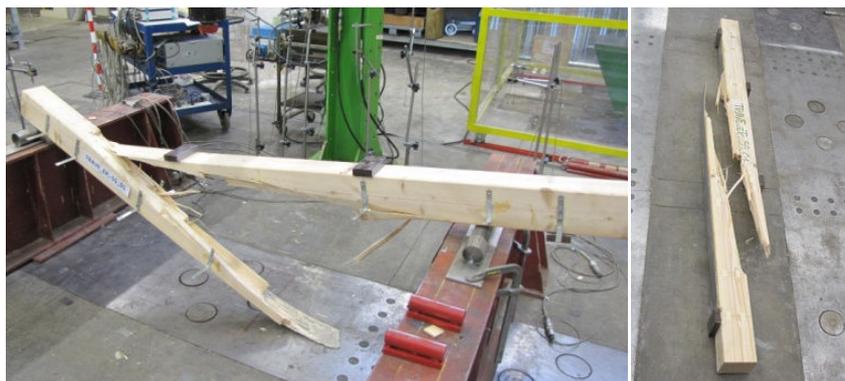


Figura 7.36: Rottura della trave per collasso delle fibre.

TRAVE_EP_L(5S)_02

Il provino TRAVE_EP_L(5S)_02 ha fornito prestazioni molto basse, sebbene non sembra aver subito gli effetti di carico e scarico. Il carico massimo raggiunto prima della rottura risulta essere più basso di quello misurato nelle travi non rinforzate e raggiunge i 47351 N per una flessione di 32,9 mm (figura 7.37).

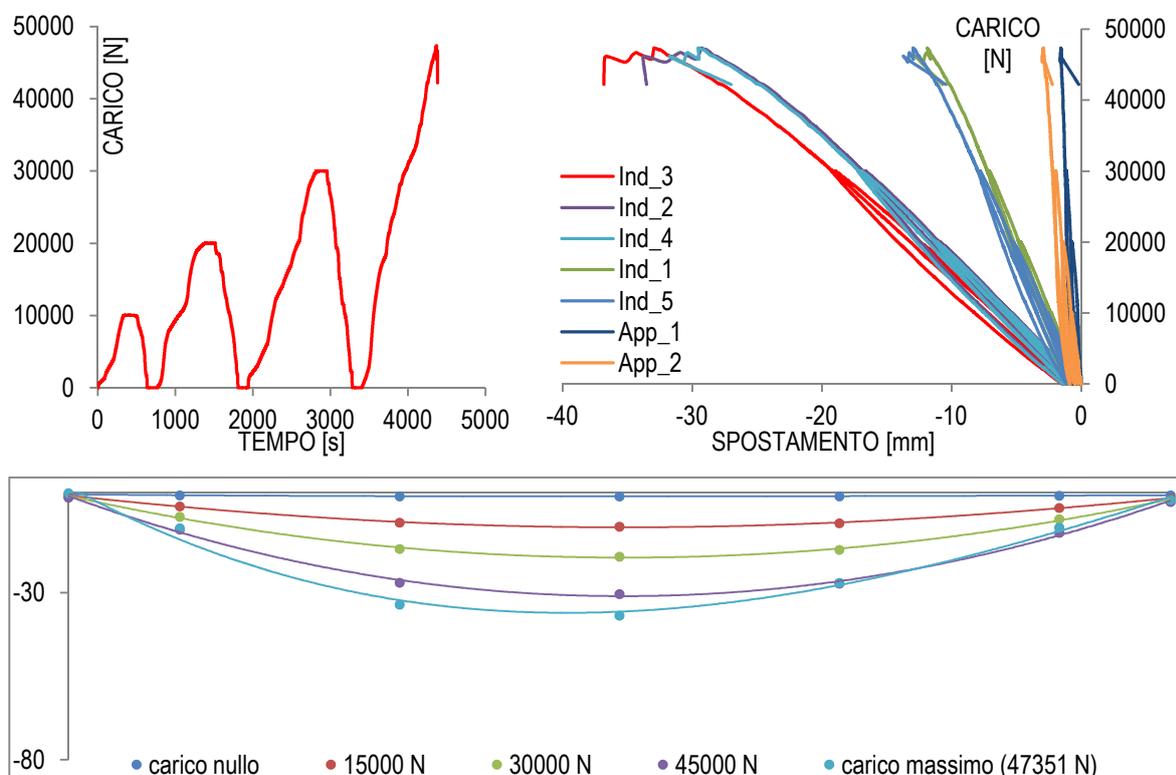


Figura 7.37: Grafici relativi alla prova di TRAVE_EP_L(5S)_02.

Il cedimento della trave è stato causato dallo scorrimento delle fibre di legno, propagatosi dal midollo. Abbiamo già osservato nel provino TRAVE_V_L(3S)₀₁, come il midollo costituisca un punto di maggiore debolezza, in questo caso andando a intaccare la prestazione della trave (figura 7.38).

Considerato ciò non è stato possibile determinare il comportamento del materiale composito a base di resina epossidica e fibra di lino applicato su tale trave.

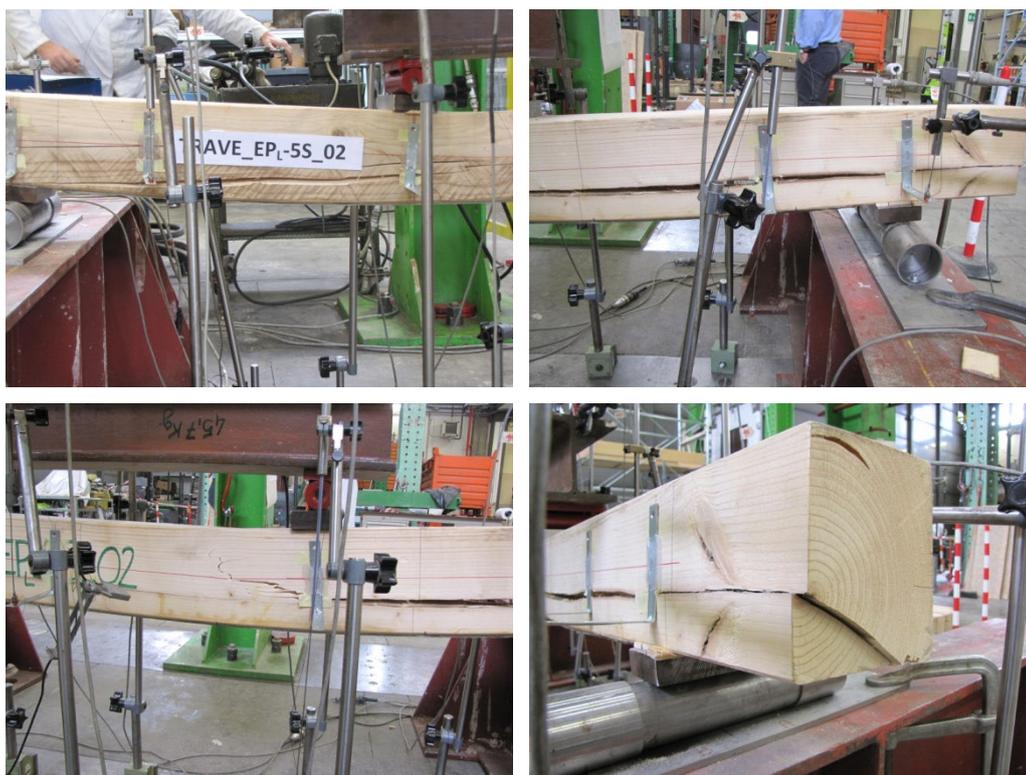


Figura 7.38: Rottura della trave per scorrimento delle fibre.

7.3.6 Travi rinforzate con CFRP - 1 strato di fibra

Le seguenti due travi di cui si riportano i risultati sono state rinforzate con un singolo strato di fibra di carbonio, impregnata con resina epossidica. I test su provini rinforzati con CFRP sono utili al confronto, in termini di prestazioni tra materiali composito tradizionali e naturali

TRAVE_EPC_01

Questa trave rinforzata con composito tradizionale è quella che ha mostrato il miglior comportamento in assoluto, in termini di resistenza allo sforzo. Il carico massimo raggiunto è stato di 90296 N per una flessione di 49,6 mm (figura 7.39).

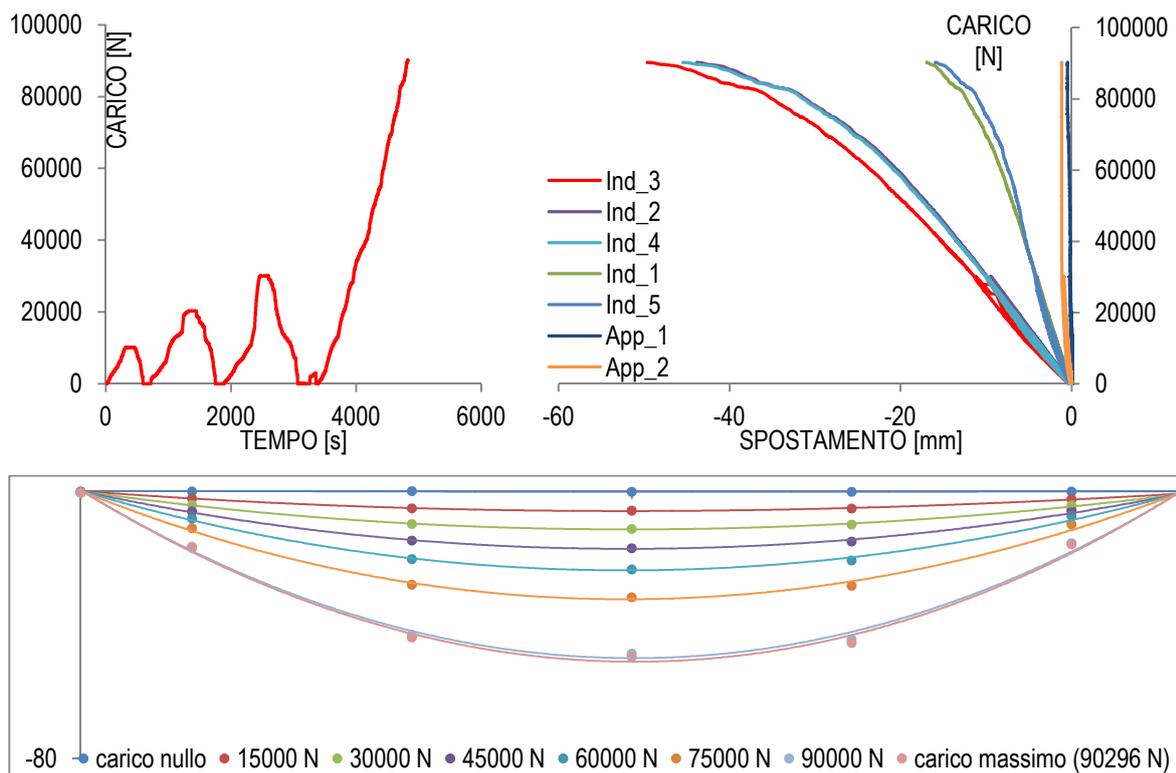


Figura 7.39: Grafici relativi alla prova di TRAVE_EPC_01.



Figura 7.40: Rottura per spaccatura netta del legno in corrispondenza degli appoggi.

Ad un'ottima resistenza corrisponde però una rottura estremamente fragile ed istantanea, infatti raggiunto il carico massimo la trave è collassata, spezzandosi nettamente in corrispondenza di un appoggio e lesionandosi gravemente in corrispondenza dell'altro (figura 7.40).

TRAVE_EPC_02

La seconda trave rinforzata con CFRP, sebbene abbia raggiunto un carico sensibilmente più basso della precedente (60994 N), il comportamento a rottura è stato identico (figure 7.41 e 7.42).

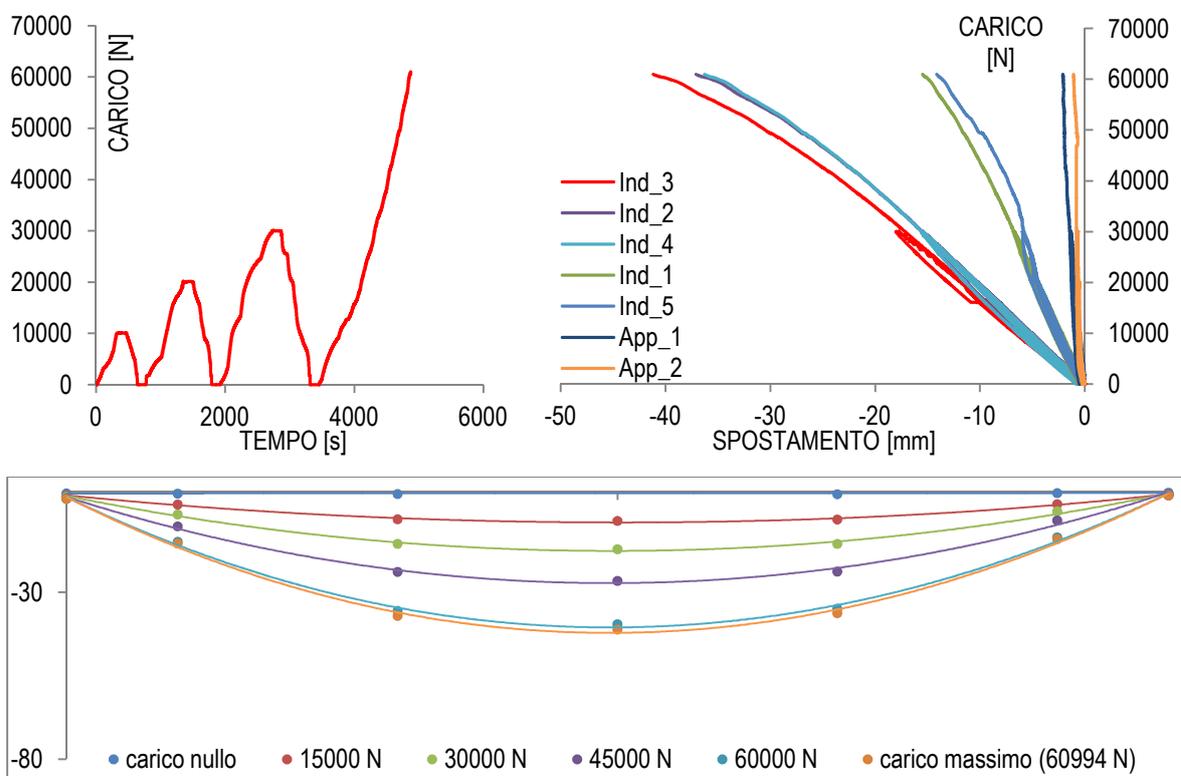


Figura 7.41: Grafici relativi alla prova di TRAVE_EPC_02.



Figura 7.42: Rottura per spaccatura netta del legno in corrispondenza degli appoggi.

7.4 Osservazioni conclusive

I materiali compositi sia naturali, sia tradizionali applicati alle travi hanno dimostrato un comportamento coerente e compatibile con quanto rilevato dalle prove di caratterizzazione locale. Le differenze di comportamento e prestazioni dei diversi compositi si osservano dai dati riportati in *tabella 7.6* e più chiaramente nei grafici in *figura 7.43* e *7.44*.

Tabella 7.65: Carichi massimi e flessioni ottenuti per ogni tipo di composito.

	P_{max} [N]	P_{NR}/P_{Rin}	S_{Pmax} [mm]	S_{NR}/S_{Rin}
TRAVE_NR	51930		-47,2	
TRAVE_EPC_1S	75645	46%	-45,4	-6%
TRAVE_EPL_3S	67131	31%	-42,3	-12%
TRAVE_VL_3S	60570	17%	-46,5	-4%
TRAVE_EPL_5S	55325	7%	-37,9	-19%
TRAVE_VL_5S	64444	24%	-54,4	13%

Come già evidenziato, le prestazioni dei materiali compositi tradizionali sono superiori rispetto a quelle dei materiali naturali, ma essi svolgono comunque in maniera soddisfacente il compito di rinforzo per cui sono state ideate.

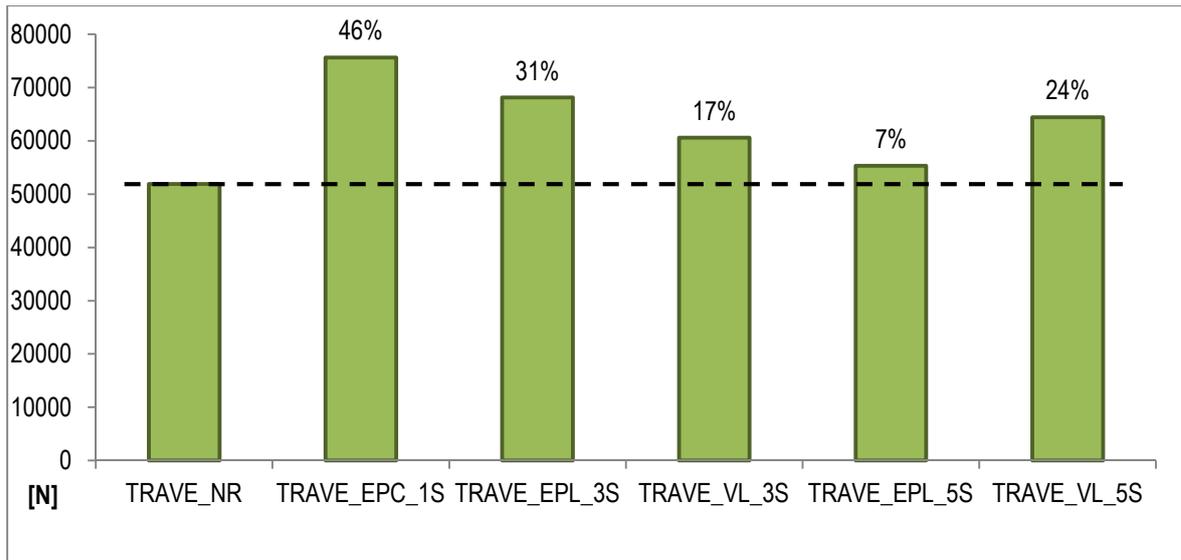


Figura 7.43: Carichi massimi ottenuti per ogni tipo di composito.

Fatta eccezione per le travi rinforzate con 5 strati di FFRP(V) è osservabile anche un irrigidimento della trave che subisce una flessione inferiore a fronte di un carico applicato superiore.

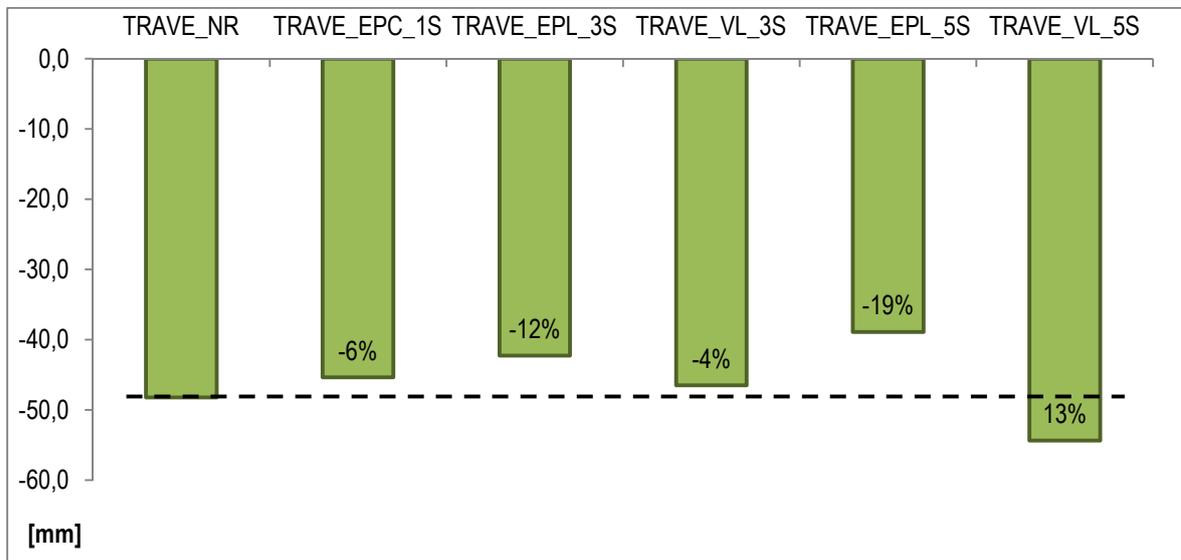


Figura 7.44: Flessioni massime ottenute per ogni tipo di composito.

