

-11-

“DURABILITA’ DEL LEGNO LAMELLARE RINFORZATO: UN PRODOTTO INNOVATIVO”

Prof. A. De Vecchi^(*), arch. S. Colajanni^()**

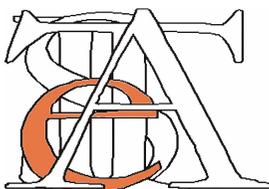
()Dipartimento di progetto e Costruzione Edilizia – Università di Palermo
Viale delle Scienze 90128 Palermo
devecchi@unipa.it di posta*

*(**)Dipartimento di progetto e Costruzione Edilizia – Università di Palermo
Viale delle Scienze 90128 Palermo
s.colajanni@unipa.it di posta*

Abstract

La ricerca sviluppata nell’ultimo decennio in edilizia si è orientata sempre più verso quei materiali, cosiddetti ecocompatibili o ecosostenibili, tali da dissipare il meno possibile le risorse naturali. In questo senso il legno, ed in particolare quello lamellare, è divenuto una valida alternativa alle tecnologie più usuali e tradizionali del cemento armato e del ferro, anche perché rappresenta una delle poche materie prime rinnovabili. Il legno lamellare è un prodotto evoluto, un prodotto industriale che supera i difetti propri del legno massello con caratteristiche di resistenza meccanica e di durabilità superiori, così da poter ottenere qualunque forma e dimensione. Presenta però una rigidezza limitata rispetto ad altre tecnologie, aspetto quest’ultimo, che ha determinato un vasto campo di ricerca basato sulla possibilità di inserire elementi irrigidenti all’interno della sezione resistente.

La memoria presenta i risultati raggiunti nell’ambito di un progetto di innovazione PIA che ha avuto l’obbiettivo di sperimentare un prodotto innovativo che possa avere una maggiore rigidezza, e quindi maggiori prestazioni a parità di costi. L’impiego di materiali originali ha richiesto la verifica delle prestazioni attraverso test ciclici di prove integrate di resistenza meccanica e di invecchiamento accelerato che sono state svolte, rispettivamente, dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica e dal Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia entrambi dell’Università di Palermo. Nel seguito si illustrano le prove di invecchiamento artificiale eseguite per verificare la durabilità dei prototipi innovativi da sperimentare.



**Ed. ISTeA – Italian Society of Science,
Technology and engineering of
Architecture**

1. Introduzione

Per valutare la durabilità di un materiale è importante considerare che i tempi di invecchiamento accelerato nei vari tipi di camere climatiche non sono correlabili con i tempi di esposizione agli agenti atmosferici reali.

Questo concetto è tanto più valido quando si parla di invecchiamenti accelerati ai cicli termici, alla nebbia salina o alla umidità; tutti gli studi e la letteratura scientifica sull'argomento concordano assolutamente con quanto espresso.

Risulta infatti molto difficile riprodurre le condizioni climatiche a cui verrà sottoposto il provino nella realtà a causa della varietà e della quantità di fenomeni in gioco (umidità, radiazioni, inquinanti di vario tipo tra cui quelli acidi, ozono, etc..)

Inoltre queste condizioni variano da luogo a luogo e addirittura di anno in anno per lo stesso luogo.

Tali prove hanno valore relativo quando vengono finalizzate per un confronto fra un prodotto innovativo ed un prodotto già industrializzato per stabilire se il primo non presenta tempi di invecchiamento inferiori.

Ci si è quindi indirizzati verso prove che simulassero condizioni estreme da applicare simultaneamente su diversi campioni.

La singola prova si è considerata conclusa nel momento in cui il materiale presentava segni visibili di deterioramento.

L'obiettivo è stato quello di verificare lo stato di coesione tra le lamelle di differenti campioni di legno lamellare ed i materiali di rinforzo scelti che sono stati applicati con differenti adesivi, sempre confrontati con analoghi campioni in legno lamellare convenzionale.

In particolare si è posta una certa attenzione agli stati in cui il materiale presentava una variazione di adesione, sia in corrispondenza delle linee di colla che nelle lamelle di legno.

La campagna di prove è stata organizzata in modo da superare, di volta in volta, i limiti delle campionature dei prototipi precedenti.

I Dipartimenti di Progetto e Costruzione Edilizia e di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Palermo con la Holzbau hanno messo a punto una serie di prototipi di legno lamellare rinforzato con materiali innovativi in modo da superare i limiti dell'attuale produzione industriale.

Sostanzialmente, la ricerca, sviluppata in 18 mesi, con la costante collaborazione tra i due Dipartimenti e l'industria, si è articolata in quattro fasi:

- 1) aggiornamento dello stato dell'arte sulle tecniche di rinforzo in commercio ed in fase di sperimentazione,
- 2) valutazione della compatibilità dei collanti e dei sistemi di rinforzo,
- 3) ricerca e sperimentazione di elementi di irrigidimento con prestazioni adeguate,
- 4) prove di durabilità per valutare l'efficacia dei sistemi ideati in termini di rapporto costi-benefici.

