

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE E AMBIENTALE



Tesi di laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Applicazioni strutturali del microlamellare di legno LVL

Structural applications of Laminated Veneer Lumber

Relatore: **Prof. Roberto Scotta**

Laureando: Stefano Marcolin

Matricola: 1105525

Anno accademico: 2017/2018

INTRODUZIONE

Il microlamellare rappresenta una evoluzione dell'uso del legno nelle costruzioni, nell'ottica di un utilizzo sempre più strutturale e non solo decorativo. Un materiale ad alte prestazioni costituito da strati di sfogliati di legno di conifera permette di avere uno spessore tale da minimizzare e distribuire le imperfezioni e ottenere una notevole resistenza, soprattutto se confrontato con altri materiali lignei. La possibilità di avere uno spessore ridotto non implica solo un risparmio di materia prima, ma anche il raggiungimento di sollecitazioni notevoli. Vista la scarsità di materiale normativo, si fa riferimento perlopiù alla norma europea vigente, l'Eurocodice 5 e la normativa EN 14374:2004, che garantiscono la qualità dei prodotti in legno e la rintracciabilità del processo produttivo. In base alla sua composizione, l'LVL ha ridotte deformazioni di ritiro, svergolamento o fessurazioni grazie alla bassa umidità e permette una riduzione del numero dei giunti.

In ambito costruttivo, travi, pannelli o lastre in microlamellare presentano, però, una criticità non trascurabile: il costo elevato. Nonostante le caratteristiche di resistenza consentano il risparmio di materiale rispetto al legno massiccio o al lamellare, (riducendo le dimensioni della sezione di una trave o lo spessore di un solaio) ciò non compensa la differenza di costi.

L'elevato prezzo di mercato di questo materiale è legato soprattutto alla scarsa permeabilità delle informazioni riguardanti il microlamellare da parte delle aziende produttrici che, essendo praticamente monopoliste di questo mercato, non sono disposte a divulgare così facilmente risultati sperimentali o processi di produzione. Di conseguenza, l'innovazione dei metodi di produzione per ottimizzare tempi ed abbassare i costi risulta procedere a rilento.

Per questo motivo, in Europa il Kerto non viene spesso utilizzato nella normale edilizia ed è stato quindi necessario ricercare un suo utilizzo che fosse economicamente conveniente.

Il compromesso migliore sembrerebbe quello dell'impiego di pannelli come rinforzo strutturale. Quando si interviene su impalcati lignei esistenti, generalmente ci si trova di fronte a problematiche legate a deformazioni flessionali prodotte dai carichi di esercizio e deformazioni permanenti accumulate nel tempo. Far fronte a questo tipo

di tematiche costituisce un motivo conduttore per i materiali più innovativi, come il microlamellare oggetto di studio.

La realizzazione di solai composti (legno-legno o legno-calcestruzzo) rappresenta una delle tecniche di rinforzo più diffuse e una interessante campagna sperimentale è stata svolta proprio in questo ambito.

Per garantire una certa integrità del solaio, è bene concentrarsi sulle connessioni, tramite singola vite inclinata, oppure a viti incrociate. Il punto chiave per garantire una buona resistenza meccanica nelle strutture da rinforzare è costituito, infatti, dall'uso di connettori con un'adeguata forza e rigidità.

Una recente valutazione sperimentale ha proposto un metodo teorico semplificato per calcolare la resistenza a taglio e rigidità dei giunti TCC (composti legno - calcestruzzo) tramite l'utilizzo di viti autofilettanti. È stato quindi riportato un confronto tra la normativa in vigore e le relative procedure progettuali.

Analisi di questo tipo, con paragoni a test sperimentali, di certo non individuano uno standard assoluto, ma gettano la base per una conoscenza sempre più approfondita di questo materiale avanguardistico.

INDICE

CAPITOLO 0 - CARATTERISTICHE E VANTAGGI DEL LEGNO NELLE COSTRUZIONI	7
Il legno come materiale da costruzione.....	7
Sostenibilità ambientale	8
Caratteristiche meccaniche del legno	9
Aspetti normativi	11
Materiali lignei per lo sviluppo di elementi costruttivi	13
CAPITOLO 1 - MICROLAMELLARE: UN MATERIALE LIGNEO ANCORA POCO CONOSCIUTO	18
Il processo produttivo degli elementi in LVL: materie prime, fasi e attività.....	19
Attuali conformazioni del prodotto e processi di lavorazione	21
Tipologie di Kerto	24
Kerto®-Q.....	24
Kerto®-S	25
Kerto®-T.....	26
Pregi e difetti del microlamellare di legno	27
Sistemi di connessione e facilità di lavorazione.....	28
Salvaguardia dell'ambiente	28
Colle sintetiche e loro impiego	30
Aspetti estetici del Kerto	30
Una domanda in espansione.....	32
Confronto prestazionale con il lamellare tradizionale	35
Durabilità degli elementi in LVL	36
Comportamento al fuoco	36
Tendenze innovative e prospettive di sviluppo.....	36
Collegamento con resine epossidiche	38
CAPITOLO 2 - IMPIEGHI ECONOMICAMENTE CONVENIENTI PER L'LVL.....	42
Utilizzo dell'LVL come materiale di rinforzo strutturale.....	43
Rinforzi per stati di sollecitazione di trazione perpendicolare alla fibratura.....	43
Incollaggio a pressione con viti.....	43
Unioni trasversali.....	45
Intagli	46

Fori.....	47
Connessione rinforzata	48
Rinforzo di elementi strutturali esistenti.....	50
Rinforzo per solai lignei.....	50
Solai composti ad alte prestazioni	58
CAPITOLO 3 – CONNESSIONI TRAMITE VITI INCLINATE.....	68
Valutazione delle connessioni nelle strutture TCC.....	68
Configurazione a singola vite	70
Configurazione a X	73
Rigidità	73
Campagna sperimentale	74
Materiali	75
Legno.....	75
Viti.....	75
Calcestruzzo.....	76
Risultati dei Test	77
Confronto tra risultati sperimentali e valori analitici	80
Capacità di sopportazione del carico.....	82
Rigidità	83
Conclusioni	84
CAPITOLO 4 - APPLICAZIONE APPROCCIO TEORICO TCC CONNECTION.....	86
Formulazione proposta:	86
Formulazione secondo eu5:	87
GI24h /cls vs Kerto/cls.....	89
GI24h /cls vs Kerto/cls.....	92
Configurazione Kerto/Kerto.....	95
Discussione dei risultati	98
CAPITOLO 5 - CONCLUSIONI.....	100
BIBLIOGRAFIA	102

CAPITOLO 0 - CARATTERISTICHE E VANTAGGI DEL LEGNO NELLE COSTRUZIONI

Il legno come materiale da costruzione

Il legno è stato uno dei primi materiali da costruzione e ha rappresentato per l'uomo la possibilità di risolvere, per molti secoli, i più complessi problemi strutturali e di produrre una molteplicità di utensili ed oggetti indispensabili per la vita di ogni giorno. Nel campo dell'architettura, il legno può essere un elemento significativo, oppure essere impiegato in modo da non apparire: c'è una grande differenza fra la casa nordica, dove muri, pareti, solai, coperture e rifiniture sono costruiti in legno, e la casa mediterranea, dove il legno è l'elemento portante dei solai, dei tetti, ma spesso non in vista, essendo preminente la struttura muraria in pietra o laterizio. In Italia, il legno nelle costruzioni significa elemento per resistere agli sforzi di flessione (trave), capriata per le coperture e anche infissi di porte e finestre. Come materiale da costruzione, il legno ha però il grave difetto di una durata valutabile intorno ai 50-80 anni a seconda delle condizioni di impiego quindi certamente molto meno rispetto alla durata secolare della pietra e dei laterizi. Essendo inoltre un materiale combustibile, il pericolo degli incendi ha costituito sempre una minaccia per le costruzioni in legno. L'uso del legno nelle costruzioni, almeno in Italia, è venuto via via diminuendo con l'introduzione dell'acciaio prima e del cemento armato poi; scompare quasi del tutto per i solai, resta ancora in determinate zone per le coperture.

Nel campo strutturale, si avverte una certa tendenza all'utilizzo del legno cosiddetto lamellare, che permette la copertura di grandi luci con strutture portanti leggere, resistenti e, per le loro grosse sezioni, anche abbastanza inattaccabili dal fuoco. Con questa tecnica dei legni lamellari, resa possibile per le eccezionali proprietà adesive dei nuovi collanti, possono essere eliminati i gravi difetti del legno massello. In questa tesi viene trattato un prodotto simile a quest'ultimo ma con caratteristiche migliorate: il legno microlamellare LVL (Laminated Veneer Lumber), conosciuto in Europa come Kerto.

Sostenibilità ambientale

Prima di entrare nello specifico delle costruzioni in legno, è doveroso spendere qualche parola sulla sostenibilità delle costruzioni realizzate utilizzando questo straordinario materiale. Nella conferenza sulla protezione del clima di Kyoto in Giappone del 1997 sono stati fissati gli obiettivi vincolanti a livello legale per la riduzione delle emissioni dei gas serra. Il protocollo di Kyoto è stato ratificato dall'Italia con la Legge n. 120 del 2002. Il trattato è entrato in vigore il 16 febbraio 2005, e prevede l'obbligo in capo ai paesi industrializzati di operare nel periodo compreso tra il 2008-2012 una riduzione delle emissioni in una misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990, considerato come anno base. Secondo un rapporto del Global Carbon Project, le emissioni di CO₂ nel 2012 sono in crescita del 58%; questo fatto è attribuibile solamente a un ristretto numero di Stati. Basti pensare che le emissioni cinesi sono cresciute del 9,9% nel 2011 e del 10,4% l'anno precedente (oggi il gigante asiatico è responsabile del 28% della CO₂ emessa nel mondo, contro il 16% degli USA). A oggi, 177 Paesi e un'organizzazione di integrazione economica regionale (EEC) hanno ratificato il protocollo o hanno avviato le procedure per la ratifica. Abbattere il contenuto in atmosfera di anidride carbonica è un impegno sociale per le future generazioni oltre che un obbligo normativo e l'utilizzo del legno a uso strutturale per l'edilizia abitativa va nella direzione del protocollo di Kyoto. La quasi totalità del legno per la produzione industriale destinata all'edilizia oggi, per quanto riguarda il mercato italiano, proviene dalla foresta austriaca dove sono immagazzinati circa 800 milioni di tonnellate di carbonio (C). Quindi il legno immagazzina appunto anidride carbonica che rimane legata anche quando l'albero viene abbattuto per essere usato.

Durante la fase post terremoto del sisma che ha colpito L'Aquila nel 2009 il quantitativo totale di legno per pannelli XLAM fornito da una singola azienda è stato riprodotto dalle foreste di origine in sole 3,5 ore di attività. Si stima che il quantitativo di materiale utilizzato per la produzione dei 29.000 m² di alloggi a struttura in legno abbia permesso di fissare a lungo termine circa 9.900 tonnellate di CO₂.

Da questa rapida panoramica sulla funzione regolatrice di anidride carbonica

dell'albero, e quindi del legno, è evidente che l'utilizzo a uso strutturale del legno, in una società che produce anidride carbonica è una scelta in direzione della sostenibilità.

Caratteristiche meccaniche del legno

Il legno è un materiale solido, naturale, organico e cellulare costituito da un complesso chimico di cellulosa, emicellulose, lignina ed estrattivi; è un materiale molto anisotropo: le fibre sono orientate in una direzione preferenziale e perciò il materiale reagisce alle sollecitazioni in maniera diversa in ogni direzione. Le caratteristiche meccaniche del legno variano entro limiti amplissimi, che dipendono dall'essenza, dal peso specifico secco, dal grado di umidità, dalla direzione delle fibre rispetto alla sollecitazione e dai difetti del legno stesso (nodi, cipollature, ecc.). Le prove sperimentali del legno si effettuano su campioni ricavati da legno sano e senza difetti. Per quanto riguarda la compressione assiale parallelamente alle fibre, il carico di rottura viene determinato su provini di 2 x 2 x 3 cm, con umidità del 12% e si ottiene da: $\rho_r = P/4$ [kg/cm²]

Se la compressione è perpendicolare alle fibre, i valori del carico di rottura sono molto inferiori a quello assiale. Si riducono a un quinto, con variazioni notevoli in relazione al tipo di legno, se invece la compressione è inclinata rispetto alle fibre. I valori del carico di rottura variano moltissimo in funzione dell'angolo α .

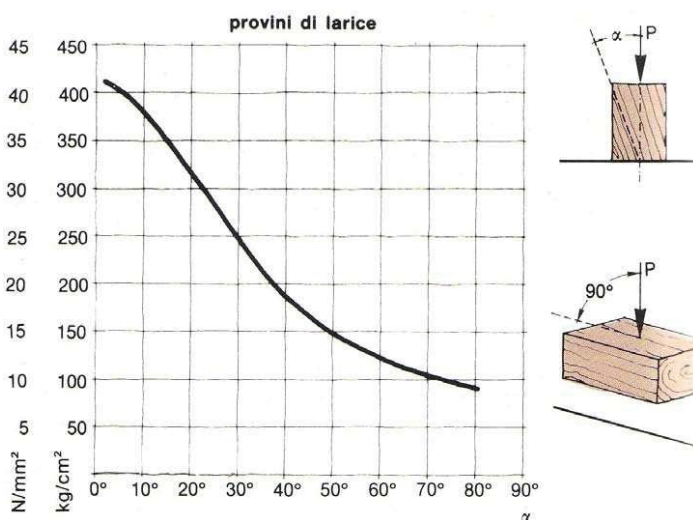


Figura 1 -

Per quanto riguarda la resistenza a trazione, in generale risulta più grande di quella a compressione (almeno doppia), sempre riferita parallelamente alle fibre. Se si considera il rapporto tra il carico di rottura e il peso specifico, si nota che il legno lavora quasi meglio dell'acciaio. Tuttavia, la resistenza a trazione è notevolmente ridotta dalla presenza dei nodi e dalle irregolarità della fibratura.

Una trave generica sottoposta a sollecitazione di flessione si deforma elasticamente, producendo sulle fibre interne uno sforzo di compressione e uno di trazione, secondo il noto diagramma di Navier. Per il legno, l'andamento delle tensioni è rappresentato dalla figura qui sotto ed è diverso da quello teorico di Navier.



Figura 2 -

La resistenza a flessione è influenzata dall'umidità e dai difetti del legno; è bene scartare le travi con spaccature longitudinali e nodi posti nella zona tesa.

Nel caso di sollecitazione di scorrimento lungo le fibre, i valori di resistenza sono molto bassi da un minimo di 4 N/mm² ad un massimo di 12 N/mm².

Per sollecitazione normale alle fibre la resistenza assume valori notevoli, da un minimo di 12 N/mm² ad un massimo di 40 N/mm².

Per quanto riguarda la rottura per fatica, ovvero quando una trave in legno è soggetta a un alternarsi di condizioni di carico, passando ciclicamente da un carico zero a un carico massimo, si verifica dopo almeno un milione di cicli e il materiale si rompe per un carico unitario pari a circa il 35% del carico di rottura a flessione statica. È una caratteristica importante per stabilire le difficoltà e le modalità di lavorazione del

legno, che può essere spaccato, segato, forato, piallato, raspato, lisciato, ecc. La durezza è funzione diretta del peso specifico e dell'età del legno, mentre diminuisce notevolmente con l'aumento dell'umidità.

Caratteristica importante per tutti i materiali legnosi impiegati nelle pavimentazioni è la resistenza all'usura che è notevole per le essenze forti a elevato peso specifico, come la quercia, il bosso, la robinia, il noce. Il modulo di elasticità E è ricavabile dalle prove di trazione o compressione oppure dalle prove di flessione, misurando con precisione le deformazioni dovute ai carichi. Il valore di E è influenzato dall'umidità; in genere varia da legno a legno da un minimo di 7500 ad un massimo di 15000 N/mm.

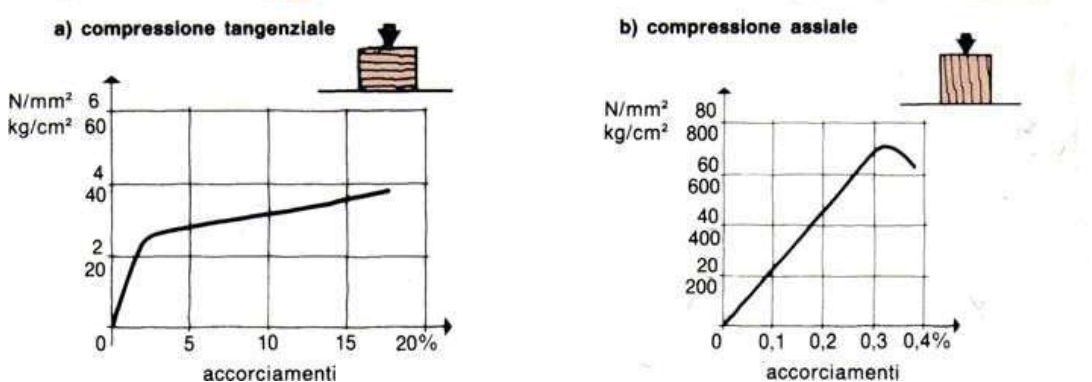


Figura 3 -

Aspetti normativi

Le norme tecniche italiane hanno lo scopo di garantire che le costruzioni posseggano i livelli di sicurezza minimi scelti dal legislatore. A tal fine, ogni progetto comprendente strutture in c.a., c.a.p., o metalliche deve essere depositato a cura del costruttore, in un archivio esistente presso l'Ufficio del Genio Civile competente per territorio. Di recente questo obbligo è stato esteso anche alle strutture in legno nel rispetto delle indicazioni specifiche sulle costruzioni di legno e sui materiali e prodotti a base di legno presenti nei paragrafi 5.3 e 11.6 delle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14/09/05. Prima dell'entrata in vigore di questo decreto, un progettista poteva effettuare i calcoli strutturali per le strutture in legno nel rispetto di "leggi di comprovata affidabilità" redatte in altre nazioni come ad esempio la DIN 1052 della Germania, la REGLES C.B. 71 della Francia ecc. Tuttavia, per poter essere utilizzata

anche in Italia, doveva prima essere redatto il NAD (Documento di Applicazione Nazionale) avente la funzione di interfacciare il codice europeo con la norma italiana in materia che però era assente. Proprio per porre fine a tale mancanza, nel luglio del 1999, si è insediata presso il Ministero dei Lavori Pubblici la commissione incaricata alla redazione delle “Norme tecniche Italiane per la progettazione, esecuzione e collaudo delle Costruzioni in Legno” che non hanno mai visto la loro pubblicazione ufficiale. Nel 2003, infatti, a seguito della ben nota catastrofe dovuta al terremoto di San Giuliano di Puglia, il presidente del Consiglio dei Ministri emanò l’OPCM 3274 in accordo alle direttive proposte dai tecnici della Protezione Civile. In questa ordinanza vengono citati gli edifici con struttura in legno tra i sistemi costruttivi ammessi in zona sismica, eliminate le limitazioni in altezza per le strutture “interamente realizzate in legno lamellare”, e si inizia a fare riferimento ai principi dell’Eurocodice 8 (costruzioni in zona sismica). D’altra parte non vengono fissate alcune regole di calcolo specifiche per le strutture di legno. Nel 2005 l’OPCM 3431 colma finalmente il vuoto normativo, con l’introduzione del capitolo 9: “Edifici con struttura di legno”. Questo breve testo riprende i principi degli Eurocodici 8 e 5, con particolare attenzione alla deformabilità dei collegamenti, e quindi a relative disposizioni costruttive.

In definitiva, sono le norme tecniche per la costruzione NTC 2018 la base per il calcolo strutturale attuale e contengono tutte le indicazioni per la corretta progettazione. In particolare, nel paragrafo 4.4 sono indicati i principi di calcolo per gli elementi strutturali in legno e nell’11.7 la certificazione dei materiali in cui vengono considerati il legno massiccio con giunti a dita, lamellare incollato, e altri prodotti derivati dal legno per uso strutturale e relative procedure di qualificazione.

Materiali lignei per lo sviluppo di elementi costruttivi

La materia prima di tutti i prodotti di legno e a base legno è il cosiddetto legno tondo. A partire da esso, attraverso segagione ed essiccazione si ottengono i “segati”, che, a loro volta, possono essere sottoposti ad una ulteriore lavorazione della superficie in base alle esigenze dell’uso previsto. I possibili tipi di taglio, rappresentati nella seguente figura, influenzano la qualità del materiale ed il suo comportamento in caso di ritiro e rigonfiamento.

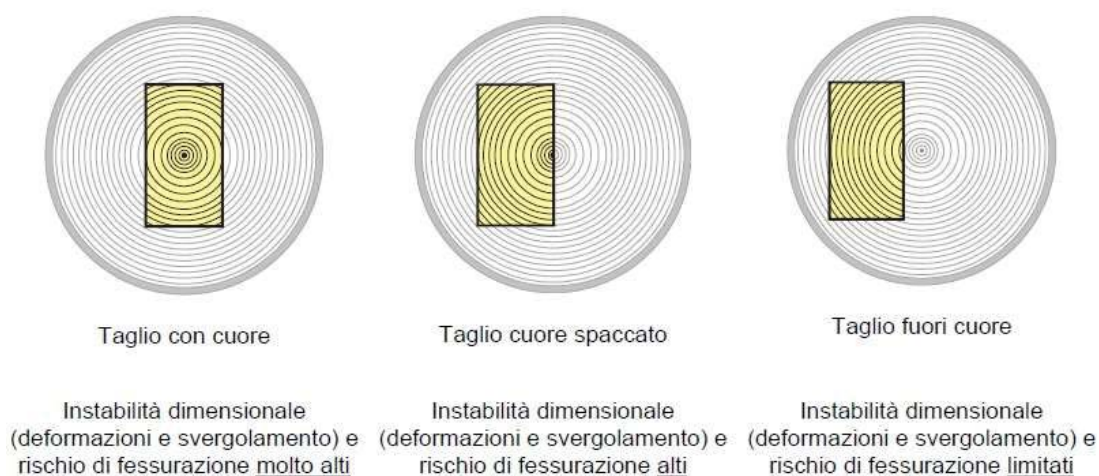


Figura 4 -

I segati possono essere classificati secondo la resistenza ed essere usati con funzione strutturale per elementi di tipo lineare di legno massiccio. Gli evidenti limiti nelle dimensioni e nelle caratteristiche fisico-meccaniche, derivanti dal fatto che i segati provengano da un unico tronco di legno, vengono superati grazie al processo di incollaggio, attraverso il quale è possibile realizzare prodotti di tipo lineare (legno massiccio da costruzione, travi duo/trio e legno lamellare incollato).

I segati vengono collegati in direzione longitudinale mediante il giunto a pettine, realizzando così un prodotto di maggiore lunghezza. Tramite incollatura della superficie possono esser uniti più elementi in direzione trasversale, ottenendo sezioni di dimensioni più grandi; tramite incollatura di più strati vengono prodotti gli elementi piani di legno massiccio e il compensato di tavole.

Mediante processi di lavorazione e produzione industriali, si possono realizzare

prodotti a base legno con caratteristiche meccaniche definite e con minore dispersione rispetto al legno massiccio. Di essi fanno parte prodotti piani o a forma di trave ricavati da piallacci, trucioli e fibre di legno.

Gli elementi costruttivi di legno di forma lineare, ad esempio travi o aste, sono da sempre utilizzati nel settore edile, ma un'evoluzione significativa si è avuta negli ultimi anni in seguito allo sviluppo di elementi costruttivi a base legno di forma piana, che è stato possibile mettere sul mercato grazie all'evolversi della possibilità di lavorazione e della tecnologia di incollaggio. In questa tesi si vedranno proprio le caratteristiche di uno dei materiali ottenuti grazie alle innovazioni tecnologiche e alle nuove colle di fissaggio: il legno microlamellare o l'LVL. Uno sguardo d'insieme dei vari prodotti derivati dalla lavorazione del legno è offerto nella figura a pagina seguente dove, ovviamente, è presente anche il microlamellare.