Analisi chimico-fisiche

In questo capitolo sono presentati i risultati delle analisi chimico-fisiche progettati allo scopo di comprendere al meglio i fenomeni rilevati con le prove meccaniche.

8.1 Microscopia ottica

La microscopia ottica è un'analisi piuttosto semplice, poiché si basa sullo sfruttamento della luce visibile e per questo anche relativamente economica. Inoltre è una tecnica veloce, infatti le informazioni sono immediate in quanto ottenute durante l'osservazione senza ulteriori elaborazioni e il campione da analizzare non deve essere sottoposto a particolari trattamenti preventivi.

Con il microscopio ottico si possono osservare sia le caratteristiche esteriori del campione, come la geometria, il colore sia la struttura interna sia le proprietà ottiche, come la trasparenza, il pleocroismo e la birifrangenza.

In un microscopio ottico ci sono una serie di lenti convergenti e divergenti, inserite in ordine opportuno che si interpongono tra l'occhio dell'operatore e il campione da analizzare. Grazie a queste lenti si può ottenere un'immagine ingrandita dell'oggetto in analisi. Durante

l'osservazione è possibile scegliere quale obiettivo utilizzare, il quale determina l'ingrandimento dell'immagine, ossia il dettaglio.

Esistono due modalità di osservazione: (i) in luce trasmessa e (ii) in luce riflessa.

La prima viene utilizzata nello studio di oggetti trasparenti alla luce visibile, i quali vengono posizionati tra la sorgente luminosa e l'occhio dell'operatore.

La seconda modalità deve essere necessariamente usata per oggetti opachi. Infatti mantenendo la geometria precedentemente descritta non si otterrebbe alcuna immagine, in quanto l'oggetto non essendo trasparente impedirebbe il passaggio del fascio luminoso. Nella modalità in luce riflessa, mediante specchi e lenti la luce viene focalizzata su un punto preciso del campione, il quale la riflette ed il raggio riflesso, attraversando la serie di lenti convergenti e divergenti che costituiscono il cuore dello strumento, fornisce un'immagine ingrandita come mostrato in *figura 8.1* (Klein, 2004).

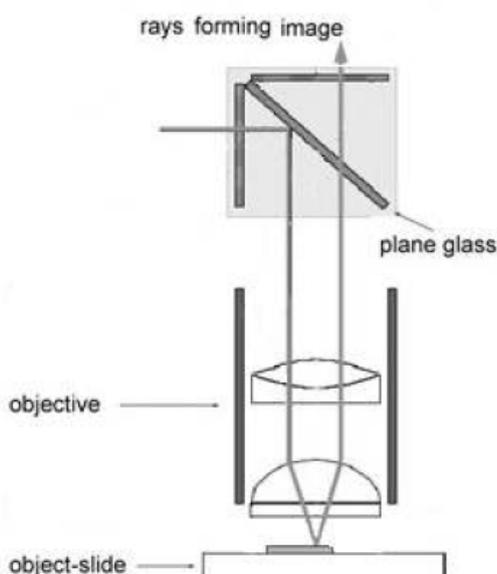


Figura 8.1: Schema del percorso effettuato dal fascio luminoso nella modalità a luce riflessa.

8.1.1 Metodologia di prova

Le osservazioni al microscopio ottico per questo lavoro sono state effettuate in due momenti diversi con differente strumentazione. Inizialmente sono state osservate le sezioni

provenienti dai campioni rinforzati con CFRP, GFRP e FFRP. L'indagine si è svolta presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Padova, con un microscopio Zeiss Axiotech 100 a luce. Lo strumento è dotato di quattro sistemi ottici di illuminazione: (i) campo chiaro, (ii) campo scuro, (iii) luce polarizzata e (iv) contrasto differenziale di interferenza. Si è utilizzato maggiormente il campo scuro e talvolta anche il campo chiaro.

In un secondo momento sono state analizzate le sezioni dei campioni rinforzati con FFRP(V) e di quelli multistrato, presso l'Istituto di Chimica Inorganica e delle Superfici (ICIS) del CNR di Padova. Lo strumento utilizzato è un microscopio stereoscopico Olympus SZX 12.

Le sezioni sono state ottenute tagliando i campioni sottoposti al test di pull-off il più vicino possibile all'area di prova, affinché ne rispecchiassero il più possibile le caratteristiche (*figura 8.2*). La superficie da analizzare è stata lisciata e resa il più piana possibile con carte abrasive di grana progressivamente crescente (80, 180, 240 e 1000).

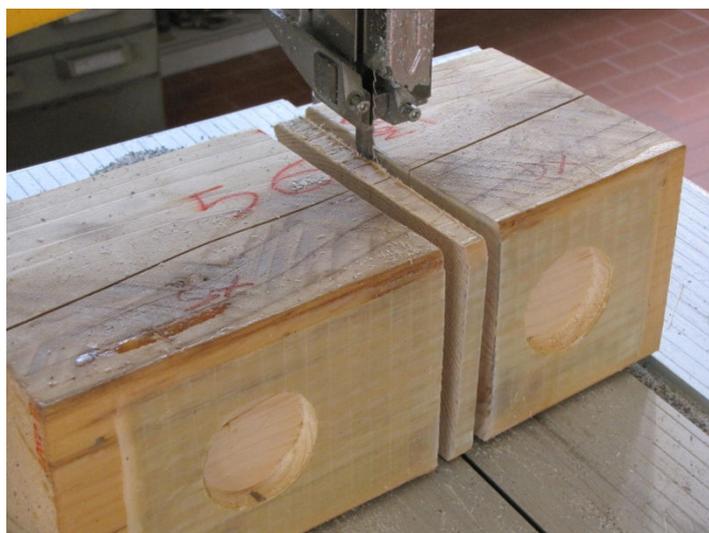


Figura 8.2: Sezione di campione per osservazione al microscopio.

7.1.2 Risultati

Le osservazioni al microscopio sono state effettuate per determinare le condizioni dei materiali compositi a livello microscopico e lo stato di adesione tra FRP e legno, mediante l'analisi dell'interfaccia. Le informazioni ottenute hanno confermato quanto riscontrato con l'analisi delle modalità di rottura riscontrate nei test di pull-off (cfr. §6.1.2).

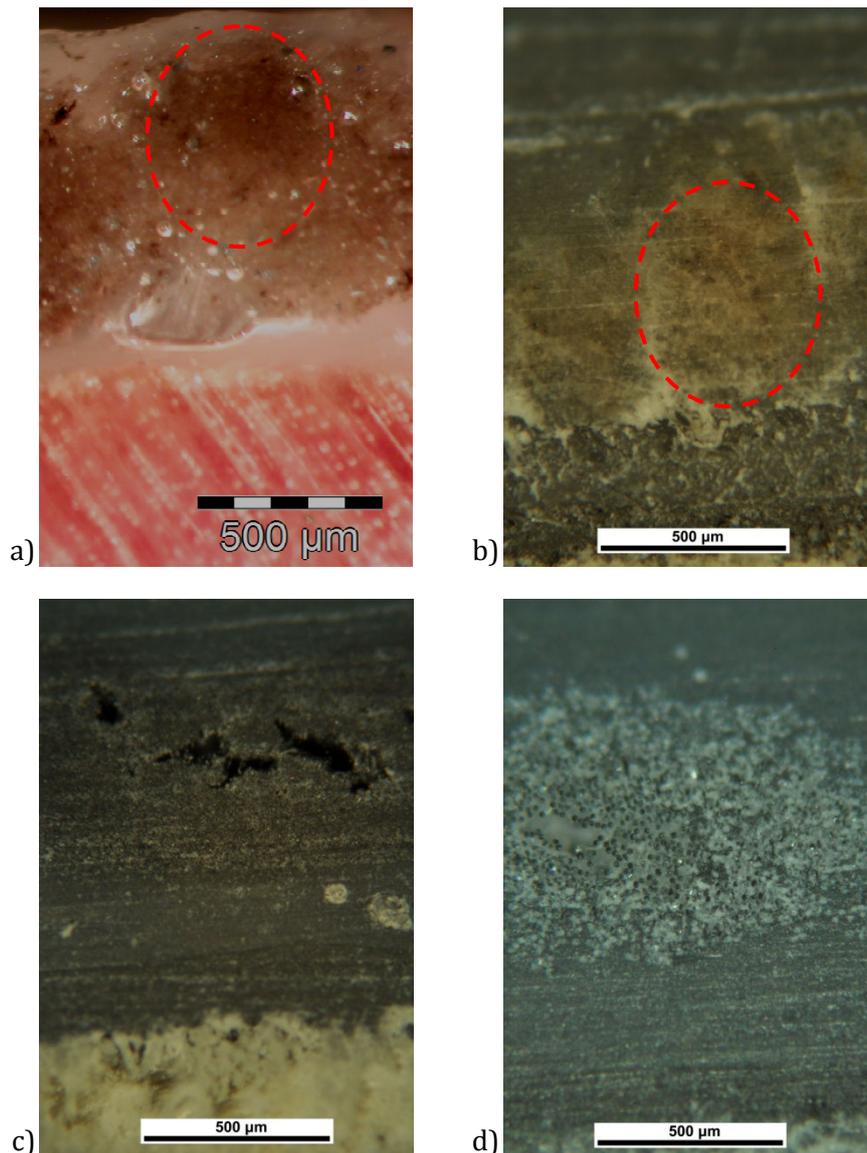


Figura 8.3: (a) FFRP(V); (b) FFRP; (c) CFRP; (d) GFRP.

In *figura 8.3* si possono osservare le sezioni dei quattro diversi materiali compositi e si può riscontrare come la colla vinilica abbia uno spessore inferiore rispetto alla resina epossidica. Anche la struttura stessa del rinforzo fibroso è evidentemente diverso, nelle immagini a) e b) si riconosce la sezione dei fili di lino, mentre le fibre di carbonio e vetro sono costituite da migliaia di microfibre dello spessore di qualche µm.

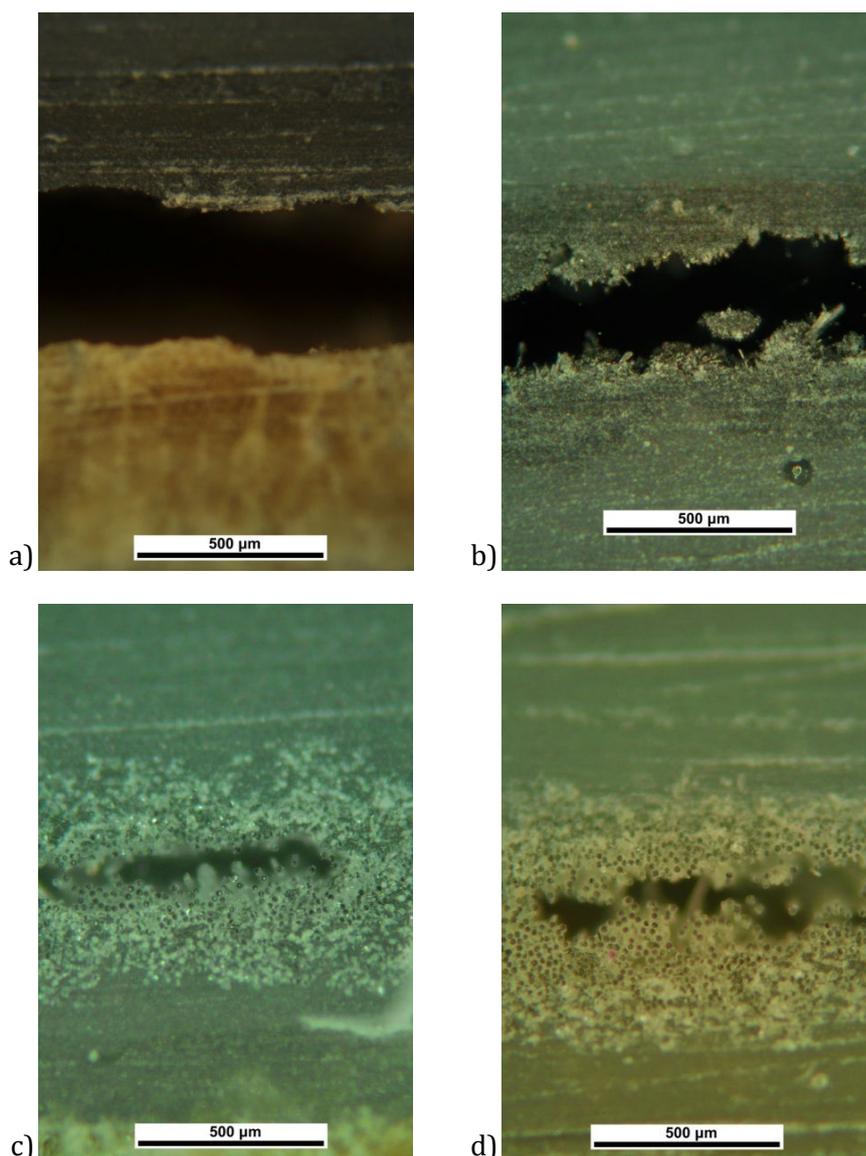


Figura 8.4: Vuoti presenti in campioni di fibra di carbonio(a, b) e di vetro (c, d).

La presenza frequente di bolle all'interno del composito o tra il composito e il legno può essere causa di rotture interne del composito o il distacco dello stesso dal substrato. Negli FRP con fibra di lino non sono stati rivelati vuoti considerabili importanti per dimensioni e soprattutto frequenza come nei materiali tradizionali (figura 8.4).

La presenza di tali difetti conferma i dati ottenuti con il test di pull-off (tabella 8.1), infatti CFRP e GFRP hanno mostrato la forte incidenza di rotture B e C, percentualmente superiori che nei campioni FFRP e FFRP(V).

Le osservazioni al microscopio hanno sottolineato la forte dipendenza tra un'inadeguata impregnazione della fibra ad opera della matrice e il comportamento non corretto del rinforzo sottoposto a stress.

Tabella 8.1: Incidenza di rotture B e C.

Composito	rottura B	rottura C
FFRP	6,3%	0,0%
FFRP(V)	5,8%	1,4%
CFRP	11,0%	9,3%
GFRP	12,3%	8,2%

I campioni di FFRP(V) sottoposti a intenso riscaldamento (F3-140 °C), hanno mostrato più degli altri una notevole variazione dell'aspetto, con scurimento della colla e una drastica diminuzione delle prestazioni meccaniche. Le osservazioni al microscopio hanno mostrato come la colla vinilica all'interfaccia subisca ugualmente degrado anche se non direttamente esposta al calore (figura 8.5).



Figura 8.5: Scurimento della colla vinilica in seguito al condizionamento F3-140 °C.

Campioni multistrato

Sono state osservate al microscopio ottico anche le sezioni relative ai campioni multistrato, per valutare la stratificazione, la distribuzione della matrice e determinare un eventuale limite di strati cui si può arrivare efficacemente.

I campioni con due strati sono stati prodotti secondo due diverse modalità, denominate *a fresco* e *fuori tatto*. La prima, utilizzata anche per tutti gli altri campioni, prevede l'incollaggio dei diversi livelli con matrice ancora non polimerizzata, la seconda modalità contempla l'incollaggio di un secondo strato, su un primo già asciutto.

In figura 8.6 si può osservare come varia lo spessore di matrice tra uno strato e l'altro coerentemente con la modalità di incollaggio scelta, in particolar nei provini con resina epossidica. Tale fenomeno è meno marcato per i campioni di FFRP(V), poiché la colla vinilica

in presenza di umidità (in questo caso nuova colla ancora fluida e ricca di acqua) tende a rammollire e tornare ancora parzialmente malleabile.

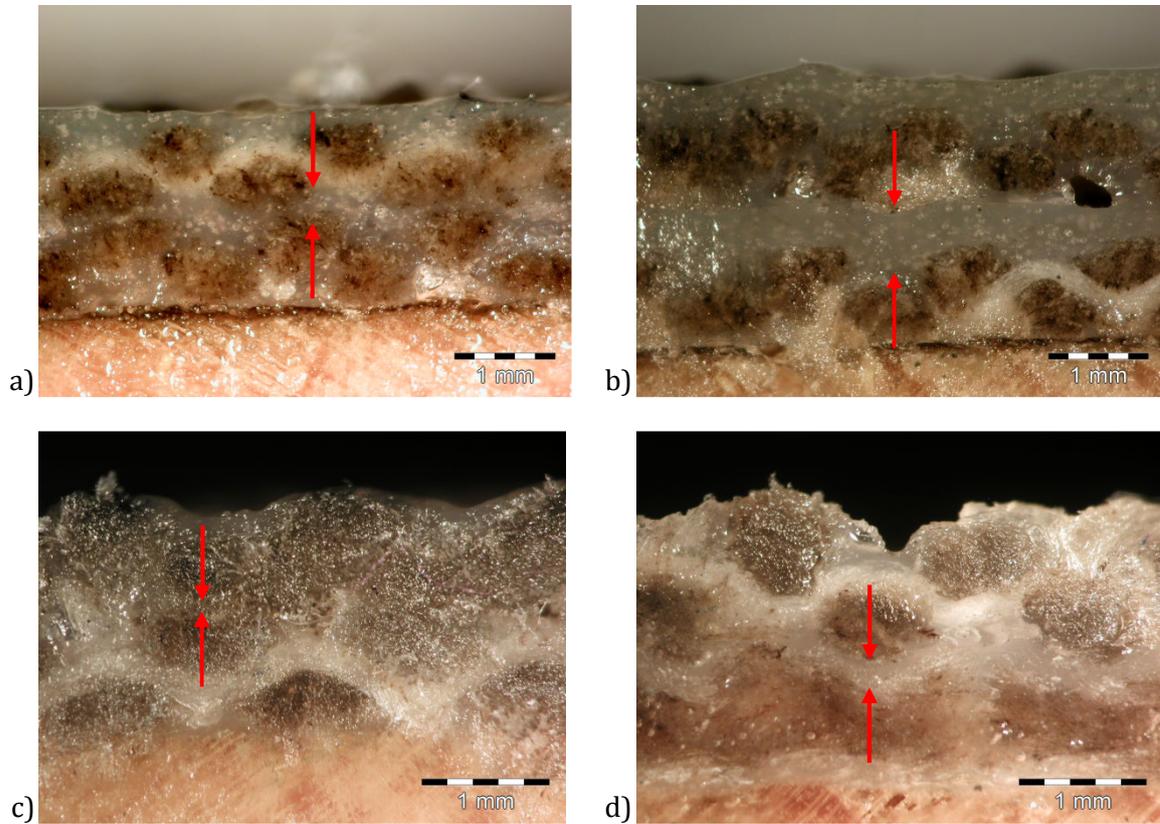


Figura 8.6: (a, c) modalità a fresco; (b, d) modalità fuori tatto; sopra FFRP, sotto FFRP(V).

Nei campioni con più strati si può osservare l'ottima impregnazione delle fibre, in cui la matrice si è insinuata tra i diversi fili formando un unico elemento solido e collaborativo (figura 8.7).

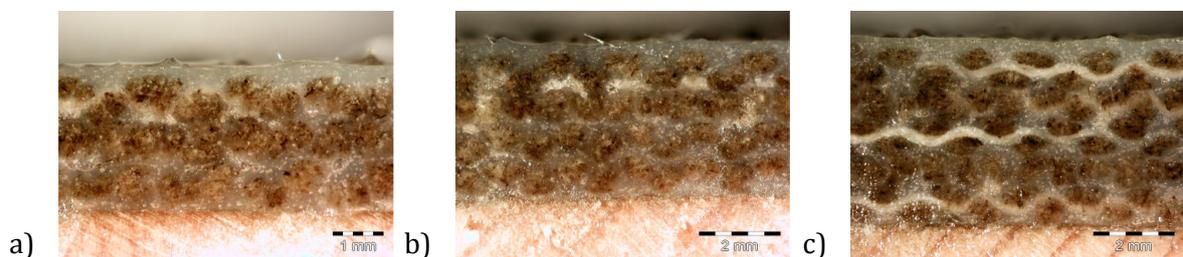


Figura 8.7: (a) tre strati; (b) quattro strati; (c) cinque strati.

8.2 Spettrofotometria FT-IR

Ogni elemento ha una struttura atomica propria e differente dalle altre, se una molecola viene esposta a radiazione elettromagnetica subirà un'eccitazione che può essere di varia natura (ad esempio elettronica o rotazionale), ma caratteristica a causa dei livelli energetici specifici in cui giacciono i suoi elettroni. Ogni tipo di eccitazione della materia richiede una quantità specifica di energia per realizzarsi, quindi l'assorbimento relativo si realizzerà in specifiche regioni dello spettro elettromagnetico (*tabella 8.2*).