2. Prima fase

Negli ultimi anni sono state sviluppate differenti tecniche per conferire al legno lamellare maggiore resistenza e rigidità. Sulla base dei materiali usati come rinforzo è possibile classificare tali tecniche nel seguente modo:

- **fibre in lamine (FRP):**
 - di vetro (GFRP),
 - di carbonio (CFRP),
 - di aramide (AFRP);
 - ibride (GFRP+AFRP, CFRP+AFRP, ...)
- **barre di acciaio o CFRP.**

La maggior parte delle sperimentazioni sono state effettuate con l'uso di fibre. In particolare tali tecniche di rinforzo sono realizzate con lamine costituite da fibre e da una matrice.

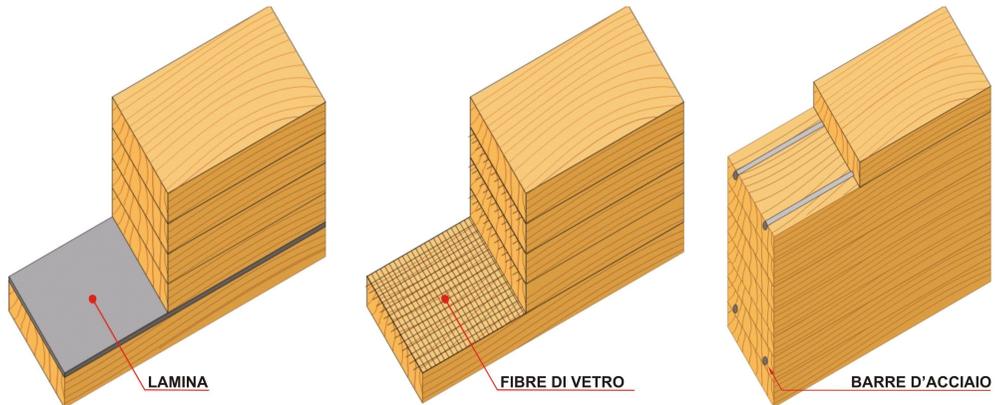


Figura 1. Trave rinforzata con lamina, con fibre e con barre.

Gli adesivi utilizzati per l'incollaggio tra FRP-legno rivestono un ruolo importante nel trasferire sollecitazioni tra due materiali caratterizzati da differente rigidità, composizione chimica, compatibilità con le resine e comportamento termomeccanico e meccanico. Essi sono essenzialmente a base epossidica o resorcinica o fenolica.

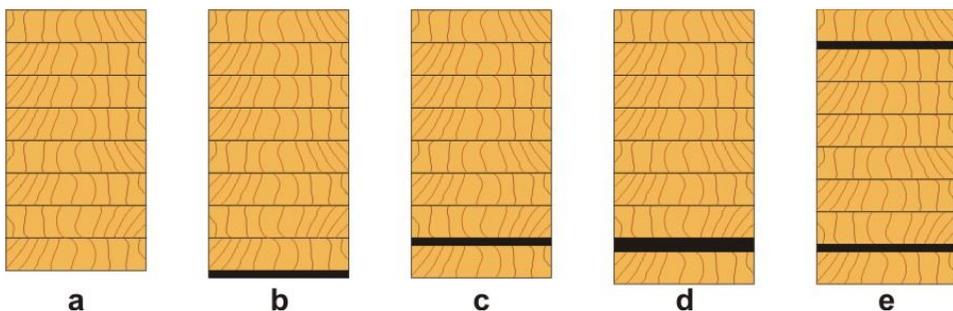


Figura 2. a) non rinforzato, b) rinforzato in zona tesa singolo esterno, c) rinforzato in zona tesa singolo interno, d) rinforzato in zona tesa doppio, e) rinforzato in zona tesa e compressa.

Dallo studio condotto si è constatato che uno dei limiti del legno lamellare rinforzato industrializzato era quello dell'adesione tra le fibre ed il legno. Ed a questo proposito sono state messe a punto diverse soluzioni tecnologiche.

GFRP	POSIZIONE DEL RINFORZO	NESSUN RINFORZO	RINFORZO NELLA ZONA TESA	DOPPIO RINFORZO NELL' AREA TESA	RINFORZO NELL' AREA TESA E NELL' AREA COMPRESSA
	MOE (MPa)	10.345+12.824	13.790	13.789	14.134
	MOR (MPa)	41,37	57,6	62,12	54,74

Figura 3. Caratteristiche meccaniche di travi rinforzate con GFRP nelle diverse posizioni

3. Seconda fase

Questa fase aveva il duplice scopo di effettuare prove di durabilità in relazione ai differenti tipi di collanti e di misurare l'efficacia delle diverse camere climatiche nel determinare un invecchiamento accelerato dei diversi campioni.

Le prove sono state eseguite con le attrezzature del Laboratorio di Edilizia del Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia che hanno permesso di sperimentare diversi tipi di simulazione in modo da far variare singoli parametri o combinarli simultaneamente.

In particolare sono stati presi in esame quei fattori maggiormente correlati con le capacità adesive del legno e dei diversi sistemi di rinforzo e relativi collanti.

Si è deciso di concentrarsi sui fenomeni legati all'umidità, all'inquinamento atmosferico, all'irraggiamento solare ed alla temperatura.