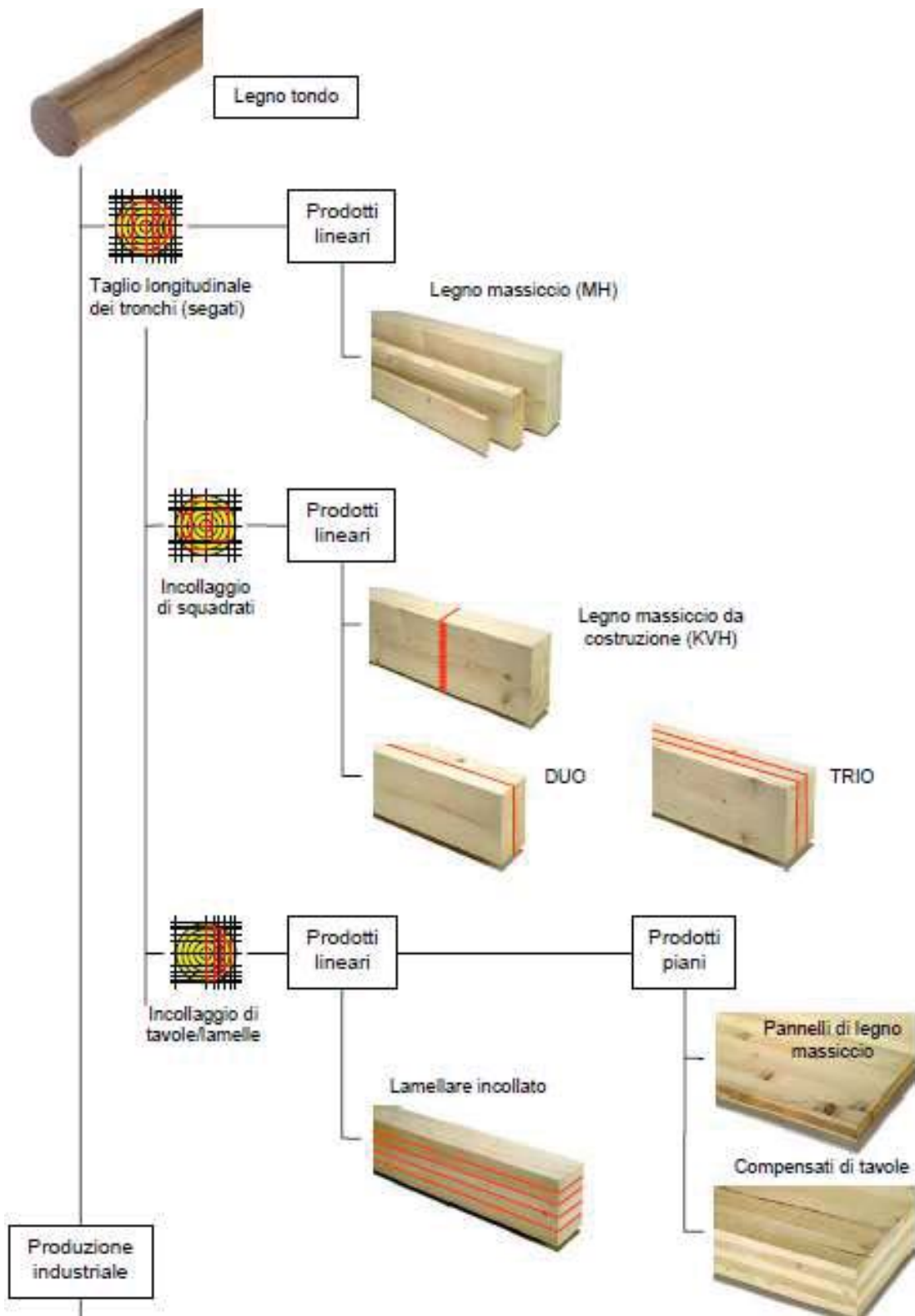


Figura 5 -

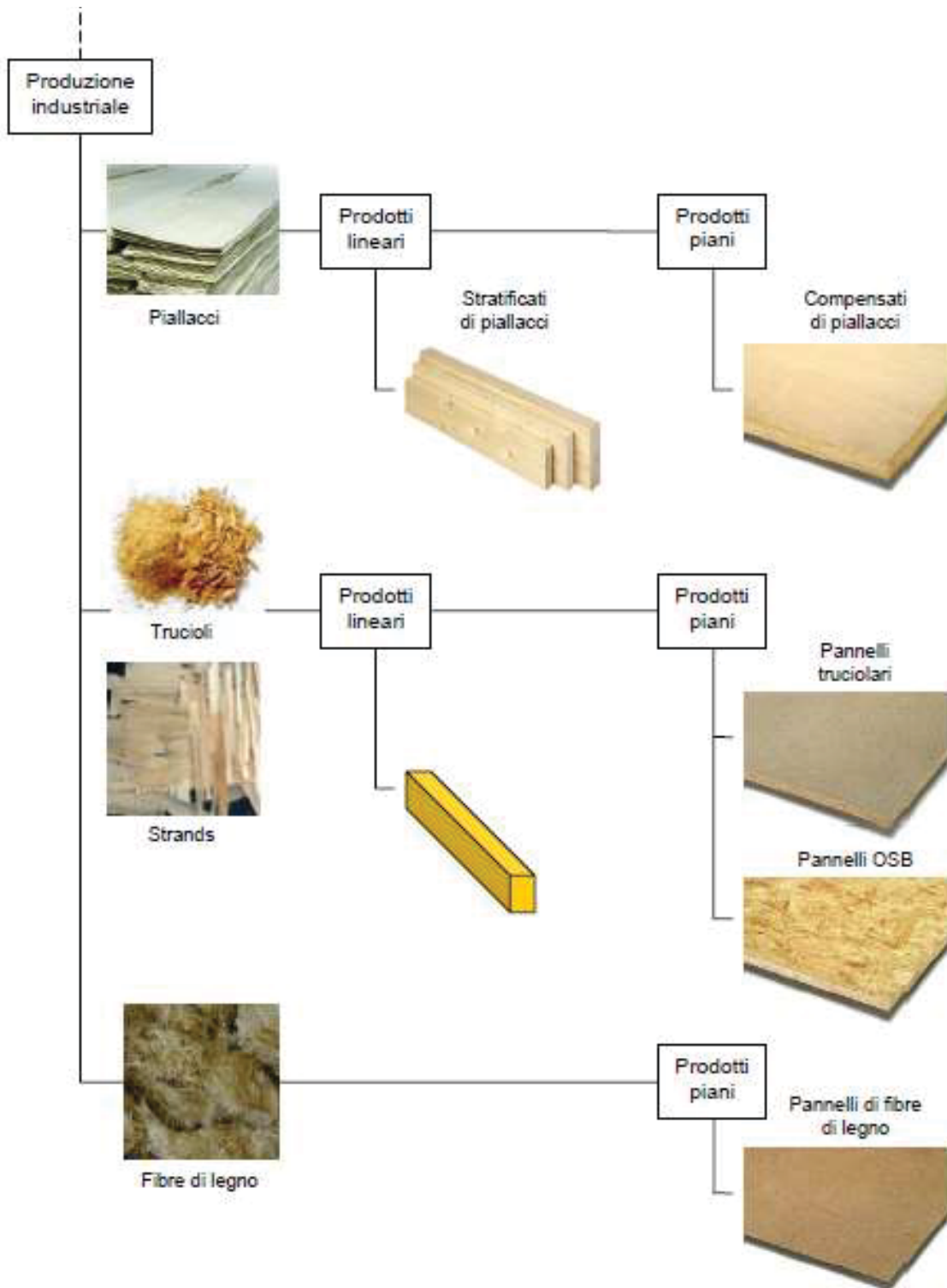


Figura 6 -

CAPITOLO I - MICROLAMELLARE: UN MATERIALE LIGNEO ANCORA POCO CONOSCIUTO

Il termine “LVL”, acronimo di *Laminated Veneer Lumber*, è stato introdotto nel 1960 dalla società Weyerhaeuser (USA) che brevettò il prodotto e ne implementò una linea di produzione nel proprio stabilimento. La sua comparsa in Europa è legata alla denominazione Kerto e si registra nel 1981 in Finlandia.

Essenzialmente le due denominazioni si equivalgono in termini di caratteristiche tecniche di prodotto e di campo di applicazione.

Questa tipologia di legno ricomposto nasce e si sviluppa come evoluzione del legno lamellare e, rispetto a questo, utilizzando elementi più piccoli, costituisce un progresso nell’ottimizzazione dell’uso del legno in quanto possono essere impiegate essenze non pregiate, provenienti da colture a rapido accrescimento, come pure scarti della prima lavorazione del legno, consentendo il contenimento dei costi energetici ed ambientali. Gli elementi in microlamellare appartengono, in ambito di classificazione dei prodotti di derivazione legnosa, ai prodotti da ricomposizione di elementi unitari e precisamente a quelli aventi la componente legnosa dimensionata in microlastre di legno (sfogliati), tenute insieme a una seconda componente costituita da resine sintetiche o naturali. Il principio su cui si fonda la realizzazione del legno lamellare incollato è la riduzione del legno massiccio in tavole di piccole e medie dimensioni, ricomposte con adesivi strutturali che conferiscono al prodotto di derivazione legnosa resistenze meccaniche omogenee ed efficienza strutturale superiori a quelle dell’essenza legnosa di cui è costituito.

I più recenti studi in materia hanno dato vita ai cosiddetti *Structural Composite Lumbers* di cui fanno parte anche i prodotti presi in esame. L’LVL è definito come un prodotto ingegnerizzato a base di legno, formato da fogli sovrapposti con fibratura parallela e testate (bordi trasversali) leggermente sormontate in modo da realizzare un pannello di grandi dimensioni che, dopo pressatura, viene generalmente sezionato in elementi di dimensioni standard.

Si prende in considerazione l’uso strutturale dell’LVL, in quanto tale campo di

applicazione ha fatto registrare ad oggi una evidente evoluzione in termini di vantaggi produttivi, prestazionali, economici, progettuali e realizzativi. Con il susseguirsi del tempo vi è stato un notevole incremento di qualità nei prodotti in microlamellare, dovuto alla sperimentazione e alle linee di sviluppo individuate dai grandi gruppi di aziende produttrici, dai primi brevetti all'attuale offerta di mercato. Il microlamellare può dunque essere considerato un materiale strutturale innovativo ad elevata qualità.

Il processo produttivo degli elementi in LVL: materie prime, fasi e attività

Il processo di produzione degli elementi in microlamellare inizia dalla materia prima, rappresentata da tronchi tagliati e scaldati in acqua calda per favorire la sfogliatura. Le essenze più utilizzate sono conifere piuttosto giovani e resinose come abete rosso giovane o pino radiata, oppure sfogliati di latifoglie, quali il pioppo proveniente da piantagioni a rapido accrescimento, più utilizzati per elementi non strutturali.

L'influenza della scelta delle materie prime (le specie legnose, il tipo di resina, la qualità e lo spessore degli sfogliati) e dei parametri derivanti dai processi di produzione sulle caratteristiche fisiche e meccaniche degli elementi sono stati ampiamente studiati. Per le essenze legnose, molti studi le hanno messe in diretta relazione con il comportamento meccanico attraverso il confronto dei moduli di elasticità caratteristici dei vari prodotti in LVL. Per quanto concerne le proprietà fisiche e meccaniche delle specie di legno, maggiore è la lunghezza delle fibre sugli sfogliati, più elevato risulta il modulo elastico e la resistenza a trazione degli elementi. Inoltre, anche il diametro dei vasi influenza numerose proprietà, e a un incremento di diametro corrisponde una struttura più porosa. Di conseguenza l'incollaggio, il grado di secchezza, la permeabilità degli sfogliati sono molto influenzati dalla porosità e dal diametro dei vasi.

L'influenza della tipologia di colla utilizzata come materia prima è stata studiata nei termini della resistenza conferita agli elementi. A questo proposito può essere preso ad esempio uno studio condotto presso l'Università Turca sul confronto tecnico ed economico dell'uso del faggio e dell'alder della famiglia delle betulle nel compensato e

nell'LVL.

In questo studio, oltre al paragone tecnico, economico e di impatto ambientale delle diverse specie legnose, sono stati messi a confronto sfogliati di faggio (*Fagus orientalis*) e di betulla alder (*Alnus glutinosa*) di spessore di 2-3-mm incollati con due tipi di resine a base di melamina-urea-formaldeide: una con un contenuto del 3% e un'altra del 12% di melamina. Ne è stato testato il comportamento in esercizio ed il risultato è riassunto nella tabella in basso. Come mostrano i valori ottenuti durante le prove, gli effetti del tipo di colla sulle proprietà meccaniche dell'LVL sono influenti soprattutto sulla resistenza a flessione. Le proprietà meccaniche del faggio risultano essere migliori rispetto a quelle della betulla, anche se queste ultime sono comunque contenute nei valori di riferimento della norma. C'è da precisare comunque che utilizzare la betulla invece che il faggio (specie più preziosa) risulta più vantaggioso economicamente e a livello di salvaguardia delle foreste.

Specie arborea	Peso specifico (Kg/m ³)	Modulo di rottura ¹ (N/mm ²)	Modulo elastico ¹ (N/mm ²)	Resistenza a trazione ¹ (N/mm ²)	Qualità dell'incollaggio (N/mm ²)
LVL di Pioppo euroamericano	480	52	4870	n.d.	n.d.
LVL di Pioppo tremula	550	81,13	n.d.	n.d.	n.d.
LVL di Pioppo nigra	412	76,14	6749,25	n.d.	n.d.
LVL di faggio orientale e pioppo nigra	571	98,66	9020,24	n.d.	n.d.
LVL di <i>Alnus glutinosa</i>	n.d.	90,50	10.608,20	n.d.	n.d.
LVL di <i>Pterocarya fraxinifolia</i>	610	87,81	9541,02	97,64	2,86
Legno di <i>Pterocarya fraxinifolia</i> (Lam), Spach	445	71,29	8150,61	20,95	n.d.
Compensato di <i>Pterocarya fraxinifolia</i> (Lam), Spach	535	37,38	3358,10	n.d.	n.d.
LVL di faggio orientale Lipsky	721	11,34	14938,10	n.d.	n.d.

Tipo di colla	Resistenza a flessione nella direzione delle fibre (N/mm ²)		Resistenza a compressione nella direzione longitudinale (N/mm ²)		Resistenza a compressione nella direzione tangenziale alle fibre (N/mm ²)	
	Faggio	Betulla	Faggio	Betulla	Faggio	Betulla
Tipo A - 3% contenuto di melamina	121,9	88,2	59,6	56,6	29,3	16,2
Tipo B- 12% contenuto di melamina	105,1	89,2	59,1	55,7	25,9	17,9

Figura 7 – Ricadute prestazionali di diversi tipi di resina su alcune proprietà meccaniche di elementi in LVL composti da sfogliati di faggio e di betulla.

La provenienza e le caratteristiche della materia prima rappresentano un punto di forza in termini di sostenibilità e di sfruttamento programmato delle risorse attraverso pratiche di silvicoltura sempre più attente alle problematiche ambientali.

Passando quindi alla fase di produzione, il tronco viene ridotto in sfogliati dello spessore di 2-4 mm, sottoposti ad un controllo qualitativo per eliminare i difetti e classificati in base alla morfologia e alle dimensioni. Dopo la sfogliatura si passa alla fase dell'essiccazione per far stabilizzare la materia prima; si prosegue selezionando e classificando gli sfogliati secondo la resistenza e la densità e si dispongono in strati prevalentemente in posizione parallela e nella direzione longitudinale, sui quali viene applicato l'adesivo (colle a base di fenolo-formaldeide). Infine il pacchetto, costituito da sfogliati e colle, viene avviato verso la pressatura e l'essiccazione. Da qui partono i processi di riduzione in parti dimensionate opportunamente per realizzare gli elementi portanti di un sistema strutturale a telaio come travi e pilastri, oppure elementi bidimensionali come pannelli o setti con funzione portante e distribuiti sul mercato. Le lavorazioni successive sono la sabbiatura ottica o calibrante, la lavorazione "maschio-femmina" per le connessioni, tagli speciali lineari o curvi, re-incollaggio per spessori maggiori, rivestimenti con verniciature, foratura, smussatura dei bordi e intagli. La fase finale di utilizzo di prodotti finiti per l'industria edile passa attraverso la fase di distribuzione e vendita soprattutto all'ingrosso.

Attuali conformazioni del prodotto e processi di lavorazione

Come già chiarito, il legno microlamellare è un materiale solido ricavato da legno di conifere (abete rosso in Europa) o latifoglie (pioppo, noce, faggio, betulla ecc.). Durante il processo di produzione il legno viene "bonificato", riducendo e distribuendo le imperfezioni naturali. In questo modo le resistenze aumentano, mentre le deformazioni dovute alle contrazioni e ai rigonfiamenti vengono ridotte. Le conformazioni dei prodotti più ricorrenti, in ambito tecnico-costruttivo, vedono l'LVL distribuito sotto forma di elementi costruttivi come travi, montanti, pannelli o lastre

con funzione portante. In costruzioni di tipo tradizionale, tali prodotti possono rappresentare soluzioni tecniche appropriate come elementi di supporto lineari o lastre e piastre rinforzate per solette portanti o coperture. Nelle strutture portanti complesse, come ad esempio capannoni soggetti a sollecitazioni estreme, strutture curvilinee, cupole, ponti, edifici a più piani, come pure in costruzioni speciali (impianti sportivi, luoghi di culto ecc.) il microlamellare riesce a creare possibilità costruttive innovative.

Gli elementi piani (pannelli o lastre portanti) sono disponibili fino ad una larghezza di circa 2.50 m per 20.00 m di lunghezza ed uno spessore che può variare tra i 21 e i 70 mm.

Gli elementi lineari portanti (travi, montanti, travetti) sono disponibili con larghezze standardizzate, preferibilmente fino a 1.80 m, con spessori variabili tra 21 e 75 mm e lunghezze fino a 23.00 m circa. La fibratura dei singoli strati scorre esclusivamente in direzione longitudinale rispetto all'elemento. Sono disponibili anche elementi lineari di dimensioni ridotte per la realizzazione di montanti e traversi nelle strutture a telaio o di strutture di sottofondo e di sostegno per pavimentazioni. Per questi elementi, le dimensioni sono caratterizzate da larghezze ridotte da 75 a 160 mm, spessori da 40 a 75 mm e lunghezze fino ad un massimo di 12 m. Per quanto attiene la conformazione superficiale, essa dipende strettamente dall'essenza legnosa utilizzata, tuttavia, è possibile che gli elementi presentino nodi superficiali. Inoltre, durante la fase della scortecciatura, possono formarsi delle piccole crepe che risultano visibili durante la levigatura.

Nella produzione industriale, per tenere sotto controllo questi difetti e soprattutto come questi possono influire sulla resistenza degli elementi, gli sfogliati vengono selezionati secondo caratteristiche di stabilità, dando meno importanza all'aspetto come ad esempio le venature ecc. Così, per pannelli destinati ad essere utilizzati anche come rivestimento, è possibile rintracciare nodosità, ramificazioni e differenza di colori e venature. Inoltre gli sfogliati vengono incollati con resine fenoliche ad alta qualità che mostrano una colorazione marrone scuro, e, di conseguenza sulla superficie potrebbero per questo venire alla luce degli affioramenti di colla che possono essere

successivamente eliminati con una levigatura sul lato di esposizione. Nella maggior parte dei centri di produzione, per avere elementi la cui qualità visiva sia elevata, bisogna specificarne l'uso e bisogna raggiungere una quantità d'ordine almeno di 40 m³ circa, in quanto questo porta con sé accortezze speciali nella fase di finitura, da attuare su un solo lato dell'elemento o su entrambi i lati se risultano a vista.

Nelle evoluzioni dei prodotti in LVL meritano una particolare attenzione le cosiddette travi ad "I", denominate I-joist, realizzate con una conformazione composta da un'anima in OSB - *Oriented Strand Board* (pannello a scaglie di legno orientate incollate insieme con una resina sintetica) ed ali in LVL. Queste particolari travi sono state immesse sul mercato europeo e internazionale negli anni '80 del secolo scorso e sono particolarmente adatte per la realizzazione della struttura portante degli orizzontamenti (solai, solette, ecc...) negli edifici a telaio. I vantaggi di questo prodotto innovativo sono, a parità di resistenza, una maggiore leggerezza che influenza la rapidità di posa in opera, sistemi di connessione standardizzati mediante connettori metallici e una elevata propensione all'integrazione impiantistica (in corrispondenza dell'anima in OSB possono essere praticati dei fori per le canalizzazioni impiantistiche senza intaccare la capacità portante della trave). Nella famiglia dei recenti prodotti ottenuti dalla combinazione di LVL con altri prodotti legnosi rientra anche un brevetto europeo denominato Kerto in Leno[®], un prodotto appositamente studiato dalla FinnForest Merk tedesca per le applicazioni da parete, che deriva da nuove esigenze in tema di tenuta all'aria. Questo prodotto, infatti, ha dispersioni termiche ridotte oltre a presentare elevata resistenza meccanica. La sua conformazione stratigrafica si compone di un'anima di Kerto, che garantisce elevate proprietà meccaniche che si traducono in ampie campate di supporto ed elevata rigidità delle lastre, contenuta all'interno di due strati di legno lamellare. Tale conformazione conferisce al prodotto una elevata stabilità dimensionale e una buona resistenza alle torsioni.

Tipologie di Kerto

Esistono sostanzialmente tre tipologie di Kerto con diverse caratteristiche strutturali che vengono scelte in funzione dell'azione da svolgere.



Figura 8 -

Kerto®-Q

Kerto-Q è costituito da singoli strati di sfogliati, disposti parallelamente e trasversalmente alla direzione longitudinale del pannello e può essere impiegato nelle più differenti strutture portanti come piastra, lastra, trave o pilastro.

Vantaggi:

- Stabile nella forma;
- Può essere di grandi dimensioni;
- Assorbe carichi elevati.



Figura 9 –

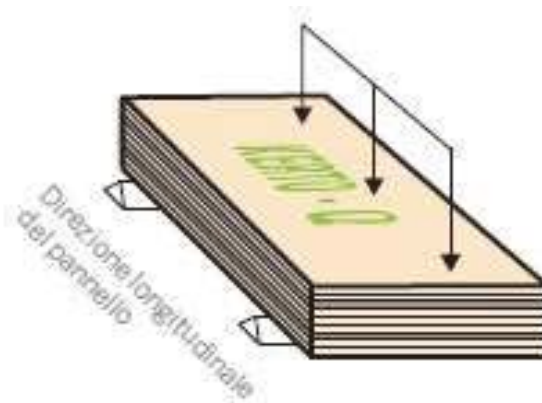


Figura 10 -

Kerto®-S

Nel Kerto-S le fibre degli sfogliati sono orientate esclusivamente nella direzione longitudinale del pannello. È prodotto come pannello e suddiviso in strisce che possono essere impiegate nelle più differenti costruzioni per elementi costruttivi.

Vantaggi:

- Di facile lavorazione;
- consente il risparmio di materiale e peso;
- consente flessibilità nella struttura della sezione trasversale.



Figura 11 -

Kerto®-T

Il Kerto-T presenta una orientazione degli sfogliati in direzione longitudinale, e per questo può essere impiegato come montante o trasverso nelle strutture di legno a telaio. Per la sua particolare stabilità nella forma, rappresenta la soluzione ottimale nella costruzione dei pavimenti come elemento ligneo livellante e di sottofondo. La sua stabilità nella forma, e la precisione delle dimensioni, risultano essere dei parametri di alta qualità nel mondo delle costruzioni.

Vantaggi:

- viene essiccato;
- risulta essere stabile nelle dimensioni;
- può presentare deformazioni ridotte.