Tabella 8.2: Energia e tipo di eccitazione dello spettro elettromagnetico (Allinger et al., 1981)

Regione	Lunghezza d'onda	Energia di eccitazione	Tipo di eccitazione
Radiazione gamma, raggi X, raggi cosmici	< 100 nm	> 286 kcal	
Ultravioletto			
nel vuoto	100-200 nm	286-143 kcal	Elettronica
con ottica di quarzo	200-350 nm	143-82 kcal	Elettronica
Visibile	350-800 nm	82-36 kcal	Elettronica
Infrarosso*			
vicino infrarosso	0,8-2,0 µm	36-14,3 kcal	Sovratoni della deformazione di legame
infrarosso	2-16 µm	14,3-1,8 kcal	Deformazioni di legame
lontano infrarosso	16-300 µm	1,8-0,1 kcal	Deformazioni di legame
Microonde	1 cm	10 ⁻⁴ kcal	Rotazionale
Radiofrequenze	metri	10 ⁻⁶ kcal	Transizioni elettroniche e di spin nucleare

* Gli spettri Raman possono essere determinati esponendo le sostanze a un'intensa radiazione ad alta energia (di solito ultravioletta) e misurando la luce che viene emessa dalla sostanza e che è di frequenza differente dalla radiazione incidente. Da spettri di questo genere si ottiene lo stesso tipo di informazioni generali che possono essere ricavate dagli spettri infrarossi.

La frequenza alla quale avviene l'assorbimento che provoca l'eccitazione a stati energetici più elevati è regolata dalla relazione (1)

$$E=h\nu \tag{1}$$

E: energia assorbita,

ν: frequenza della radiazione elettromagnetica,

h: costante di Planck (6,626 x 10⁻³⁴ J·s).

Data la reciprocità tra frequenza e lunghezza d'onda l'energia assorbita viene definita (2)

$$E=hc/\lambda \quad (2)$$

λ : lunghezza d'onda,

c : velocità della luce ($2,998 \times 10^{10}$ cm/sec).

Per praticità nella spettroscopia viene spesso utilizzato il reciproco della lunghezza d'onda, ossia il numero d'onda $n=1/\lambda$ espresso in cm^{-1} (Allinger et al., 1981).

La regione dello spettro elettromagnetico di nostro interesse comprende radiazioni con numeri d'onda che vanno da 12800 a 10 cm^{-1} , lo spettro infrarosso (IR) viene spesso suddiviso in porzioni dette *vicino*, *medio* e *lontano* infrarosso (figura 8.8).

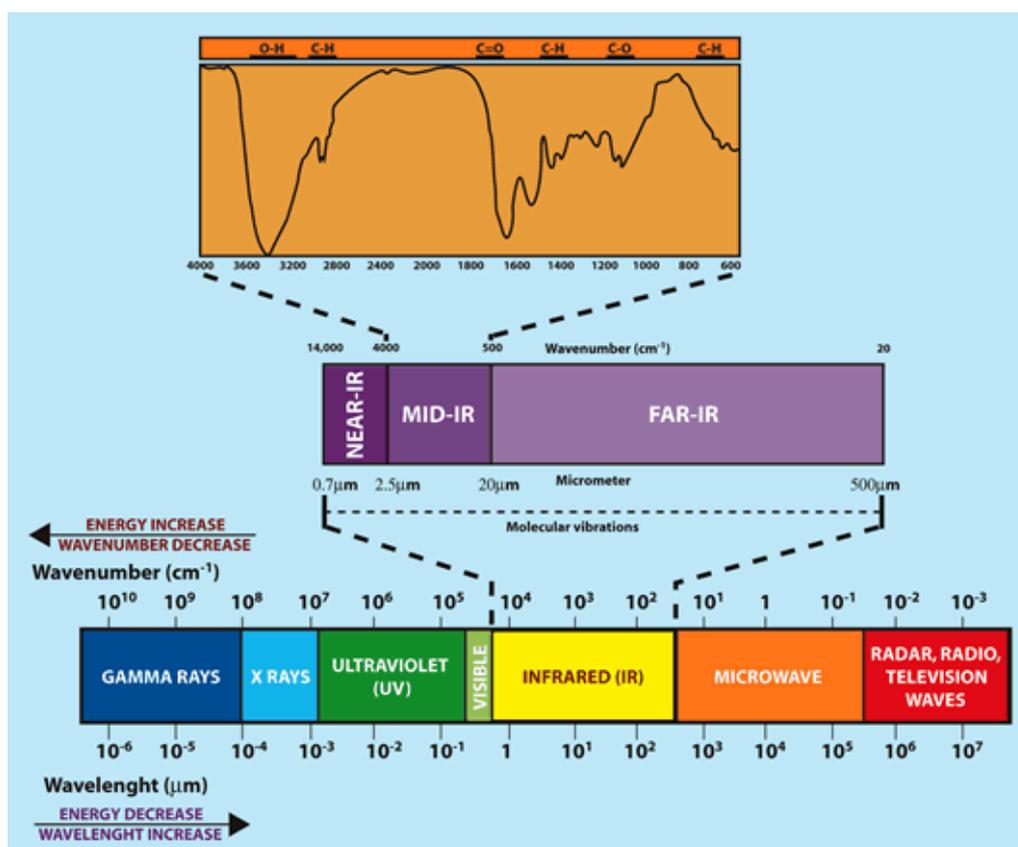


Figura 8.8: Regione spettrale della radiazione elettromagnetica con espansione della regione IR (Derrick et al., 1999).

L'applicazione principale e più caratteristica della spettroscopia infrarossa è l'identificazione dei composti (soprattutto organici) che nella regione dell'infrarosso forniscono spettri complessi e caratteristici, spesso con un'impronta digitale univoca che ne permette il riconoscimento.

Gli atomi delle molecole non hanno posizioni relative fisse, ma sono in continua fluttuazione a causa di molteplici tipi di vibrazioni, l'energia dell'IR corrisponde alle energie di tali moti.

Le vibrazioni possono essere suddivise in due categorie principali: stiramento (*stretching*) e deformazione (*bending*). Una vibrazione di stiramento implica il cambiamento della distanza interatomica tra atomi adiacenti, lungo l'asse di legame, si parla di stretching simmetrico quando si riscontra un allontanamento sincronizzato di due atomi, rispetto ad un terzo atomo che funge da ponte, si parla invece di stretching asimmetrico quando un atomo si avvicina e l'altro si allontana. La vibrazione di deformazione è caratterizzata dalla variazione dell'angolo di legame e può essere di quattro tipi, sia nel piano sia fuori piano: (i) deformazione a forbice nel piano (*scissoring*), (ii) oscillazione nel piano (*rocking*), (iii) ondeggiamento fuori piano (*wagging*) e (iv) torsione fuori piano (*twisting*), come mostrato in *figura 8.9* (Skoog e Leary, 2000).

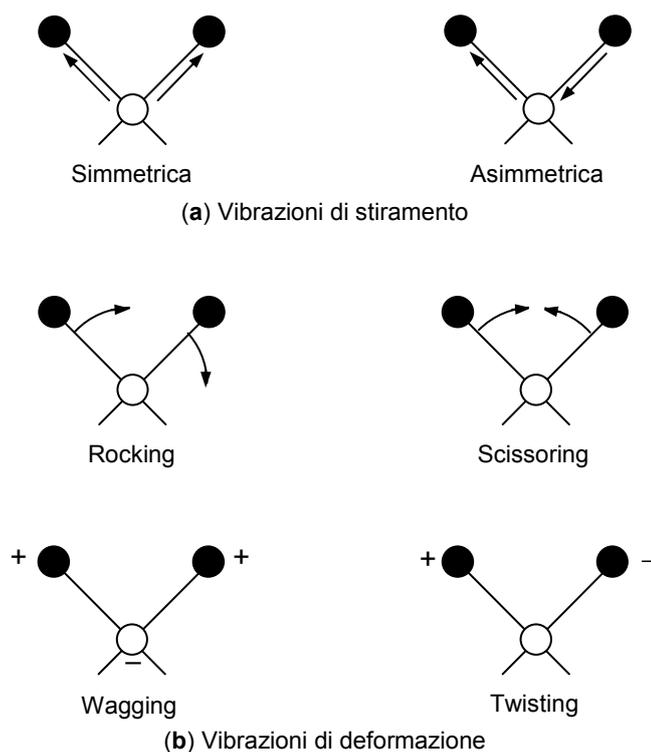


Figura 8.9: Tipi di vibrazione molecolari (Skoog e Leary, 2000).

In *figura 8.10* è riportato lo schema generale di uno spettrofotometro. La sorgente di radiazioni elettromagnetiche emette un raggio di riferimento ed uno incidente di uguale intensità, quest'ultimo interagisce con il campione, da cui emerge come raggio trasmesso. La

differenza tra l'intensità del raggio di riferimento e quello trasmesso è la quantità di radiazione assorbita dal campione. Negli spettri, le parti con trasmittanza prossima al 100%, indicano che le molecole sono trasparenti al raggio incidente. Quando invece avviene interazione tra raggio e materia non si ottengono linee nitide corrispondenti a precisi livelli di energia vibrazionale, ma bande di assorbimento, poiché i livelli energetici vibrazionali hanno molti livelli rotazionali associati. La molecola che ha assorbito la radiazione per eccitarsi agli stati più alti, quando torna al più basso stato energetico, rilascia l'energia principalmente come calore, nella regione infrarossa (Allinger et al., 1981).

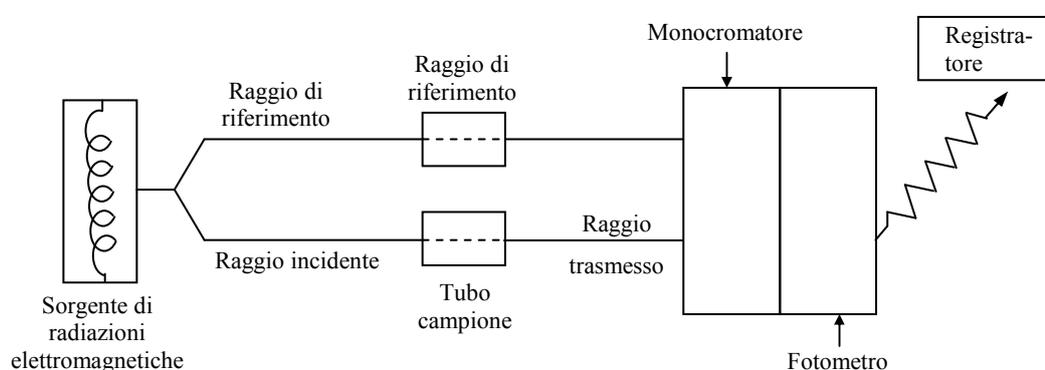


Figura 8.10: Schema di uno spettrofotometro (Allinger et al., 1981).

7.2.1 Metodologia di prova

Le analisi IR sono state effettuate utilizzando un microscopio Nicolet Continuum collegato allo spettrometro FT-IR Nicolet iS 10. Nelle misure sono state utilizzate la modalità in riflessione per i campioni di resina epossidica e la modalità ATR per i campioni di colla vinilica (con cristallo di germanio per attenuare il segnale). Gli spettri IR sono stati collezionati esaminando un range di frequenza compreso tra 4000 e 400 cm^{-1} , con una risoluzione spettrale di 2 cm^{-1} e sono elaborati con l'ausilio del software OMNIC.

I campioni di matrici analizzati per determinare un eventuale degrado chimico provengono per lo più dai provini a forma di "osso di cane" testati a trazione (cfr. §5.2), alcuni invece sono stati ricavati dai provini sottoposti a test di pull-off (cfr. §6.1).

La provenienza dei campioni analizzati è riportata in *tabella 8.3*.

Tabella 8.3: Provenienza dei campioni analizzati.

Spettro	Campione di provenienza		Spettro	Campione di provenienza	
	Matrice	Pull-off		Matrice	Pull-off
spettro_EP_F0_ATR	X		spettro_V_F0	X	
spettro_EP_F0	X		spettro_V_F1_40		X
spettro_EP_F1_40		X	spettro_V_F2	X	
spettro_EP_F2	X		spettro_V_F3_100	X	
spettro_EP_F3_100	X		spettro_V_F3_140		X
spettro_EP_F3_140	X		spettro_V_F4_40	X	
spettro_EP_F4_40	X				

7.2.2 Risultati

FFRP - fibra di lino e resina epossidica

La resina epossidica proveniente dai campioni rinforzati con FFRP è stata analizzata inizialmente in modalità ATR, ma la rigidità della matrice non ha permesso un soddisfacente contatto tra quest'ultima e la punta dello strumento, impedendo quindi l'acquisizione di spettri chiaramente leggibili, come si può osservare nella comparazione di due spettri ottenuti in modalità differenti (*figura 8.11*).

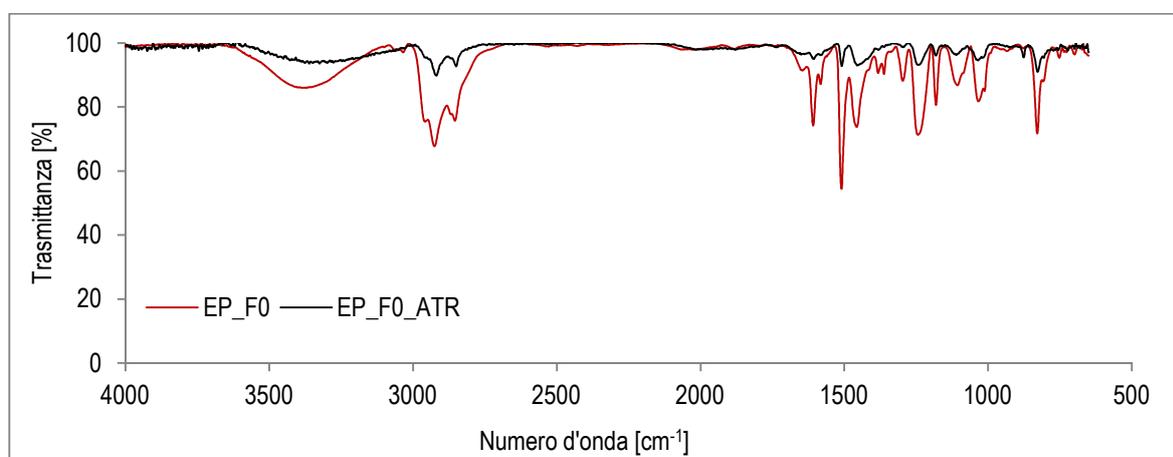


Figura 8.11: Comparazione di uno spettro acquisito in modalità ATR e in riflessione.

Le analisi sono state quindi effettuate in riflessione su un microprelievo, con un apposito strumento è stata raschiata una piccola porzione di resina epossidica, posta su un vetrino ed opportunamente distribuita. In *figura 8.12* si osserva un prelievo al microscopio.

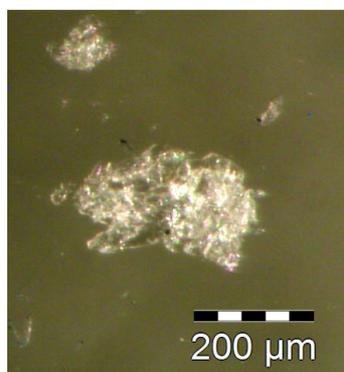


Figura 8.12: Microprelievo.

La struttura chimica base della resina epossidica, al netto di eventuali additivi tipicamente aggiunti è caratterizzata dalla presenza di specifici gruppi funzionali: (i) anelli epossidici, (ii) anelli benzenici 1,4 -disostituiti e infine (iii) i gruppi alifatici (cfr. §3.2.4).

Lo spettro della resina tal quale (ossia F0) è riportato in *figura 8.13*.

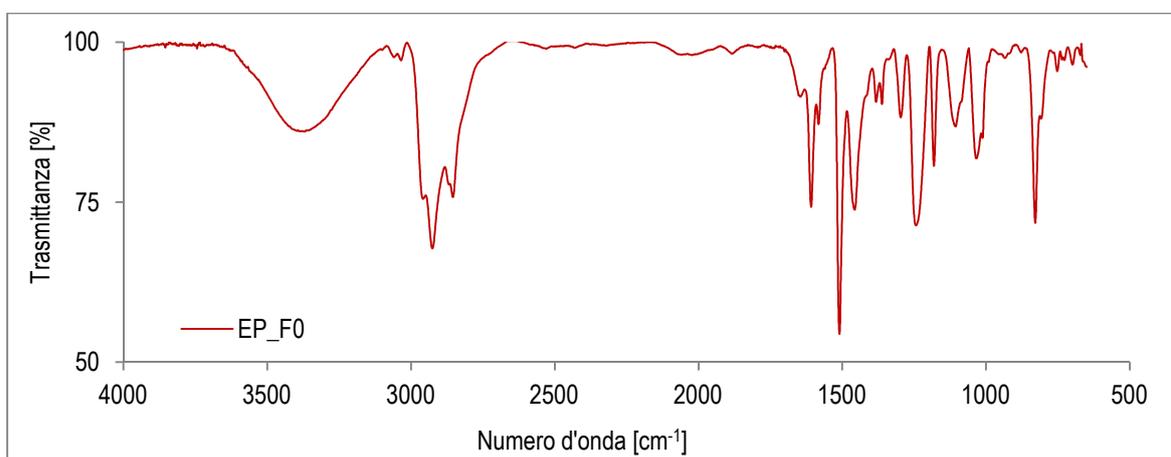


Figura 8.13: Spettro infrarosso EP_F0.

Gli anelli epossidici sono caratteristici di questo tipo di matrice e si distinguono per specifici modi vibrazionali: a 1245 cm⁻¹ è osservabile l'assorbimento dovuto allo stretching in fase dell'anello, detto anche "ring breathing". La deformazione simmetrica dell'anello si manifesta con l'assorbimento a 878 cm⁻¹, mentre quella asimmetrica produce bande nella regione 932-

883 cm^{-1} , in questo caso non particolarmente apprezzabili. Infine, lo stretching asimmetrico del CH_2 (3065-3038 cm^{-1}) produce un segnale coincidente con alcune bande prodotte dall'anello aromatico.

Gli anelli benzenici hanno decine di modi vibrazionali, ma non tutti sono visibili negli spettri IR, nel nostro caso sono infatti apprezzabili le bande dovute solo a quattro di essi.

Le bande sovrapposte a quelle dell'anello epossidico sono dovute agli stretching C–H e sono osservabili a 3061 e 3035 cm^{-1} . Gli assorbimenti a 1608 e 1582 cm^{-1} sono attribuibili agli stretching C–C e come avviene tipicamente la seconda banda è più debole della prima. Gli assorbimenti a 1181 e 1086 cm^{-1} sono prodotti dal bending C-H nel piano, mentre a 828 cm^{-1} da quello fuori piano.

La larga banda tra 1140 e 1085 cm^{-1} è caratteristica degli stretching asimmetrici C–O–C, ossia dei cosiddetti ossigeno-ponte che legano l'anello benzenico con quello epossidico.

Per quanto riguarda i gruppi alifatici abbiamo bande prodotte sia dai modi vibrazionali dei CH_3 che dei CH_2 . Per il gruppo metilico a 2961 e 2872 cm^{-1} si osservano le bande prodotte rispettivamente dallo stretching C–H asimmetrico e simmetrico, i bending asimmetrico e simmetrico sono segnalati dagli assorbimenti a 1456 e 1380 cm^{-1} . Gli stretching asimmetrico e simmetrico dei metileni sono osservabili a 2927 cm^{-1} il primo e a 2850 cm^{-1} il secondo (*Lin-Vien et al., 1991*).

Gli spettri della resina epossidica trattata sono stati comparati con quello della resina tale quale per determinare eventuali variazioni chimiche, la *figura 8.14* mostra i confronti.

Si può osservare come la resina epossidica sia molto stabile rispetto ai diversi condizionamenti. L'unica differenza evidente la si riscontra nello spettro relativo alla matrice riscaldata a 140 °C, dove è osservabile una banda a 1736 cm^{-1} . Questo segnale è tipico degli ione carbonile C=O, composto caratteristico dei processi di combustione.