A questo scopo sono state utilizzate:

- la Camera climatica (ACS Challenge CH1200 SP) che permette di controllare i diversi parametri che esprimono in modo simultaneo e ciclico l'azione degli agenti atmosferici (temperatura, nel range compreso fra -40°C e $+180^{\circ}\text{C}$, umidità relativa e assoluta nel range compreso fra il 10% e il 98%, azione della pioggia attraverso la nebulizzazione di acqua demineralizzata e la radiazione solare), l'autoclave cilindrica installata ad asse orizzontale che è idonea a lavorare con valori di vuoto inferiori a 10 Kpa (di pressione assoluta), raggiunge una temperatura max. di lavoro di $80-85^{\circ}\text{C}$, con possibilità di immissione di acqua e misura dell'umidità relativa,
- la Camera a nebbie saline (DCTC 600 - Dry Corrosion Test Cabinet) per verificare il comportamento di componenti sottoposti all'azione simulata di agenti aggressivi,
- la stufa termostatica (G Therm 205) per attivare cicli di temperatura diversa (fino ad un massimo di 260 C°),
- la Solarbox (1500E) per l'irraggiamento solare tramite lampada allo Xeno.

La possibilità di utilizzare il sistema di irrigidimento in qualsiasi condizione ambientale ha determinato la mancanza di una collocazione geografica specifica e le relative condizioni climatiche.



Figura 4. Camera climatica ACS Challenge CH1200 SP e Autoclave cilindrica ad asse orizzontale

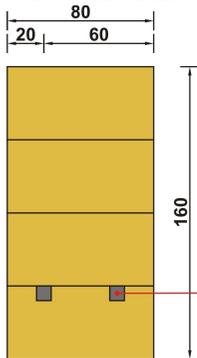
Ciò ha costituito il punto di partenza per l'impostazione dei parametri dei diversi cicli di prova.

Essendo molto difficile riprodurre la varietà e la quantità dei fenomeni in gioco (umidità, radiazioni, inquinanti di vario tipo tra cui quelli acidi, ozono, etc..) ci si è orientati verso prove che simulassero condizioni estreme da applicare simultaneamente sui diversi campioni e quindi sui diversi materiali di rinforzo.

In particolare si è posta una certa attenzione agli stati in cui il materiale presentava una variazione di adesione, sia in corrispondenza delle linee di colla tra le lamelle di legno, sia in corrispondenza del rinforzo.

Si sono realizzati prototipi di legno lamellare MS10, rinforzato con barre, di lunghezza massima non superiore a 1000 mm, in modo tale che potessero essere

inseriti all'interno delle macchine del Laboratorio del DPCE, con le seguenti caratteristiche e tipi di barre:



- N.6 PROTOTIPI RINFORZATI CON FIBRE DI CARBONIO INCOLLATE CON COLLA MELAMMINICA
- N.6 PROTOTIPI RINFORZATI CON FIBRE DI VETRO INCOLLATE CON COLLA MELAMMINICA
- N.6 PROTOTIPI RINFORZATI CON FIBRE DI CARBONIO INCOLLATE CON RESINA EPOSSIDICA
- N.6 PROTOTIPI RINFORZATI CON FIBRE DI VETRO INCOLLATE CON RESINA EPOSSIDICA.
- N.6 PROTOTIPI RINFORZATI CON FIBRE DI CARBONIO (TECNOFIB FIOCCO C 240) INCOLLATE CON TECNOEPO 700 E TECNOEPO 701;
- N.6 PROTOTIPI RINFORZATI CON FIBRE DI VETRO (TECNOFIB FIOCCO GLASS 73) INCOLLATE CON TECNOEPO 700 E TECNOEPO 701
- N.6 PROTOTIPI DI LEGNOLAMELLARE SENZA RINFORZI CON COLLA MELAMMINICA

In relazione alle prove di delaminazione sono stati messi a punto cicli di prove umido – secco al variare della temperatura. I prototipi sono stati inseriti nella cabina della macchina di invecchiamento accelerato ACS Challenge CH1200 SP in cui sono stati eseguiti 6 cicli di prove, per un totale di 356,5 ore, con il 90% di umidità e 90°C di temperatura. Una prima partita di campioni è stata sottoposta ad una serie di prove della durata di 48 e 72 ore.



Figura 5. Trave rinforzata con fibre di vetro e carbonio applicate con resina epossidica e trave senza rinforzo incollata con adesivo epossidico.

Già alla fine del primo ciclo di 48 ore tutti i campioni risultavano decoesi in corrispondenza delle linee di colla e con un distacco molto evidente dove erano stati applicati i rinforzi con la resina epossidica.

Tale fenomeno si è anche verificato in campioni senza rinforzo dove le lamelle erano state incollate con adesivo epossidico. Le prove in autoclave, in definitiva, non fanno altro che accelerare maggiormente il processo di invecchiamento rispetto alle altre attrezzature di prova. Un primo ciclo di prove è stato attivato impostando delle condizioni tali da portare le capacità della macchina fino ad elevati livelli di stress.

La prova è stata eseguita, manualmente, in 24 minuti secondo le seguenti modalità:

- Carico H2O (durata 1 minuto)
- Depressione a 800 mBar (durata 2 minuti)
- Pressione a 1.200 mBar (durata 2 minuti)
- Scarico H2O (durata 2 minuti)
- Ricircolo aria (durata 2 minuti)
- Temperatura a 80° C, con umidità del 95% (durata 15 minuti)
- Pressione:60 mBar

Questo ciclo di prove è stato applicato a una prima partita di campioni rinforzati con fiocchi di fibre di vetro e carbonio applicati con resina epossidica e al campione senza rinforzo era stato incollato con resina epossidica, il risultato è stato la decoesione delle lamelle in corrispondenza delle linee di incollaggio con adesivo diverso dalla colla melaminica.