Figura 12 -

DIMENSIONI DI FORNITURA*												
KERTO-Q/S	Spessori	21**	24**	27	33	39	45	51	57	63	69	75***
	Larghezze	1.820 e 2.500										
KERTO-T	Spessori	-	-	-	-	39	45	51	57	63	69	75
	Larghezze	1.820										

Lunghezze standard: 6,0 m; 12,0 m; 13,50 m

* in mm / ** disponibile solo nella larghezza 1.820 mm / *** Variante Kerto-S

Figura 13 -

Pregi e difetti del microlamellare di legno

I vantaggi nella produzione di LVL possono essere riassunti nell'idea di lunghezza illimitata e di elevata resistenza, che lo rendono un materiale compatto. Le fasi iniziali della produzione di LVL sono simili a quelle della produzione del compensato, ma per l'LVL l'orientamento dei singoli fogli segue la direzione longitudinale degli elementi (trave, pannello, colonna). Oggi, la crescita dinamica nell'ambito delle conoscenze relative alla produzione di LVL sul mercato mondiale del legno è dovuta ai numerosi vantaggi offerti, grazie ai quali si registra un consumo globale che aumenta annualmente del 5-10%, e attualmente costituisce più di 3 milioni di m³. Gli elementi in LVL concretizzano, nel settore produttivo del legno, la tendenza in atto anche negli altri comparti produttivi dei prodotti da costruzione, verso lo studio di prodotti ad alta tecnologia. Infatti l'LVL è uno dei più recenti prodotti lignei che presenta forme ingegnerizzate, la disposizione degli sfogliati in parallelo fa sì che l'LVL abbia le stesse

proprietà direzionali del legno segato, a fronte di una maggiore uniformità, e consente inoltre di ottenere elementi privi di connessioni sino ad una lunghezza di circa 25 m. Le motivazioni della rapida affermazione di questi prodotti trovano riscontro principalmente nella necessità di superare i limiti dimensionali e di forma insiti nei fusti arborei, realizzare manufatti dalle caratteristiche geometriche progettabili, nonché dal comportamento più facilmente prevedibile ed interpretabile, e realizzare semilavorati di ampia superficie ed elevata stabilità dimensionale. Grazie alla elevata affidabilità, si è valorizzato l'uso del legno in molte applicazioni della moderna ingegneria civile.

Il Kerto lascia lo stabilimento con un'umidità relativa del solo 9%, ciò porta, se correttamente utilizzato, a non avere praticamente nessuna deformazione da ritiro, svergolamento o fessurazione, e quindi ad essere un materiale stabile nelle forme e preciso nelle dimensioni.

Sistemi di connessione e facilità di lavorazione

I sistemi di connessione tra gli elementi sono analoghi a quelli utilizzati nel legno lamellare. Le tendenze innovative sulle connessioni hanno portato a produrre piastre dello stesso materiale LVL predisposte con sistemi di chiodatura o viti resistenti.

Dato che i pannelli in microlamellare vengono prodotti in grandi dimensioni, va a ridursi il numero di giunti con un conseguente risparmio di denaro e una snellezza nei tempi di posa.

Inoltre l'LVL può essere lavorato con tutte le macchine segatrici, piallatrici e levigatrici di uso comune e, per quanto riguarda la verniciatura, può essere trattato con le medesime tecniche degli altri prodotti lignei.

Salvaguardia dell'ambiente

Un altro aspetto fondamentale dei prodotti in microlamellare risiede nell'analisi dell'intero ciclo di vita (LCA - Life Cycle Assessment) ed in particolare in termini di impatto energetico della produzione. Gli aspetti ambientali rappresentano un punto di forza del prodotto LVL, non tanto rispetto agli altri prodotti in legno, quanto rispetto a

prodotti da costruzione che offrono le stesse risposte prestazionali. Infatti, se paragoniamo l'energia consumata durante l'acquisizione della materia prima grezza (il tronco), la lavorazione, la produzione, il trasporto in cantiere e la posa in opera possiamo apprezzarne sicuramente i vantaggi rispetto all'acciaio. In relazione agli effetti sull'ambiente, ponendo come valore unitario quello dei prodotti ottenuti dalla ricomposizione di elementi unitari in legno come l'LVL, si osserva che sia l'acciaio che il calcestruzzo superano il valore unitario stesso (vedi Fig. 14).

In aggiunta, c'è da registrare una linea di sviluppo che riguarda alcune innovazioni apportate nel processo produttivo finalizzate ad un ulteriore abbattimento dell'impatto ambientale. Infatti in molti centri di produzione vengono bruciati gli scarti del legno derivati dalla sfogliatura dei tronchi e dalla preparazione delle microlastre per ottenere gran parte dell'energia necessaria per la produzione. Questo dà luogo ad una riduzione di emissione di CO₂ rispetto all'uso di combustibili fossili e pone l'LVL tra i materiali che non contribuiscono all'effetto serra. Inoltre il carbone derivato dalla produzione di LVL viene immagazzinato per essere riutilizzato. I gas derivanti dal processo di essiccazione degli sfogliati vengono trattieneuti e riutilizzati per alimentare i forni che garantiscono la rimozione di ogni componente organico. La colla a base di fenolo-formaldeide viene tenuta sotto controllo costantemente sia nei valori riferiti alla temperatura che alla pressione. Alla fine di un ciclo di produzione, i macchinari per l'incollaggio possono essere puliti semplicemente con acqua, così da essere subito pronti per un successivo ciclo. Il materiale Kerto, inoltre, aderisce al PEFC o Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes, tra i cui criteri stabiliti del processo produttivo, rigorosamente controllati sono: nessun disboscamento totale, rimboschimento, nessun impiego di sostanze chimiche sintetiche ausiliari e completa rintracciabilità.

Effetti sull'ambiente	Legno ricomposto da elementi unitari	Acciaio	Cls
Energia incorporata	1	1.26	1.57
Emissione gas effetto serra	1	1.34	1.81
Inquinamento dell'aria	1	1.24	1.47
Inquinamento dell'acqua	1	4.00	3.50
Consumo di risorse	1	1.11	1.81
Produzione di rifiuti solidi	1	1.08	1.23

Figura 14 – Confronto tra l'impatto ambientale dei prodotti appartenenti alla famiglia dei prodotti di derivazione legnosa ricomposti da elementi unitari, l'acciaio e il calcestruzzo.

Colle sintetiche e loro impiego

I punti critici nel legno microlamellare risiedono nel fatto che l'innovazione si è mossa, ad oggi, tenendo insieme due aspetti e rispettivamente le più ampie tematiche ambientali che coinvolgono l'intero settore delle costruzioni e la minimizzazione sullo spreco della risorsa legno, utilizzando legno riciclato. Tuttavia, il nocciolo del problema resta l'utilizzo delle colle sintetiche. Se da un lato le colle rendono possibile l'utilizzo di legno di piccole dimensioni proveniente da colture a rapido accrescimento, allo stesso tempo sono fonte, anche se pur in minima parte, di inquinamento. Secondo ricerche americane, infatti, la formaldeide presente nei collanti se non sottoposta a controlli di qualità suggeriti dalla normativa tecnica può risultare dannosa per il sistema respiratorio degli uomini.

Si può comunque sostenere che le colle utilizzate nei prodotti in LVL a base di fenolo-formaldeide che garantiscono la qualità dell'incollaggio, essendo colle termoindurenti, una volta trattate per ridurre l'emissione di formaldeide nell'aria, non subiscono modificazioni dovute a variazioni di temperatura o umidità. Comunque, la sfida che i progettisti si trovano a raccogliere sembra mirare verso la progettazione di strutture assemblate a secco in cui si intensificano e moltiplicano i modi e i sistemi di giunzione tra gli elementi. Sistemi di giunzione che non si riferiscono solo agli attacchi pilastro-trave-travetto ecc..., ma riguardano i modi di giunzione tra le sfoglie che compongono, per esempio, la trave stessa.

Aspetti estetici del Kerto

Negli sviluppi innovativi e nelle applicazioni dei prodotti in microlamellare, gli aspetti estetico formali sono quelli che più risentono di una penalizzazione a favore della funzione strutturale più ampiamente trattata. Le applicazioni più frequenti di questi elementi si trovano nella realizzazione di capannoni industriali di notevoli dimensioni, la cui qualità morfologica non rappresenta certamente uno dei punti di forza del prodotto. Comunque negli ultimi anni si assiste ad un'inversione di tendenza in quanto molte delle firme prestigiose dell'architettura contemporanea (Shigeru Ban, Herzog,

Renzo Piano, Norman Foster, e molti progettisti nord europei), grazie all'interazione con le competenze tecniche presenti all'interno delle aziende produttrici analizzate, hanno sperimentato l'uso di strutture in Laminated Veneer Lumber ottenendo risultati eccellenti.



Figura 15 -



Figura 16 - Shigeru Ban - Atsushi Imai Memorial Gymnasium, Akita, Japan (2002)

La sperimentazione tecnica ha raggiunto un livello tale da poter modellare e realizzare strutture di grandi dimensioni ad ossatura curva, a guscio, strutture reticolari, direttamente nelle fasi di produzione in stabilimento. Inoltre, per mezzo di macchinari complessi che permettono un controllo dimensionale computerizzato, questi elementi consentono un livello di prefabbricazione ed assemblaggio in opera molto competitivo rispetto ad altri prodotti strutturali. Questo, insieme ad una spiccata integrabilità che i prodotti in LVL presentano con altri materiali (come le facciate in vetro, elementi in

acciaio ecc.) ne hanno incentivato l'uso, specie in Europa settentrionale. Impieghi opportuni ed efficaci sotto il profilo funzionale e morfologico si ritrovano in complessi residenziali, edifici per uffici, impianti sportivi, luoghi di culto fino ad arrivare all'uso nelle opere infrastrutturali come ponti e sistemi di grandi coperture di spazi urbani.



Figura 17 – Norman Foster, Complesso residenziale Chesa Futura, St. Moriz, Switzerland, 2003.

Una domanda in espansione

Nell'ambito del monitoraggio del settore produttivo degli elementi in microlamellare, risulta interessante partire da uno studio di settore del tutto teorico elaborato nel 2015. Questo studio teorico-economico, condotto dal Prof. Philip M. Parker, è stato condotto proprio sulla domanda latente di Laminated Veneer Lumber a livello mondiale ed è diretto alle società che operano su mercati stranieri per le quali è fondamentale avere delle previsioni sull'andamento della competizione internazionale. La domanda latente, a tutti i livelli della catena di valore, è servita quindi a comprendere l'equilibrio per poter elaborare strategie di pianificazione. Infatti le ditte produttrici che devono servire il mercato, devono percepire la domanda latente e

devono essere capaci di far fronte a questa domanda.

I risultati di questo studio riportano l'Asia al primo posto con la Cina che occupa il 33% della domanda dell'intera regione. In seconda battuta troviamo l'Europa, che in questa elaborazione è stata unita ai paesi del Medio Oriente. L'Italia occupa il quarto posto rispetto agli altri paesi del raggruppamento regionale con il 10,15%, risultato che risulta soddisfacente per l'eventuale mercato nazionale di LVL (paragonabile a paesi come il Canada, la Nuova Zelanda, l'Australia, dove il reale mercato di prodotti in microlamellare trova una larga diffusione). Ciò significa che se in Italia le aziende produttrici producessero sul mercato prodotti in LVL, questi rappresenterebbero una fonte di reddito a seguito della buona domanda rilevata.

D'altro canto, ad oggi un uso considerevole di prodotti in LVL si riscontra nei paesi del nord Europa, soprattutto in Finlandia, in America del nord, Canada e con particolare dinamismo nei paesi dell'Australasia (Australia, Nuova Caledonia e Nuova Zelanda). In ambito nazionale l'uso di prodotti in microlamellare è strettamente vincolato a dinamiche di importazione, la cui provenienza attuale è monopolio della Finlandia, ma dalle indagini condotte risulta un crescente interesse, specie da parte del mercato australiano e neozelandese, verso la "conquista" della produzione italiana attualmente priva di aziende produttrici di microlamellari. Si riscontra invece una esigua attività di distribuzione nazionale da parte del mercato finlandese che ha istituito un nodo nella rete della distribuzione europea, non fornendolo però di competenze tecniche, ma esclusivamente commerciali. Ad oggi un progettista intenzionato all'uso di prodotti microlamellari in Kerto LVL deve interagire tecnicamente con una sede tedesca deputata allo scambio di informazione tecnica sul territorio italiano, al conseguente supporto durante le fasi della progettazione e alla certificazione dei prodotti. Questo rappresenta un punto debole per la diffusione del microlamellare in Italia e una ragione per cui i produttori di altri paesi hanno individuato nel nostro paese un "terreno di conquista" per lo sviluppo futuro di questi prodotti ormai competitivi nel mondo.

In Italia non è presente una rete di produzione diretta in quanto, come il resto d'Europa, risulta monopolio esclusivo della produzione finlandese, questo è dovuto in

gran parte alla notevole disponibilità finanziaria richiesta per affrontare gli investimenti iniziali necessari alla produzione di microlamellari (acquisto di brevetti e macchinari) che impedisce di mantenere la competitività rispetto alle importazioni, per cui la ricerca di economie di scala e di razionalizzazioni organizzative vincolano le aziende produttrici. Operando un censimento sul territorio nazionale sulle aziende produttrici di elementi di derivazione legnosa per uso strutturale (compensati strutturali, legno lamellare) la risposta più frequente risulta quella in cui viene dichiarata la volontà di intraprendere la produzione di microlamellare riconoscendone i caratteri competitivi, ma che al momento non rientra nelle priorità di sviluppo dell'azienda in quanto troppo complessa. Così viene favorita la tendenza alla distribuzione di prodotti importati di maggior valore aggiunto, nonché la fornitura di servizi di assistenza tecnica notevolmente difficile in quanto i centri tecnici sono tedeschi, finlandesi, svizzeri. In Italia, quindi, arriva il prodotto finito e pronto per essere montato o dei semilavorati che entrano nella filiera produttiva nazionale in quanto richiedono successive lavorazioni caratterizzate da semplici tagli o lavorazioni di ordinaria falegnameria che questi prodotti permettono. Infatti il microlamellare, una volta composto, può essere lavorato con seghe, piallatrici e fresatrici tradizionali e, per i pannelli portanti in LVL, possono essere utilizzati gli stessi tipi di rivestimento applicabili agli altri prodotti in legno o a base di legno. L'incentivazione nell'apertura del mercato nazionale verso la produzione di microlamellari in aziende che già occupano il comparto produttivo dei prodotti di derivazione legnosa per uso strutturale sarebbe auspicabile in un momento in cui questi prodotti siano notevolmente sostenuti dalle ricerche in ambito dell'ingegneria strutturale e della sostenibilità ambientale. Inoltre l'implementazione dei sistemi di gestione della qualità e la rispettiva certificazione, che si sta diffondendo in maniera capillare insieme ad una parallela evoluzione della normativa tecnica sui prodotti in LVL, hanno contribuito alla crescita culturale dell'intero settore cui fa riscontro un'elevata affidabilità dei prodotti in oggetto.

Confronto prestazionale con il lamellare tradizionale

Essendo impiegato principalmente per usi strutturali, l'LVL ha nella resistenza e nella rigidità le caratteristiche più significative. Tali caratteristiche sono particolarmente apprezzabili mettendole a confronto con quelle del legno lamellare che, di per sé, presenta miglioramenti notevoli rispetto al legno tradizionale.

Molti prodotti in commercio in LVL (travi e pannelli con funzione portante) offrono prestazioni meccaniche migliorate nei termini di:

- resistenza a compressione (parallela alle fibre);
- resistenza a flessione (parallela alle fibre) ;
- resistenza a trazione (parallela alle fibre);
- resistenza a taglio (longitudinale);
- modulo di elasticità (parallelo alle fibre).

Dall'analisi condotta sulle schede tecniche dei prodotti in LVL si può affermare che, la stessa resistenza a flessione, per esempio, si può ottenere con elementi in LVL di sezione minore rispetto a quelli di legno lamellare incollato.

Qui di seguito viene riportata la tabella con i rispettivi valori delle varie resistenze.

Resistenza a compressione (parallela alle fibre) espressa in N/mm ²	
LVL (<i>laminated veneer lumber</i>)	30
Legno lamellare incollato	24

Resistenza a flessione espressa in N/mm ²	
LVL (<i>laminated veneer lumber</i>)	40
Legno lamellare incollato	19

Resistenza a trazione (parallela alle fibre) espressa in N/mm ²	
LVL (<i>laminated veneer lumber</i>)	30
Legno lamellare incollato	26

Resistenza a trazione (perpendicolare alle fibre) espressa in N/mm ²	
LVL (<i>laminated veneer lumber</i>)	30
Legno lamellare incollato	26

Resistenza a trazione (perpendicolare alle fibre) espressa in N/mm ²	
LVL (<i>laminated veneer lumber</i>)	30
Legno lamellare incollato	26

Figura 18 -

Durabilità degli elementi in LVL

La durabilità degli elementi in LVL è assimilabile a quella dei compensati strutturali. Le carenti informazioni sulla durabilità nel tempo hanno determinato la diffidenza nell'applicazione esterna dei suddetti elementi, associandoli alla durabilità del legno massiccio e sottovalutandone le potenzialità specie in presenza di umidità. Proprio su tale aspetto si stanno concentrando i recenti studi che vedono coinvolti enti di ricerca in collaborazione con aziende produttrici, rivolti alla messa a punto di strumenti idonei a determinare la durata di vita e la qualità biologica di elementi di derivazione legnosa per uso strutturale.

Ad oggi gli accorgimenti tecnici per limitare la velocità di degrado in caso di umidità rilevanti sono rappresentati da trattamenti superficiali con vernici impregnanti.

Comportamento al fuoco

Per il comportamento al fuoco il grado di partecipazione al fenomeno della combustione e la carbonizzazione sono simili a quelli del legno lamellare e sicuramente inferiori a quelli del legno massiccio. Gli elementi in LVL con peso specifico apparente 400 Kg/m^3 e uno spessore $> 2 \text{ mm}$ appartengono alla Classe B2, normalmente infiammabile.

Con aggiunta di sali ignifughi o strati di spugna durante il processo di produzione, travi, pilastri e pannelli normalmente infiammabili riducono la partecipazione al fuoco passando alla Classe B1, difficilmente infiammabili. Tra i parametri per l'ottenimento della certificazione europea sul comportamento in caso d'incendio si fa riferimento alla classe D_{-s1, d_0} appartenente al sistema di classificazione europeo e corrispondente alla classe 3 di reazione al fuoco italiana.

Tendenze innovative e prospettive di sviluppo

Se innovazione significa rintracciare all'interno di un contesto consolidato soluzioni, sistemi e criteri nuovi, per il settore dei microlamellari (LVL, Kerto, ecc...) si possono individuare delle linee innovative riferite ad un prodotto di cui nel resto del mondo se

ne conoscono possibilità e potenzialità d'uso già da qualche tempo, mentre in Italia appare esso stesso innovativo. Per far comprendere il gap che separa la conoscenza tecnica in alcuni ambiti internazionali da quella relativa al nostro paese in materia di applicazione strutturale dei microlamellari, basta considerare che negli altri paesi si stanno sperimentando sistemi innovativi per far superare a questi prodotti i limiti di applicazioni per edifici alti, mentre invece in Italia risulta innovativo il semplice uso di travi in LVL per la copertura di un solaio di un edificio di tipo industriale ad un livello.

Il mercato australiano e neozelandese, interessato non solo alla distribuzione in Italia di LVL, ma anche alla formazione di tecnici ed industrie produttrici capaci di rendere concreto l'uso dei microlamellari, risulta il più attento sia da un punto di vista della qualità dei prodotti offerti, sia per il fatto che le aziende selezionate investono una consistente parte del loro fatturato in ricerca e sperimentazione, avvalendosi, mediante contratti e assegni di ricerca, della collaborazione di importanti Istituti universitari e di ricerca. Proprio grazie a questo notevole impulso si possono individuare le attuali tendenze innovative che riguardano sicuramente la sperimentazione di sistemi per la realizzazione di edifici in zone sismiche che superano i tre piani. Un altro ambito rispetto al quale si riscontrano prospettive di sviluppo riguarda i sistemi di connessione strutturale. Infatti i più comuni ad oggi risultano quelli ottenuti mediante piastre e connettori metallici più o meno complessi che però a lungo termine possono generare problemi di compatibilità tra i materiali e corrosione delle parti metalliche. È per questo che quasi tutte le aziende prese in considerazione stanno studiando sistemi per connettere gli elementi in LVL con piastre realizzate sempre in LVL o in compensato strutturale al fine di ridurre al minimo l'uso del metallo per chiodature e bullonature. Le innovazioni rilevanti quindi si riscontrano nella volontà di superarne i limiti di applicazione, andando verso un prodotto tecnico, considerando che rappresenta esso stesso il frutto di innovazione.



Figura 19 -



Figura 20 -

Collegamento con resine epossidiche

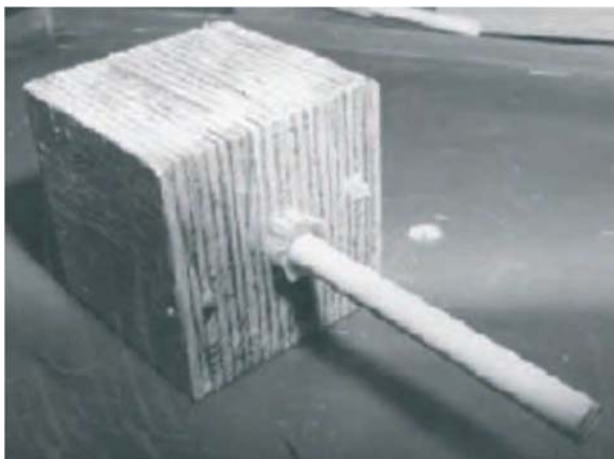
I Sistemi di collegamento tradizionali tra gli elementi in LVL prevedono connessioni metalliche di tipo a piastra, con chiodatura, viti.

Una delle più recenti prospettive di sviluppo in termini prestazionali riguarda la sperimentazione sul comportamento meccanico di elementi in LVL rinforzati con barre di resina fibrorinforzata, ed in particolare con GFRP - Glass Fibre- Reinforced Plastic in barre estruse collegate all'interno degli elementi in LVL con resina epossidica a temperatura ambiente tramite due linee di colla dello spessore di 2-4 mm.

Questo tipo di connessioni innovative sono state messe in uso in Germania e in Svezia, ma attualmente risultano ancora pochi i riferimenti bibliografici sulle prove di resistenza e quindi sull'affidabilità.

Queste connessioni hanno dei vantaggi rispetto ai carichi assiali, elevata resistenza al fuoco perché le barre sono protette dallo spessore del legno, e non alterano l'aspetto estetico dell'elemento in microlamellare. Questa tecnica, confrontata con le connessioni in acciaio, presenta sicuramente vantaggi rispetto alla compatibilità tra la resina e il legno, migliore resistenza all'umidità e agli ambienti acidi e migliori prestazioni grazie al collegamento migliorato.

Inoltre, hanno anche il vantaggio di poter utilizzare elementi con sezioni ridotte e quindi riducono il peso della struttura. La tipologia di resina che garantisce una migliore qualità dell'incollaggio delle barre all'interno degli elementi in LVL è la resina epossidica applicata con una linea minima di colla di 2 mm. Le superfici delle barre devono essere trattate con sabbiatura e asciugatura prima dell'incollaggio. Le prove di laboratorio, effettuate su provini di LVL della tipologia Kerto con l'inserimento di una singola barra di resina fibrorinforzata GFRP, hanno dimostrato che le modalità di rottura sono diverse se l'azione del carico è di tipo statico (forza di estrazione applicata in modo costante) o di tipo dinamico (forza di estrazione variabile, vedi Fig. 21). Inoltre, le modalità di rottura cambiano in relazione agli spessori delle linee di colla (la fase di rottura inizia prima quando all'aumentare del carico si ha uno spessore maggiore delle linee di colla). Di conseguenza lo spessore delle linee di incollaggio risulta un importante parametro che influenza la resistenza di queste connessioni.



In questo caso il provino di LVL con l'inserimento della barra in GFRP è stato sottoposto ad uno sforzo di tipo statico per estrarre la barra. In questo caso la rottura si verifica negli sfogliati di LVL, in maniera cilindrica, vicino alla linea di incollaggio.