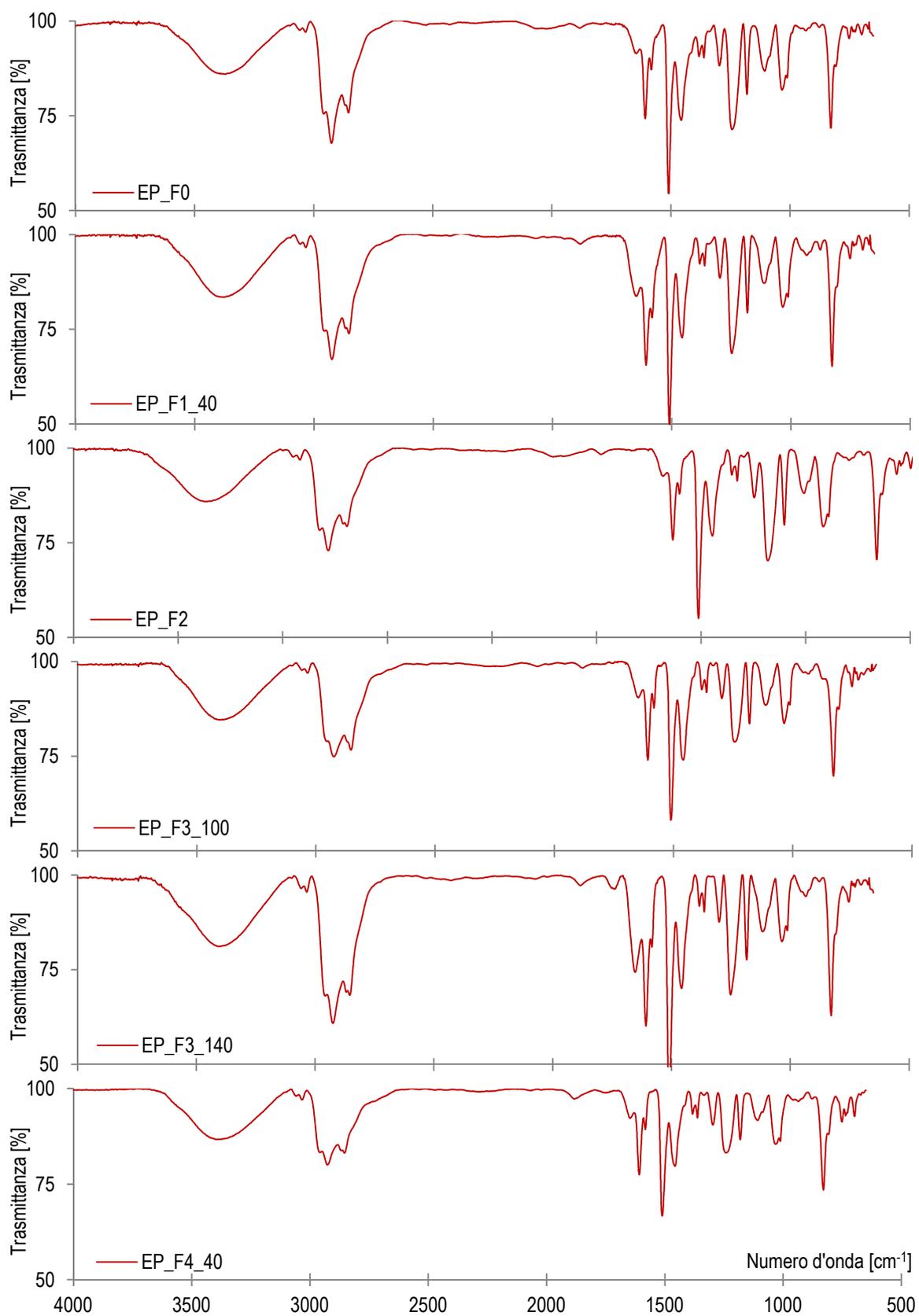


Figura 8.14: Confronto degli spettri di resina epossidica.

FFRP(V) – fibra di lino e colla vinilica

A differenza della resina epossidica, la colla vinilica è stata analizzata in modalità ATR e in *figura 8.15* è riportato lo spettro della matrice tal quale.

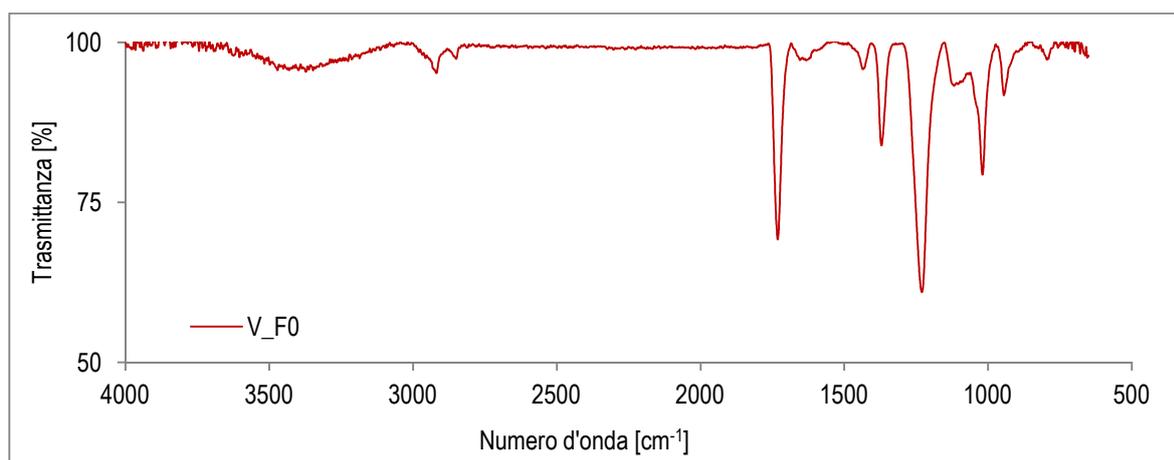


Figura 8.15: Spettro infrarosso V_F0.

I gruppi funzionali specifici di questa matrice sono (i) la catena polivinilica e (ii) il gruppo acetato (cfr. §3.2.5).

I C–H sono presenti sia nella catena principale che come metile del gruppo acetato e nello spettro sono osservabili 4 segnali ad essi imputabili. Le due deboli bande a 2918 e 2849 cm⁻¹ sono prodotte rispettivamente dagli stretching asimmetrici e simmetrici, più intense sono invece le bande dovute al bending asimmetrico e simmetrico riscontrabili a 1433 e 1371 cm⁻¹. L'ampio assorbimento a 1160-1060 cm⁻¹ è dovuto agli stretching C–C dello scheletro della catena polivinilica. Il carbonile C=O del gruppo acetato produce un segnale deciso a 1730 cm⁻¹ per via dello stretching.

L'intensa banda a 1231 cm⁻¹ è caratteristica dello stretching fuori fase dei C–O–C, ossia dei cosiddetti ossigeno-ponte che legano il gruppo acetato alla catena (*Derrick et al., 1999*).

Come per la resina epossidica, anche gli spettri dei campioni di colla vinilica trattata sono stati comparati con quello della colla tal quale e la *figura 8.16* mostra i confronti, non si ravvisano evidenti differenze tra gli spettri acquisiti, a dimostrazione di una stabilità chimica anche di questa matrice.

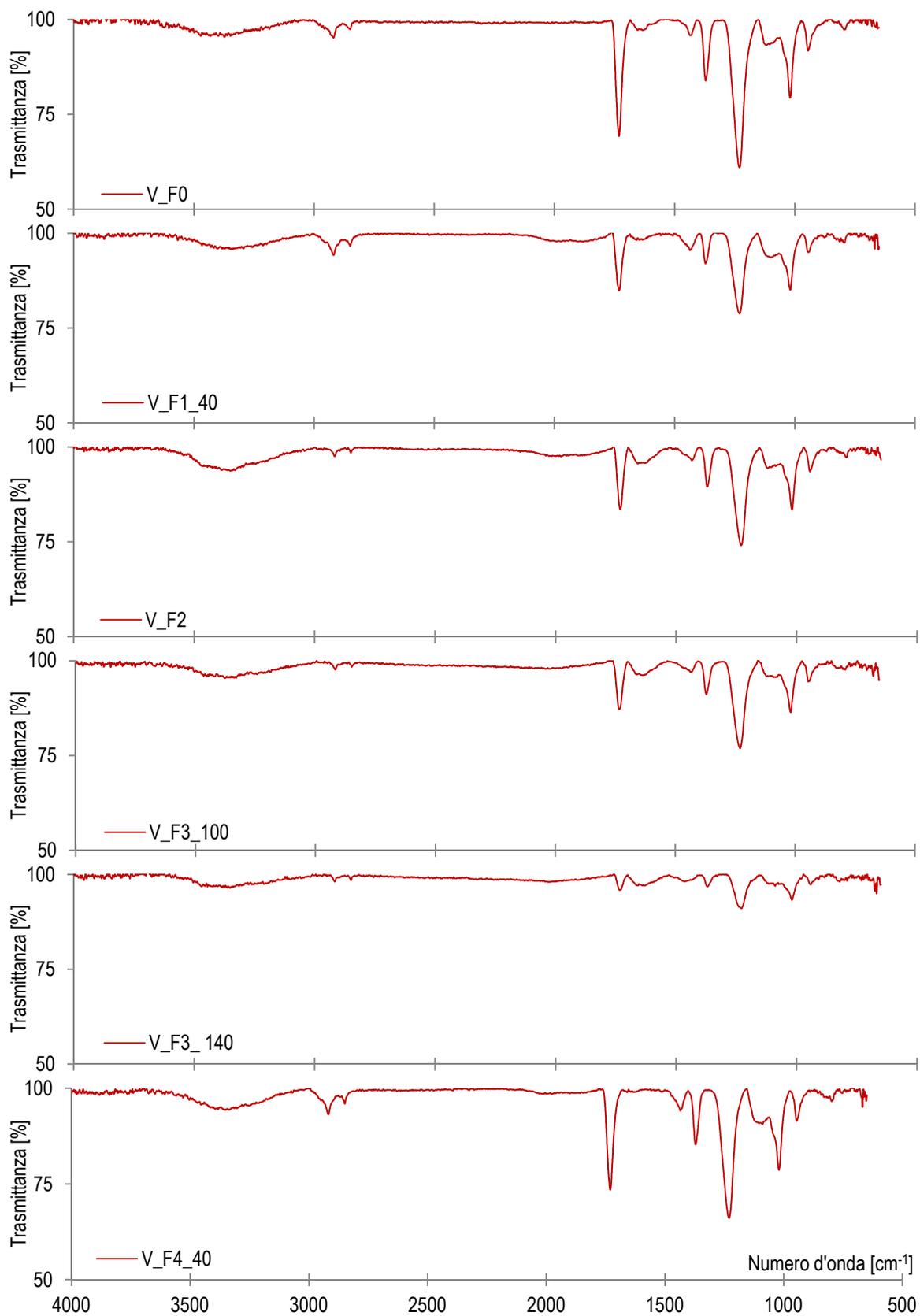


Figura 8.16: Confronto degli spettri di colla vinilica.

8.3 Termografia all'infrarosso

La termografia ha trovato applicazione nell'ambito delle prove non distruttive per i Beni Culturali sin dall'inizio degli anni '80 e a tutt'oggi viene frequentemente usata durante tutto il processo di conoscenza di un bene storico, a cominciare dalle acquisizioni preliminari alla redazione del progetto di conservazione, fino ad arrivare al controllo in fase di esecuzione dell'intervento e alla fase di manutenzione.

La termografia all'infrarosso è una tecnica d'indagine non distruttiva in grado di determinare la temperatura di una superficie attraverso la misura della radiazione infrarossa emessa da una superficie, con una sensibilità che può arrivare fino a pochi centesimi di grado. Il risultato è un'immagine in livelli di grigio o falsi colori; alla radianza di ogni pixel è associato il valore di temperatura corrispondente in quel punto del corpo (*Rosina, 2004*).

In questo lavoro di la tecnica termografica è stata utilizzata per il controllo dell'adesione di materiali compositi a matrice polimerica.

La prima parte della sperimentazione condotta presso il laboratorio ITC presso l'istituto CNR di Padova ha avuto lo scopo di mettere a punto di un metodo non distruttivo affidabile, capace di caratterizzare la qualità dell'adesione tra FRP e substrato in legno e da poter utilizzare anche al di fuori di un laboratorio attrezzato, con apparecchiature trasportabili e di semplice utilizzo.

Durante la seconda parte condotta presso il laboratori del Dipartimento ICEA, la metodologia è stata applicata al fine di osservare la comparsa di distacchi all'interfaccia causati dalle prove a flessione su travi fibrorinforzate (cfr. §7).

8.3.1 Metodologia di prova

Il metodo termografico

Le caratteristiche termiche dei materiali sono comunque indicative delle loro caratteristiche meccaniche e fisiche e, pertanto, la valutazione della distribuzione superficiale della temperatura permette di trarre indicazioni fondamentali sullo stato generale di conservazione del materiale.

I risultati sono immagini immediatamente leggibili, ossia non occorre elaborazione per rilasciare un primo livello di informazione; richiedono solo un colpo d'occhio per individuare le aree di discontinuità termica. Il principale vantaggio dell'analisi termografica è quindi la lettura in tempo reale della distribuzione dell'anomalia, ricercata su più zone contemporaneamente.

Data la totale non invasività della prova, è possibile ripetere le misure nel tempo, verificando i mutamenti al cambiare delle condizioni ambientali e monitorando così l'evoluzione del degrado. Le informazioni ottenute permettono inoltre di limitare il numero dei saggi distruttivi ai punti realmente rappresentativi per la formulazione del quadro diagnostico generale. Poiché la misura avviene in tempo reale, la rapidità d'esecuzione della prova infine consente l'indagine di vaste aree in poco tempo.

I limiti intrinseci sono essenzialmente legati al carattere superficiale dell'indagine, alle condizioni transitorie in cui appaiono le anomalie ricercate e alle informazioni di tipo qualitativo che si ricavano. I materiali edili hanno inoltre caratteristiche termiche poco adatte a diffondere velocemente ed efficacemente il calore e quindi le difficoltà si incontrano nell'applicare una stimolazione termica che si propaghi all'interno della struttura. Anche le irregolarità della superficie, come differenze di colore, di materiale, dello stato di conservazione, ecc. possono causare un assorbimento non omogeneo e perciò alterano la temperatura della superficie, mascherando le discontinuità termiche dovute alle anomalie interne alla struttura.

Poiché il rilievo delle temperature superficiali è influenzato da fattori ambientali, quali le condizioni climatiche, di orientazione delle superfici da indagare, risulta indispensabile conoscere i principi basilari di trasporto del calore e delle proprietà termiche dei materiali per poter prevedere gli effetti delle condizioni al contorno sulle anomalie che si intende individuare (*Rosina, 2004*).

Sistemi di trasferimento del calore

Il meccanismo che sta alla base dell'indagine termografica è la rilevazione delle radiazioni infrarosse che ogni corpo con temperatura superiore allo zero assoluto emette. Fondamentale per applicare correttamente tale tecnica è conoscere le modalità di trasferimento del calore. Questo scambio avviene infatti tra oggetti a temperatura diversa oppure all'interno di un unico corpo, sino a quando viene raggiunto l'equilibrio termico e cioè quando le differenze di temperatura degli oggetti immersi nello stesso mezzo o di parti dello stesso oggetto diminuiscono fino a scomparire.

L'energia termica si trasferisce quindi, a seguito di gradienti termici spaziali e temporali, con tre modalità differenti denominate: conduzione, convezione e irraggiamento.

(i) La conduzione è la propagazione dell'energia termica connessa con i moti vibrazionali degli atomi. Essa si sviluppa a seguito di una differenza di temperatura tra due corpi posti a contatto fra loro oppure tra parti contigue di uno stesso oggetto. La conducibilità o conduttività è una proprietà del materiale che quantifica la facilità con cui esso trasmette il calore per conduzione. Il rapporto tra lo spessore e la conducibilità rappresenta la resistenza termica costituita da uno strato di un certo materiale. Più bassa è la conduttività termica e maggiore è la resistenza offerta al trasferimento del calore, viceversa la resistenza aumenta di pari passo con lo spessore dello strato.

(ii) La convezione implica il movimento di massa di molecole di un fluido, come aria o acqua, che sono in contatto con un solido a temperatura diversa.

(iii) L'irraggiamento è un processo di trasferimento di calore che può avvenire a grandi distanze attraverso gas o nel vuoto, senza che intervengano conduzione e convezione. La materia, allo stato solido, liquido o gassoso, emette radiazioni elettromagnetiche, che trasportano energia, se gli atomi o le molecole cambiano la loro configurazione. Tali onde, propagandosi nel vuoto, non sono minimamente attenuate. La luce del sole costituisce l'esempio più palpabile di scambio radiativo. La termografia si basa sulla rilevazione e quantificazione del flusso termico irradiato dai corpi. I tre modi di scambio possono convivere contemporaneamente (*Rosina, 2004*).

L'apparecchiatura termografica

Le termocamere producono senza contatto mappe termiche bidimensionali chiamate termogrammi. La termografia, essendo una tecnica ottica, è impiegata per la sua rapidità, per l'elevato contenuto informativo e per la non pericolosità e il non danneggiamento degli elementi soggetti ad analisi. La recente evoluzione tecnica dei sistemi termografici, con il miglioramento delle caratteristiche funzionali, è accompagnata poi dall'incremento del numero di produttori, con una conseguente riduzione dei costi.

L'apparecchiatura infrarossa comprende un rilevatore dotato di gruppo ottico, fisso o intercambiabile, e può essere equipaggiata con un elemento di preelaborazione e di visualizzazione delle immagini. I moderni sistemi contengono inoltre memorie di massa digitale per la registrazione dei dati.

Le caratteristiche fondamentali di un sistema termografico sono: banda spettrale, cioè la regione dell'infrarosso di sensibilità. Alcune finestre utilizzate sono la banda SW, 3-5 μm , e la

banda LW, 8-13 μm ; risoluzione termica, ossia la sensibilità dello strumento; frequenza di campionamento ed elaborazione, cioè la rapidità nella produzione ed elaborazione dei termogrammi; il rumore prodotto dalla sola apparecchiatura; risoluzione spaziale, critica nella rilevazione dei dettagli e nelle riprese a grande distanza; campo di vista e disponibilità di ottiche intercambiabili; sistema di raffreddamento, che consente di ridurre notevolmente il rumore del sensore, ma incrementa i costi e la complessità della termo camera; ergonomia ed autonomia della strumento, caratteristiche importanti per le indagini in sito; connettività e software di gestione per trasferire rapidamente i dati ad un elaboratore ed eseguire in linea le prime elaborazioni di base.

Di grande importanza nel campo delle prove termografiche sono anche i specifici programmi per l'elaborazione digitale delle immagini, i cui due principali scopi sono: l'implementazione automatica degli algoritmi di identificazione e caratterizzazione delle discontinuità; la riduzione del rumore attraverso un processo di filtraggio che può essere eseguito sia nel dominio dello spazio che del tempo (Rosina, 2004).

Procedure d'indagine

L'impiego della termografia può essere fatto seguendo due approcci diversi:

(i) passivo: quando i materiali generano spontaneamente calore o si trovano sottoposti ad un flusso termico naturale, come ad esempio il riscaldamento solare. Questo metodo non richiede l'utilizzo di sorgenti di calore artificiali ed è utilizzato generalmente in modo qualitativo, per individuare le anomalie. Approccio semplice e conveniente, ma che può essere inficiato dalle variazioni imprevedibili delle condizioni ambientali, che possono quindi complicare i processi naturali alla base delle differenze di temperatura superficiale.

(ii) attivo: i materiali devono essere sollecitati artificialmente con apposite sorgenti termiche. Con tale tecnica è possibile non solo identificare le anomalie, ma anche caratterizzarle quantitativamente.

Un'ulteriore distinzione si fa tra le tecniche statiche e le tecniche dinamiche:

(i) tecniche statiche (regime stazionario): il flusso termico che agisce sull'oggetto non varia nel tempo;

(ii) tecniche dinamiche (regime transitorio): la prova viene condotta in condizioni termiche transitorie e il flusso che agisce sull'oggetto viene studiato nel dominio nel tempo.

Quest'ultimo metodo, anche se si presenta più complesso ed è meno produttivo in termini di tempo, tuttavia possiede una maggiore capacità ispettiva.

Tali procedure possono essere applicate anche con diverse configurazioni:

(i) bilaterale: l'oggetto viene frapposto tra la sorgente termica e l'apparato di misura; il flusso analizzato è quello trasmesso dal materiale. Tecnica chiamata anche "per trasmissione".

(ii) monolaterale: l'apparato termico è posto sullo stesso lato della superficie che viene sollecitata dallo stimolo termico. Tale tipologia è detta anche "per riflessione" ed è quella utilizzata maggiormente nei test non distruttivi.

In generale la superiorità di un metodo rispetto ad un altro dipende dalla capacità di indicare i difetti minimizzando il rumore di fondo (*Trentin, 2006*).