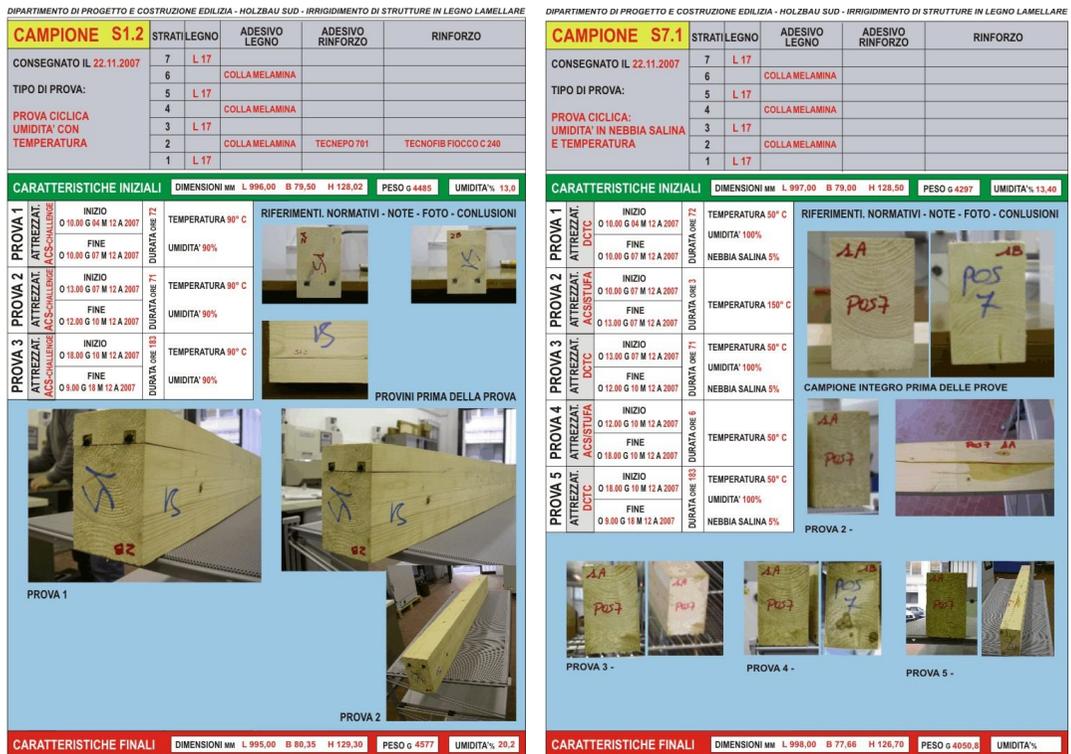


Fig 6. Schede di sintesi dei risultati delle prove di durabilità al variare di temperatura ed umidità

Da questa prima campagna di prove, applicata a provini in legno lamellare standard e rinforzati con fiocchi di fibre di vetro e carbonio incollati con resina epossidica, si sono ricavati i primi risultati sulla durabilità dell'incollaggio con resina epossidica, dimostrando che i fattori maggiormente influenti sono riferibili al rapporto tra umidità e temperatura ed in minima parte alla presenza di nebbie saline.

Questi risultati hanno permesso di escludere gli effetti prodotti dall'esposizione ai raggi U.V. a meno di un lieve cambiamento di colore.

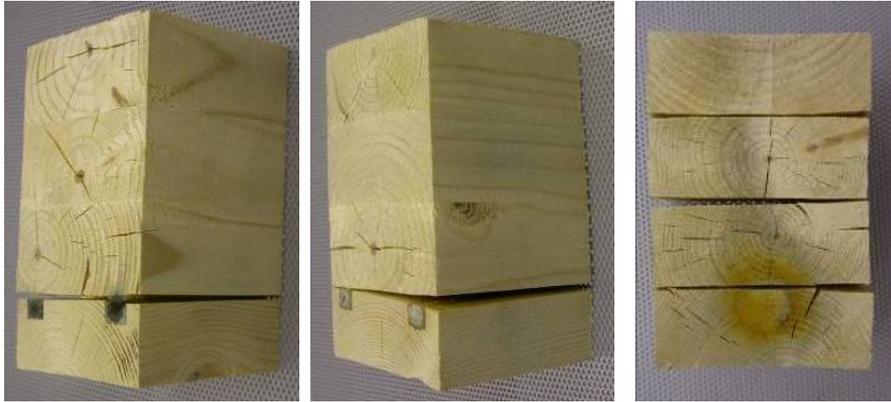


Figura 7. Travi rinforzate con fibre di carbonio e vetro e adesivo epossidico - trave in legno lamellare normale con tutte le lamelle incollate con adesivo epossidico

4. Terza fase

Durante la prima fase le prove meccaniche effettuate sui prototipi non hanno dato rilevanti incrementi di rigidezza a meno del tipo con barre in fibra di carbonio che presentavano l'inconveniente di un costo elevato.