Figura 21 -

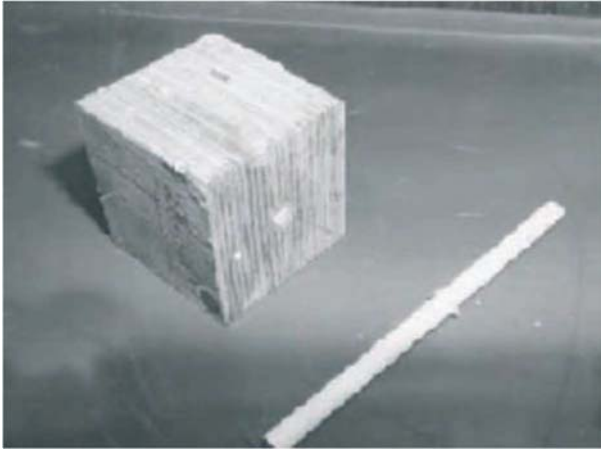


Figura 22 -

Il provino è stato sottoposto ad un sforzo dinamico di estrazione. La rottura avviene principalmente nello strato di colla facendo fuoriuscire la barra dall'LVL;

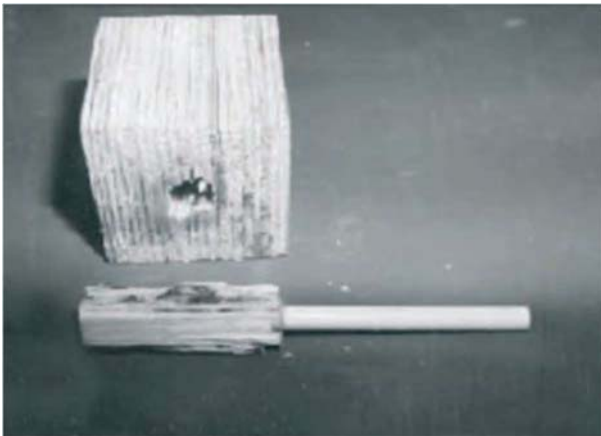


Figura 23 -

Questo caso mostra come può accadere che la barra porti via con sé una certa quantità irregolare di LVL intorno alla linea di incollaggio.

CAPITOLO 2 - IMPIEGHI ECONOMICAMENTE CONVENIENTI PER L'LVL

Nonostante il Kerto sia un materiale estremamente promettente e dalle elevate caratteristiche meccaniche, è ancora poco utilizzato nel campo dell'edilizia.

Ciò è strettamente legato a due fattori:

- La quasi nulla permeabilità delle informazioni riguardanti il materiale Kerto da parte delle aziende produttrici che, essendo monopoliste di questo mercato, vogliono custodire eventuali dati sperimentali senza divulgarli, ai fini di impedire l'entrata nel mercato di altre aziende; come esempio basta osservare che, in Europa, è presente l'unica azienda produttrice di Kerto.
- Il secondo punto risulta a mio parere strettamente legato al primo: con l'impermeabilità delle informazioni da parte delle aziende, l'innovazione dei metodi di produzione per ottimizzare i tempi ed abbassare i costi risulta procedere a rilento. Aggiungendo poi che le poche aziende produttrici di LVL, essendo monopoliste, possono scegliere il proprio prezzo di vendita garantendosi un buon margine di profitto, ne consegue che il costo di questo materiale è tutt'altro che modesto rispetto agli altri materiali lignei. Quindi, nonostante le eccezionali caratteristiche intrinseche del Kerto, è decisamente più conveniente utilizzare un altro tipo di materiale ligneo aumentando per esempio lo spessore o la dimensione della sezione rispettivamente in un solaio o in una trave. Ne consegue che, nella maggior parte dei casi, l'impiego del Kerto non sia la scelta economicamente più conveniente.

Esistono però dei campi di utilizzazione in cui l'LVL può rappresentare una valida, se non unica, soluzione.

Utilizzo dell'LVL come materiale di rinforzo strutturale

Rinforzi per stati di sollecitazione di trazione perpendicolare alla fibratura

I rinforzi di elementi in legno si rendono necessari soprattutto per la scarsa resistenza nei confronti di sollecitazioni a trazione perpendicolare rispetto alla direzione delle fibre. Le sollecitazioni a trazione perpendicolare intervengono, per esempio, nella zona delle connessioni, negli appoggi con intagli, nei fori e nelle travi di copertura nella zona d'apice.

L'LVL possiede una maggiore resistenza a trazione perpendicolare rispetto al legno lamellare incollato o al legno massiccio di conifera, in particolare nella Kerto Q, possiede una resistenza a trazione perpendicolare pari a 16 N/mm^2 (per uno spessore nominale di $B = 20 \text{ mm}$) e a 8 N/mm^2 (per uno spessore nominale di $30 \text{ mm} \leq B \leq 80 \text{ mm}$).

Impiegando elementi monodimensionali come alternativa al legno lamellare incollato o al legno massiccio di conifera, è possibile in molti casi fare a meno di un rinforzo alla trazione perpendicolare con un risparmio economico consistente.

I pannelli, invece, si prestano con particolare idoneità a una funzione di rinforzo esterno per elementi in legno lamellare incollato o in legno massiccio a rischio di fessurazioni causate da trazioni perpendicolari.

È necessario innanzitutto distinguere tra rinforzi interni ed esterni. Come rinforzi interni possono essere impiegate viti a tutto filetto, barre filettate incollate e barre da cemento armato. Come rinforzi esterni è possibile invece utilizzare pannelli a base di legno incollati sulla superficie. La progettazione di viti a tutto filetto deve avvenire in conformità alle relative certificazioni.

Incollaggio a pressione con viti

Per il recupero di fessure a trazione perpendicolare e il rinforzo di unioni trasversali o di fori successivo alla loro esecuzione, il ricorso a presse idrauliche a volte non è praticabile a causa delle limitate dimensioni spaziali; in questi casi vi è la possibilità di

realizzare connessioni portanti mediante incollaggio a pressione con viti, dove la pressione necessaria è esercitata tramite viti autoforanti parzialmente filettate.

Per garantire una pressione uniforme e di conseguenza un'eccellente qualità delle superfici d'incollaggio è opportuno limitare lo spessore del pannello di rinforzo a un massimo di 50 mm se si impiegano pannelli a base di legno. Anche la spaziatura tra i mezzi di unione non può superare precisi valori massimi e, come mezzi di unione, possono essere impiegate soltanto viti a filettatura parziale dotate di certificazione. La lunghezza della sezione non filettata deve corrispondere almeno allo spessore del pannello di rinforzo, l'adesivo utilizzato, conformemente alla sua certificazione, deve essere idoneo alla realizzazione di incollaggi strutturali con pressione a vite.

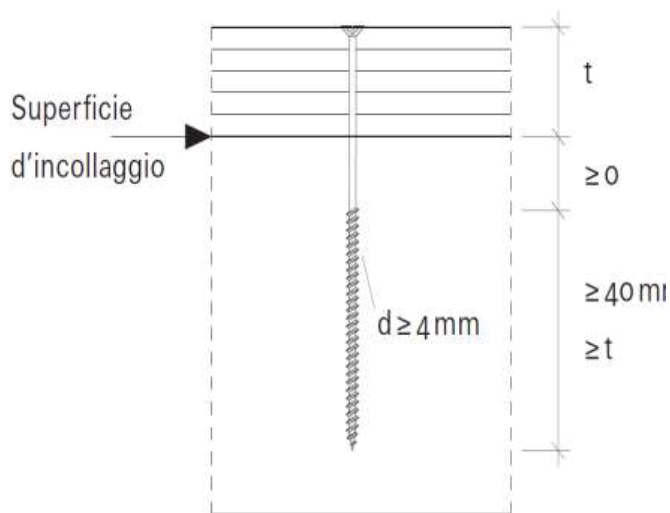


Figura 26-

Tabella 45. Condizioni necessarie per l'incollaggio a pressione con viti secondo la DIN 1052-10, cap. 6.2

Spessore del pannello di rinforzo
$t_{\max} = 50 \text{ mm}$ (pannello a base di legno)
Mezzo di unione
Vite autoforante a filettatura parziale dotata, secondo la certificazione, di:
(1) $l_{\text{sezione non filettata}} \geq t_{\text{pannello di rinforzo}}$
(2) Lunghezza della filettatura nell'elemento di legno inclusa la punta
$l_{\text{eff}} \geq \max(t_{\text{pannello di rinforzo}}; 40 \text{ mm})$
(3) Diametro nominale $d \geq 4 \text{ mm}$
Disposizione
(1) Spaziatura tra le viti $a_1, a_2 \leq 150 \text{ mm}$
(2) Area d'influenza di ciascuna vite
$a_1 \cdot a_2 \leq 15.000 \text{ mm}^2$
(3) Griglia uniforme per $a_1 = a_2 = 120 \text{ mm}$
Elemento costruttivo
(1) Umidità del legno $u \leq 15\%$
(2) Differenza di umidità $\Delta u \leq 4\%$
(3) Superficie piallata o limata
Adesivo
Certificato per l'utilizzo nell'incollaggio a pressione con viti
Azienda produttrice
Idoneità all'incollaggio come stabilito in DIN 1052-10

Figura 27-

Inoltre per evitare tensioni interne nella superficie d'incollaggio, nell'esecuzione dell'incollaggio a pressione con viti, i gradi di umidità e i singoli elementi da connettere possono differenziarsi fino ad un massimo del 4 %.

Unioni trasversali

Per carichi generati da forze a trazione ortogonali all'asse dell'elemento e che agiscono in prossimità del bordo sollecitato, sussiste il rischio di rottura per fessurazione.

Quando si impiegano gruppi di mezzi di unione, il mezzo di unione più distante dal bordo sollecitato risulta essere determinante per la formazione di fessure; nel caso in cui unioni trasversali richiedano un rinforzo, è necessario dimensionare tale rinforzo a partire da una sezione trasversale fessurata. Ciò significa che gli elementi di rinforzo devono assorbire per intero le forze di trazione perpendicolare.

Qui di seguito vengono riportati spazi e distanze da rispettare nelle unioni trasversali:

- massima spaziatura tra i mezzi di unione e distanza dal bordo sollecitato $h_e=150\text{mm}$
- Larghezza del gruppo dei mezzi di unione $a_r = 50\text{ mm}$
- Numero delle file dei mezzi di unione $n = 3$
- Angolo di connessione $\alpha = 90^\circ$
- Diametro dei mezzi di unione $d = 10\text{ mm}$

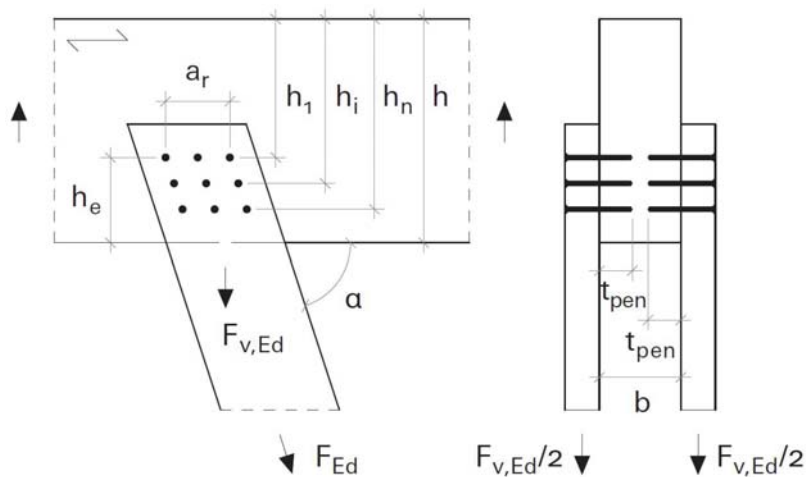


Figura 28 -

Intagli

Partendo dallo spigolo d'intaglio, le tensioni di trazione perpendicolare sono soggette a un rapidissimo smorzamento. Pertanto, gli elementi di rinforzo esterni devono essere applicati sin dallo spigolo d'intaglio. Gli elementi di rinforzo interni, per esempio viti, devono essere disposti facendo attenzione alle distanze minime dal bordo, il più possibile in prossimità dello spigolo d'intaglio.

Per lo stesso motivo si dovrebbe considerare nella verifica soltanto la prima fila dei mezzi di unione.

Fori

Sono da considerarsi “fori” le aperture nelle travi con dimensione h_d maggiore di 50 mm. Tensioni di trazione perpendicolare in corrispondenza dei fori sono causate da sollecitazioni prodotte da una forza di taglio e da un momento flettente.

Facendo riferimento alla figura riportata qui sotto, nel caso in cui la forza di taglio sia prevalente, si generano fessure nelle posizioni 1 e 2, mentre se prevale il momento flettente, le fessure si generano soltanto sul bordo superiore (posizioni 1 e 3).

È importante considerare che, nella progettazione degli elementi di rinforzo, vanno presi in esame tutti i punti a rischio di rottura.

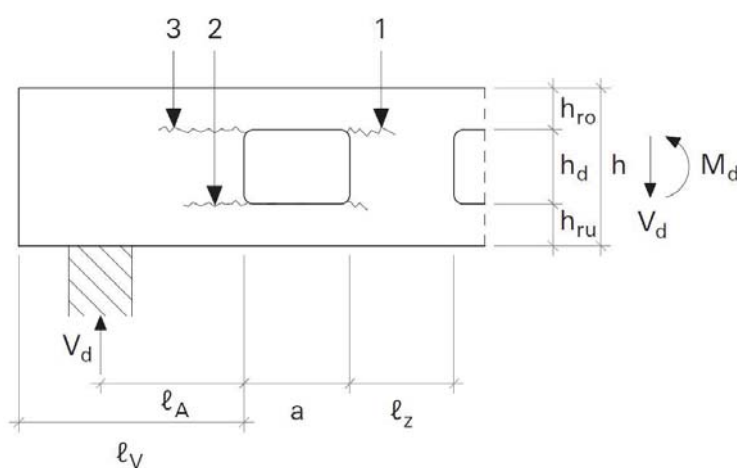


Figura 29 -

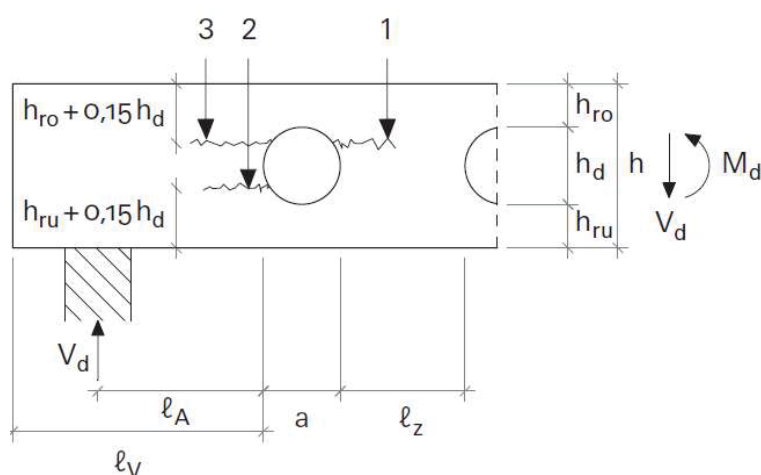


Figura 30 -

Per la progettazione di rinforzi da applicare ai fori devono essere rispettate le seguenti condizioni geometriche:

$l_z \geq h$ in ogni caso non minore di 300 mm

$l_z \geq h$

$l_A \geq h/2$

$h_{ro(ru)} \geq 0,25 h$

$a \leq h$ e $a / h_d \leq 2,5$

$h_d \leq 0,3 h$ (per rinforzo interno)

$h_d \leq 0,4 h$ (per rinforzo esterno)

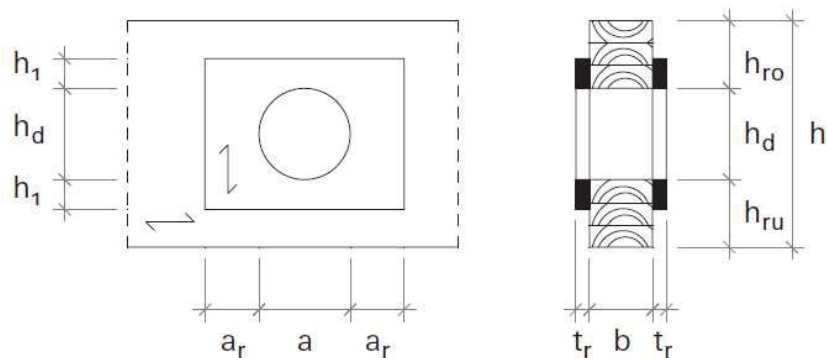


Figura 31 -

Connessione rinforzata

I pannelli di LVL possono essere impiegati anche per incrementare la resistenza di connessioni con mezzi di unione sollecitati a taglio. In tal caso, i pannelli vengono incollati sul legno in corrispondenza dei piani di taglio. In virtù dell'alta resistenza a rifollamento di questi pannelli rispetto a quella degli elementi lignei da connettere, la capacità portante della connessione può essere notevolmente aumentata ed un ulteriore effetto positivo consiste nella diminuzione del rischio di rottura per fessurazione, dato che i pannelli incollati costituiscono un rinforzo trasversale per il legno.

Per il calcolo progettuale Werner (1995) offre a tal proposito alcune equazioni che si basano sulle equazioni presenti nella sezione 8 dell'Eurocodice 5 (Teoria di Johansen).

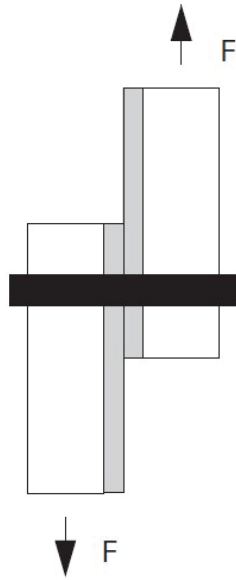


Figura 32 – esempio di connessione rinforzata

Rinforzo di elementi strutturali esistenti

Rinforzo per solai lignei

Quando si interviene su impalcati lignei esistenti, generalmente ci si trova di fronte a problematiche legate a deformazioni flessionali prodotte dai carichi di esercizio, deformazioni permanenti accumulate nel tempo e fenomeni di vibrazione. La scelta della modalità di intervento è condizionata da molti fattori, sia di tipo architettonico che strutturale, quali ad esempio:

- reversibilità e limitazione della invasività dell'intervento;
- presenza di contro-soffitti o pavimenti di pregio che rendono necessaria la scelta di una tecnica di rinforzo estradossale o intradossale;
- impossibilità di modificare la quota di calpestio dei solai;
- necessità di mantenere contenute le masse sismiche (soprattutto quando si interviene nei piani alti degli edifici);
- stato di degrado degli elementi resistenti per cui, a volte, può anche rendersi necessaria la sostituzione o l'integrazione con nuovi elementi);
- limiti di carattere tecnologico/costruttivo presenti in cantiere;

La realizzazione di solai composti (legno-legno o legno-calcestruzzo) rappresenta una delle tecniche di rinforzo più diffuse.

È bene quindi riportare i risultati emersi da una recente campagna sperimentale caratterizzata da elementi di innovazione che la distinguono dalle ricerche sperimentali già disponibili in letteratura.

Per i campioni di solaio da rinforzare sono state utilizzate travi in legno GL24h aventi una sezione relativamente tozza, tipica di una situazione esistente (160 x 200 mm), disposte ad interasse pari a 600 mm. Lo strato di completamento è stato realizzato con un tavolato disposto ortogonalmente rispetto alle travi ed avente uno spessore di 20 mm (Figura 33). Tutti solai testati hanno una luce netta tra gli appoggi pari a 6.4 m.



Figura 33 -

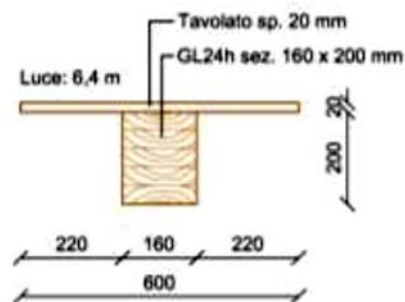


Figura 34 – Solaio oggetto di rinforzo

Per quanto riguarda l'elemento di rinforzo, due sono le soluzioni che sono state prese in considerazione. La prima prevede l'impiego di pannelli in legno multistrato a strati incrociati (X-Lam) di spessore pari a 99 mm e 57 mm, la seconda con appunto l'uso di travi in microlamellare di faggio (ETA-14/0354) di dimensioni 50 x 280 mm disposte in configurazione sdraiata sopra al tavolato.

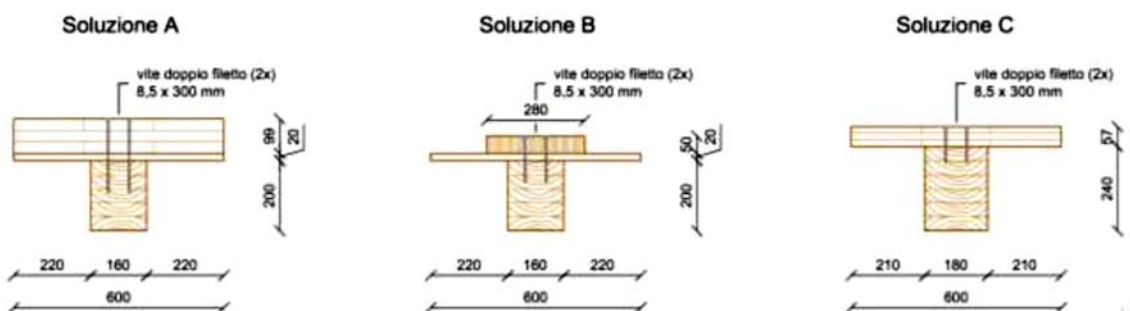


Figura 35 -

La connessione è stata realizzata con viti a doppio filetto (ETA-12/0132) di diametro 8.5 mm e lunghezza che varia da 150 mm a 300 mm a seconda dello spessore dell'elemento di rinforzo.

Tutte le viti sono state inserite a 45° ed orientate in modo tale da sollecitarle a taglio-trazione quando la trave è caricata verticalmente.

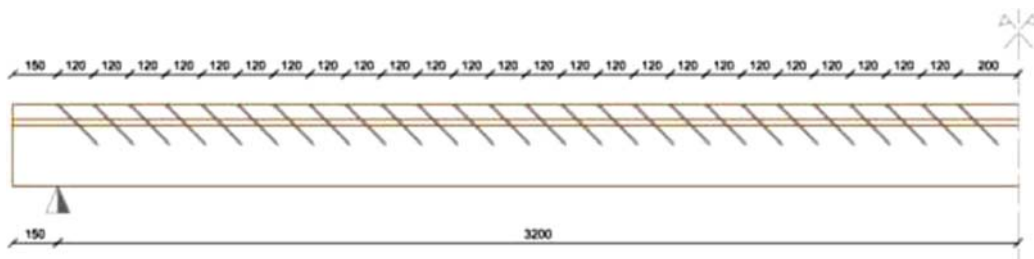


Figura 36 – Disposizione dei connettori

Le travi sono state assemblate secondo un innovativo sistema di montaggio che permette di realizzare travi composte precomprese caratterizzate da una controfreccia iniziale significativa. Il metodo sfrutta la “pressione” esercitata da ogni singola vite attraverso una precisa sequenza di inserimento.

Si tratta dunque di un metodo di intervento reversibile, che garantisce di mantenere contenuto l’incremento di peso del solaio ed essendo realizzato con una procedura a secco, di rapida realizzazione.

Le tre soluzioni studiate rispecchiano diverse esigenze di carattere progettuale. La soluzione A è stata pensata per un solaio ligneo nel quale il rinforzo si rende necessario per un cambio di destinazione d’uso e quindi per la realizzazione di solai in grado di sopportare carichi di notevole entità.

La soluzione B, ovvero con l’LVL, consente invece di mantenere contenuto lo spessore del pacchetto di rinforzo. Inoltre, l’utilizzo di un elemento collaborante relativamente snello ma sufficientemente resistente garantisce il posizionamento in aderenza anche quando si va ad intervenire su solai esistenti notevolmente deformati. L’ultima soluzione rappresenta infine una soluzione intermedia nella quale è stato rimosso lo strato di tavolato.