8.3.2 Preparazione dei campioni

I materiali oggetto di studio sono:

- (i) campioni in legno di abete delle dimensioni 30x14x12cm
- (ii) fibra di carbonio (CFRP) applicata con resina epossidica
- (iii) fibra di vetro (GFRP) applicata con resina epossidica
- (iv) fibra di aramide (AFRP) applicata con resina epossidica
- (v) fibra di lino applicata con resina epossidica
- (vi) fibra di lino applicata con colla vinilica

La resina epossidica e le fibre di vetro, aramide e lino utilizzate sono prodotte da Fidia srl, mentre la fibra di carbonio è fornita da BASF Chemical Company.

I campioni sono stati preparati secondo due configurazioni:

Configurazione 1

I difetti artificiali introdotti sono costituiti da una cavità di forma circolare, larga 2 cm e profonda 1 cm e due strisce di Teflon®, di 1 cm di larghezza, di cui una a nastro singolo e una a nastro doppio (*figura 8.17*).

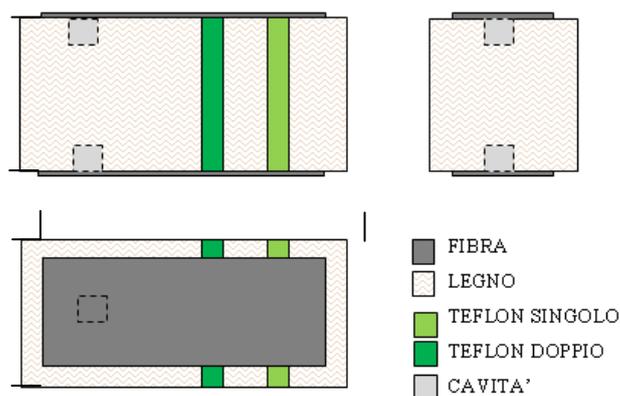




Figura 8.17: Configurazione 1.

Con tale configurazione sono stati preparati 5 campioni ognuno rinforzato con CFRP, GFRP, FFRP, FFRP(V) e AFRP (composito con fibra di arammide)

Configurazione 2

per simulare una situazione di umidità elevata e confinata in prossimità della superficie, sono state scavate tre cavità rettangolari con profondità di alcuni mm sul lato superiore dei campioni per adagiarvi successivamente un quadrato di garza in cotone idrofilo, imbevuta d'acqua (figura 8.18). Tali cavità sono state quindi sigillate mediante del comune nastro adesivo prima dell'applicazione del materiale composito.

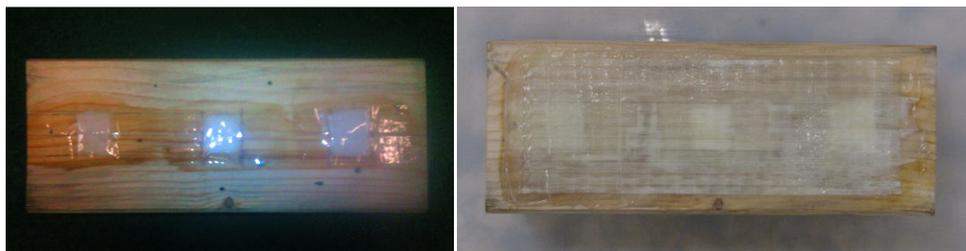
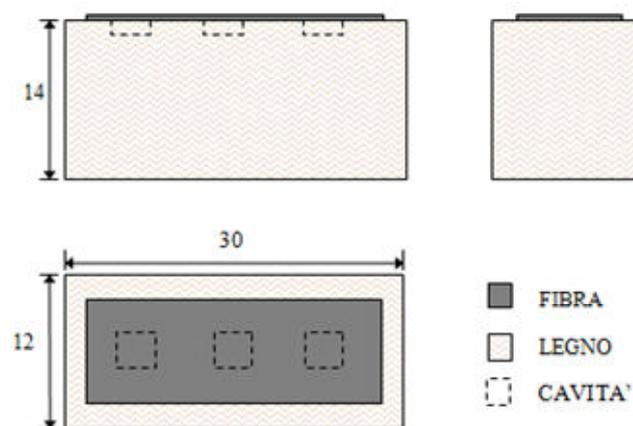


Figura 8.18: Configurazione 2.

Sono stati preparati campioni con il medesimo rinforzo della configurazione 1.

Prima di effettuare l'analisi termografica, tutti i campioni preparati secondo le due configurazioni sono stati verniciati di nero mediante una semplice bomboletta spray (figura 8.19), sulla faccia superiore, così da agevolare l'assorbimento delle radiazioni infrarosse prodotte dalle lampade o dai flash ed attenuarne invece la riflessione.

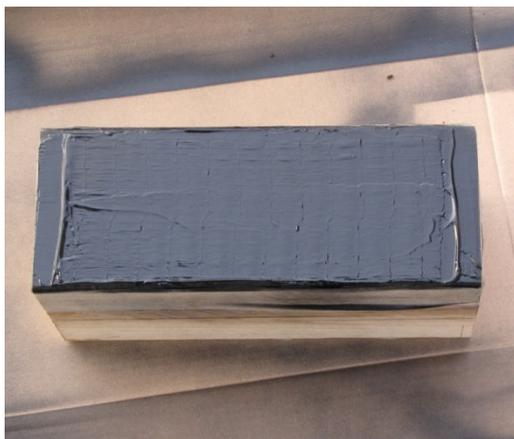


Figura 8.19: Campione verniciato.

8.3.3 Programma sperimentale

Le prove termografiche sui 10 campioni corredati da difetti artificiali sono state realizzate in condizioni termo-igrometriche al contorno costanti e controllate. I risultati ottenuti da questa tecnica sono le immagini in temperatura dei provini.

Per i primi 5 campioni analizzati, preparati secondo la configurazione 1, la sollecitazione termica, di tipo impulsato, è stata ottenuta mediante due lampade da 1000 W (Fig.5.11). Le immagini termiche sono state acquisite ad una frequenza di 1 Hz per un tempo totale di 60 secondi (acquisizione di un'immagine al secondo), mediante la termocamera FLIR sc3000, avente le seguenti caratteristiche: sensibilità nell'intervallo spettrale 8 – 9,6 μm ; frequenza di formazione dei termogrammi, a formato pieno, pari a 50 Hz; possibilità di aumentare la massima frequenza di acquisizione fino a 750 Hz riducendo la dimensione dell'immagine; risoluzione termica 30 mK a 20°C; modalità *snapshot* di acquisizione delle immagini, cioè non si generano sfasamenti temporali tra i pixel costituenti ogni singola immagine termografica, nelle diverse fasi di acquisizione dei dati.



Figura 8.20: Strumentazione utilizzata.

La modalità di acquisizione adottata è stata la seguente per la configurazione 1:

- 1 sec lampade spente;
- 5 sec lampade accese;
- 54 sec lampade spente.

Per ogni tipo di campione si riporta di seguito l'ultimo termogramma della sequenza registrata, oltre alle immagini più significative relative alle elaborazioni eseguite.

La scala sulla destra delle immagini rappresenta i valori di temperatura in gradi Celsius. Per quanto riguarda, invece, le immagini ricavate mediante algoritmi di elaborazione la scala dei valori rappresenta dei livelli ed è espressa in unità arbitrarie [u.a.].

Per quanto riguarda i 5 campioni preparati secondo la configurazione numero 2, sono state adottate due diverse modalità di sollecitazione termica: una di tipo impulsato, mediante due lampade da 1000 W, e una di tipo prolungato, mediante un flusso di aria calda prodotto da un phon. Per quanto riguarda la prima modalità, si è seguita la seguente procedura di acquisizione:

- 1 sec a lampade spente;
- 5 sec a lampade accese;
- 54 sec a lampade spente.

Per quanto riguarda la seconda modalità, invece, il tempo di acquisizione è stato prolungato a 180 sec, i quali sono stati così suddivisi:

- 1 sec a phon spento;
- 10 sec a phon acceso;
- 2 min e 47 sec a phon acceso.

8.3.4 Risultati

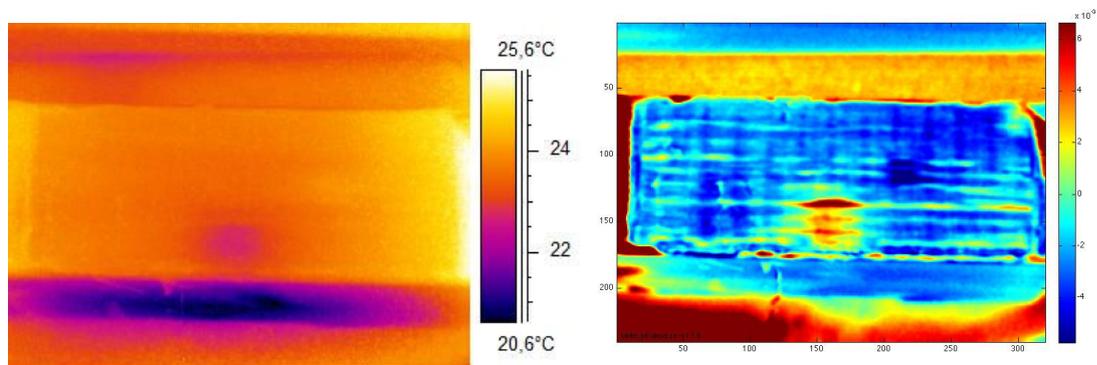


Figura 8.21: Campione Rinforzato con CFRP – configurazione 1.

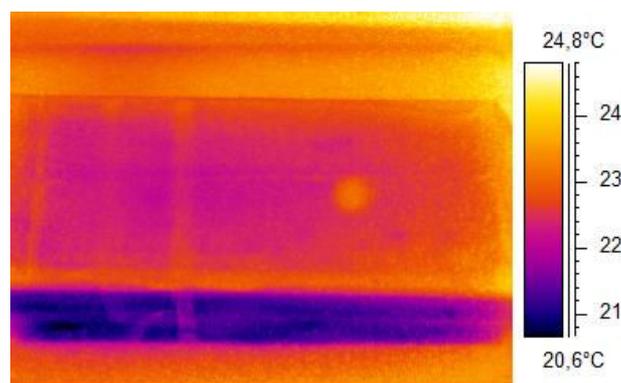


Figura 8.22: Campione Rinforzato con GFRP – configurazione 1.

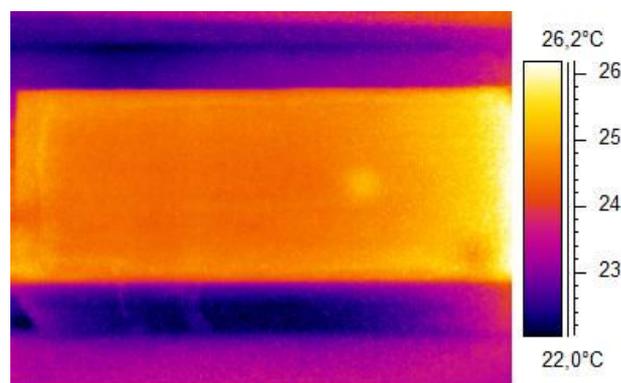


Figura 8.23: Campione Rinforzato con AFRP – configurazione 1.

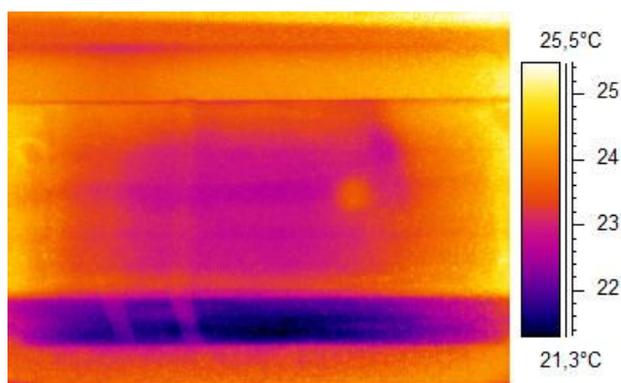


Figura 8.24: Campione Rinforzato con FFRP – configurazione 1.

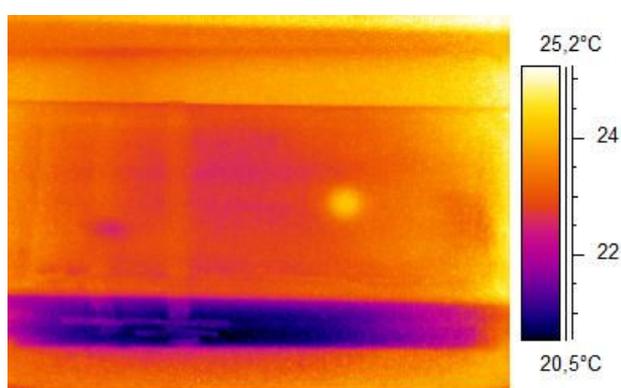


Figura 8.25: Campione Rinforzato con FFRP(V) – configurazione 1.

Da un veloce confronto delle immagini in temperatura relative ai diversi campioni, è possibile osservare come tutti i difetti artificiali introdotti siano messi perfettamente in evidenza, senza dover ricorrere ad una successiva analisi mediante gli algoritmi di elaborazione (figure 8.21-8.25). Anche i difetti naturali, quali i nodi del legno, sono individuati chiaramente questi però, a differenza del nastro di Teflon® e della cavità circolare, appaiono come macchie più scure, in quanto, assorbendo meno energia, si mantengono a valori di temperatura più bassi.

Unico ricorso alla PCA è stato fatto nel caso del campione rinforzato con fibra di carbonio, in cui i difetti sono appena visibili; il segnale termico dovuto ai difetti è cioè molto debole. Qui è possibile notare la presenza di un grande nodo centrale, oltre alla cavità prodotta artificialmente sulla destra della superficie. Per quanto riguarda i nastri di Teflon®, risulta ancora difficile il loro riconoscimento.

Di seguito si mettono a confronto, per ciascun tipo di campione, le ultime immagini in temperatura delle due diverse sequenze temporali acquisite, più alcune immagini significative relative alle elaborazioni eseguite.

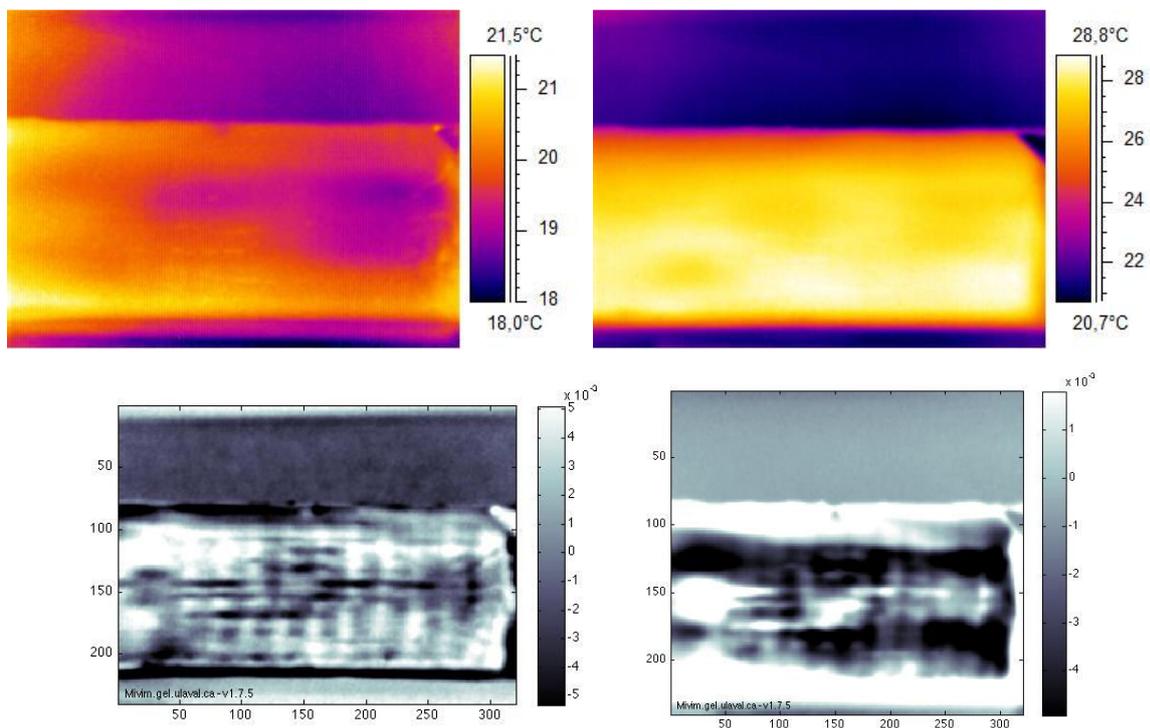


Figura 8.26: Campione Rinforzato con CFRP – configurazione 2.

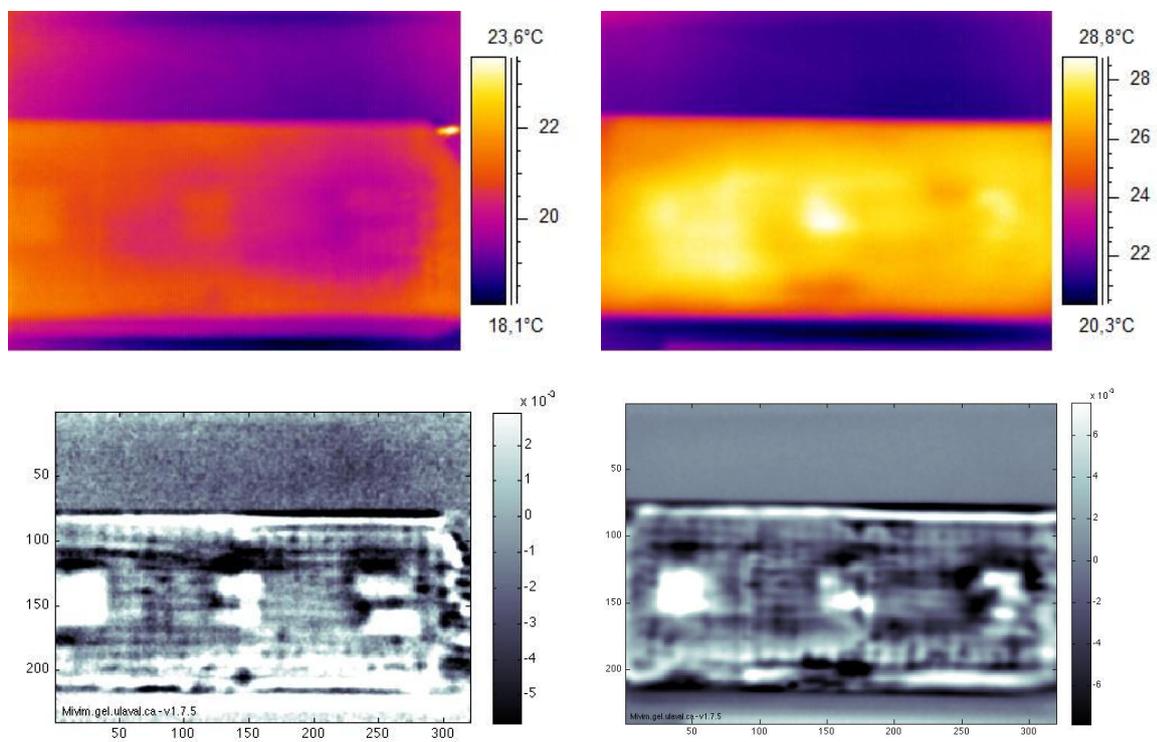


Figura 8.27: Campione Rinforzato con GFRP – configurazione 2.