	PRODUTTORE	CARATTERISTICHE TECNICHE											PREZZO al netto IVA				
		TIPO DI RESINA	DIAMETRI (mm)	LUNGH. (m)	SEZIONE	PESO SPECIFICO (kg/cm ³)	CONTENUTO DI FIBRE (% del peso)	RESISTENZA A TRAZIONE (MPa=N/mm ²)	MODULO ELASTICO A TRAZIONE (GPa)	RESISTENZA A FLESSIONE (MPa=N/mm ²)	MODULO ELASTICO A FLESSIONE (GPa)	RESISTENZA A COMPRESIONE (MPa=N/mm ²)		MODULO ELASTICO A COMPRESIONE (GPa)	ALLUNG. A ROTTURA	COEFF. DI DILATAZ. TERMICA (1/°C)	
BARE IN VETRORESINA	MAPEI MAPERCO G 40	vini ebrete epossidificato	9,53		circolare	1,9	75	760	40,8					2%	Dir long= 6-10 x10 ⁴ Dir trave= 20-25 x10 ⁴		
	KIMIA KINITECH TONDO V		6-12-16-20-24	2m	circolare	1,9	>70	1000	40				4,5%		q8=3,39 €/cm q12=4,79 €/cm		
	BRESCIANI SRL	poliestere	3-6-8-10-12-14-15-16-18-20	Solo 2m	circolare	1,9	50-70	400 - 650	35	300-450	32	250 - 450	25		7,5*10 ⁴	q8=1,2 €/cad q10=2,0 €/cad q16=4,0 €/cad q10=5 €/cad	
	CTS SRL	poliestere	3-4-6-8-10-12-14 -16-18-20	Solo 2m	circolare	1,9	68	650	35	625	32	220	20		7,5*10 ⁴	q8=2,75 €/cad q10=3,70€/cad q20=19,6€/cad	
	DURGLASS	poliestere	5,5-7,5-10-12-15-18-20-22-25-28		circolare	1,9	70	1000	40								
	RIMATEX SRL	epossidica poliestere			Arrotolata bile fino a q 8 (maximo 2,3m)	circolare										q 8 = 3 €/cm	
	HUGHES BROTHERS		6-9-13-16-19-22-25-29-32		circolare		70	825-760-690-655-620-586-550-517-480	40,8							Dir long= 6,58*10 ⁴ Dir trave= 33,7*10 ⁴	
	COMPROD	epossidica	8-10		circolare		65			Vetro E: 45 Vetro S: 53 Basalto: 57	Vetro E: 32 Vetro S: 37 Basalto: 40					Vetro E q 8=0,56 €/cm q 10=5,88 €/cm Vetro S: q 8=3,77 €/cm q 10=5,73 €/cm Basalto: q 8=1,20 €/cm q 10=1,70 €/cm	
	PHASE ITALIA	Poliestere epossidica			circolare	1,65-1,85	50-70	400-650	15-32	300-600		150-300				15-17*10 ⁴ 15-17*10 ⁴	
	BARE IN FIBRA DI CARBONIO	MAPEI MAPERCO C 150	resina epossidica	9,70		circolare	1,54	71	2000	155				1,5%		Dir long= 6*10 ⁴	q8=34,38 €/cm q10=36,9 €/cm
KIMIA KINITECH TONDO C			8-10-12	2m e su richiesta	circolare	1,6	60	2300	130				1,5%		Dir long= 6*10 ⁴	q8=34,38 €/cm q10=36,9 €/cm	
BRESCIANI SRL		epossidica	7,5		circolare	1,5	68	3400	170						0,5x10 ⁴		
RIMATEX SRL			3-4-6-8-10-12-14-16-18-20		circolare	1,78		4800	240					2,1 %		q 8=9,5 €/cm	
BETONTEX			8-10		Arrotolata bile fino a q 8 (creati da 50 a 100 m) (tecnicamente migliorati)	circolare	1,5	58	3500	240				2,1 %		LISCIA q 8=11 €/cm q 10=15 €/cm AZER NEGULOR q 8=13 €/cm q 10=16 €/cm	
HUGHES BROTHERS			6-9-12		circolare			2068	124						Dir long= 2-5 0*10 ⁴ Dir trave= 74-104 *10 ⁴		
COMPROD		epossidica	8-10		circolare		65		156		109					q 8=4,71 €/cm q 10=7,19 €/cm	

Figura 8. Riepilogo delle caratteristiche delle barre trovate nel mercato

Si è effettuata, quindi, un'indagine di mercato per determinare le possibili barre in commercio o in fase di sperimentazione che possedessero quei requisiti tali da rendere il prodotto innovativo.

E cioè un elevato modulo elastico, un basso costo e fossero confezionati in matasse.

Con tali requisiti si sperava di potere ottenere un prodotto innovativo con più alti livelli di rigidità rispetto a quelli standard e con costi del materiale e di produzione tali da renderlo competitivo.

In particolare si è trovato un tipo di barra realizzata con fibre di basalto e resina epossidica che, oltre a possedere quei requisiti essenziali per la produzione, possiedono un modulo elastico sensibilmente superiore ad analoghe barre realizzate con fibra di vetro.

5. QUARTA FASE

Sulla base dei risultati ottenuti nelle due fasi precedenti è stata confezionata una nuova partita di campioni che superasse i limiti riscontrati durante i cicli di prove effettuate; i campioni sono stati incollati tutti con colla melaminica e rinforzati anche con materiali innovativi risultati dalla ricerca di mercato effettuata.