Si osserva che l’elevato spessore del pannello di rinforzo utilizzato nel caso A deriva dalla volontà dei ricercatori di testare le potenzialità dell’innovativo sistema di assemblaggio, massimizzando lo stato di coazione generato dalle viti. A tal proposito, si ricorda che lo stato tensionale introdotto da ogni vite è proporzionale alla lunghezza della parte filettata, che deve essere dimensionata in funzione dell’elemento

attraversato.

Il livello di precompressione che si è in grado di introdurre negli elementi composti attraverso la speciale procedura di assemblaggio dipende dalle caratteristiche flessionali degli elementi lignei, oltre che dalle caratteristiche del sistema di connessione.

Per determinare il comportamento dei sistemi di connessione adottati, è stata realizzata un'opportuna campagna sperimentale su campioni di dimensione ridotta (test di "pushout").

La sperimentazione è stata suddivisa in due fasi ben distinte:

Fase 1: Assemblaggio delle travi composte

In questa fase l'elemento di rinforzo è stato reso solidale alla trave attraverso l'inserimento dei connettori. Durante tutta questa fase, la monta imposta è stata monitorata utilizzando trasduttori di spostamento LVDT posizionati all'intradosso della trave. Gli scorrimenti relativi pannello-trave sono invece stati misurati con una serie di trasduttori di spostamento estensimetrici AEP. Lo "stato di sollecitazione" indotto nella trave dal "tiro" esercitato dalle viti è stato misurato tramite estensimetri a resistenza applicati nella mezzeria dei campioni ai lembi superiore ed inferiore della sezione. Nella seguente figura è riportata la disposizione degli strumenti di misura utilizzati.



Figura 37 - Fase di assemblaggio: strumentazione

Fase 2: Applicazione del carico

Nella seconda fase i campioni sono stati portati a rottura mediante l'esecuzione di una prova a flessione su sei punti (Figura 39). Tutti i test sono stati condotti in controllo di spostamento con una velocità di avanzamento del martinetto mantenuta costante durante tutta la prova e pari a 0,2 mm/min.

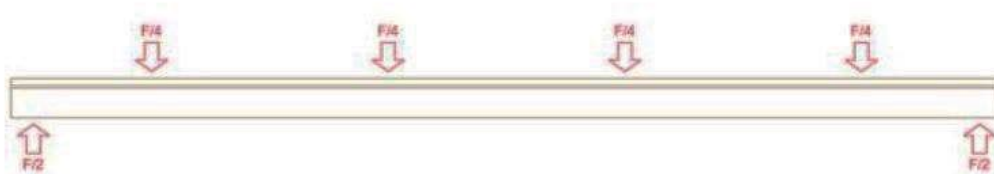


Figura 38 – Prova a flessione su sei punti



Figura 39 - Fase di carico: prova a flessione su sei punti (Soluzione C)

Nella seguente figura sono riportati i risultati ottenuti. In particolare, le curve individuano il comportamento in termini di carico totale/spostamento in mezzeria per i tre test effettuati. È bene evidenziare come queste non partano dall'origine degli assi ($d = 0$ mm), bensì da una configurazione deformata, identificabile al termine della fase di assemblaggio (fase 1). La retta verticale (SLE) rappresenta invece il limite di inflessione per lo stato limite di esercizio, convenzionalmente assunto pari a $L/300$.

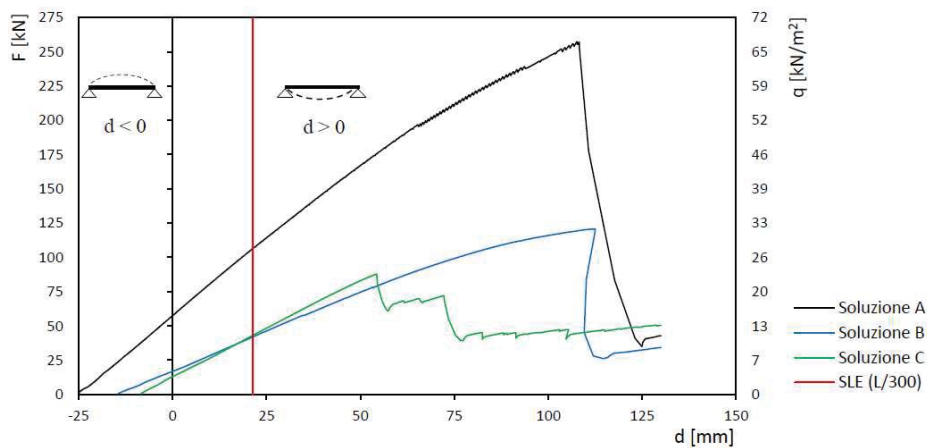


Figura 40 - Risultati test a flessione

Il segno negativo caratterizza il valore di controfreccia raggiunto con la speciale tecnica di assemblaggio adottata, e quindi identifica uno spostamento verso l'alto.

In Figura 41 è riportata una sintesi dei risultati ottenuti, con riferimento alle condizioni di normale utilizzo dei solai. Come anticipato, il limite di freccia che identifica lo stato limite di esercizio è stato assunto convenzionalmente pari a:

$$SLE = L/300.$$

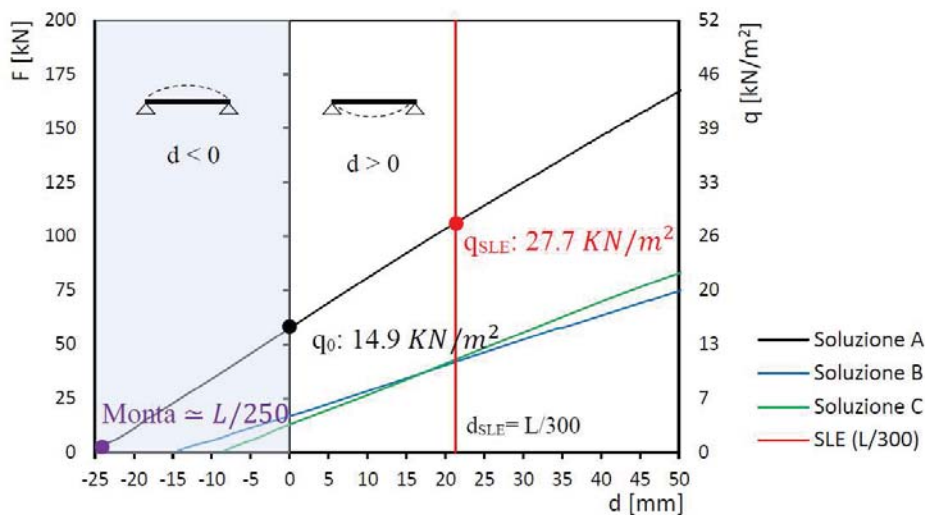


Figura 41 - Risultati test a flessione – considerazioni sulle condizioni di esercizio

Analizzando i risultati ottenuti per la soluzione A (soluzione pensata per massimizzare gli effetti della controfreccia iniziale imposta) si nota che per riportare la trave in configurazione indeformata è stato necessario applicare una forza di 57,7 kN che corrisponde a un carico distribuito sulla trave pari 14,9 kN/m². Tale carico è ben

superiore a quelli usualmente assunti per il progetto di un solaio; i risultati ottenuti per le soluzioni B e C (quindi anche con l'LVL) si sono rivelati altrettanto soddisfacenti, se rapportati al sistema di rinforzo adottato.

Le rette tratteggiate riportate in Figura 42, rappresentano il comportamento di "sezioni composte ideali" (EJ_{inf}) dove lo scorrimento tra trave e pannello è impedito. In assenza di connettori meccanici le curve partono dunque dalla condizione indeformata ($d = 0$ mm).

Confrontando tali rette con i risultati sperimentali, è possibile osservare come l'efficienza della connessione ottenuta attraverso la speciale procedura di assemblaggio appaia superiore all'unità fino a livelli di carico considerevoli. A tal proposito, si ricorda che l'efficienza è un parametro adimensionale che indica quanto il comportamento della sezione composta "reale" sia assimilabile al comportamento ideale ($\eta = 0$ nel caso di elementi scollegati e $\eta = 1$ nel caso di connessione infinitamente rigida). I valori di efficienza che solitamente si registrano per i solai composti lignei (con soletta di legno o calcestruzzo) sono compresi tra 0.4 e 0.7.

Monta $\approx L/250$

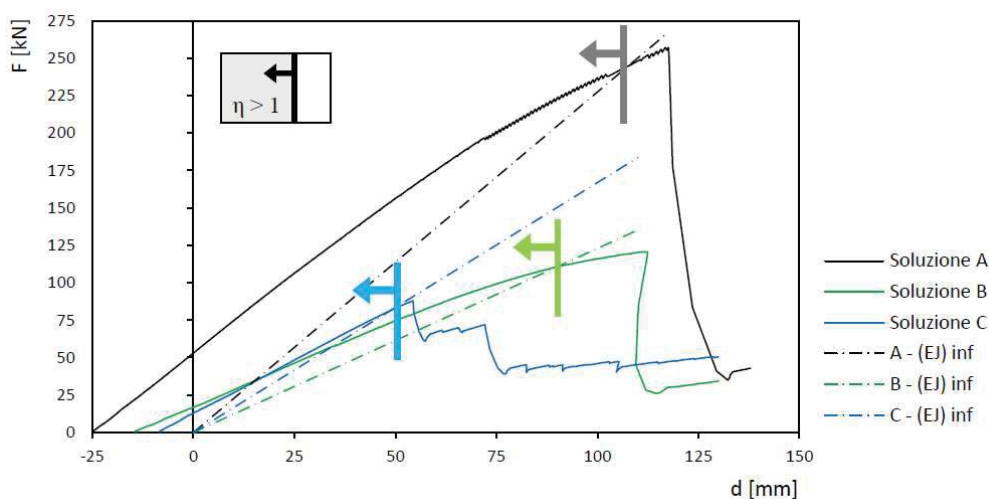


Figura 42 - Risultati test a flessione - Efficienza travi composte

In tutte le prove eseguite la rottura è imputabile a una crisi per tenso-flessione in corrispondenza del lembo inferiore della trave (Figura 43). In nessun caso si è assistito ad un danneggiamento del pannello di rinforzo.



Figure 43 - Soluzione B, modalità di rottura

Solai composti ad alte prestazioni

Una piccola parentesi all'impiego dell'LVL come rinforzo strutturale va a delle prove sperimentali effettuate su solai lignei composti realizzati con soluzioni innovative LVL-LVL, per la realizzazione di solai progettati per sopportare grandi carichi.

Questa sperimentazione non cadrebbe precisamente all'interno dei possibili utilizzi economicamente convenienti dell'LVL, ma rappresenta una casistica particolare in cui la struttura composta assume caratteristiche di resistenza molto elevate e difficili da ottenere con altre soluzioni lignee.



Figura 44 –

La scelta del materiale ricade sul microlamellare di faggio e deriva dalla volontà di aumentare le prestazioni del sistema costruttivo, mantenendo contenute le dimensioni del pacchetto strutturale. Le caratteristiche meccaniche di tale materiale (GL70) vengono rapportate con quelle di un lamellare tradizionale con classe resistente GL24:

Materiale:			GL70*	GL24h**
Resistenza a flessione:	$f_{m,k}$	[MPa]	70.0	24.0
Resistenza a trazione:	$f_{t,0,k}$	[MPa]	55.0	19.2
	$f_{t,90,k}$	[MPa]	0.6	0.5
Resistenza a compressione:	$f_{c,0,k}$	[MPa]	59.4	24.0
	$f_{c,90,k}$	[MPa]	10.2	2.5
Resistenza a taglio:	$f_{v,k}$	[MPa]	4.0	3.5
Modulo di elasticità:	$E_{0,mean}$	[MPa]	16700	11500
Massa volumica apparente:	ρ_{mean}	[Kg/m ³]	≥ 740	420

* ETA-14/0354

** UNI EN 14080: 2013

Figura 45 –

Anche in questa sperimentale il collegamento tra travetto e pannello viene realizzato mediante viti a filetto parziale, inserite a 45°.

Per le soluzioni A1 e A2 è stata utilizzata una trave in microlamellare di faggio avente sezione 160 x 240 mm connessa ad una soletta realizzata con lo stesso materiale e di spessore pari a 40 mm.

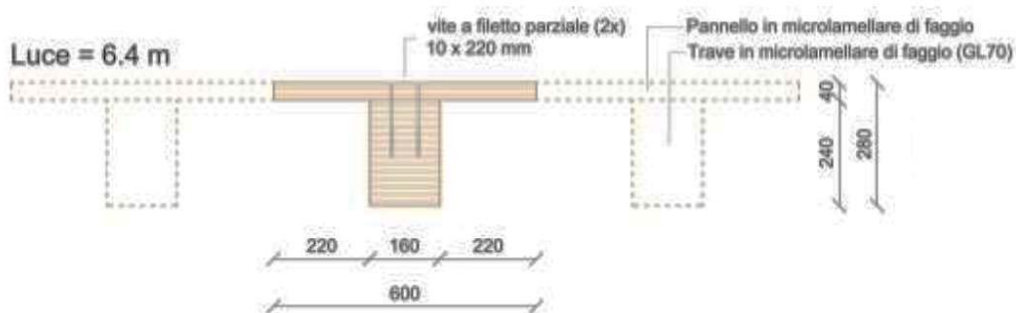


Figura 46 –

Per quanto riguarda la soluzione B, la soletta di spessore 40 mm è stata accoppiata con una trave realizzata sempre con microlamellare di faggio, ma di dimensioni ridotte rispetto alle soluzioni A e pari a 120 x 200 mm.

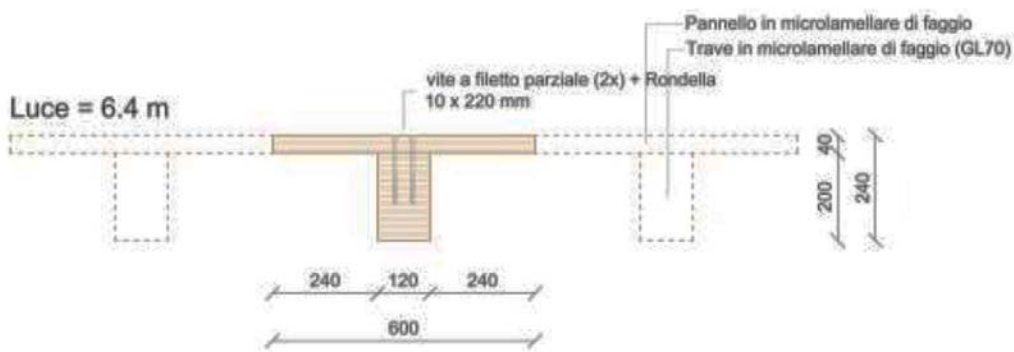


Figura 47 -

Per tutti i test sono stati utilizzati viti a filetto parziale 10 x 220 mm (ETA-11/0190) disposti su due file. Per le soluzioni A1 e A2, non è stato previsto l'uso di alcuna rondella (Figura 48). Per la soluzione B, le viti sono state inserite utilizzando una speciale rondella (Figura 49).



Figura 48 -



Figura 49 -

Tutti i connettori sono stati inseriti con passo costante ed un'inclinazione di 45° in modo tale da sollecitarle nella tipica configurazione a “taglio-trazione”.

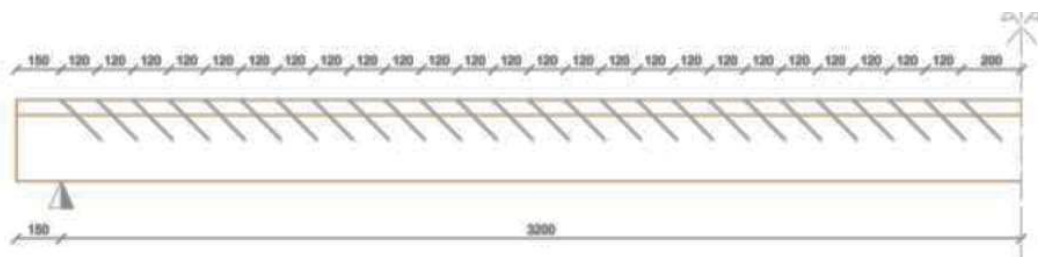


Figura 50 -

Le travi A1 e B sono state assemblate secondo il medesimo sistema di montaggio del capitolo precedente, con la possibilità di realizzare travi composte precomprese con una monta iniziale significativa.

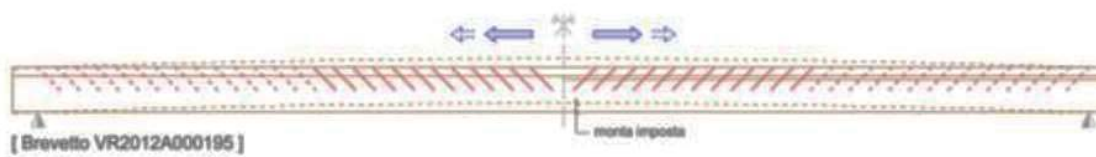


Figura 51 –

Ogni trave è stata portata a rottura mediante una prova a flessione su 6 punti, tale configurazione permette di schematizzare con sufficiente grado di approssimazione, la sollecitazione indotta da un carico uniformemente distribuito agente sul solaio.

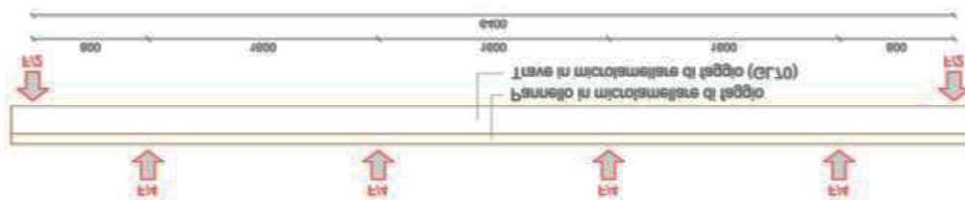


Figura 51 –

Gli strumenti utilizzati per il monitoraggio dei campioni durante la fase di carico sono riportati qui sotto:



Figura 52 -



figura 53 –

Una delle problematiche riscontrate in queste prove di laboratorio riguarda la densità del materiale che comporta delle difficoltà in fase di lavorazione dello stesso e durante l'inserimento delle viti. Per l'intera campagna sperimentale sono state utilizzate viti a filetto parziale disponibili in commercio e quindi progettate per un utilizzo su legno di conifera ma, l'utilizzo di connettori appositamente progettati per l'inserimento in legni duri porterebbe ad un miglioramento e ad una maggior facilità della fase di assemblaggio.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per i tre test sopra descritti. Uno spostamento negativo individua un sollevamento della trave verso l'alto (fase di assemblaggio per i test A1 e B), mentre un valore positivo rappresenta uno spostamento concorde con la direzione del carico applicato.

È inoltre riportato, come nel caso del solaio ligneo rinforzato, il limite di spostamento che individua lo stato limite di esercizio, convenzionalmente assunto pari a $L/300$ (retta verticale rossa in figura).

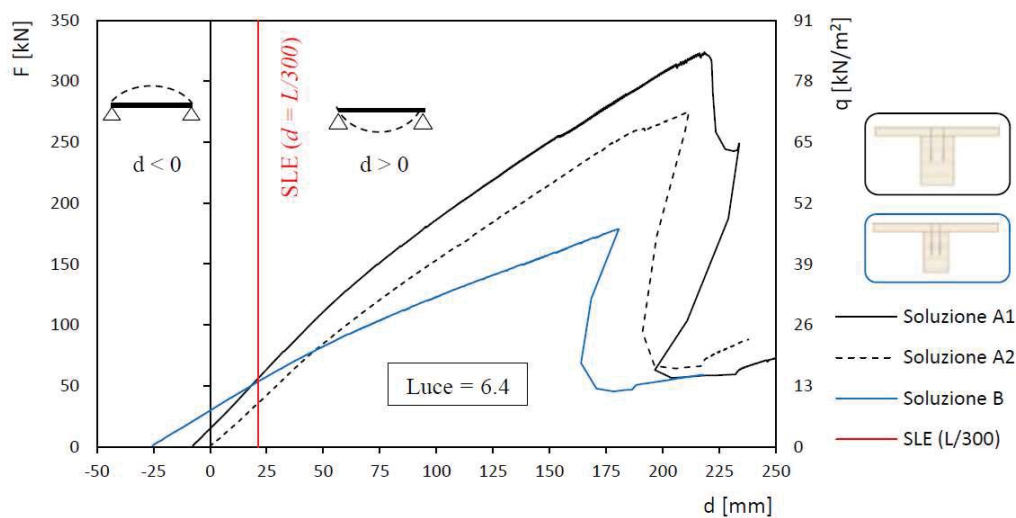


Figura 9 Risultati test a flessione

Figura 54 -

Fin da subito è immediato notare l'entità dei carichi in gioco. Nello specifico, la trave composta A1 ha raggiunto un carico massimo di 324 kN per un valore di spostamento pari a 219 mm. Tale forza corrisponde ad un carico distribuito sulla superficie del solaio pari a 84 kN/m².

La soluzione A2 parte da un punto ad ascissa nulla ($d = 0$ mm) che corrisponde alla configurazione indeformata iniziale della trave. Per i campioni A1 e B la tecnica di assemblaggio utilizzata ha permesso invece di realizzare travi dotate di una monta iniziale significativa, mentre la soluzione B, grazie ad una maggiore snellezza dell'elemento trave e l'utilizzo di rondelle speciali (a parità di viti utilizzate) si è dimostrata la più performante in termini di monta ottenuta. La contro-freccia registrata è stata pari a circa 26 mm che corrisponde a circa $L/250$. Focalizzando l'attenzione sulla allo stato limite di esercizio, sebbene la trave utilizzata per il solaio B sia dotata di minor inerzia rispetto a quelle utilizzate negli altri test, questa soluzione si è dimostrata la più performante a parità di connessioni inserite e spessore della soletta collaborante.

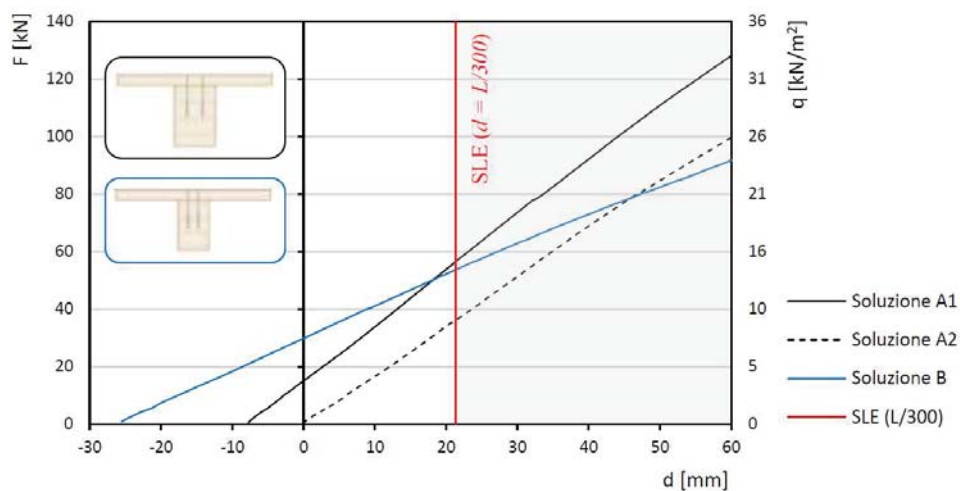


Figura 10 Considerazioni sulle condizioni di esercizio

Figura 55 -

Tale comportamento è reso possibile dalla speciale procedura di assemblaggio adottata. Il carico necessario per riportare la trave B in configurazione indeformata è stato pari a 8,1 kN/m², decisamente elevato se confrontato con i carichi usualmente assunti in fase di progetto. Lo stato limite di esercizio è stato raggiunto con l'applicazione di 14 kN/m².

Confrontando le soluzioni A1 e A2 realizzate con elementi aventi le medesime dimensioni e stesso numero di viti è possibile avere una conferma del miglioramento prestazionale introdotto in fase di assemblaggio.