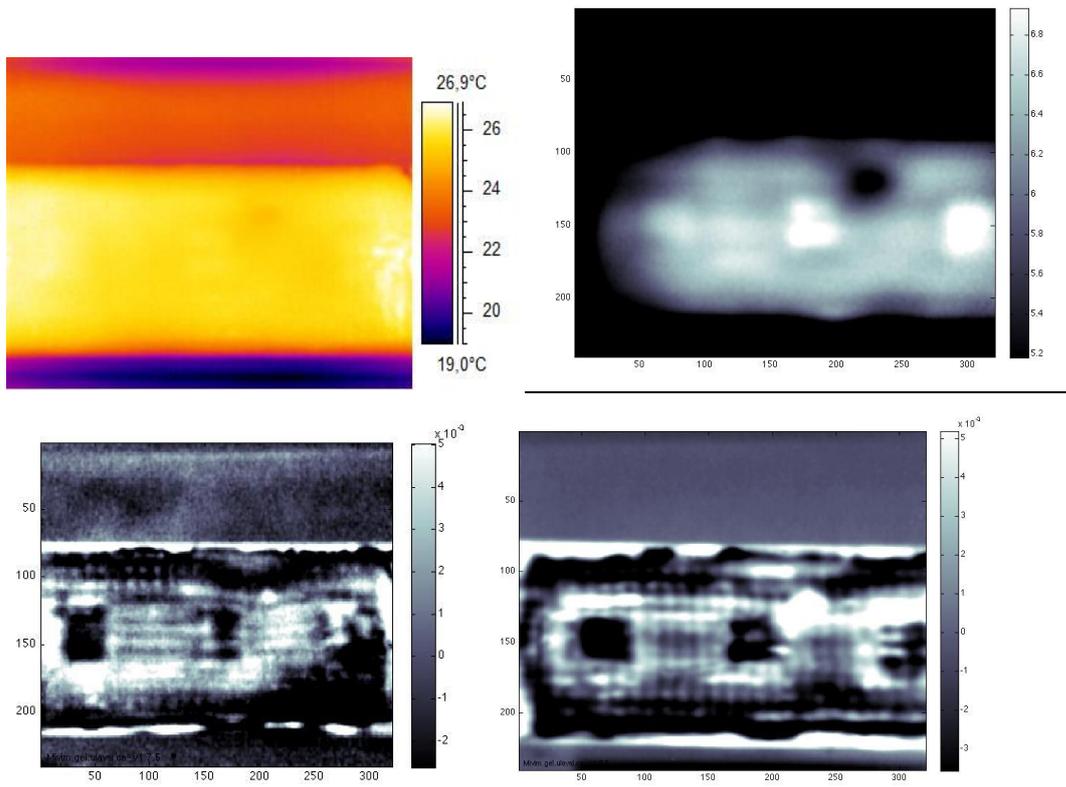


Figura 8.28: Campione Rinforzato con AFRP – configurazione 2.

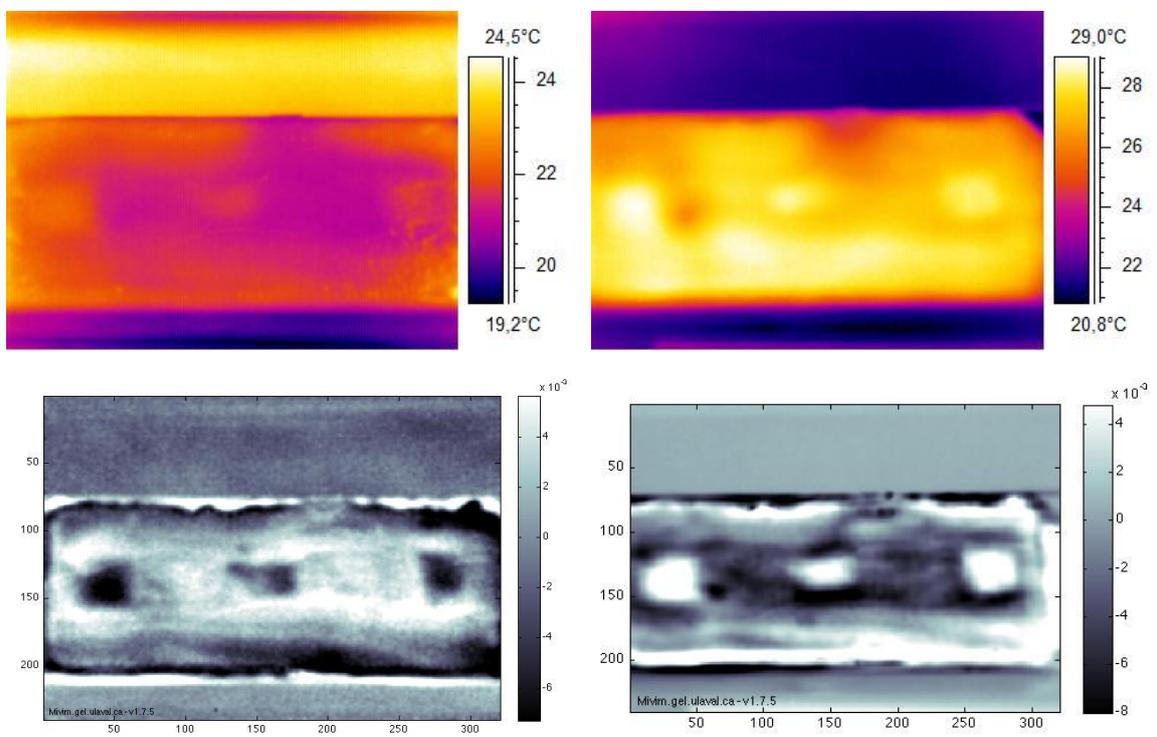


Figura 8.29: Campione Rinforzato con FFRP – configurazione 2.

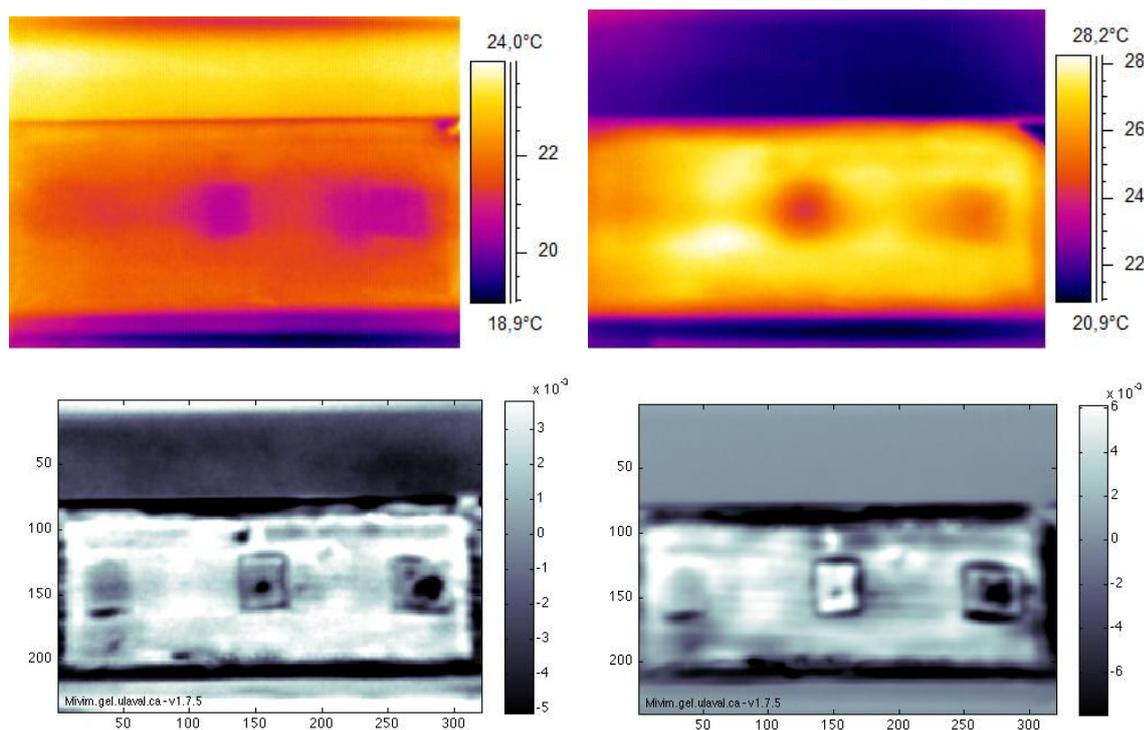


Figura 8.30: Campione Rinforzato con FFRP(V) – configurazione 2.

Come per i 5 campioni preparati secondo la configurazione 1, l'analisi termografica effettuata sui provini con umidità confinata ha dato risultati positivi (*figure 8.26-8.30*), ossia ha portato alla luce, anche se in maniera tenue, i difetti, artificiali e non, presenti sulla superficie del legno e cioè sottostanti lo strato di materiale composito. Unica eccezione è rappresentata dal campione rinforzato con fibra di carbonio, per il quale la sola analisi delle immagini in temperatura non è risultata sufficiente per osservare le tre cavità presenti e quindi si è dovuto necessariamente procedere ad elaborazione mediante PCA.

Tale metodo, usato generalmente per aumentare dal punto di vista qualitativo il segnale termico dovuto alle fessurazioni e per determinare dal punto di vista quantitativo la profondità dei difetti, si dimostra molto efficace; le immagini elaborate mediante questo algoritmo permettono infatti di osservare con molta chiarezza le tre cavità presenti sulla superficie dei campioni e ne mettono perfettamente a risalto i bordi.

Conclusioni

In questo capitolo sono illustrate le osservazioni conclusive ricavate dalla ricerca effettuata per approfondire specifici aspetti nell'utilizzo di materiali compositi con fibre naturali.

L'adozione dei materiali compositi fibrorinforzati per il consolidamento di elementi in legno è stata caratterizzata da un ritardo rispetto ad altri materiali costruttivi, per tale motivo gli interrogativi sulla possibilità di un efficace accoppiamento tra FRP e legno necessita di costante approfondimento. In particolare l'introduzione di prodotti innovativi, come le fibre di origine naturale ha posto nuove domande riguardo sia alla loro compatibilità con il legno, sia alla loro durabilità in un intervento di rinforzo.

Partendo da tali considerazioni, il presente lavoro si è proposto di approfondire alcuni aspetti di quest'ampio settore di ricerca, focalizzando l'attenzione sull'analisi di fenomeni fondamentali quali l'aderenza fibra-matrice e composito-legno e la durabilità e compatibilità dei materiali compositi naturali proposti.

In particolar modo si è cercato di comprendere quali siano i limiti applicativi dei materiali compositi naturali selezionati ed i requisiti che deve avere il legno affinché sia efficace un intervento con questi prodotti. Sono state altresì analizzate le condizioni ambientali in cui è garantito il perdurare dell'intervento di rinforzo con i materiali compositi naturali e quali invece ne causano un rapido degrado, il tutto mirato a determinare se di fatto i materiali compositi naturali rappresentano una valida alternativa a quelli tradizionali.

La ricerca sin qui condotta oltre ad aver gettato le basi per la comprensione delle criticità e la valutazione delle potenzialità dei materiali compositi naturali, ha posto nuovi interrogativi, evidenziando la necessità di esplorare ulteriori aspetti di questa tematica, attraverso nuove ricerche sperimentali.

Le prove di caratterizzazione sui singoli costituenti (fibra e matrici) del sistema di rinforzo anticipano le diversità e criticità dei due materiali compositi con fibra di lino che si differenziano per il tipo di matrice utilizzata. In particolar modo le prove di trazione assiale sulle matrici mette in luce le marcate differenze tra i due prodotti. La resina epossidica ha raggiunto una tensione massima pari a 19 N/mm^2 ed una corrispondente deformazione media del 5,5%, la rottura intervenuta è stata immediata e di tipo fragile. La colla vinilica ha invece subito un allungamento prossimo al 350%, tanto che il test è stato sospeso per il raggiungimento dei limiti della macchina di prova, la resistenza massima raggiunta di 2 N/mm^2 risulta pertanto quasi nulla, soprattutto se confrontata con quella della resina epossidica.

Poiché uno degli obiettivi della tesi è quello di determinare la durabilità degli interventi di rinforzo con i materiali oggetto di studio è necessario valutare quali siano le condizioni maggiormente critiche per i singoli costituenti, che presumibilmente avranno effetti anche sul composito da essi derivato. A tale scopo sia le matrici che i materiali compositi con esse prodotti sono stati sottoposti a specifici condizionamenti in cui sono state variate temperatura ed umidità ambientali.

I campioni di resina epossidica condizionati hanno mostrato una generalizzata sensibilità ai trattamenti, dai valori di tensione e deformazione appare chiaro che essi subiscono gli effetti dei condizionamenti in termini di deformazione. Si è osservato un irrigidimento della resina, soprattutto in condizioni di elevata temperatura ($140 \text{ }^\circ\text{C}$) che ha causato una capacità di deformazione inferiore dell'88% rispetto ai campioni tal quali, tale irrigidimento però non corrisponde ad un relativo calo prestazionale in termini di valori di tensione.

I campioni di colla vinilica condizionati acquistano rigidità e resistenza, divenendo però maggiormente fragili e perdendo la loro peculiare deformabilità, caratteristica che differenzia sostanzialmente la colla vinilica dalla resina epossidica.

I test di trazione assiale su strisce di materiale composito hanno permesso di: (i) confrontare le proprietà meccaniche di FFRP e FFRP(V) con quelle del più tradizionale CFRP; (ii) determinare l'influenza di critiche condizioni ambientali sulla resistenza meccanica dei compositi naturali; (iii) stabilire la possibilità di produrre campioni multistrato in cui l'incremento dello spessore non pregiudichi la resistenza del composito.

Le prove sui compositi FFRP e FFRP(V) confermano le marcate differenze che le matrici epossidica e vinilica producono sugli FRP, infatti la resistenza media del primo materiale (436 N/mm²) risulta superiore di oltre il 40% rispetto a quella del secondo (297 N/mm²), sebbene entrambi forniscano resistenze di rottura ben lontane da quelle di CFRP (1935 N/mm²). Anche la deformabilità risente della matrice utilizzata ma anche e soprattutto della fibra, infatti le $\epsilon_{\sigma max}$ di FFRP(V), FFRP e CFRP sono pari a 5,5 - 2,4 e 0,6% rispettivamente. Un tale risultato sottolinea come gli FRP tradizionalmente utilizzati propongano prestazioni meccaniche non riscontrabili tra quelli innovativi.

Per quanto concerne la durabilità dei sistemi di rinforzo rispetto a condizioni ambientali spinte, i provini di FFRP ricalcano quanto già evinto nelle prove sulle matrici. La resina epossidica risulta resistente alle variazioni di temperatura e umidità, subendo solo un irrigidimento. Similarmente anche il tessuto impregnato subisce una diminuzione della deformazione a trazione, pur non patendo un calo delle prestazioni meccaniche. FFRP(V) non risulta altrettanto resistente, è suscettibile alle variazioni di temperatura e umidità, in particolare le alte temperature costituiscono un serio problema per questo tipo di composito (con un calo prestazionale rispettivamente del 60 e dell'80% per temperature pari a 100 e 140 °C).

La preparazione di campioni multistrato può comportare l'introduzione di un numero maggiore di difetti e di conseguenza l'aumento di punti di debolezza rispetto ai campioni costituiti da un unico strato di fibra. I test effettuati evidenziano come FFRP e FFRP(V) non subiscano gli effetti negativi di un aumento dello spessore, infatti non si sono verificate rotture premature.

Circoscritte le condizioni che causano un calo prestazionale dei materiali compositi è stato considerato opportuno valutare anche quanto essi siano compatibili con il legno, ossia se l'incollaggio rinforzo-supporto sia efficace ed anche quali condizioni ambientali e dell'elemento ligneo possono avere effetti sull'aderenza supporto-rinforzo, fenomeno che primariamente determina la riuscita o meno di un intervento.

L'adesione è stata quindi analizzata mediante prove di trazione perpendicolare alla fibra (test di pull-off) e di taglio (shear test).

Il test di pull-off, attraverso l'analisi delle resistenze massime ottenute e delle modalità di rottura intervenute permette sia di determinare quali materiali risultino maggiormente compatibili con il legno, sia quali siano le condizioni ambientali e del legno che garantiscono il perdurare dell'intervento di rinforzo. Tali prove sono semplici ed immediate, per questo sono state utilizzate in maniera estensiva, ma trattandosi di prove puntuali, risentono di fattori

intrinseci al legno come la presenza o meno di difetti, la densità e la direzione della fibratura. Per riuscire a focalizzarsi solo sul fenomeno di aderenza sono state condotte parallelamente delle prove di taglio, le quali risentono meno delle caratteristiche proprie del legno, poiché il risultato dipende principalmente dalle condizioni all'interfaccia.

Dai risultati dei test di pull-off emerge una buona compatibilità dei materiali naturali con il legno, superiore a quella mostrata dai materiali tradizionali. L'analisi delle modalità di rottura permette di mettere in luce come la natura della matrice determini comportamenti e sensibilità diversi nei materiali compositi analizzati. L'utilizzo della matrice vinilica riduce nettamente gli effetti negativi di un intervento su legno umido, che invece risulta essere problematico nel caso si utilizzi la matrice epossidica (indipendentemente dalla fibra). Appaiono confermate sia dalle modalità di rottura che dalle resistenze massime misurate, le criticità dei compositi a matrice vinilica rispetto a condizioni di elevata temperatura (superiori a 80 °C) che determinano un cospicuo calo prestazionale. I materiali tradizionali risultano più sensibili di quelli naturali a tutte quelle condizioni ambientali che promuovono una variazione volumica del substrato, come la perdita o l'assorbimento di elevate quantità di acqua, in accordo con una loro minore deformabilità già riscontrata nelle prove di trazione assiale sugli FRP. Non risultano invece problematiche per alcun composito piccole variazioni cicliche di temperatura ed umidità.

Per quel che concerne i campioni multistrato, è stata valutata la tenuta del sistema di rinforzo anche qualora composto da molteplici strati di fibra. Le problematiche emergono quando i successivi strati vengono aggiunti sul primo già asciutto, è quindi necessario definire già in fase progettuale lo spessore di composito necessario a garantire le prestazioni meccaniche desiderate. Nel caso di FFRP(V) 5 strati rappresentano un limite per la buona aderenza, infatti il composito si è staccato dal legno.

Le prove di shear test (effettuate solo su provini rinforzati con compositi naturali) mettono in luce come il materiale composito applicato al legno abbia le stesse caratteristiche e manifesti le stesse criticità del materiale testato da solo, inoltre confermano quanto riscontrato con i test di pull-off, ossia una marcata sensibilità di FFRP alle condizioni iniziali del substrato e seri cali prestazionali di FFRP(V) qualora sottoposto ad alte temperature.

In associazione alle prove meccaniche sono state svolte anche delle analisi chimico-fisiche mirate a trovare un riscontro dei risultati in quella che è la condizione all'interfaccia e la stabilità chimica delle matrici rispetto a temperatura ed umidità.

Le condizioni all'interfaccia sono state valutate mediante microscopia ottica e le informazioni ottenute hanno confermato quanto riscontrato con l'analisi delle modalità di rottura

riscontrate nei test di pull-off. La presenza frequente di bolle all'interno del composito o tra il composito e il legno può essere causa di rotture interne del composito o del distacco dello stesso dal substrato, i materiali tradizionali risultano soggetti rispetto a quelli naturali alla formazione di vuoti considerabili importanti per dimensioni e soprattutto frequenza. Infatti l'incidenza di rottura o distacco del composito è più frequente in CFRP e GFRP.

Poiché la produzione di compositi multistrato può essere danneggiata dall'introduzione di difetti e discontinuità, sono state osservate al microscopio ottico anche le sezioni relative a questi prodotti, per valutare la stratificazione, la distribuzione della matrice e determinare un eventuale limite di strati cui si può arrivare efficacemente.

La modalità di incollaggio detta *fuori tatto*, che prevede l'applicazione di strati successivi di composito, sul primo già asciutto è caratterizzata da uno spessore consistente di matrice tra uno strato e l'altro, fenomeno meno marcato per i campioni di FFRP(V), poiché la colla vinilica in presenza di umidità (in questo caso nuova colla ancora fluida e ricca di acqua) tende a rammollire e tornare ancora parzialmente malleabile. La presenza di un consistente spessore di matrice rappresenta un punto di debolezza all'interno del quale possono innescarsi meccanismi che provocano un cedimento prematuro del sistema di rinforzo. Nei campioni con più strati si può comunque osservare l'ottima impregnazione delle fibre, in cui la matrice si è insinuata tra i diversi fili formando un unico elemento solido e collaborativo.

La stabilità chimica della resina epossidica e della colla vinilica è stata valutata mediante spettrofotometria infrarossa, con lo scopo di capire se alcuni condizionamenti particolarmente aggressivi possano essere causa di una modificazione della composizione chimica della matrice. In particolar modo si è cercato di determinare la natura dello strato bianco formatosi per contatto della resina epossidica con l'umidità del legno e confermare l'evidente carbonizzazione della colla vinilica e l'imbrunimento della resina epossidica riscaldate a 140 °C. Nel primo caso non si è riscontrata alcuna differenza apprezzabile tra la composizione dello strato di reazione con l'acqua e la resina epossidica tal quale, mentre gli effetti del riscaldamento intenso sono evidenti dalla comparsa dello ione carbonile C=O, composto caratteristico dei processi di combustione.