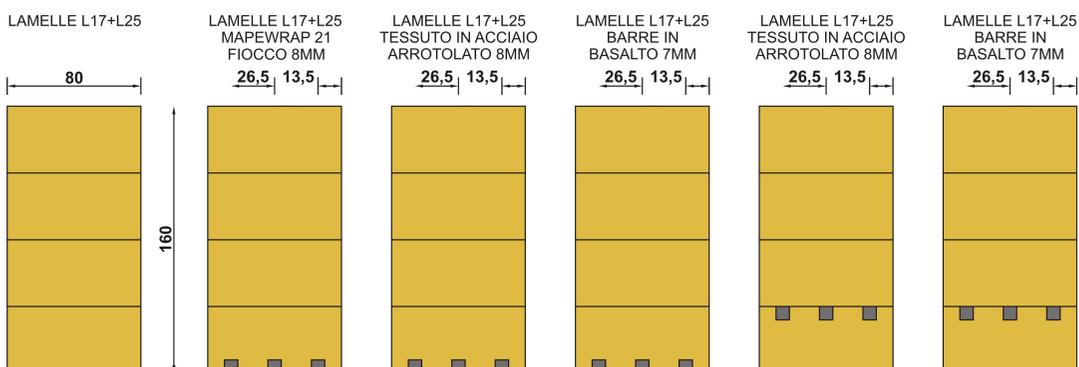


Figura 9. Riepilogo delle caratteristiche delle barre trovate nel mercato

Per quanto riguarda lo svolgimento delle prove di delaminazione si è fatto riferimento alla normativa UNI EN 391:2003 – Legno lamellare incollato – Prova di delaminazione delle superfici di incollaggio.

L'ultima campagna di prove è stata eseguita sui prototipi rinforzati con barre in vetroresina, basalto e reticolo in acciaio sono stati eseguiti 6 cicli di prove, per un totale di 356,5 ore, con condizioni di 90% di umidità e 90°C di temperatura.

La prima prova ha avuto durata di 160 ore, la seconda 48 ore, la terza 42 ore, la quarta 42 ore, la quinta 48,5 ore e la sesta 16 ore.

Alla fine dei sei cicli di prove i campioni non presentavano particolari alterazioni, se non quella cromatica, le lamelle erano tutte incollate fra di loro ed i rinforzi non risultano particolarmente alterati.

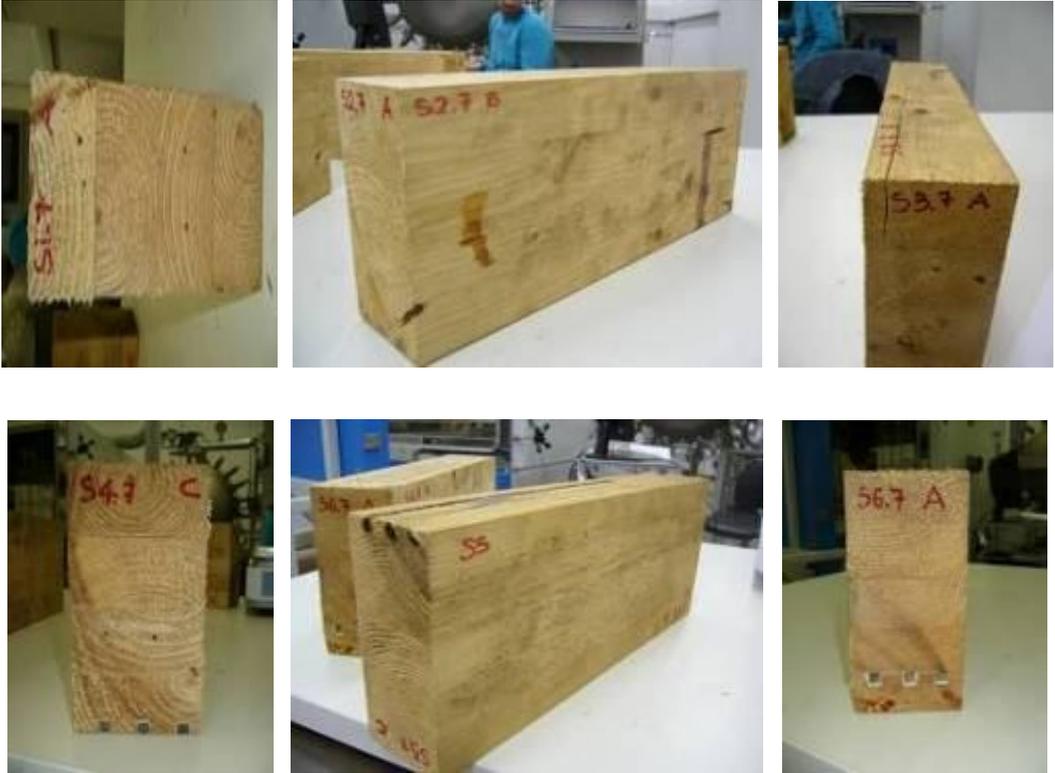


Figure 10. Campioni dopo l'ultima prova in camera climatica

Si sono rilevati lievi lesioni, più o meno estese, nei campioni rinforzati con barre in basalto e rete metallica, in corrispondenza della lamella superiore,; anche in questo caso i rinforzi in acciaio si sono in parte corrosi, a causa dell'adesivo poco compatto e disomogeneo.