Figura 56 -

Prendendo ora in esame la soluzione B, è possibile fare qualche ulteriore osservazione. $(EJ)_{inf}$, $(EJ)_0$, rappresentano il comportamento di una trave composta ideale realizzata con gli stessi elementi strutturali (trave e soletta), ipotizzando rispettivamente una rigidezza infinita ed una rigidezza nulla della connessione. $(EJ)_{eff}$ identifica invece la rigidezza flessionale della trave composta calcolata utilizzando il metodo di progetto fornito nell'appendice B dell'Eurocodice 5.

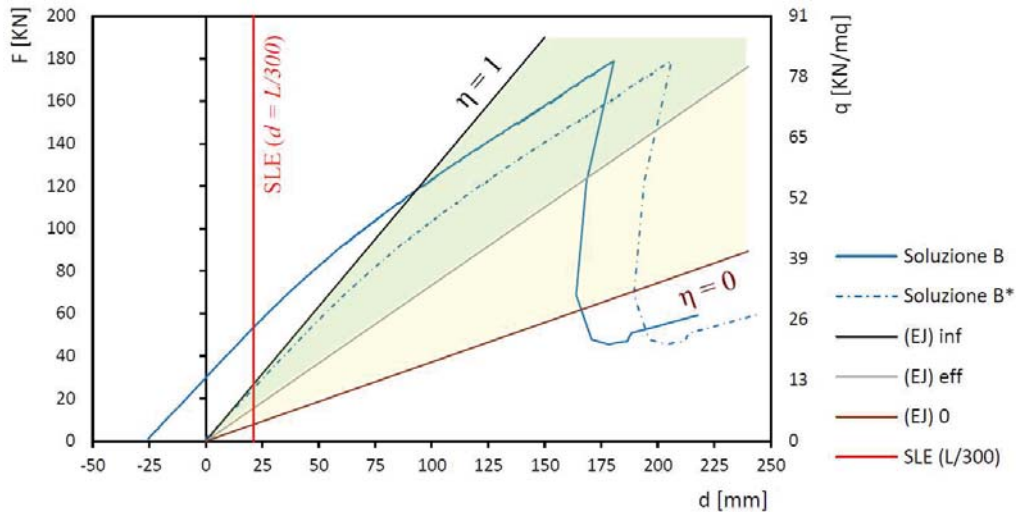


Figura 57 -

Definendo l'efficienza della connessione:

$$\eta = \frac{(EJ)_{reale} - (EJ)_0}{(EJ)_{inf} - (EJ)_0}$$

dove $(EJ)_{reale}$ è calcolata utilizzando direttamente le risultanze sperimentali, essa è dunque un parametro che indica quanto il comportamento della sezione composta "reale" sia assimilabile al comportamento ideale ($\eta = 0$ nel caso di elementi scollegati, $\eta = 1$ nel caso di connessione infinitamente rigida). I valori di efficienza che solitamente si registrano per i solai composti lignei sono compresi tra 0.4 e 0.7. Per quanto riguarda la soluzione B, considerando la configurazione deformata iniziale, è possibile osservare come, per valori di carico considerevoli, la curva "carico-spostamento" sia superiore a quella che identifica la configurazione con rigidezza infinita della connessione (situazione ben rappresentata da una connessione incollata).

Al fine di valutare l'efficienza del sistema di connessione a meno del contributo dato dalla "precompressione", si fa riferimento alla curva traslata B*. In questo caso, è

possibile notare come l'efficienza sia prossima all'unità per valori di carico inferiori a quello corrispondente allo stato limite di esercizio.



Figura 58 -

CAPITOLO 3 – CONNESSIONI TRAMITE VITI INCLINATE

Nei capitoli precedenti è stata ripresa più volte l'importanza delle connessioni nei confronti del corretto dimensionamento e della resistenza delle varie tipologie di rinforzi trattati. In questo capitolo è stato considerato un articolo redatto da Luca Marchi, Roberto Scotta e Luca Pozza riguardante la valutazione della resistenza a taglio, secondo EU5, delle connessioni nelle strutture composte in legno-clc.

Valutazione delle connessioni nelle strutture TCC

Le strutture composte legno-calcestruzzo vengono utilizzate per la progettazione di nuovi solai o per il rinforzo di solai esistenti. Il punto chiave per garantire una buona resistenza meccanica a queste strutture è costituito dall'uso di connettori con un'adeguata forza e rigidità tra trave in legno e lastra in calcestruzzo. I moderni connettori cilindrici, come le viti autofilettanti, stanno suscitando interesse perché combinano buone proprietà meccaniche e velocità di esecuzione. Nello studio effettuato in questo articolo è stato ricavato un metodo teorico semplificato per calcolare la resistenza a taglio e rigidità dei giunti TCC (composti legno- calcestruzzo) tramite l'utilizzo di viti inclinate ed è stato riportato un confronto tra la normativa in vigore e le relative procedure progettuali. Sono stati inseriti inoltre i risultati di test sperimentali push-out (a breve periodo) su giunti di TCC realizzati con viti autofilettanti inclinate. Queste prove sono state effettuate utilizzando diversi tipi di connettori, con diametro variabile e calcestruzzo normale o alleggerito. Infine, è stato effettuato un confronto tra i risultati dei test e il metodo teorico, ed è stato discusso sia in termini di forza che di rigidità.

Le strutture composte TCC sono una tecnica praticabile per sfruttare contemporaneamente le migliori caratteristiche meccaniche del legno e del calcestruzzo al fine di realizzare dei solai composti. Questo metodo risulta essere una soluzione efficace sia per i nuovi solai, sia per gli esistenti, per aumentare la capacità di carico e ridurre le vibrazioni ed i relativi problemi acustici. Il sistema di connessione

deve essere attentamente esaminato per avere sufficiente forza e rigidità. Un' inadeguata forza d'attrito tra la superficie del legno e quella del calcestruzzo può portare infatti al collasso globale della struttura. Dall' altro lato, una rigidità insufficiente può condurre alla rottura anticipata degli elementi connessi o provocare grandi deformazioni tali da superare lo stato limite di servizio previsto da normativa. Le viti autofilettanti moderne non sono fabbricate per essere posizionate perpendicolarmente alla zona di contatto tra gli elementi da connettere, ma vengono posizionate con angolo variabile tra l'asse della vite e la direzione delle fibre del legno in modo tale da migliorare la resistenza a taglio e la resistenza di estrazione del connettore. Possono comunque sorgere delle difficoltà di installazione se si hanno angoli eccessivi, quindi una soluzione equilibrata si ha con una inclinazione di 45°. In questo modo si ottengono buone performance, oltre alla facilità di esecuzione.

Tuttavia è bene evidenziare che, seguendo l'equazione dell'Eurocodice 5 per la progettazione di un giunto con configurazione a singola vite inclinata, esso non conferisce sufficiente resistenza e rigidità, quindi si predilige la configurazione a doppia vite inclinata che permette di raddoppiare la resistenza al carico per CP (punto di connessione).

Le viti incrociate con una inclinazione di 45° lavorano contemporaneamente a compressione e trazione ed in queste combinazioni la vite è soggetta ad una condizione di carico assiale e laterale. In accordo con l'EU5 può essere usata una combinazione quadratica per calcolare la capacità della connessione. C'è comunque una mancanza di informazione riguardo il comportamento delle viti disposte a X e riguardo il contributo della vite caricata a taglio ed a compressione rispetto alla resistenza globale del CP.

Lo scopo di della ricerca è quello di approfondire il comportamento meccanico delle viti inclinate autofilettanti utilizzate come connettori di legno e calcestruzzo sia nella configurazione a singola vite sia in quella a X, e di definire un approccio analitico attraverso le modifiche delle formule teoriche esistenti. Le valutazioni della rottura del calcestruzzo sono state aggiunte al modello così come modifiche minori in modo tale da poterle applicare anche in caso di viti parzialmente filettate. In aggiunta, in questo

studio, sono presenti i risultati dei test push out a breve termine allo scopo di valutare il comportamento meccanico al variare di:

- Disposizioni delle viti: singole a 45 ° o incrociate a 45°rispetto al piano di attrito;
- Tipo di calcestruzzo: normale o alleggerito;
- Diametro nominale delle viti: 8, 10, 12 mm.

Nella figura 59 vengono rappresentati i due casi presi in esame: nel primo la configurazione con il CP a singola vite, nel secondo con la configurazione a X

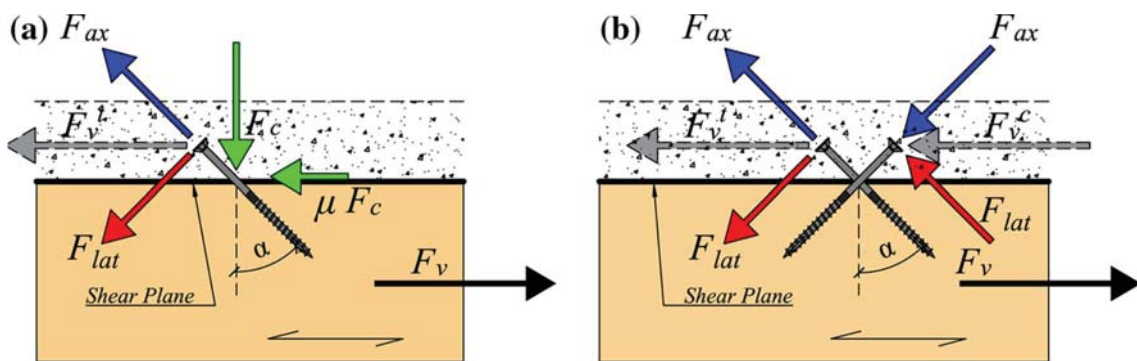


Figura 59 –

Si può osservare come la forza trasmessa alla vite (F_v) possa essere scomposta in una componente parallela all'asse della vite F_{ax} e una laterale F_{lat} :

$$F_{ax} = F_v \cdot \sin \alpha$$

$$F_{lat} = F_v \cdot \cos \alpha$$

Dove α è l'inclinazione rispetto alla direzione perpendicolare alle fibre del legno.

Configurazione a singola vite

L'Eurocodice 5 stabilisce che, per il calcolo della massima capacità di carico della singola vite, si utilizzi la seguente disuguaglianza:

$$\left(\frac{F_{ax}}{F_{ax,Lim}} \right)^2 + \left(\frac{F_{lat}}{F_{lat,Lim}} \right)^2 \leq 1$$

$F_{ax,lim}$ e $F_{lat,lim}$ sono rispettivamente le massime capacità di carico nella direzione assiale e trasversale. Componendo quindi le prime due equazioni si può ottenere la capacità di carico parallela al piano di taglio:

$$F_v = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{\sin \alpha}{F_{ax,Lim}}\right)^2 + \left(\frac{\cos \alpha}{F_{lat,Lim}}\right)^2\right]}} \quad (3)$$

$F_{ax,Lim}$ può essere calcolato in accordo con l'EU5 se non esistono normative particolari per quel determinato connettore.

$F_{lat,Lim}$ può essere calcolato con l'EU5 tramite la teoria di Johansen, e può essere aumentata considerando il "rope effect" che sfrutta la resistenza ad estrazione del connettore. Nelle unioni con connettori cilindrici, infatti, raggiunti i meccanismi di collasso i connettori iniziano a lavorare a trazione oltre che flessione e taglio e si ha quindi un incremento di resistenza dovuto alla componente nella direzione del carico della trazione nei connettori. La componente aggiuntiva del *rope effect* è data da $\mu \cdot F_c$ dove μ è un coefficiente pari a 0.25 e risulta essere adatta a superfici legno-legno, mentre non risultano esserci valori standard per quanto riguarda le superfici legno-calcestruzzo.

Viene quindi richiamata una estensione alla teoria di Johansen adatta alle TCC ed alla combinazione taglio trazione.

Le principali ipotesi di questa teoria sono il comportamento rigido della vite nello strato di cls e la resistenza a estrazione dovuta alla parte filettata della vite. Il fallimento cinematico può avvenire in 3 modi e le capacità di carico sono estrapolate dall'equilibrio di questi 3 modelli:

- Rifollamento;
- Formazione di una cerniera plastica nella superficie tra legno-cls;
- Formazione di due cerniere nello strato legnoso.

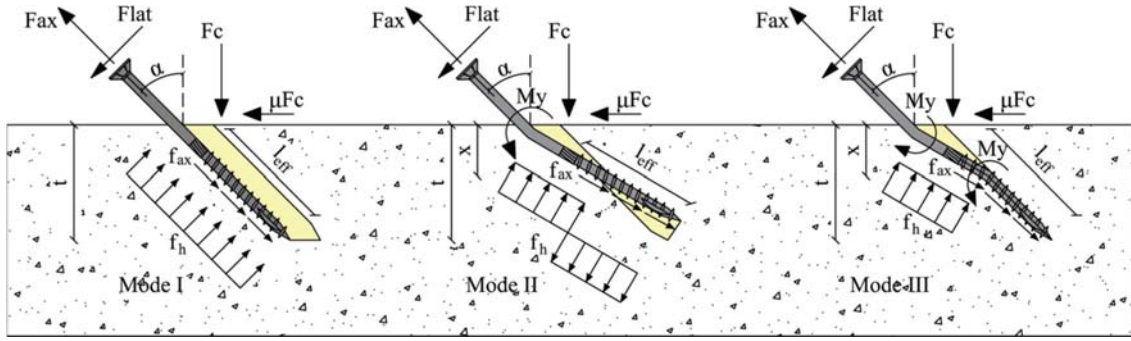


Figura 60 –

L_{eff} risulta essere la lunghezza della parte filettata della vite, responsabile della capacità di estrazione, e si distingue dalla lunghezza di penetrazione t responsabile della forza laterale.

Vengono indicati con le appendici t e c i casi di taglio-trazione e taglio-compressione.

La capacità di carico parallela al piano di taglio per una vite soggetta a taglio trazione risulta essere, con il metodo di Johansen, il minimo tra le 3 equazioni riportate di seguito:

$$F_{v,Rk,th}^t = \min(F_{v,Rk}^{It}; F_{v,Rk}^{II t}; F_{v,Rk}^{III t}) \quad (4)$$

$$F_{v,Rk}^{It} = R_{ax,k}^t \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) + f_{h,k} \cdot d \cdot t \cdot (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \quad (5)$$

$$F_{v,Rk}^{II t} = R_{ax,k}^t \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) + f_{h,k} \cdot d \cdot t \cdot (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \cdot \left[\sqrt{2} \sqrt{\frac{2M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t^2} \cdot \cos^2 \alpha + 1} - 1 \right] \quad (6)$$

$$F_{v,Rk}^{III t} = R_{ax,k}^t \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha) + 2 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} \cdot (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha) \quad (7)$$

$R_{ax,k}$ è la resistenza assiale della vite e viene calcolata come il minimo tra la capacità di estrazione della parte filettata e la resistenza della testa della vite nel calcestruzzo che potrebbe portare ad una rottura anticipata nel calcestruzzo:

$$R_{ax,k} = \min(F_{ax,Rk}; F_{ax,Rk,cone}) \quad (8)$$

Il primo termine può essere calcolato con l'EU 5 oppure con eventuali indicazioni fornite nel libretto di omologazione del connettore, mentre il $F_{ax,Rk,cone}$ è dato da:

$$F_{ax,Rk,cone} = 0,96\sqrt{f_{ck}}\pi \cdot h_{eff} \cdot (h_{eff} + d_h) \quad (9)$$

Dove h_{eff} può essere identificato come il valore medio dello strato di copertura in calcestruzzo dalla testa della vite misurato parallelamente all'asse della vite. In aggiunta, visto che la rottura del cono in calcestruzzo può avvenire sia nella parte superiore sia in quella inferiore dello strato in il valore di h_{eff} varia secondo la figura 61.

Configurazione a X

Nella configurazione a X, l'equazione 3 vale sia nel caso di taglio-trazione che nel caso di taglio-compressione. Anche l'equazione 4 continua ad essere valida, ma variano alcuni termini all'interno delle equazioni 5, 6, 7. Nello specifico:

- μ viene trascurato per l'assenza del carico di compressione F_c agente tra legno e calcestruzzo;
- nella valutazione della resistenza il fallimento del cono nel cls viene calcolato in maniera differente tra taglio-trazione e taglio-compressione considerando h_{eff1} per la trazione e h_{eff2} per la compressione:

$$F_{ax,Rk,cone}^t = F(h_{eff,1}); \quad F_{ax,Rk,cone}^c = F(h_{eff,2}) \quad (10)$$

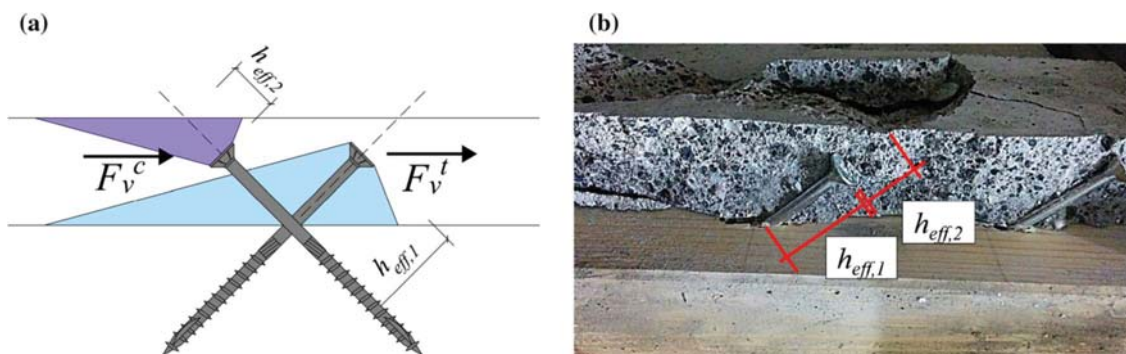


Figura 61 -

La resistenza totale della coppia di viti incrociate risulta quindi essere data da:

$$F_{v,Rk,th}^{t+c} = \min(F_{v,Rk}^{I t+c}; F_{v,Rk}^{II t+c}; F_{v,Rk}^{III t+c}) \quad (11)$$

Rigidezza

In accordo con l'EU5, la rigidezza K_{ser} dipende esclusivamente dalle proprietà del legno, cioè dalla densità ρ_m e dal diametro del connettore raccolte all'interno della seguente relazione:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot d/23 \quad (\text{N/mm}) \quad (12)$$

Questa formulazione è adatta per connessioni legno-legno ma, nel nostro caso, considerando la maggior rigidità del cls, viene moltiplicata per 2. I contributi per la rigidità laterale ed assiale dovrebbero essere considerati allo stato limite di esercizio assumendo un comportamento elastico-lineare della vite.

Il $k_{ser,\perp}$ può essere calcolato con l'eq. 12.

La proposta alternativa alle equazioni riportate nell'EU5 vengono riportate qui di seguito:

$$K_{ser,th}^t = K_{ser, //} \cdot \sin \alpha \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha) + K_{ser, \perp} \cdot \cos \alpha \cdot (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha) \quad (13)$$

Considerando l'inclinazione delle viti di 45° si può semplificare a:

$$K_{ser,th}^t = \frac{K_{ser, //} \cdot (1 + \mu) + K_{ser, \perp} \cdot (1 - \mu)}{2} \quad (14)$$

Campagna sperimentale

Sono state condotte 12 prove *push-out* variando diametro delle viti, sistemazione delle viti e tipo di calcestruzzo. Per ciascuna serie si sono eseguite 4 prove ottenendo quindi un totale di 48 sperimentazioni. Questi test sono stati effettuati per valutare il comportamento complessivo, la rigidità e la resistenza del TCC.

Il provino è composto da due elementi di calcestruzzo connessi alla parte centrale in legno con dei connettori disposti come in figura sottostante. Data la simmetria della configurazione, il carico applicato è distribuito in maniera uguale tra le due superfici di contatto legno-cls.

- Spessore calcestruzzo = 6 cm
- Spessore legno = 24 cm
- Altezza totale provino = 50 cm
- Configurazione a I vite: 3 viti per ogni parte con un totale di 6 viti;
- Configurazione a X: 2x2 per un totale di 8 viti;

Lo spazio tra le viti è stato calcolato utilizzando l'EU5 e le omologazioni ETA

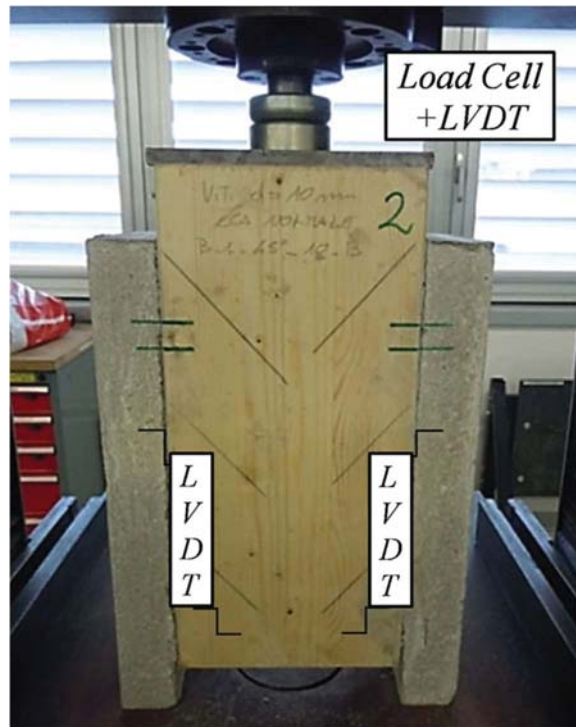


Figura 62 -

Materiali

Legno

Il legno utilizzato per fabbricare i provini è classificato GL24h (EN 14080) con densità caratteristica e densità media rispettivamente di :

$$\rho_k = 385 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_m = 420 \text{ kg/m}^3.$$

Il contenuto di umidità è stato determinato per ogni serie di provini in accordo con la normativa EN13183-2 con un valore medio di 11.2%.

Viti

Le viti sono autofilettate con testa svasata e lunghezza del filetto $l_{\text{eff}}=80\text{mm}$ e diametri nominali variabili, ovvero di 8,10 e 12mm.

Il parametro della forza caratteristica di estrazione $f_{ax,k}$ e il momento flettente $M_{y,Rk}$ sono stati ricavati direttamente dal documento ETA-11/0027 e sono:

$$f_{ax,k} = 10.0 \text{ MPa} \quad (15)$$

$$M_{y,Rk} = 0.15 \cdot 600 \cdot d^{2.6} \quad (16)$$

Per il parametro di forma, è tollerata l'indipendenza dall'inclinazione fino ai 45°.

Calcestruzzo

Le proprietà meccaniche del calcestruzzo sono state valutate da test di compressione su cubi per ciascuno dei 4 gruppi di provini in accordo con la norma EN12390. Il corrispondente modulo elastico medio E_{cm} è stato calcolato seguendo l'EU2 per il calcestruzzo normale. La forza uniassiale di compressione media misurata è di $F_{cm}=35.62$ MPa ed il corrispondente modulo elastico $E_{cm}= 31.256$ GPa. Per il calcestruzzo alleggerito, invece, i valori corrispondono a $F_{cm}= 32.73$ MPa ed $E_{cm}=16.072$ GPa rispettivamente. Le verifiche sul calcestruzzo sono state effettuate prima dell'inizio dei test di push-out.

I test a breve termine sui push out sono stati effettuati seguendo dei protocolli di verifica di carico in accordo con la norma EN26891 su un'unica macchina con capacità di carico fino a 250 kN. L'incremento di carico è stato calibrato in maniera specifica per ciascuna serie sullo sforzo ultimo di taglio, il quale è stato ottenuto da un test preliminare ripetuto più volte.

Le forze applicate sono state misurate usando una cella di carico posizionata tra l'attuatore e il provino. Lo spostamento relativo tra le superfici di attrito è stato misurato con un LVDT posizionato lungo entrambi i piani di taglio e confermato da un LVDT indipendente situato sul jack stesso. I test di valutazione sono stati fermati dopo un'improvvisa diminuzione della capacità di carico o quando si è raggiunto uno scorrimento di 15 mm.

Risultati dei Test

Le figure 63 e 64 illustrano le curve di forza-spostamento ottenute dai test e mostrano un confronto diretto tra le capacità di carico raggiunte con una singola vite inclinata di 45° e il suo incremento ottenuto con l'aggiunta della seconda vite incrociata. Le curve sono limitate ad un valore di spostamento di 10 mm.