Determinate le condizioni che possono compromettere le proprietà meccaniche dei materiali compositi naturali e tradizionali ed inficiare l'efficacia dell'intervento di rinforzo, è stata fatta un'applicazione su un elemento strutturale per confermare la validità degli NFRP e valutare se essi rappresentano una valida alternativa ai prodotti tradizionali anche dal punto di vista di efficacia meccanica.

I materiali compositi sia naturali, sia tradizionali applicati alle travi hanno dimostrato un comportamento coerente e compatibile con quanto rilevato dalle prove di caratterizzazione locale. Come già evidenziato, le prestazioni di CFRP sono superiori rispetto a quelle di FFRP e FFRP(V), rispetto alle travi non rinforzate, il composito tradizionale ha conferito un aumento della resistenza alla flessione pari al 46%, i compositi con fibra di lino hanno operato un aumento della resistenza variabile dal 7 al 31%, a seconda del tipo specifico di FRP e del numero di strati.

In particolar modo emerge che le travi rinforzate con FFRP migliorano maggiormente le proprie prestazioni quando lo spessore del composito si limita a 3 strati (+ 31% della resistenza), mentre non si evince un particolare beneficio per le travi rinforzate con 5 strati di composito (+7%). Il composito FFRP(V) risulta invece maggiormente efficace in presenza di 5 strati (+24%), piuttosto che 3 (+17%).

Una considerazione estremamente importante che va oltre la quantificazione numerica dell'incremento di resistenza a flessione riguarda le modalità di cedimento della trave sotto sforzo. Le travi rinforzate con materiali compositi a base epossidica (sia con fibra di lino che carbonio) sono state caratterizzate da rottura fragile, al cedimento del rinforzo – manifestatosi con la completa rottura per trazione – è corrisposto un cedimento repentino della trave di legno. I compositi a base vinilica, grazie alla loro già osservata capacità di deformazione, tendono ad allungarsi e subiscono una frattura delle fibre di lino, solo laddove le fibre del legno risultano lesionate. Sebbene non più in grado di sostenere un elevato carico, il materiale FFRP(V), allungandosi senza arrivare a rottura per trazione, permette di evitare il collasso repentino della trave come invece accade con FFRP e CFRP.

I risultati ottenuti in questo lavoro di tesi permettono di validare i materiali compositi con fibra naturale di lino, come possibili sostituiti dei più tradizionali compositi tradizionali con fibra di carbonio o vetro. L'efficacia meccanica di questi materiali innovativi non raggiunge quella nota dei materiali di comune utilizzo, ma risulta essere sufficiente per la maggior parte delle opere di consolidamento che richiedono un incremento della resistenza del legno.

Resta comunque fondamentale valutare in fase progettuale quali saranno le condizioni ambientali in cui i materiali compositi naturali andranno ad operare ed adottare tutte le accortezze per eliminare o almeno attenuare tutti quei fattori che possono pregiudicare la durabilità dell'intervento di rinforzo.

Per ciò che concerne l'utilizzo della colla vinilica come matrice sostitutiva alla resina epossidica, considerando i risultati qui ottenuti, da cui emerge che le sue prestazioni sono inferiori, ma comunque soddisfacenti e tenendo in considerazione i vantaggi che il suo

utilizzo produce (atossicità, facilità di applicazione, facilità nella pulizia degli strumenti, economicità e facile reperibilità in commercio) è possibile affermare che essa rappresenta una valida alternativa alla matrice classica epossidica, fermo restando la necessità di valutare anticipatamente le condizioni di operatività.

Le prove sin qui condotte hanno permesso di validare in prima istanza i materiali compositi con fibre naturali, quali possibili sostituti dei materiali più tradizionali. Restano comunque da approfondire alcuni aspetti riguardo alle problematiche di compatibilità e durabilità.

In primo luogo è necessario programmare condizionamenti di lunga durata che mettano in luce eventuali effetti critici che fattori - qui apparsi ininfluenti - possono avere nel corso del tempo. È bene valutare se le piccole variazioni cicliche di temperatura ed umidità sul lungo periodo possano creare degrado del composito o danni all'interfaccia. Allo stesso modo il perdurare di elevate condizioni di umidità, non ha promosso evidenti cali prestazionali, ma è stato accompagnato dalla comparsa di muffe ed agenti biodeteriogeni (limitati al legno nei campioni rinforzati con FFRP ed estesi anche al rinforzo per campioni con FFRP(V)), la cui proliferazione può determinare il degrado irreversibile del legno e del rinforzo.

È inoltre auspicabile, effettuare prove di resistenza meccanica su campioni in cui è in corso il rammollimento della matrice per il superamento della temperatura di transizione vetrosa T_g per determinare, non solo gli effetti della variazione volumica, ma anche l'eventuale calo prestazionale causato nell'immediato dal calore.

Infine, data la varietà di fibre naturali presenti sul mercato, è importante valutare l'efficacia anche di altri prodotti di origine vegetale.

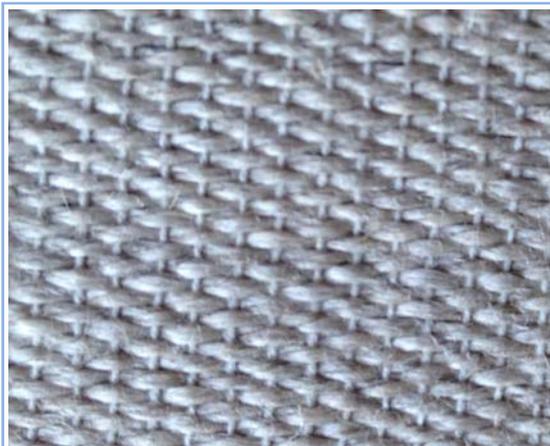
Allegato

FIDFLAX UNIDIR 430 HS43®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI LINO AD ALTA RESISTENZA PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services



Proprietà geometriche e meccaniche*

-Maggio 2012-

Fibra secca (filato)

Tensione caratteristica a trazione, σ_{fibra}	512 MPa
Modulo elastico, E_{fibra}	21,4 GPa
Deformazione a rottura, ϵ_{fibra}	3,27 %
Densità	1,5 g/cm ³

Tessuto impregnato (valori per il calcolo)

Titolo filato	324 Tex
n° fili/cm	9 Fili/cm
Massa	430 g/m ²
Spessore equivalente del rinforzo FRP, t_f	0,267 mm
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, f_{fk}	532 MPa
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, E_f	43 GPa
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, ϵ_f	2,34 %

*Le proprietà del tessuto impregnato con resina FIDSATURANT sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati". Il sistema è classificato di TIPO A, come riportato nel documento CNR-DT 200/2004 al cap.2 paragrafo 2.5. I valori caratteristici vengono ricavati dal valore medio meno due volte la deviazione standard.

CARATTERISTICHE MATERIALE

Descrizione

Il tessuto unidirezionale FIDFLAX UNIDIR 430 HS43® in fibra di lino greggio di stoppa bollita ad alta resistenza è completamente naturale, ad elevata stabilità grazie al particolare intreccio e alle cuciture laterali che ne garantiscono un'ottima lavorabilità in cantiere. Il tessuto viene installato mediante matrici organiche di tipo epossidico.

Ideale per:

- Adeguamento statico e sismico di elementi strutturali in muratura di mattoni, pietra naturale, legno e camorcanna;
- Consolidamento di archi, volte e cupole in muratura di mattoni o in pietra naturale, legno e camorcanna;
- Rinforzo a pressoflessione e taglio di pannelli murari in muratura di mattoni o in pietra naturale;
- Limitazione di stati fessurativi;
- Rinforzo di tamponature soggette a ribaltamento;

Vantaggi:

- elevata resistenza a trazione;
- completamente naturale e biocompatibile;
- incremento trascurabile di spessore e peso, pertanto efficace sia nei consolidamenti strutturali che nel restauro-consolidamento conservativo di monumenti storico-artistico monumentali;
- facilità e rapidità d'installazione;
- compatibilità con diverse tipologie di matrici organiche.

SEDE LEGALE:

Via Gerardo Dottori, 85 06132 San Sisto (PG) Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A: 181644 Iscr. Trib. PG 28053—Cap.Soc. € 118.000

SEDE OPERATIVA:

Via Y. Gagarin, 61/63 06070 San Mariano (PG) Tel. (+39) 075 5173078 Fax. (+39) 075 5178358

DIREZIONE TECNICA E COMMERCIALE:

Piazza del Duomo, 17 20121 Milano Tel. (+39) 02 72093424 Fax. (+39) 02 45471830

Website: www.fidiaglobalservice.com—E-mail: tecnico@fidiaglobalservice.com





MODALITA' DI APPLICAZIONE

L'applicazione del tessuto **FIDFLAX UNIDIR 300 HS43®** può essere effettuata, solamente mediante:

- **Matrici Organiche:**

- *resine epossidiche bi componenti tixotropica (FIDSATURANT) ottenendo così il composito **FFRP** (E_lax R_einforced P_olymer);*

Per maggiori informazioni nello specifico di ogni tipologia di impiego, fare riferimento alle voci di capitolato e per qualsiasi approfondimento contattare il nostro staff tecnico a tecnico@fidiaglobalservice.com.

Vengono di seguito elencate per punti le fasi di lavorazione:

1) *Preparazione del sottofondo* (per ulteriori approfondimenti si rimanda alla scheda tecnica del prodotto impiegato).

Per supporti murari: il supporto deve essere coeso e consistente, preparato asportando polvere, efflorescenze saline, parti inconsistenti, materiale organico, muffe e disarmanti, ed eventualmente trattato con opportuno sistema di protezione dalla formazione di sali idrosolubili da concordare con la D.L.

2) *Rasatura della superficie*

Eseguire la rasatura della superficie mediante malta (seguendo le prescrizioni della scheda tecnica del produttore) al fine di eliminare eventuali asperità e materiali incoerenti, e fino a ripristinare la sezione e garantire una superficie piana senza concavità.

3) *Stesura primo strato*

Applicare una prima mano di resina epossidica adesivo-impregnante (FIDSATURANT), avendo cura di inglobare il materiale all'interno della matrice assicurandosi che la resina fuoriesca tra i filamenti.

4) *Stesura e impregnazione del tessuto*

Assicurandosi che lo strato sia ancora "fresco", applicare il tessuto prestando attenzione a non formare grinze, spianandolo manualmente oppure a mezzo di rullo per eliminare eventuali bolle d'aria.

5) *Stesura secondo strato*

Applicare una seconda mano di resina (FIDSATURANT) sino al completo inglobamento del tessuto nella matrice, senza che nessun filamento rimanga visibile ed esposto.

6) *Finitura e protezione del sistema*

Nel caso di matrice epossidica terminare con un eventuale spolvero di sabbia al quarzo di opportuna granulometria per garantire l'aggrappo di un eventuale successivo intonaco. Qualora il sistema di rinforzo venga installato in ambienti particolarmente aggressivi, e qualora non sia previsto un ulteriore intonacatura/protezione del sistema, si consiglia l'applicazione di una pittura epossidica/poliuretana per un'ulteriore protezione del sistema di rinforzo, secondo prescrizioni progettuali.

SEDE LEGALE:

Via Gerardo Dottori, 85 06132 San Sisto (PG) Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A: 181644 Iscr. Trib. PG 28053—Cap.Soc. € 118.000

SEDE OPERATIVA:

Via Y. Gagarin, 61/63 06070 San Mariano (PG) Tel. (+39) 075 5173078 Fax. (+39) 075 5178358

DIREZIONE TECNICA E COMMERCIALE:

Piazza del Duomo, 17 20121 Milano Tel. (+39) 02 72093424 Fax. (+39) 02 45471830

Website: www.fidiaglobalservice.com—E-mail: tecnico@fidiaglobalservice.com



FIDFLAX UNIDIR 430 HS43®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI LINO AD ALTA RESISTENZA PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services

CONFEZIONI

Il tessuto viene solitamente fornito in rotoli da 20, 50, 100cm di larghezza e 50m di lunghezza.

RACCOMANDAZIONI

Maneggiando il tessuto indossare indumenti protettivi ed occhiali ed attenersi alle istruzioni concernenti le modalità di applicazione del materiale.

Contatto con pelle: non è richiesta alcuna misura speciale.

Stoccaggio in cantiere: conservare in luogo coperto ed asciutto e lontano da sostanze che ne possano compromettere l'integrità

ESEMPI DI APPLICAZIONE

Per conoscere progetti di rinforzo strutturale mediante tessuti in lino consultare la sezione Applicazioni al sito www.fidiaglobalservice.com oppure contattare lo staff tecnico all'indirizzo di posta elettronica tecnico@fidiaglobalservice.com.

QUALITA' & CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale, su richiesta, è accompagnata dal certificato di origine del materiale e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

VOCI DI CAPITOLATO

FFRP®

Esecuzione di rinforzo strutturale di elementi in meratura o legno mediante l'utilizzo di un sistema composito a base di tessuto unidirezionale in fibra di lino ad alta resistenza tipo **FIDFLAX UNIDIR 300 HS45** impregnato con una matrice organica tipo **FIDSATURANT** epossidica bi componente tixotropica, da applicarsi direttamente alla struttura da rinforzare, previo eventuale trattamento di ripristino delle superfici degradate, fornito e posto in opera da appaltatori specializzati e di comprovata esperienza. L'intervento si svolge nelle seguenti fasi: (1) eventuale regolarizzazione della superficie con malta strutturale di calce idraulica naturale **FIDCALX NHL5** o cementizia **FIDGROUT**; (2) stesura di un primo strato di resina epossidica bi componente tipo **FIDSATURANT** da impregnazione; (3) posa del tessuto in fibra di lino ad alta resistenza tipo **FIDFLAX UNIDIR 300 HS45**, del peso netto di fibra di ca 430 g/mq avente le seguenti caratteristiche prestazionali meccaniche: tensione caratteristica a trazione 532 MPa; modulo elastico 43 GPa; deformazione ultima a rottura 2,34%, avendo cura di garantire una completa impregnazione del tessuto evitando la formazione di eventuali vuoti; (4) esecuzione del secondo strato di resina epossidica bi componente tixotropica **FIDSATURANT**; (5) l'eventuale ripetizione delle fasi (3) e (4) per tutti gli strati previsti da progetto, sia in semplice sovrapposizione che in direzione ortogonale alla precedente; (6) la rimozione delle eventuali parti eccedenti di resina. Il sistema di rinforzo deve garantire le caratteristiche minime prestazionali di progetto e i materiali devono essere certificati da laboratori riconosciuti a livello nazionale od internazionale. E' compresa la fornitura e posa in opera di tutti i materiali sopra descritti e quanto altro occorre per dare il lavoro finito. Sono esclusi: l'eventuale bonifica delle zone degradate e il ripristino del substrato; le prove di accettazione del materiale; le indagini e le prove pre e post intervento; tutti i sussidi necessari per l'esecuzione dei lavori (bybridge, opere provvisoriale, etc). Il prezzo è ad unità di superficie di rinforzo effettivamente posto in opera comprese le sovrapposizioni e zone di ancoraggio.

NOTE LEGALI

I consigli tecnici che FIDIA S.r.l. Technical Global Services fornisce, verbalmente o per iscritto come assistenza al cliente o all'applicatore in base alle sue esperienze, corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono impegnativi e non dimostrano alcuna relazione legale contrattuale né obbligo accessorio col contratto di compravendita. Essi non dispensano l'acquirente dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto concerne la loro idoneità relativamente all'uso previsto. Per il resto sono valide le nostre condizioni commerciali. Diffornità dall'originale predetto per contenuto e/o utilizzo non implicherà alcuna responsabilità da parte dell'azienda FIDIA S.r.l. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che la presente scheda e gli eventuali valori riportati siano validi per la partita di prodotto di suo interesse e non siano superati in quanto sostituiti da edizioni successive e/o nuove formulazioni del prodotto. Nel dubbio, contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.

SEDE LEGALE:

Via Gerardo Dottori, 85 06132 San Sisto (PG) Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A.: 181644 Iscr. Trib. PG 28053—Cap.Soc. € 118.000

SEDE OPERATIVA:

Via Y. Gagarin, 61/63 06070 San Mariano (PG) Tel. (+39) 075 5173078 Fax. (+39) 075 5178358

DIREZIONE TECNICA E COMMERCIALE:

Piazza del Duomo, 17 20121 Milano Tel. (+39) 02 72093424 Fax. (+39) 02 45471830

Website: www.fidiaglobalservice.com—E-mail: tecnico@fidiaglobalservice.com

Pag. 3 di 3



FIDPRIMER

RESINA EPOSSIDICA PER LA PREPARAZIONE DI SUPERFICI DI STRUTTURE CHE DEVONO ESSERE RINFORZATE MEDIANTE MATERIALI COMPOSITI FRP O SRP



FIDIA srl
Technical Global Services

Caratteristiche della resina non miscelata

	Colore	Viscosità a 25 °C [mPa·s]	Densità [g/cm ³]	Rapporto di miscelazione		Condizioni di stoccaggio (contenitore sigillato)	
				In volume	In peso	Tempo [mesi]	Temperatura [°C]
Componente A	Incolore	750	1,11	2	2	12	25
Componente B	Paglierino	600	1,00	1	1	12	25
Miscela	Paglierino	650	1,05				

Caratteristiche della resina miscelata

Tempo di lavorabilità [min]	35°C	30
Tempo di gelo [min]	20° C	60
Picco esotermico	Temperatura [°C]	190
Tempo di completa reticolazione [h]	20 °C	5

Caratteristiche della resina reticolata

	Stagionato a 5 gg a 22°C
Temperatura di transizione vetrosa, Tg [°C]	65
Modulo di elasticità a trazione [GPa]	2,5
Resistenza a trazione [MPa]	45
Deformazione a rottura [%]	3,8

*Le proprietà del composito e delle resine sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE

Descrizione:

FIDPRIMER è un prodotto da impregnazione bicomponente, senza solventi, tixotropica a base di resina epossidica.

Ideale per:

preparazione di superfici per l'installazione di rinforzi strutturali in CA, CAP, Muratura, Pietra naturale e Legno (per l'Acciaio non è necessario l'impiego del FIDPRIMER).

Vantaggi:

facilità di miscelazione e di applicazione;
resistenza agli agenti chimici ed ai condizionamenti atmosferici ed ambientali.

CONFEZIONI

Imballi da kg. 30 (20 kg componente A + 10kg componente B).

QUALITÀ E CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDPRIMER

RESINA EPOSSIDICA PER LA PREPARAZIONE DI SUPERFICI DI STRUTTURE CHE DEVONO ESSERE RINFORZATE MEDIANTE MATERIALI COMPOSITI FRP O SRP



FIDIA srl
Technical Global Services

AVVERTENZE

Per applicazioni che comportano l'esposizione a temperature superiori a 70°C, consultare il nostro Servizio Tecnico.

RACCOMANDAZIONI

Indossare l'abbigliamento protettivo (guanti in butile, occhiali protettivi).

MODALITA' DI APPLICAZIONE

1. Preparazione delle superfici

Trattare, preferibilmente mediante sabbiatura o martellinatura del sottofondo in modo da eliminare ogni parte incoerente, tracce di grasso, disarmanti, vernici, lattime di calcestruzzo superficiale, smog, ecc. e depolverare accuratamente con aria esente da olio e condensa. Pulire le armature metalliche deteriorate da eventuali tracce di ruggine e quindi proteggerle da processi di passivazione e corrosione. Le fessurazioni di dimensioni maggiori a 0,25mm devono essere stabilizzate mediante iniezione con prodotti a base di resine epossidiche (ved. FIDPUTTY). Tenore massimo di umidità della superficie non superiore al 4%.

2. Miscelazione resina

Versare il componente B nel componente A, impastare a fondo per 5 minuti a bassa velocità fino a quando il prodotto risulta omogeneo. Per avere un post-life più lungo si può suddividere il materiale impastato in quantità parziali più piccole, o si possono raffreddare i due componenti prima di procedere con la miscelazione.