In particolare il sistema di rinforzo realizzato con fibre di vetro non ha fornito buoni livelli di durabilità nella prima campionatura in cui erano state inserite in forma di fiocco.

Questi limiti sono però stati superati con il rinforzo in forma di barre che durante le prove hanno mantenuto livelli di adesione soddisfacenti tra rinforzo e lamella.

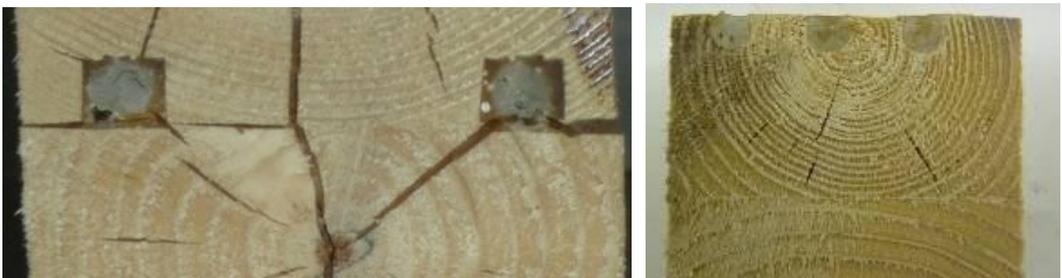


Figura 11 Confronto tra campioni rinforzati con fibre di vetro

Il rapporto tra fibre e matrice risulta molto più equilibrato e non sono più presenti punti in cui il fiocco non è solidale con la matrice ed il legno della lamella che lo contiene, inoltre la scanalatura dove alloggiare il rinforzo è di forma circolare e permette una migliore adesione del rinforzo al legno.

Con la prova di delaminazione si è introdotto un gradiente di umidità nel legno al fine di generare azioni interne; ciò ha determinato sollecitazioni di trazione perpendicolari alle superfici di incollaggio.

Si è così proceduto in accordo con la normativa che dava indicazioni su tre tipi di prova correlate a specifiche condizioni climatiche ed al tipo di adesivo utilizzato.

Dai prototipi sono stati prelevati, dalla parte intermedia, dei campioni di dimensioni concordi con quanto specificato dalla Norma UNI EN 391:2003. Si è scelto di impostare i parametri della macchina secondo la PROVA B, intermedia fra le altre due proposte (figura 7).

Al termine di ogni prova sono state calcolate le percentuali di delaminazione di ogni singola lamella, così come suggerito dalla norma di riferimento; e quindi la percentuale di delaminazione totale.

UNI EN 391:2003					
Legno lamellare incollato - Prova di delaminazione delle superfici di incollaggio					
PROVINO					
DIMENSIONI mm L 75,00 ± 5 B min 130,00 H min 300,00					
PROVA A Adesivi tipo I	TEMP. ACQUA	DEPRESSIONE	PRESSIONE	ESSICCAMENTO	N. CICLI
	10°C - 20°C elegante prosci.	15kPa - 30kPa per 5 min	600kPa - 700kPa per 1h	Temp. 60°C - 70°C Umid. rel. <15% Vel. 2-3m/s Durata: 21-22 h	2 N. CICLI SUPPL. 1
DOPPIO CICLO (130 min)					
PROVA B Adesivi tipo II	TEMP. ACQUA	DEPRESSIONE	PRESSIONE	ESSICCAMENTO	N. CICLI
	10°C - 20°C elegante prosci.	15kPa - 30kPa per 30 min	600kPa - 700kPa per 2h	Temp. 60°C - 70°C Umid. rel. 6-10% Vel. 2-3m/s Durata: 10-15 h	1 N. CICLI SUPPL. 1
PROVA C Adesivi tipo III	TEMP. ACQUA	DEPRESSIONE	PRESSIONE	ESSICCAMENTO	N. CICLI
	10°C - 20°C elegante prosci.	15kPa - 30kPa per 30 min	600kPa - 700kPa per 2h	Temp. 25°C - 30°C Umid. rel. 25-35% Vel. 2-3m/s Durata: 90 h	1 N. CICLI SUPPL. 0
DOPPIO CICLO (5 h)					

Figura 12. Parametri Norma UNI EN 391:2003

I campioni dopo il ciclo non mostrano particolari alterazioni se non un lieve viraggio cromatico; non si sono verificate significative aperture in corrispondenza delle superfici di incollaggio ed anche i rinforzi non risultano particolarmente alterati. Si sono però rilevate, quelle che la normativa definisce, anomalie e cioè: modeste aperture nella superficie di incollaggio in prossimità dei nodi nel legno, sia per i campioni senza rinforzo che in corrispondenza del rinforzo nel caso di barre in basalto, tra l'adesivo ed il rinforzo con un lieve distacco dello stesso nel caso in cui questo era posto nella parte inferiore dell'ultima lamella.



Figura 13. Campione senza rinforzo e con rinforzo in basalto dopo la prova Bmed

Per quanto riguarda i rinforzi in acciaio si sono in parte corrosi, probabilmente perché l'adesivo risulta essere poco compatto e disomogeneo.