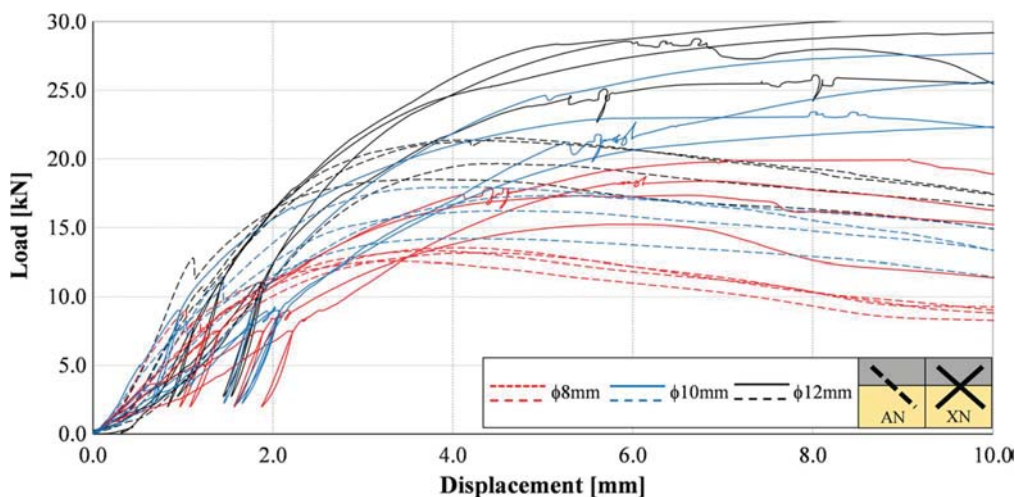


Figura 63 -

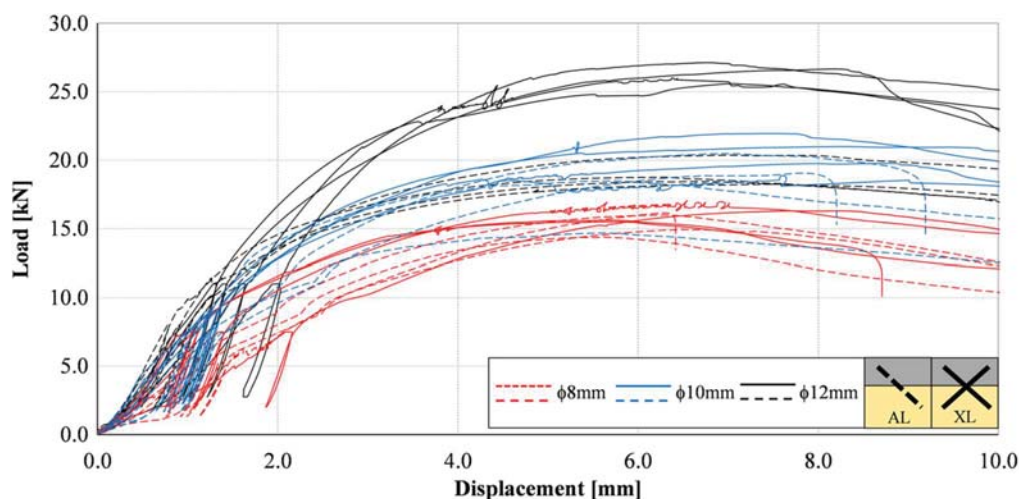


Figura 64 -

I test effettuati permettono di quantificare la forza a taglio sperimentale $F_{v,exp}$ come il carico critico applicato. In più il modulo istantaneo di scorrimento $K_{ser,exp}$ è

determinato dalle curve sperimentali carico-spostamento in accordo con le formule riportate nelle EN26891

$$K_{ser,exp} = \frac{0.4 \cdot F_{v,est}}{v_{i,mod}} = \frac{0.4 \cdot F_{v,est}}{4/3 \cdot (v_{04} - v_{01})}$$

$$= \frac{0.4F_{v,est} - 0.1F_{v,est}}{v_{04} - v_{01}} \quad (17)$$

Dove v_{01} e v_{04} corrispondono allo slittamento misurato rispettivamente al $0.1 \cdot f_{vest}$ e $0.4 \cdot f_{vest}$.

È bene inoltre controllare le condizioni di servizio delle connessioni in termini di forza e spostamento quando si progettano delle strutture TCC, generalmente, nelle strutture in legno, questi valori possono essere identificati come il punto di snervamento della connessione. Vale la pena specificare che la definizione di punto di snervamento per le connessioni *dowel type* è ancora un dibattito aperto visto che solitamente le curve sperimentali mostrano un cambio poco chiaro nel valore di pendenza carico-deformazione.

Analizzando i risultati sperimentali, è possibile osservare che tutte le curve carico-scorrimento presentano un andamento globale uniforme per tutti i provini: la forza di taglio $f_{v,exp}$ e la rigidezza di servizio $k_{ser,erp}$ aumentano con l'incremento del diametro delle viti da 8 a 12 mm. Passando da cls normale ad alleggerito si può notare un aumento della deformabilità senza una riduzione del $f_{v,exp}$. Dopo il carico critico $f_{v,exp}$ un comportamento costante caratterizza le configurazioni a singola vite mentre il collasso del cono di calcestruzzo è stato rilevato in alcuni provini a vite incrociata con conseguente perdita di resistenza della vite sottoposta a compressione e taglio. La figura 65 elenca per ciascun provino la forza a taglio critica misurata $f_{v,exp}$, il modulo di scorrimento istantaneo $K_{ser,exp}$ determinato con l'eq. 17 e le coordinate del punto di snervamento convenzionale f_{vy} , così come i valori medi e i coefficienti di variazione COV. Per la configurazione a singola vite inclinata si hanno i seguenti risultati:

COV MAX=12% per $f_{v,exp}$

E = 18.3% $k_{ser,exp}$

AN series					AL series				
Spec. Id	$F_{v,exp}$ (kN)	$K_{ser,exp}$ (kN/mm)	$F_{v,y}$ (kN)	δ_y (mm)	Spec. Id	$F_{v,exp}$ (kN)	$K_{ser,exp}$ (kN/mm)	$F_{v,y}$ (kN)	δ_y (mm)
8_1	75.4	60.2	37.7	0.7	8_1	89.6	36.3	44.8	2.0
8_2	78.9	40.9	39.4	1.2	8_2	96.0	34.5	48.0	1.7
8_3	81.2	54.0	40.6	0.9	8_3	86.3	43.5	43.1	1.8
8_4	79.8	53.3	39.9	1.0	8_4	96.9	44.1	48.4	2.2
Mean	78.8	52.1	39.4	1.0	Mean	92.2	39.6	46.1	1.9
COV (%)	2.8	13.7	1.4	19.9	COV (%)	4.9	11.0	2.4	10.7
10_1	85.2	63.2	42.6	0.9	10_1	88.1	45.9	44.1	1.2
10_2	104.1	60.1	52.0	1.5	10_2	114.3	51.9	57.2	2.0
10_3	97.3	53.3	48.7	1.1	10_3	110.9	48.1	55.4	1.3
10_4	107.7	51.1	53.8	1.2	10_4	122.9	44.5	61.4	1.9
Mean	98.6	56.9	49.3	1.1	Mean	109.0	47.6	54.5	1.6
COV (%)	8.9	8.8	4.4	19.3	COV (%)	12.0	6.0	6.0	22.2
12_1	128.2	70.5	64.1	1.2	12_1	122.2	55.6	61.1	1.3
12_2	129.2	65.5	64.6	1.3	12_2	110.6	46.5	55.3	1.2
12_3	111.1	66.2	55.5	0.8	12_3	112.5	62.4	56.3	0.9
12_4	118.0	42.4	59.0	1.8	12_4	109.5	56.3	54.7	1.0
Mean	121.6	61.1	60.8	1.3	Mean	113.7	55.2	56.8	1.1
COV (%)	6.3	18.3	3.2	27.7	COV (%)	4.5	10.6	2.3	13.6

Figura 65 -

XN series					XL series				
Spec. Id	$F_{v,exp}$ (kN)	$K_{ser,exp}$ (kN/mm)	$F_{v,y}$ (kN)	δ_y (mm)	Spec. ID	$F_{v,exp}$ (kN)	$K_{ser,exp}$ (kN/mm)	$F_{v,y}$ (kN)	δ_y (mm)
8_1	69.4	24.2	34.7	1.4	8_1	68.2	23.6	34.1	1.5
8_2	82.3	22.8	41.1	1.9	8_2	62.4	38.7	31.2	1.1
8_3	68.0	21.0	34.0	2.2	8_3	65.2	17.2	32.6	2.3
8_4	76.8	20.1	38.4	2.7	8_4	62.0	31.0	31.0	1.1
Mean	76.2	22.4	38.1	2.0	Mean	64.4	31.1	32.2	1.5
COV (%)	8.3	7.5	4.2	24.2	COV (%)	4.0	29.2	2.0	32.0
10_1	98.2	41.5	49.1	1.4	10_1	79.1	28.4	39.5	1.5
10_2	111.0	23.2	55.5	2.3	10_2	87.8	31.3	43.9	1.6
10_3	104.7	44.4	52.4	2.9	10_3	85.0	27.8	42.5	1.5
10_4	90.0	20.3	45.0	2.5	10_4	83.9	31.2	42.0	1.4
Mean	101.0	32.4	50.5	2.3	Mean	83.9	29.7	42.0	1.5
COV (%)	8.0	34.1	4.0	25.5	COV	3.9	5.5	1.9	4.1
12_1	117.0	65.7	58.5	1.8	12_1	104.5	34.2	52.2	1.6
12_2	121.5	47.5	60.7	1.9	12_2	102.3	38.0	51.2	1.5
12_3	115.0	30.3	57.5	2.2	12_3	108.5	34.6	54.2	2.3
12_4	105.5	25.8	52.8	2.1	12_4	106.6	30.4	53.3	1.9
Mean	114.7	42.3	57.4	2.0	Mean	105.5	34.3	52.7	1.8
COV (%)	5.2	38.4	2.6	8.0	COV (%)	2.3	8.1	1.1	16.5

Figura 66 -

Per la configurazione a viti incrociate, è confermato il COV della resistenza di picco ma i risultati in termini di rigidità diventano variabili e sono stati ottenuti dei COV più elevati (fino al 38,4% per le serie Xn con viti da 12mm). In media l'aumento di forza $f_{v,exp}$ e rigidità $k_{ser,exp}$ di viti con stesso diametro è confermato con tutte le combinazioni degli altri parametri. In termini di forza, i provini con viti da 8 e 10 mm dimostrano inaspettatamente una forza media più alta se composti da calcestruzzo alleggerito. La rigidità delle connessioni si è rivelata maggiore per il calcestruzzo

normale anche se con viti di diametro più piccolo (8mm) e con configurazione incrociata. Inoltre, alcuni risultati con calcestruzzo alleggerito sono più elevati di quelli ottenuti con il calcestruzzo normale. Ad ogni modo, le osservazioni più interessanti sono sorte quando si è confrontata la configurazione a singola vite con quella a X. L'introduzione di una seconda vite ha comportato:

- Risultati di perdita di rigidezza uniformi per tutti i diametri di viti e tipi di calcestruzzo;
- In caso di calcestruzzo normale non sono state osservate differenze in termini di forze medie tra le due configurazioni AN (singola vite – cls normale) XN (viti a X – cls normale);
- In caso di calcestruzzo alleggerito, la configurazione incrociata XL (viti a X – cls alleggerito) risulta essere in media meno resistente della configurazione a singola vite AL (singola vite – cls alleggerito).

La diminuzione di rigidezza è stata giustificata dalla perdita del contributo di frizione. Il comportamento peggiore della configurazione incrociata in termini di resistenza può essere intuito se vengono considerati i metodi di collasso.

Nelle configurazioni a singola vite inclinata il fallimento avviene sempre sul lato del legno con la formazione di una cerniera plastica doppia nei connettori, accoppiata a un fenomeno di rifollamento nel legno.

Nei provini con viti incrociate, invece, la rottura inizia con la formazione di cerniere plastiche, poi si ha una rottura locale dovuto all'espulsione del calcestruzzo. Le viti compresse, in questo caso, non si rompono, ma compromettono la capacità a taglio della connessione. Il calcestruzzo alleggerito è più incline all'espulsione del cono rispetto al calcestruzzo normale.

Confronto tra risultati sperimentali e valori analitici

In questa sezione, la resistenza a taglio $f_{v,exp}$ e la rigidezza $k_{ser,exp}$ derivati da test sperimentali sono confrontati con valori analitici. I seguenti valori sono stati adottati per i calcoli analitici di resistenza sia con l'EU5 sia con l'approccio descritto nella sezione 2. In particolare:

- Momento caratteristico di snervamento e resistenza a trazione $f_{ax,Rk}$ delle viti sono calcolati in accordo con il loro certificato di omologazione.

$$F_{ax,Rk} = f_{ax,k} \cdot l_{eff} \cdot (\rho_k/350)^{0.8} \quad (18)$$

- Anche le proprietà geometriche delle viti come l_{eff} , d_{cor} e il diametro della testa d_h sono stati ricavati dal certificato di omologazione. La resistenza caratteristica a rifollamento del legno, in accordo con l'EU5 risulta:

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0.01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (19)$$

- La resistenza caratteristica laterale $f_{lat,Rk}$ rispetta l'EU5 (in particolare il modello della teoria di Johansen) con l'ipotesi di un piatto di acciaio spesso.
- La rigidità assiale $K_{ser||}$ della vite calcolata seguendo le indicazioni della (29)

$$K_{ser,||} = 780 \cdot d^{0.2} \cdot l_{ef}^{0.4} \quad (20)$$

La tabella 67 sintetizza i valori medi di resistenza a taglio $f_{v,exp}$, $f_{v,Rk,exp}$ e i corrispondenti valori teorici calcolati sia con le formule dell'EU5 sia con le equazioni proposte nell'articolo (eq 4,11 considerando $\mu = 0.25$).

Series	Shear strength F_v						Stiffness K_{ser}				
	Experimental		Theoretical				Experimental		Theoretical		
	Mean (kN)	$F_{v,Rk,exp}$ (kN)	Eurocode 5		Equations 4, 11		Mean (kN/mm)	Eurocode 5		Equation 13	
			$F_{v,Rk}$ (kN)	$\Delta F_{v,Rk}$ (%)	$F_{v,Rk}$ (kN)	$\Delta F_{v,Rk}$ (%)		K_{ser} (kN/mm)	ΔK_{ser} (%)	K_{ser} (kN/mm)	ΔK_{ser} (%)
AN-8	13.1	11.5	6.6	42.2	8.2	28.3	8.7	4.4	48.8	5.9	31.7
AN-10	16.4	12.8	8.7	31.5	10.9	14.3	9.5	5.3	44.5	6.4	32.2
AN-12	20.3	17.0	10.6	37.6	13.3	21.6	10.2	6.3	38.6	7.0	31.6
AL-8	15.4	13.4	6.6	50.7	8.2	38.8	6.6	4.4	32.7	5.9	10.2
AL-10	18.2	12.8	8.7	31.6	10.9	14.3	7.9	5.3	33.6	6.4	18.9
AL-12	18.9	16.5	10.6	35.7	13.3	19.3	9.2	6.3	32.0	7.0	24.2
Average single screw				38.2		22.8			38.3		24.8
XN-8	19.0	15.5	11.7	24.8	14.4	7.4	5.6	4.4	20.6	5.6	-0.6
XN-10	25.2	21.1	16.2	23.4	19.0	10.1	8.1	5.3	34.9	6.2	23.3
XN-12	28.7	25.0	19.8	20.7	22.9	8.3	10.6	6.3	40.9	6.8	35.5
XL-8	16.1	14.1	11.7	17.0	14.2	-1.1	7.8	4.4	42.9	5.6	27.6
XL-10	21.0	18.3	16.2	11.7	18.8	-2.6	7.4	5.3	29.0	6.2	16.4
XL-12	26.4	23.0	19.8	13.8	22.7	1.3	8.6	6.3	27.0	6.8	20.4
Average crossed screws				18.6		3.9			32.5		20.4

Figura 67 -

I valori sopra citati sono visibili in fig. 68 e 69 ed è presente anche un confronto tra le previsioni sperimentali e i metodi teorici.

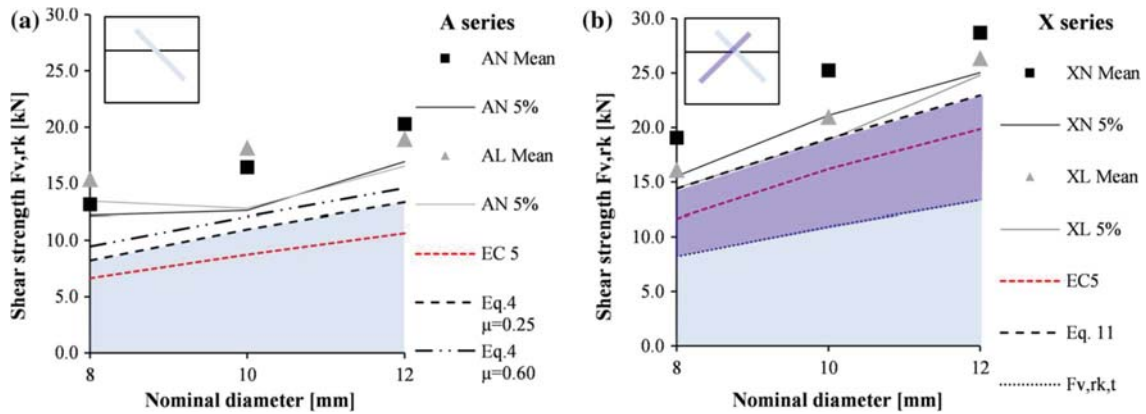


Figura 68 -

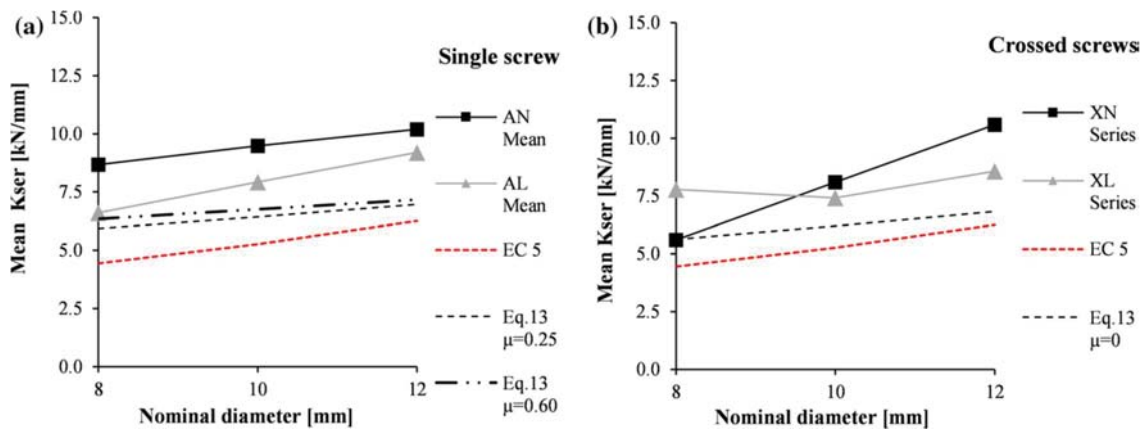


Figura 69 -

Capacità di sopportazione del carico

Con la configurazione a singola vite la differenza relativa

$$\Delta F_{v,Rk} = 1 - (F_{v,Rk,th} / F_{v,Rk,exp})$$

calcolata in riferimento all'EU5 varia tra 31,5 e 50,7 % con un valore medio di 38,2%. Al contrario, l'approccio modificato proposto fornisce una miglior corrispondenza con i valori sperimentali visto che la differenza relativa media $\Delta F_{v,rk}$ è ridotta fino al 22,8%. Questo conferma che il contributo della capacità di ritiro è rilevante se si adotta un coeff. di attrito $\mu=0.6$ (un valore più appropriato nel caso di diretto contatto tra legno e cls) la differenza media relativa si ridurrebbe fino all'11%.

La differenza di resistenza è meno importante nella configurazione a X perché l'adozione di una resistenza quadratica assiale a taglio $\Delta F_{v,rk}$ è del 18,4%. Visto che

l'espulsione del calcestruzzo porta a un fallimento prematuro del giunto, l'uso dell'eq. 4 anche per le viti caricate a taglio e compressione porta a sovrastimare la resistenza totale delle viti incrociate. Solo l'inserimento del fenomeno di fallimento del cono in cls (eq.8) porta ad una corretta valutazione della resistenza delle viti con inclinazione contraria alla direzione del carico. L'approccio analitico proposto per le viti incrociate a 45° mostra risultati simili a quelli ottenuti sperimentalmente, questo a dimostrare che è fondamentale trascurare gli effetti di attrito, così come includere l'ipotesi di rottura del calcestruzzo.

Rigidezza

Le equazioni di rigidezza modificata per K_{ser} proposte mostrano un collegamento più preciso con i dati sperimentali che non con l'EU5.

La differenza media relativa:

$$\Delta K_{ser} = 1 - (K_{ser,exp}/K_{ser,th})$$

Calcolata con EU5 è uguale al 38,3% mentre l'eq 13 riduce questo valore del 24.8 %. in aggiunta, nell' approccio proposto il modulo elastico del calcestruzzo non è tenuto in conto: servirebbero diversi approfondimenti per valutare questo fenomeno ed eventualmente includere questa variabile alle formule. Per quanto riguarda le configurazioni a X, sembra che la rigidezza del CP non migliori quando viene aggiunta la seconda vite inclinata nella direzione opposta. Al contrario, una seconda vite porta ad un decremento della rigidezza del CP in diverse circostanze. Calcolando la rigidezza con l'EU5 e considerando solo la vite caricata a taglio-tensione, si ottengono risultati conservativi ma l'approccio modificato riduce questa differenza fino al 20.4%. Queste evidenze dimostrano come sia rilevante l'interazione tra le due viti.

Conclusioni

Lo studio presentato ha esaminato il comportamento dei giunti composti legno-calcestruzzo realizzati con viti autofilettanti con testa svasata inclinata di 45°. È stato proposto un approccio analitico per calcolare la resistenza e la rigidezza di questa connessione, a partire dai modelli della letteratura e delle regole progettuali in vigore. Sono stati condotti dei test di *push out* e sono state rilevate le principali caratteristiche meccaniche al variare del diametro della vite, della configurazione dell'installazione, e del tipo di calcestruzzo. La valutazione delle condizioni di servizio delle connessioni in termini di forza e spostamento sono state ottenute con riferimento alle condizioni di snervamento delle curve sperimentali carico-spostamento in accordo con il metodo proposto da Ceccotti. Riguardo al modulo di scorrimento, il test ha mostrato una dispersione limitata per la connessione a singola vite inclinata, e una più grande dispersione se si adotta la configurazione a X. È stata individuata anche una riduzione in termini di rigidezza k_{ser} , passando da un calcestruzzo normale ad un calcestruzzo alleggerito. In aggiunta, il contributo di una seconda vite è molto limitativo se si considera la rigidezza globale del CP e spesso porta addirittura a valori più bassi. I risultati dei test sperimentali sono stati usati per verificare l'affidabilità dell'attuale metodo di progetto proposto dall'EU5 e per garantire una prima conferma dell'approccio analitico proposto. I risultati hanno mostrato che, nella valutazione della capacità di sopportazione del carico, il metodo dell'EU5 sottostima la resistenza delle viti inclinate di 45°, e risulta così più affidabile per le viti incrociate rispetto ai giunti con singole viti TCC.

Ad ogni modo, i confronti hanno mostrato che, tenendo in considerazione l'inclinazione della vite ed il contributo della capacità di ritiro, si ha una maggior corrispondenza con il comportamento sperimentale dei test. In accordo con l'approccio proposto, le connessioni TCC con viti incrociate possono portare ad una speciale condizione di rottura con l'espulsione dello strato sovrapposto in calcestruzzo. Pertanto devono essere prese delle precauzioni quando si stima la resistenza totale a taglio.