3. Applicazione

Trattare il FIDPRIMER che verrà applicato alla superficie, in maniera regolare, per mezzo di un pennello o rullo.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDSATURANT HM

RESINA EPOSSIDICA BICOMPONENTE AD ALTO MODULO PER L'IMPREGNAZIONE IN SITU DI TESSUTI DI RINFORZO



FIDIA srl
Technical Global Services

Caratteristiche della resina non miscelata

	Colore	Viscosità a 25 °C [mPa·s]	Densità [g/cm ³]	Rapporto di miscelazione		Condizioni di stoccaggio (contenitore sigillato)	
				In volume	In peso	Tempo [mesi]	Temperatura [°C]
Componente A	Lattescente	350.000	0,97	2	2	12	20
Componente B	Incolore	850	1,2	1	1	12	20
Miscela	Lattescente	12.000	1,1				

Caratteristiche della resina miscelata

Tempo di lavorabilità [min]	35°C	15
Tempo di gelo [min]	20° C	50
Picco esotermico	Temperatura [°C]	160
Tempo di completa reticolazione [h]	20 °C	15

Caratteristiche della resina reticolata

	Stagionato a 5 gg a 22°C
Temperatura di transizione vetrosa, Tg [°C]	65
Modulo di elasticità a trazione [GPa]	2,5
Resistenza a trazione [MPa]	70
Deformazione a rottura [%]	6,0

*Le proprietà del composito e delle resine sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE

Descrizione

FIDSATURANT HM è un prodotto da impregnazione bicomponente, senza solventi, a base di resina epossidica del sistema **FIDFORTIFICA**.

Ideale per l'impregnazione con la tecnica manual layup di tessuti per il rinforzo e consolidamento di strutture in CA, CAP, Muratura, Legno ed Acciaio.

Vantaggi:

- applicazione semplice con spazzola, cazzuola, spatola, talocchia e rullo da impregnazione;
- elevata stabilità su superfici verticali e sopratesta;
- buona resistenza meccanica;
- strato fine;
- senza solventi.

CONFEZIONI

Imballi da kg. 30 (20 kg componente A + 10kg componente B).

QUALITA' E CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale è accompagnata dal certificato di origine del materiale proveniente dal produttore e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com

FIDSATURANT HM

RESINA EPOSSIDICA BICOMPONENTE AD ALTO MODULO PER
L'IMPREGNAZIONE IN SITU DI TESSUTI DI RINFORZO



FIDIA srl
Technical Global Services

AVVERTENZE

Per applicazioni che comportano l'esposizione a temperature superiori a 70°C, consultare il nostro Servizio Tecnico.

RACCOMANDAZIONI

Indossare l'abbigliamento protettivo (guanti in butile, occhiali protettivi).

MODALITA' DI APPLICAZIONE

1. Preparazione delle superfici

Trattare, preferibilmente mediante sabbiatura o martellinatura il sottofondo in modo da eliminare ogni parte incoerente, tracce di grasso, disarmanti, vernici, lattime di calcestruzzo superficiale, smog, ecc. e depolverare accuratamente con aria esente da olio e condensa.

Per applicazione su metallo togliere ogni traccia di ruggine, vernice, grasso, ecc. ricorrendo alla sabbiatura a metallo bianco, smerigliatura o accurata pulizia meccanica.

Per poliestere, resine epossidiche e materiali sintetici e vetosi in genere, ricorrere alla smerigliatura della superficie.

Assicurarsi che il sottofondo all'atto della posa si presenti pulito, compatto e asciutto.

2. Miscelazione dei componenti

Per la preparazione dell'adesivo aggiungere il componente B al componente A della singola confezione e miscelare mediante l'apposito agitatore ad ancora montato su di un trapano a bassa velocità (ca. 200 giri/minuto) per includere la minore quantità di aria possibile, fino a perfetta omogeneizzazione: si otterrà una pasta di colore omogeneo grigio chiaro.

3. Applicazione dell'adesivo

- applicazione della resina miscelata sul sottofondo preparato con cazzuola dentata, spazzola o spatola;
- stesura del tessuto sullo strato di resine applicato, nella direzione di progetto;
- pressare il tessuto nella resina con l'utilizzo di un rullo da impregnazione, fino a quando la resina fuoriesce dai fasci di fibre e ripartire il materiale per ottenere una struttura omogenea.

Sede centrale e legale:

Via Gerardo Dottori, n.85 06132 S. Sisto PERUGIA
Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A. 181644 Iscr. Trib. PG 28053 - Cap. Soc. € 26.000

Sedi operative:

Via Y. Gagarin, n. 61/63 06070 San Mariano - PERUGIA Tel +39 075.5171558 Fax +39 075.5178358
Piazza Duomo, n.17 20121 Milano Tel.+39 02.72093424 - Fax.+39 02.45471830

Web-Site: www.fidiaglobalservice.com - E-mail: info@fidiaglobalservice.com



The Chemical Company

MBrace FRP applicato ad un elemento strutturale inflesso consente, rispetto alla situazione originaria, di:

- ridurre le deformazioni ai carichi di servizio (aumento di rigidità);
- aumentare la capacità portante (ad esempio riqualifica strutturale a seguito di una variazione d'esercizio);
- incrementare la resistenza alla fatica;
- limitare gli stati fessurativi (incremento di durabilità).

MBrace FRP è indicato anche per le fasciature di elementi strutturali le quali presentano poi, rispetto alla situazione non rinforzata, maggior:

- capacità portante;
- duttilità contro le sollecitazioni sismiche;
- resistenza alle sollecitazioni dinamiche ed impulsive.

Prestazioni tipiche dei tessuti (riferite allo spessore di tessuto secco)

	MBrace Fibre Alta resistenza	MBrace Fibre Alto modulo	MBrace Fibre Aramide	MBrace Fibre vetro
Tipo di fibra	Carbonio	Carbonio	Aramidica	Vetro Alcali resistente
Spessore equivalente di tessuto secco, mm	0,165	0,165	0,214	0,230
Modulo elastico medio a trazione, ASTM D3039, MPa	230.000	390.000	105.000	65.000
Deformazione ultima media a trazione, ASTM D3039, %	1,3	0,8	1,7	2,5
Resistenza caratteristica a trazione f_{tk} , ASTM D3039, MPa	2.500	2.500	1.500	1.300
Coefficiente di dilatazione termica, K^{-1}	10^{-7}	10^{-7}	$-3,5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Conduttività termica, $J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	17	17	Isolante	Isolante
Resistività elettrica, $\Omega \cdot m$	$1,6 \cdot 10^{-5}$ Conduttivo	$1,6 \cdot 10^{-5}$ Conduttivo	----- Isolante	----- Isolante

Confezione

- MBrace Primer: Unità da 10 litri.
- MBrace Adesivo (Saturant): Unità da 10 litri
- MBrace Fibre Alto Modulo: rotolo da 25 m² (50 cm x 50 m);
- MBrace Fibre Vetro: rotolo da 25 m² (50 cm x 25 m).
- MBrace Fibre Alta Resistenza: rotolo da 50 m² (50 cm x 100 m).
- MBrace Fibre Aramide: rotolo da 50 m² (50 cm x 100 m).

COSMO D3

Parquet- and Laminate glue

APPLICATION

COSMO D3 is especially used for the bonding / laying of laminate and parquet (groove and spring joining).

COSMO D3 is used for assembly-, surface-, board gap- and block bondings, when higher demands on the water resistance have to be fulfilled. – Only suitable for professional use by instructed personnel.

COSMO D3 is suitable for the gluing of soft-, hard- and exotic wood and used for cold- and warm-setting as well as high-frequency bonding, only suitable for professional use by instructed personnel.

COSMO D3 is especially used in the window- and door manufacturing for the gluing of corner angles. – Only for specialized companies.

COSMO D3 obtains, during the wood/wood bonding, without any addition of hardener, the strain group D3 according to EN 204, as well as a heat adhesive strength of approx. 7,5N/mm² according to **WATT 91**.

TECHNICAL DATA

BASIS	dispersion glue on PVAc (polyvinylacetat)		
FILM PROPERTY	of hardened up film		tough elastic
VISCOSITY	Brookfield Sp06/20, +20°C	approx.	11.000 mPa.s
DENSITY	according to EN 542 at +20°C	approx.	1,1 g/cm ³
PH- VALUE	pH-value according to EN 1245	approx.	pH 3
OPEN TIME	at +20°C, 50% rel. air humidity, application quantity 150µm-glass	approx.	8 min
HEATH ADHESIVE STRENGTH	according to WATT 91 at +80 °C	approx.	7,5 N/mm ²
MINIMUM TEMPERATURE FOR APPLICATION		from	+5 °C

WORKING INSTRUCTIONS

COSMO D3 can be processed directly after the delivery cask has been stirred up.

COSMO D3 is applied, at bonding parquets and laminates, directly from the glue bottle into the groove, in order to ensure a strong, tight bonding.

The elements are joined immediately after the glue application, within the open time of the adhesive; then, press together the parts to be bonded until the wished functional hardness has been reached.

Adhesive, which has flown out, has to be wiped at once with a humid cloth; hardened up adhesive can be removed e.g. with spirit.

COSMO D3 obtains, as one-component window glue, without any addition of hardener, the strain group D3 according to EN 204 and fulfils the requirements of the ift-directive, part 2 (institute for window technique e. V. Rosenheim).

COSMO D3

Page 2

Parquet- and Laminate glueWORKING INSTRUCTIONS

- * Please consider our advices in the technical information "Wood/wood bonding in the outside area", as well as the ift-directive "Bondings on wood windows"!
- * Contact with metals, e.g. iron, may result in discolorations !
- * Because of the contained wood materials, discolorations may exceptionally happen on different wood varieties !

APPLICATION QUANTITY depending on supporting material approx. 150 g/m²PRESSURE 0,2-0,4 N/mm²

OPEN TIME, as well as the individual PRESS TIMES, can only be exactly found out through own tests, as they are strongly affected by material, temperature, prepared quantity, application quantity, humidity, and other criteria. The user should provide adequate security additions to the given approximate values.

CLEANING

Not hardened up **COSMO D3** can be removed from the tools with water.

Hardened up **COSMO D3** is removed with **COSMOPLAST 751**, spirit or **COSMOFEN 10**

STORAGE

Store **COSMO D3** in tightly closed original casks, in a dry place, at a temperature between +15°C and +25°C, without direct solar irradiation. Can be stored in unopened original casks for approx. 12 months.

Agitate before use !

CASK SIZE

500g	PE-glue bottle, 5 pcs / box
1.000g	PE-glue bottle, 10 pcs / box

Other cask sizes are available on request.

CLASSIFICATION

Further information can be taken from the safety data sheet.

Our instructions for use, processing directives, product- or performance indications, as well as other technical statements are only general guidelines; they only describe the nature of our products (determined value at the production time) and their performance, but they give no guarantee in accordance with paragraph 443 of the BGB (Civil Code). Due to the variety of application purposes for each product, and due to a lot of different particular conditions (e. g. processing parameters, material properties, etc.), the user has to carry out his own individual qualifying tests. Our consultation in application technique, verbal and in writing, as well as with tests, is offered free of charge and is not legally binding.

These documents replace former issues

Riferimenti

AIMAT (a cura di) (1996) *Manuale di materiali per l'ingegneria*, Milano, McGraw-Hill

Allinger N. L., Cava M. P., De Jongh D. C., Johnson C. R., Lebel N. A., Stevens C. L. (1981) *Chimica organica*, II ed., Bologna, Zanichelli

Amerio C., Canavesio G. (1999) *Materiali per l'edilizia*, Torino, SEI

Amoroso G.G. (2002) *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Firenze, Alinea Editrice

ASTM C 1583 (2004) *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*

Bismarck A., Baltazar-Y-Jimenez A., Sarikakis K. (2006) *Green composites as panacea? Socio-economic aspects of green materials*, Environment, Development and Sustainability 8 445-463

Bonaldo E., Barros J.A.O., Lourenço P.B. (2004) *Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing*, International Journal of Adhesion & Adhesives 24 463-474

Bonelli R. (1977) *Il restauro architettonico in Teoria e cultura del restauro dei monumenti e dei centri antichi* a cura di Guerrieri F., Firenze, CLUSF

Borri A., Castori G (2009) *Un contributo allo studio della durabilità dei rinforzi strutturali con materiali compositi*, Atti del 3° Convegno Nazionale MURICO3 - Meccanica delle strutture in muratura rinforzate con compositi

Broughton J., Hutchinson A. R. (2001) *Effect of timber content on bonded-rods*, Construction and Buildings Materials, 15 17-25

- Brown W. H. (2001) *Introduzione alla chimica organica*, Napoli, EDISES
- Brydson J. A. (1995) *Plastics materials*, VI ed., Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd
- Cagnana A. (a cura di) (2000) *Archeologia dei materiali da costruzione*, Mantova, SAP Società Archeologica S.r.l.
- Caneva G., Nugari M. P., Salvadori O. (a cura di) (2005) *La Biologia Vegetale per i Beni Culturali*, vol. 1 Biodeterioramento e Conservazione, Firenze, Nardini Editore
- Carunchio T. (1996) *Dal restauro alla conservazione. Introduzione ai temi della conservazione del patrimonio architettonico*, Roma, Edizioni Kappa
- CNR-DT 200/2004 – *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*
- CNR-DT 201/2005 – *Studi Preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per Interventi di Consolidamento Statico di Strutture Lignee mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*
- Cognard J.Y., Créac'hcadec R. & Maurice J. (2011) *Numerical analysis of the stress distribution in single-lap shear tests under elastic assumption – Application to the optimization of the mechanical behaviour*, International Journal of Adhesion & Adhesives 31 714–724
- Custodio J., Broughton J., Cruz H.(2009) *A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 29 173-185
- De Angelis D'Ossat G. (1977) *Danni di guerra e restauro dei monumenti in Teoria e cultura del restauro dei monumenti e dei centri antichi* a cura di Guerrieri F., Firenze, CLUSF
- Derrick M. R., Stulik D., Landry J. M. (1999) *Infrared Spectroscopy in Conservation Science*, Los Angeles, The Getty Conservation Institute
- Dittenber D. B., Ganga Rao H. V. S. (2012) *Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure*, Composites: Part A 43 1419–1429
- Federici C., Giannotta G (1991) *Polimeri termoplastici*, Milano, Tecniche nuove
- Fonseca G., Pirollo A. (1994) *Materiali compositi. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo della tecnologia della pultrusione*, Napoli, Edizioni Scientifiche Italiane

Galetti, P. (a cura di) (2004) *Civiltà del legno. Per una storia del legno come materia per costruire dall'antichità ad oggi.*, Bologna, CLUEB

Gazzola P. (1977) *La cooperazione internazionale nel campo della tutela del patrimonio monumentale in Teoria e cultura del restauro dei monumenti e dei centri antichi* a cura di Guerrieri F., Firenze, CLUSF

Giordano G. (1999) *Tecnica delle costruzioni in legno*, V ed., Milano, Hoepli

Giovannoni G. (1977) *Restauro in Teoria e cultura del restauro dei monumenti e dei centri antichi* a cura di Guerrieri F., Firenze, CLUSF

Grozdanov A, Avella M, Buzarovska A, Gentile G, Errico M. E. (2010) *Reuse of natural fiber reinforced eco-composites in polymer mortars*, *Polymer Engineering & Science* 50(4) 762–766.

Guo S., Dillard D.A. & Plaut R.H. (2006) *Effect of boundary conditions and spacers on single-lap joints loaded in tension or compression*, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 26 629–638

Kafkalidis M.S. & Thouless M.D. (2002) *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*, *International Journal of Solids and Structures* 39 4367–4383

Kalia S., Kaith B. S., Kaur I.(2009) *Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites - A Review*, in *Polymer Engineering & Science* 49 (7) 1253-1272

Kaw A. K. (2006) *Mechanics of Composite Materials*, II ed., U.S.A., CRC press.

Klein C. (2004) *Mineralogia*, Bologna, Zanichelli

Liewellyn I., Williams H. (1972) *Vinyl Acetate Homopolymers and Copolymers*, in *Vinyl and Allied Polymers* di Matthews G., Londra, Iliffe Books

Lin-Vien D., Colthup N. B., Fateley W. G., Grasselli J. G. (1991) *The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules*, San Diego, Academic Press

Maya J. J., Sabu T. (2008) *Biofibres and biocomposites (Review)*, *Carbohydrate Polymers* 71 343-364

Minguzzi G. (1998) *Fiber Reinforced Plastics. Utilizzo dei materiali compositi a matrice polimerica in edilizia civile*, Firenze, Alinea Editrice

Nardon F. (2010) *Durabilità di sistemi di rinforzo di elementi in legno con materiali compositi a matrice polimerica*, tesi di laurea specialistica in Scienze e Tecnologie per i Beni Archeologici e Artistici, relatore prof. Valluzzi M. R., Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Costruzioni e Trasporti e Facoltà di Scienze MM. FF. NN. - Dipartimento di Scienze Chimiche

Netravali A. N., Chabba S. (2003) *Composites get greener*, *Materials Today*, 6(4) 22–29

Perogalli C. (1977) *Pregiudiziale ad una storia del restauro architettonico in Teoria e cultura del restauro dei monumenti e dei centri antichi* a cura di Guerrieri F., Firenze, CLUSF

Raftery J. G. M., Harte M. A., Rodd P. D. (2009), *Bond quality at the FRP-wood interface using wood-laminating adhesives*, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29 101-110

Ramos N.M.M., Simões M.L., Delgado J.M.P.Q., de Freitas V.P. (2012) *Reliability of the pull-off test for in situ evaluation of adhesion strength*, *Construction and Building Materials* 31 86–93

Ray D., Sarkar B. K., Rana A. K., Bose N. R. (2001) *Effect of alkali treated jute fibres on composite properties*, *Bull. Mater. Sci.*, 24 (2) 129–135

Ross S. M. (2003) *Probabilità e statistica per l'ingegneria e le scienze*, Trento, Apogeo

Sgriccia N., Hawley M. C., Misra M. (2008) *Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites*, *Composites: Part A* 39 1632–1637

Skoog D. A., Leary J. J. (2000) *Chimica analitica strumentale*, Napoli, EdiSES

Stocchi A., Lauke B., Vázquez A., Bernal C. (2007) *A novel fiber treatment applied to woven jute fabric/vinylester laminates*, *Composites: Part A* 38 1337–1343

Tiozzo Pezzoli S. (2011) *Una tecnica di rinforzo innovativa per il miglioramento sismico di solai in legno con biocompositi*, tesi di laurea magistrale in Ingegneria Edile, relatore prof. Valluzzi M. R., Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti

UNI 11119 (2004) *Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera.*

UNI 11138 (2004) *Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi.*

UNI 8269 (1981) *Materie plastiche. Formatura a bassa pressione di lastre o pannelli stratificati ottenuti con resine termoindurenti rinforzate con fibre di vetro (o eventualmente altre fibre) per scopo di prova.*

UNI 9595 (1990) *Determinazione della rapidità di presa a freddo di adesivi per legno mediante prove di taglio per trazione.*

UNI EN 13183-1 (2003) *Umidità di un pezzo di legno segato. Determinazione tramite il metodo per pesata.*

UNI EN 13183-2 (2003) *Umidità di un pezzo di legno segato. Stima tramite il metodo elettrico.*

UNI EN 16245 (2013) *Compositi polimerici rinforzati con fibre. Dichiarazione delle caratteristiche delle materie prime.*

UNI EN 1912 (2012) *Legno strutturale. Classi di resistenza. Assegnazione delle categorie visuali e delle specie.*

UNI EN 204 (2002) *Classificazione degli adesivi termoplastici per legno per applicazioni non strutturali.*

UNI EN 302-3 (2006) *Adesivi per strutture portanti di legno. Metodi di prova. Parte 3: Determinazione dell'effetto dell'attacco acido alle fibre del legno, dovuto ai trattamenti ciclici di temperature e di umidità, sulla resistenza alla trazione trasversale.*

UNI EN 338 (2009) *Legno strutturale. Classi di resistenza.*

UNI EN 384 (2010) *Legno strutturale. Determinazione dei valori caratteristici delle proprietà meccaniche e della massa volumica.*

UNI EN 408 (2010) *Strutture di legno. Legno massiccio e legno incollato. Determinazione di alcune proprietà fisiche e meccaniche.*

UNI EN ISO 14126 (2001) *Compositi plastici rinforzati con fibre. Determinazione delle caratteristiche a compressione nel piano.*

UNI EN ISO 5079 (1998) *Tessili. Fibre. Determinazione della forza di rottura e dell'allungamento di rottura di fibre singole.*

UNI EN ISO 527 (da 1 a 5) *Materie plastiche. Determinazione delle caratteristiche a trazione.*

USDA (2010) *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*, USA, CreateSpace Independent Publishing Platform

Valluzzi M. R., Garbin E., Modena C. (2007) *Flexural strengthening of timber beams by traditional and innovative techniques*, Journal of Building Appraisal 3 125-143

Wambua P., Ivens J., Verpoest I. (2003) *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?*, Composites Science and Technology 63 1259–1264

Yan L., Chouw N., Jayaraman K. (2014) *Flax fibre and its composites – A review*, Composites: Part B 56 296–317