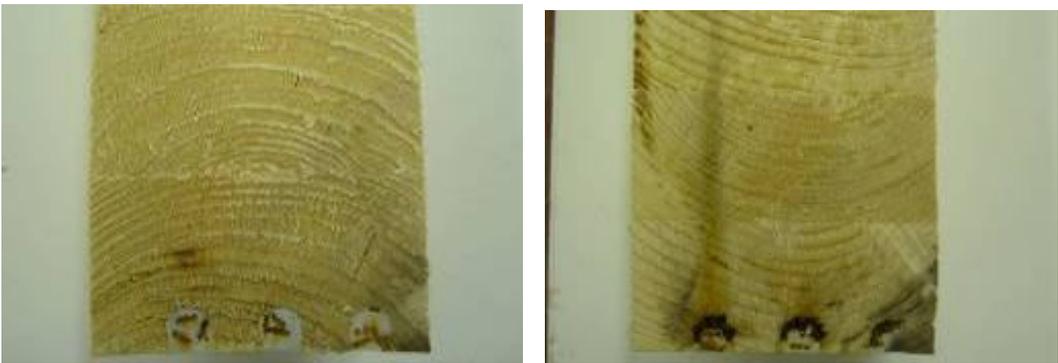


Figura 14. Campione con rinforzo in reticolo di acciaio dopo la prova Bmed

4. Conclusioni

Al termine dei cicli di prove di invecchiamento accelerato è stato possibile registrare, in relazione alle condizioni proposte, un miglioramento delle prestazioni di adesione tra il tipo di rinforzo e le lamelle.

Il rapporto tra fibre e matrice risulta molto più equilibrato e non sono più presenti punti in cui il fiocco non è solidale con la matrice ed il legno della lamella che lo contiene, inoltre la scanalatura dove alloggiare i rinforzo è di forma circolare e permette una migliore adesione del rinforzo al legno.

Il rinforzo ottenuto con le barre di basalto costituisce un sistema assolutamente innovativo per il tipo di materiale che costituisce una novità sul mercato. Il sistema ha un buon modulo di elasticità.

Una situazione a parte è costituita dal sistema di rinforzo con reticolo in acciaio che forse per una non corretta messa in opera (i prototipi consegnati presentavano ampie zone mancanti di adesivo e il reticolo sfibrato in più punti) risulta corrosivo. Ciò ha prodotto macchie e deterioramento delle lamelle di legno, nonché una perdita di efficienza del materiale stesso.

Questo tipo di rinforzo, se inserito tra le lamelle come per gli altri campioni, avrebbe potuto superare i suddetti inconvenienti.

5. Bibliografia

1. Alves Dias A., Fiorelli J., (2006), "Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber", *Materials Research*, Vol. 9, n° 3.
2. Bergmeister K., Luggin W., (1998), "Carbon fiber reinforced and prestressed timber beams", Budapest.
3. Blaß H. J., Romani M., (2001), "Design model for FRP reinforced glulam beams", Venezia.
4. Brusati G., Laner F., "La tecnologia del legno lamellare fibrorinforzato (L.L.F.)", *L'Edilizia*, n° 3, (1993).
5. Cattich C., Gottardi L., Piazza M., "ARMALAM. Strutture innovative in legno lamellare armato", *L'Edilizia*, n°128, (2003).
6. Dagher H.J., Lindyberg R.F., (1997), "Probabilistic nonlinear model for reinforced glulam beam", Maine,.
7. Dagher H. J., Kimball T. E., Shaler S. M., (1996), "Effect of FRP Reinforcement on Low Grade Eastern Hemlock Glulams", Maine.
8. Dattomi A., (2001), "I compositi a base di legno strutturali. Materiali compositi a base di legno fibrorinforzati, FRP", *L'Edilizia*, n° 2 - Speciale Lamellare.
9. Dattomi A., (1999), "FRP Reinforced Glulam Technology. La tecnologia del legno lamellare fibro-rinforzato", *L'Edilizia*, n° 1-2.
10. Davalos J. F., Hernandez R., Sonti S. S., Kim Y., Moody R. C., (1997) "Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams".
11. Faraj A. K., Fioriani L., Kombila A. (1992), "Sperimentazione sul legno lamellare rinforzato con fibre di vetro", *Tecnologos*.
12. Gamache C. P., (2001) "Preliminary investigation on the durability of FRP reinforced glulam bridge girders", Maine.
13. Giordano F. (1993)., "I materiali compositi a base legnosa: analisi della produzione e proposta per un nuovo composito a base legnosa", *Tecnologos*.
14. Guan Z.W., Pope D.J., Rodd P.D., (2005), "Study of glulam beams pre-stressed with pultruded GRP", *Science Direct*.
15. Jordan A. R., (1998) "Wet preg reinforcement of glulam beams", Maine.
16. Lopez-Anido R., Xu H., (2002) "Structural Characterization of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Glulam Panels for Bridge Decks", *Journal of composites for construction*, August,.
17. Martin Zeno A., Tingley D. A, "Fire resistance of FRP reinforced glulam beams", Maine.
18. Modena R., Piazza M., Tomasi R., (2006) "Strutture in legno – Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee", Milano.
19. Paulin J.P, (2001) "Bond and static bending strength of FRP-Reinforced glulam beams using western wood species", Maine.