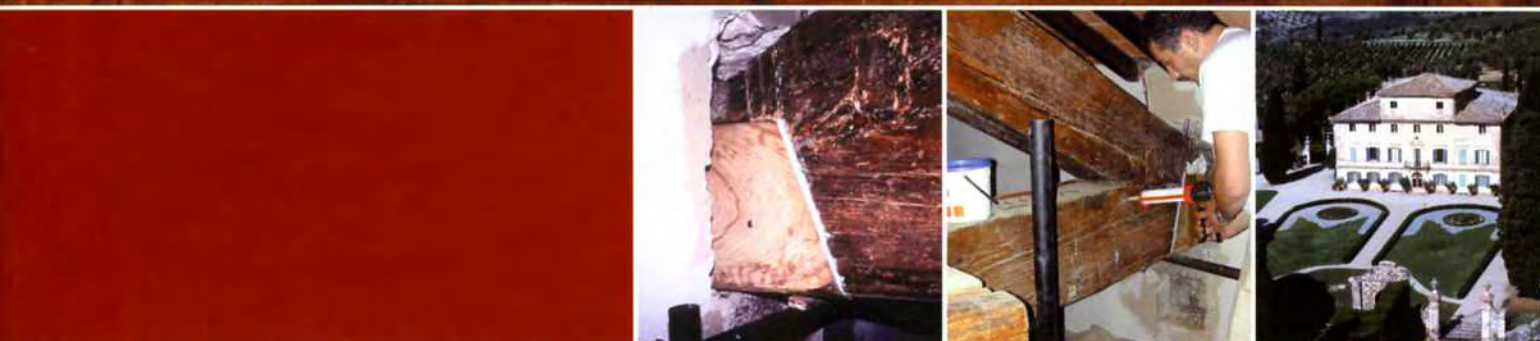


MAPEWOOD SYSTEM

IL RESTAURO DELLE STRUTTURE LIGNEE



Nella maggior parte degli edifici antichi sono presenti strutture lignee che hanno un elevato valore storico e artistico, ma anche un'importante funzione statica. Il legno, come altri materiali, non è esente da patologie, ma la conservazione delle strutture lignee antiche è tecnicamente giustificata in virtù dell'importante valore storico, artistico e dell'ottimo comportamento sismico. Nel restauro, spesso eseguito in condizioni di cantiere non agevoli, l'impiego di primer e di adesivi strutturali specifici per il legno offre notevoli vantaggi rispetto ad altri sistemi d'intervento, consentendo di rispondere alle diverse esigenze progettuali senza far lievitare i costi. La linea dei prodotti MAPEWOOD, ad elevata compatibilità con il legno, nasce da un ampio programma di ricerca in laboratorio e sperimentazione in cantiere, svolto da Mapei in collaborazione con l'Istituto per la Ricerca sul Legno (IRL), con il CNR e la società LegnoDOC. Un contributo significativo per i professionisti della realizzazione e della conservazione di strutture in legno.



Le strutture lignee antiche

Sistemi di intervento

Ricerca e sviluppo

Mapewood System per il restauro delle strutture lignee



Modalità di applicazione

Esperienze di cantiere

I prodotti Mapei



FIGURA 1 - Nodo strutturale complesso di particolare valore estetico

Le strutture lignee antiche

Patologie, diagnosi e principi del restauro conservativo

A cura di:
Dr. Macchioni (Istituto per la Ricerca sul Legno, CNR)

Nella maggior parte degli edifici antichi sono presenti strutture lignee che hanno un'importante funzione statica, ma anche un elevato valore storico e artistico. In passato, le strutture lignee sono state spesso sostituite con altri materiali sulla base di troppo speditive valutazioni di natura tecnica od economica, anche con conseguenze gravi in certi casi. Ma è ormai accertato che il loro restauro, se correttamente progettato ed eseguito, consente di soddisfare le diverse esigenze tecniche riducendo al minimo l'alterazione dell'autenticità dell'impianto originario, senza far lievitare il costo dell'intervento. Numerosi esempi testimoniano la possibilità di intervenire in maniera rapida, efficiente ed esteticamente gradevole, conservando le strutture lignee originali dell'edificio [Tampone, 1996; Ceccotti et al, 1998]. Di conseguenza, un numero crescente di proprietari e progettisti si orienta verso la conservazione delle strutture lignee. Le difficoltà di ordine tecnico nell'attività di diagnostica, progettazione ed esecuzione di un intervento sono agevolmente superabili avvalendosi di operatori dotati di specifica professionalità e consolidata esperienza. In attesa di una normativa tecnica specifica, gli operatori qualificati fanno riferimento alle indicazioni dell'*International Council on Monuments and Sites* [ICOMOS, 1999].