Infine, gli effetti d'attrito possono alterare la forza risultante a taglio ottenuta dai test di *push out* usata per valutare le prestazioni delle connessioni TCC in caso di diretto contatto tra legno e calcestruzzo.

Per quanto riguarda le stime di rigidezza, il confronto tra i risultati sperimentali e i dati

analitici hanno mostrato che il metodo dell'EU5 fornisce dei valori più conservativi rispetto a quelli del modello proposto. Inoltre, i risultati hanno dimostrato che le formule proposte portano ad una stima più affidabile della rigidità del CP che non semplicemente dimenticando il contributo della vite sottoposta a taglio e compressione come da EU5.

In conclusione, sarebbero necessarie ulteriori ricerche riguardo al tema delle connessioni TCC. Ci si dovrebbe focalizzare sulla valutazione dell'effettivo contributo dell'attrito, e trovare un valore plausibile μ per le connessioni legno – calcestruzzo. Dovrebbe essere anche condotta una campagna sperimentale più estesa e dettagliata in modo tale da verificare meglio il modello proposto e controllare l'affidabilità ed i metodi standard dell'EU5.

CAPITOLO 4 - APPLICAZIONE APPROCCIO TEORICO TCC CONNECTION

Utilizzando le sperimentazioni e le formule teoriche proposte nell'articolo, sono stati effettuati alcuni casi studio andando a sostituire, in un primo momento, il materiale ligneo con il Kerto e in un secondo momento l'intera struttura, ottenendo non più una TCC ma una struttura composta da due parti in Kerto e unita con la configurazione a vite inclinata. Il tutto per analizzare e confrontare le relazioni proposte dall'articolo con quelle dell'EU5 e capire se possono essere adottate anche in diversi ambiti.

Lo spessore del legno e del cls sono state mantenute uguali a quelle dell'articolo, come anche le caratteristiche dei connettori e le relative variazioni di diametro in base al caso considerato.

È stato quindi utilizzato un foglio excel per il calcolo della resistenza a taglio e del modulo di scorrimento, contenente sia le relazioni dell'EU5 sia quelle proposte nell'articolo.

Qui di seguito sono state riportate le formule utilizzate:

Formulazione proposta:

Resistenza a taglio:

$$F_{v,Rk,th}^t = \min(F_{v,Rk}^{It}; F_{v,Rk}^{IIIt}; F_{v,Rk}^{IIIIt})$$

$$F_{v,Rk}^{It} = R_{ax,k}^t \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) + f_{h,k} \cdot d \cdot t \cdot (1 - \mu \cdot \tan \alpha)$$

$$F_{v,Rk}^{IIIt} = R_{ax,k}^t \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) + f_{h,k} \cdot d \cdot t \cdot (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \cdot \left[\sqrt{2} \sqrt{\frac{2M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t^2} \cdot \cos^2 \alpha + 1} - 1 \right]$$

$$F_{v,Rk}^{IIIIt} = R_{ax,k}^t \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha) + 2 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} \cdot (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha)$$

Rigidezza di scorrimento:

$$K'_{\text{ser,th}} = \frac{K_{\text{ser,//}} \cdot (1 + \mu) + K_{\text{ser,\perp}} \cdot (1 - \mu)}{2}$$

Formulazione secondo eu5:

Resistenza a taglio:

$$F_{v,Rk} = \min. \begin{cases} f_{h,k} t_1 d \\ f_{h,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases}$$

Rigidezza di scorrimento:

$$K_{\text{ser}} = \rho_m^{1,5} \cdot d/23 \quad (\text{N/mm})$$

Nella seguente tabella vengono riportati i valori relativi al kerto-Q utilizzati ai fini dei calcoli e forniti dalla Metsawood.

ESSENTIAL CHARACTERISTICS	SYMBOL	PERFORMANCE		HARMONIZED TECHNICAL SPECIFICATION
		KERTO-Q THICKNESS 21 - 24 MM	KERTO-Q THICKNESS 27 - 69 MM	
Modulus of elasticity and shear modulus		N/mm² or kg/m³	N/mm² or kg/m³	
<u>Modulus of elasticity, mean values</u>				
Parallel to grain, along	$E_{0,mean}$	10000	10500	
Parallel to grain, across	$E_{90,mean}$	1200 ¹	2000	
Perpendicular to grain, edgewise	$E_{90,edge,mean}$	2400	2400	
Perpendicular to grain, flatwise	$E_{90,flat,mean}$	130	130	
<u>Modulus of elasticity, fifth percentile value</u>				
Parallel to grain, along	$E_{0,k}$	8300	8800	
Parallel to grain, across	$E_{90,k}$	1000 ¹	1700	
Perpendicular to grain, edgewise	$E_{90,edge,k}$	2000	2000	
Perpendicular to grain, flatwise	$E_{90,flat,k}$	100	100	
<u>Shear modulus, mean values</u>				
Edgewise	$G_{0,edge,mean}$	600	600	
Flatwise, parallel to grain	$G_{0,flat,mean}$	60	120	
Flatwise, perpendicular to grain	$G_{90,flat,mean}$	22	22	
<u>Shear modulus, fifth percentile value</u>				
Edgewise	$G_{0,edge,k}$	400	400	
Flatwise, parallel to grain	$G_{0,flat,k}$	60	100	
Flatwise, perpendicular to grain	$G_{90,flat,k}$	16	16	
Strength, fifth percentile values				
<u>Bending strength</u>				
Edgewise (depth 300mm)	$f_{m,0,edge,k}$	28.0	32.0	EN 14374:2004
Size effect parameter	S	0.12	0.12	
Flatwise, parallel to grain	$f_{m,0,flat,k}$	32.0	36.0	
Flatwise, perpendicular to grain	$f_{m,90,flat,k}$	8.0 ¹	8.0	
<u>Compression strength</u>				
Parallel to grain	$f_{c,0,k}$	19.0	26.0	
Perpendicular to grain, edgewise	$f_{c,90,edge,k}$	9.0	9.0	
Perpendicular to grain, flatwise	$f_{c,90,flat,k}$	2.2	2.2	
<u>Tension strength</u>				
Parallel to grain (length 3000mm)	$f_{t,0,k}$	19.0	26.0	
Perpendicular to grain, edgewise	$f_{t,90,edge,k}$	6.0	6.0	
<u>Shear strength</u>				
Edgewise	$f_{v,0,edge,k}$	4.5	4.5	
Flatwise, parallel to grain	$f_{v,0,flat,k}$	1.3	1.3	
Flatwise, perpendicular to grain	$f_{v,90,flat,k}$	0.6	0.6	
Density				
Density, mean value	ρ_{mean}	510	510	
Density, fifth percentile value	ρ_k	480	480	

GI24h /cls vs Kerto/cls (configurazione a singola vite inclinata)

Di seguito vengono riportati i valori relativi al caso di struttura composta GL24h/cls e successivamente quelli del caso kerto/cls con la configurazione a singola vite inclinata.

Resistenza a taglio GL24H /CLS (singola vite)

PROPOSTA	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} = 8,4$ kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} = 11,0$ kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} = 13,8$ kN

EU5	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} = 6,7$ kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} = 9,2$ kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} = 10,9$ kN

Incremento della resistenza a taglio calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	25
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	20
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	26

Resistenza a taglio KERTO /CLS (singola vite)

PROPOSTA	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} = 9,8$ kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} = 12,9$ kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} = 16,1$ kN

EU5	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} = 7,6$ kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} = 11,2$ kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} = 13,1$ kN

Incremento della resistenza a taglio calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	29
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	15
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	23

Confrontando i risultati si può notare, come previsto, un aumento delle resistenze a taglio quando si sostituisce il GL24h con il kerto, sia secondo EU5 sia secondo la formulazione proposta; questo è dovuto alla maggior densità caratteristica ρ_k del kerto rispetto al GL24h che porta ad avere una maggior resistenza assiale $F_{ax,Rk}$ e di conseguenza un aumento delle resistenze a taglio.

I valori di incremento di resistenza nel kerto/cls, ricavati dalle relazioni proposte dall'articolo nei confronti dell'EU5, sono coerenti con quelli ricavati nel GL24h/cls con un incremento massimo ricavato del 29% contro un 26%.

Rigidezza di scorrimento k_{ser} GL24H /CLS (singola vite)

PROPOSTA	$K_{ser} =$	5,8	KN/mm
	$K_{ser} =$	6,4	KN/mm
	$K_{ser} =$	7,0	KN/mm
EU5	$K_{ser} =$	4,2	KN/mm
	$K_{ser} =$	5,2	KN/mm
	$K_{ser} =$	6,3	KN/mm

Incremento della rigidezza K_{ser} calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	39
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	23
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	10

Rigidezza di scorrimento k_{ser} KERTO /CLS (singola vite)

PROPOSTA	$K_{ser} = 6,4 \text{ kN/mm}$
	$K_{ser} = 7,1 \text{ kN/mm}$
	$K_{ser} = 7,8 \text{ kN/mm}$
EU5	$K_{ser} = 5,6 \text{ kN/mm}$
	$K_{ser} = 7,0 \text{ kN/mm}$
	$K_{ser} = 8,4 \text{ kN/mm}$

Incremento della rigidezza K_{ser} calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con $d=8\text{mm}$	INCREMENTO %	13
CASO con $d=10\text{mm}$	INCREMENTO %	1
CASO con $d=12\text{mm}$	INCREMENTO %	-8

I k_{ser} ottenuti dalla configurazione kerto/cls risultano maggiori se rapportati al caso GL24h, questo è dovuto alla maggior densità media ρ_m del kerto. Si può osservare che i valori ricavati con l'EU5 nel caso del kerto/cls crescono più rapidamente di quelli della "proposta" infatti ricavando con l'EU5 il k_{ser} con $d=12 \text{ mm}$ risulta maggiore di quello calcolato con la proposta, risultato diverso rispetto all'articolo dove la rigidezza allo scorrimento si manteneva sempre maggiore se calcolata con la formulazione proposta.

GI24h /cls vs Kerto/cls (configurazione a X)

Di seguito vengono riportati i valori relativi al caso di struttura composta GL24h/cls e successivamente quelli del caso kerto/cls con la configurazione a X.

Resistenza a taglio GL24H /CLS (configurazione a X)

PROPOSTA	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} = 13,4$ kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} = 18,5$ kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} = 24,1$ kN
EU5	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} = 10,9$ kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} = 16,7$ kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} = 21,4$ kN

Incremento della resistenza a taglio calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	23
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	11
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	13

Resistenza a taglio KERTO /CLS (configurazione a X)

PROPOSTA	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} =$	15,6	kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} =$	21,5	kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} =$	27,9	kN

EU5	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} =$	12,4	kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} =$	19,1	kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} =$	25,8	kN

Incremento della resistenza a taglio calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	26
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	13
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	18

Le relazioni tra le due diverse configurazioni di calcolo sono simili al caso precedente infatti, confrontando i risultati si può notare, come da previsione, un aumento delle resistenze a taglio quando si sostituisce il GL24h con il kerto, sia secondo EU5 sia secondo la formulazione proposta; questo è dovuto alla maggior densità caratteristica ρ_k del kerto rispetto al GL24h che porta ad avere una maggior resistenza assiale $F_{ax,Rk}$ e di conseguenza un aumento delle resistenze a taglio. I valori di incremento di resistenza nel kerto/cls, ricavati dalle relazioni proposte dall'articolo nei confronti dell'EU5, sono coerenti con quelli ricavati nel GL24h/cls con un incremento massimo ricavato del 26% contro un 23%.

Rigidezza di scorrimento k_{ser} GL24H /CLS (configurazione a X)

PROPOSTA	$K_{ser} =$ 5,5 kN/mm
	$K_{ser} =$ 6,2 kN/mm
	$K_{ser} =$ 6,8 kN/mm
EU5	$K_{ser} =$ 4,2 kN/mm
	$K_{ser} =$ 5,2 kN/mm
	$K_{ser} =$ 6,3 kN/mm

Incremento della rigidezza K_{ser} calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	31
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	18
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	8

Rigidezza di scorrimento k_{ser} KERTO /CLS (configurazione a X)

PROPOSTA	$K_{ser} =$ 6,2 kN/mm
	$K_{ser} =$ 7,1 kN/mm
	$K_{ser} =$ 7,9 kN/mm
EU5	$K_{ser} =$ 5,6 kN/mm
	$K_{ser} =$ 7,0 kN/mm
	$K_{ser} =$ 8,4 kN/mm

Incremento della rigidezza K_{ser} calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	10
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	1
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	-6

Anche qui, come nel caso precedente, i k_{ser} ottenuti dalla configurazione kerto/cls risultano maggiori se rapportati al caso GL24h, questo è dovuto alla maggior densità media ρ_m del kerto.

I k_{ser} ottenuti dall'EU5 hanno valori analoghi a quelli della configurazione a singola vite, mentre quelli ottenuti dalla formulazione proposta dall'articolo sono leggermente inferiori a causa dell'annullarsi del coefficiente di attrito μ .

I valori ricavati con l'EU5 nel caso del kerto/cls crescono più rapidamente di quelli della "proposta" infatti ricavando con l'EU5 il k_{ser} con $d=12$ mm risulta maggiore di quello calcolato con la proposta, risultato diverso rispetto all'articolo dove la rigidità allo scorrimento si manteneva sempre maggiore se calcolata con la formulazione proposta.

Configurazione Kerto/Kerto

È stata sostituita la parte in cls con il Kerto, ottenendo una struttura composta Kerto/Kerto. Quindi sono state utilizzate le analoghe relazioni dei casi precedenti ma con alcune differenze:

- sostituzione della vite a filetto parziale con una a filetto totale (variazione l_{eff});
- esclusione del fallimento del cono di cls.

Sono stati quindi esaminati il caso della configurazione a singola vite e poi quello a X.

KERTO/KERTO (configurazione a singola vite)

Resistenza a taglio Kerto/Kerto (configurazione a singola vite)

PROPOSTA	CASO con $d=8$ mm	$F_{v,Rk} = 13,5$ kN
	CASO con $d=10$ mm	$F_{v,Rk} = 17,4$ kN
	CASO con $d=12$ mm	$F_{v,Rk} = 21,6$ kN
EU5	CASO con $d=8$ mm	$F_{v,Rk} = 8,6$ kN
	CASO con $d=10$ mm	$F_{v,Rk} = 12,1$ kN
	CASO con $d=12$ mm	$F_{v,Rk} = 14,2$ kN

Incremento della resistenza a taglio calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	56
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	45
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	52

Analizzando i risultati ottenuti si può osservare che, come nelle strutture composte TCC, i valori ricavati dalla formulazione proposta sono più elevati rispetto a quelli ottenuti dall'EU5, ma in questo caso non sono limitati ad un incremento del circa 25% ma arrivano fino a un 56%.

Sarebbe opportuno verificare sperimentalmente, come nell'articolo sulle TCC, se i valori ottenuti dall'EU5 siano più a favore di sicurezza e quindi sottostimino fortemente la capacità di resistenza a taglio della connessione o se le relazioni proposte sovrastimino la resistenza a taglio rendendo quindi inadatto il loro utilizzo per le strutture kerto/kerto.

KERTO/KERTO (configurazione a X)

Resistenza a taglio kerto/kerto (configurazione a X)

PROPOSTA	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} =$	24,3	kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} =$	31,9	kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} =$	40,1	kN

EU5	CASO con d=8mm	$F_{v,Rk} =$	17,3	kN
	CASO con d=10mm	$F_{v,Rk} =$	25,6	kN
	CASO con d=12mm	$F_{v,Rk} =$	32,6	kN

Incremento della resistenza a taglio calcolata con la formulazione proposta dall'articolo nei confronti dell'EU5:

CASO con d=8mm	INCREMENTO %	40
CASO con d=10mm	INCREMENTO %	25
CASO con d=12mm	INCREMENTO %	23

Per quanto riguarda la configurazione a X, si possono fare le stesse considerazioni di quella a singola vite inclinata con la differenza che, in questo caso, gli incrementi di resistenza a taglio arrivano ad un massimo del 40% quindi risultano essere più confrontabili rispetto al caso precedente.

Rigidezza di scorrimento k_{ser} kerto/kerto (configurazione a singola vite)

PROPOSTA	$K_{ser} =$	6067	kN/mm
	$K_{ser} =$	6558	kN/mm
	$K_{ser} =$	7016	kN/mm
EU5	$K_{ser} =$	2804	kN/mm
	$K_{ser} =$	3505	kN/mm
	$K_{ser} =$	4206	kN/mm

Rigidezza di scorrimento k_{ser} kert/kerto (configurazione a X)

PROPOSTA	$K_{ser} =$	5414	N/mm
	$K_{ser} =$	5948	N/mm
	$K_{ser} =$	6454	N/mm
EU5	$K_{ser} =$	2804	N/mm
	$K_{ser} =$	3505	N/mm
	$K_{ser} =$	4206	N/mm

Si può osservare che i valori ottenuti con la proposta sono incompatibili con quelli dell'EU5.

Questo perché la formulazione dell'EU5 (sezione 7.1) prevede di moltiplicare per 2 il modulo di scorrimento ricavato nel caso di connessioni acciaio/legno o, come nel nostro caso, cls/legno. Questa moltiplicazione è stata eseguita nell'articolo e nei precedenti casi, ma ora, trattandosi di un collegamento legno/legno il k_{ser} non è stato raddoppiato. Di conseguenza, i valori ricavati con la formulazione proposta risultano essere decisamente troppo elevati per essere adottati.

Discussione dei risultati

Si può affermare che, sostituendo il GL24h con il kerto, i risultati ottenuti tramite la formulazione proposta dall'articolo, sia in termini di resistenza a taglio, sia in termini di rigidità allo scorrimento, siano compatibili con i valori ricavati dall'EU5. In questo caso l'utilizzo del kerto porterebbe ad un incremento sia in termini di resistenza che in termini di rigidità allo scorrimento.

Per quanto riguarda il caso della sostituzione del cls con il kerto, l'adozione delle relazioni proposte nell'articolo portano a risultati diversi da quelli dell'EU5 e, a meno di futuri test sperimentali per verificare l'eventuale coerenza dei risultati, non è possibile utilizzarle.

Per quanto riguarda la rigidità allo scorrimento nel caso di struttura kerto/kerto, la formulazione proposta non può essere adottata a causa dei motivi descritti in precedenza.

CAPITOLO 5 - CONCLUSIONI

La bioedilizia si pone l'importante obiettivo di studiare nuove soluzioni e materiali che riducano al minimo l'impatto ambientale degli edifici sull'ecosistema. A partire dalla progettazione, è possibile scegliere materiali ecosostenibili, in grado di favorire il risparmio energetico ed evitare la dispersione delle risorse.

A tal proposito, in questa tesi, è stato scelto di esaminare il comportamento del Laminated Veneer Lumber (LVL), un materiale composto da strati sottili di legno, usato comunemente in quelle strutture che richiedono grandi prestazioni, resistenza meccanica e un'ottima reazione al fuoco. Da una prima analisi sulle caratteristiche e tipologie del materiale, si è subito messa in luce la lacuna di linee guida e precise normative, che diano istruzioni pratiche ai progettisti.

Facilità di esecuzione, possibilità di spessore molto ridotto, buona lavorabilità, riduzione del numero dei giunti sono solo alcuni dei vantaggi che rendono il microlamellare valido e degno di considerazione. Un deficit di informazioni dettagliate in letteratura, però, ha portato le aziende produttrici a diventarne monopoliste. Come conseguenza, il prezzo di vendita del materiale a uso strutturale, risulta essere troppo elevato.

Il giusto comportamento sembra quello di adottare l'LVL per il rinforzo di solai lignei esistenti, tramite l'utilizzo di adeguate connessioni.

La ricerca sul microlamellare, in particolare sul Kerto europeo, ha portato a mettere a confronto dati sperimentali effettuati da case produttrici e altri enti. Oltre a ciò, le formulazioni di base dell'Eurocodice 5 hanno permesso di fissare altri parametri derivati non solo dalle proprietà intrinseche del legno, ma anche da tipi di comportamento.

Un recente studio, ha esaminato il comportamento dei giunti composti legno – calcestruzzo realizzati con viti autofilettanti inclinate di 45°. A partire dai modelli della letteratura, è stato proposto un approccio analitico per calcolare la resistenza e rigidità della connessione, ed è stata effettuata la valutazione dei test sperimentali di push-out. Come risultato, la configurazione a singola vite inclinata risulta essere sottostimata dall'EU5, mentre nella configurazione a X è opportuno inserire una condizione di rottura che avviene con l'espulsione dello strato sovrapposto di

calcestruzzo. Pertanto, in fase di progettazione risulta necessario prestare particolare attenzione alla resistenza a taglio.

Sulla base di questi ragionamenti, per questa tesi sono state calcolate le sollecitazioni con il microlamellare Kerto. I valori di resistenza a taglio delle connessioni, sono stati valutati secondo l'Eurocodice 5 e l'approccio analitico semplificato. Solai composti Kerto-calcestruzzo e Kerto-Kerto, sono stati studiati con configurazioni a singola vite autofilettante inclinata o a X, con diametri delle viti di 8, 10 e 12 mm.

La sostituzione del legno Glue Lam con il Kerto conduce, in base ai risultati ottenuti, a un incremento sia in termini di resistenza a taglio, sia in termini di rigidità allo scorrimento.

Utilizzando il microlamellare al posto del calcestruzzo, quindi considerando una composizione Kerto-Kerto, l'approccio analitico proposto per valutare la resistenza a taglio non è più valido, a meno di test sperimentali per verificarne l'attendibilità.

Sempre nel caso di composizione Kerto – Kerto, la rigidità allo scorrimento non può essere valutata analiticamente a causa del fattore di moltiplicazione 2 che non può essere preso in considerazione nei collegamenti legno-legno.

In conclusione, dovrebbero essere effettuati ulteriori test sperimentali su questo materiale per tentare di rendere univoche delle informazioni, al fine di agevolare i progettisti. In particolare, sarebbe opportuno valutare sperimentalmente il comportamento dell'LVL con i moderni connettori cilindrici, variando le geometrie dei connettori e le modalità di esecuzione. Con i dati di laboratorio, e l'interpolazione di risultati ottenuti mediante L'Eurocodice 5 e successivi approcci, una formulazione ad hoc per il microlamellare diventa un traguardo sempre più tangibile.

BIBLIOGRAFIA

L.Marchi , R.Scotta, L. Pozza, *Experimental and theoretical evaluation of TCC connections with inclined self-tapping screws*, Materials and Structures (2017)

DECRETO 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».

EN 14374 (2004) *Timber structures – Structural laminated veneer lumber - Requirements*

EN 14279 *Laminated Veneer Lumber (LVL) – Definitions, classification and specifications*

EN 338 *Structural timber – Strength classes*

EN 1194 *Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values*

ETA 07/0029 (2017) *Metsä Wood Kerto Ripaelementit, Wood based composite slab element for structural purposes*

EN 1995-1-1 (2009) *Design of timber structures part 1-1: general—common rules and rules*. CEN, Brussels, Belgium

A. Ceccotti (2002) *Composite concrete-timber structures*. Prog Struct Eng Mater 4:264–275

A. Ceccotti (1995) *Timber-concrete composite structures*, in «Centrum Hout (ed) Timber engineering STEP 2», Netherlands E13/1–E13/12

ETA-11/0027 (2016) *Self-tapping screws for use in timber structures*, ETA-Danmark A/S October 2016

EN 14080 (2013) *Timber structures—glued laminated timber and glued solid timber—requirements*. CEN, Brussels, Belgium

Certificate n. 184/03, VTT Expert Service LTD, Kerto – S and Kerto Q *Structural laminated veneer lumber*

Progetto di Ricerca DPC – ReLuis 2014, Linee guide Reluis per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno

G. Schiro, I. Giongo, M. Piazza, *Solai in legno ad alte prestazioni - Prove sperimentali su solai lignei composti realizzati con soluzioni innovative legno-legno*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica – Università degli Studi di Trento

G. Schiro, I. Giongo, M. Piazza, *Tecniche di rinforzo per solai lignei - Prove sperimentali su solai lignei rinforzati con soluzioni innovative legno-legno*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica – Università degli Studi di Trento

SITOGRAFIA

metsawood.com

promolegno.com

pollmeier.com