Spesso le strutture lignee presentano una notevole complessità nella loro composizione ed una forma più o meno accentuata di degrado. Il primo aspetto è relativo soprattutto alla tipologia della materia prima: non è raro trovare, nella stessa struttura, forti differenze tra i singoli elementi. Una elevata variabilità in termini di specie legnosa, tipo di lavorazione, distribuzione durame/alburno ed incidenza di difetti si traduce in una altrettanto ampia variabilità delle proprietà fisico-meccaniche e della durabilità naturale degli elementi lignei che costituiscono le strutture. Il tecnico progettista deve quindi essere in grado di fare le opportune distinzioni.

Il secondo aspetto riguarda le patologie più frequenti e le loro cause. Esistono forme di degrado di tipo prettamente strutturale (Figura 2) che causano la diminuzione o la

perdita di efficienza funzionale: rotture, sconessioni, deformazioni eccessive. Le cause possono derivare da alcuni difetti presenti nella materia prima utilizzata (nodi, fessurazioni, deviazioni della fibratura), da un dimensionamento insufficiente, oppure da errori di progettazione o di realizzazione (tipica la messa in opera di legname non stagionato). Si riscontra, inoltre, un degrado causato dall'aumento dei carichi propri per interventi successivi irrazionali (tipico nei solai) o l'assoggettamento della struttura a carichi accidentali eccessivi.



FIGURA 2 - Degrado di tipo strutturale: rotture, sconessioni, deformazioni eccessive



FIGURA 3 - Analisi diagnostiche accurate, di tipo visivo e strumentale non distruttivo, consentono di quantificare l'estensione del degrado senza ricorrere allo scalzamento delle testate

A causa della natura organica del materiale, è spesso presente anche il degrado biologico (carie da funghi ed attacchi di insetti xilofagi), talvolta meno appariscente e più difficilmente diagnosticabile (Figura 4 e Figura 5). Il danno è diverso a seconda del tipo di organismo e in stretto rapporto con l'estensione e la posizione nella struttura. Spesso le carie sono molto localizzate e l'intervento necessario per la loro eliminazione è meno oneroso rispetto alla sostituzione della membratura. Danni da insetti xilofagi sono frequenti in strutture costituite da specie legnose poco durabili (abete, pioppo) o anche molto durabili ma con alborno abbondante (castagno, quercia). Spesso le parti della struttura lignea che scaricano sulla muratura sono a diretto contatto e completamente inglobate nel materiale da costruzione, con elevato rischio di inumidimento localizzato; per questo motivo gli appoggi sono frequentemente degradati, con conseguenze anche gravi sulla capacità portante. In tempi più recenti si sono aggiunti altri fattori che hanno favorito lo sviluppo di carie: per esempio l'impiego di rivestimenti impermeabili sulle facciate

o la messa in opera di rinalzi o cordoli che impediscono la ventilazione delle testate delle travi. L'elevata durabilità dimostrata dalle strutture in legno progettate e realizzate in maniera corretta sta comunque ad indicare che il degrado biologico spesso ha origine dalla inadeguatezza dei dettagli progettuali, piuttosto che nella natura della materia prima.

Uno dei problemi principali che il progettista si trova dunque ad affrontare è la valutazione dello stato di conservazione delle strutture lignee, al fine di impostare correttamente le verifiche e la progettazione dei successivi interventi. Una buona indagine diagnostica, attraverso la valutazione della qualità del materiale e la localizzazione e quantificazione delle varie forme di degrado, permette di conoscere in maniera oggettiva lo stato di conservazione e la capacità portante residua sia dei singoli elementi che della struttura nel suo complesso. Tali informazioni sono un supporto indispensabile per il progettista e facilitano una più razionale programmazione del lavoro in cantiere con notevoli vantaggi di ordine pratico ed economico, ad esempio riducendo al minimo gli imprevisti in corso d'opera.



FIGURA 4 - Appoggio di capriata con catena visibilmente degradata da carie

Normalmente, una buona indagine diagnostica consente un risparmio di tempi e materiali ampiamente superiore al proprio costo, e consiste in:

- ispezione visiva, per la descrizione particolareggiata di ciascun elemento (specie legnosa; caratteristiche geometriche; classe di qualità resistente; sezioni critiche o di minima resistenza; alterazioni dovute a degrado biologico, lesioni strutturali, dissesti, ecc.);
- eventuali analisi strumentali di tipo non distruttivo (Figura 3), finalizzate a quantificare l'estensione e la gravità delle alterazioni dovute al degrado biologico anche nelle parti non in vista o inaccessibili, senza richiedere lo scalzamento delle testate;
- elaborazione dei risultati in forma grafica (Figura 6) per l'esecuzione delle verifiche strutturali e la progettazione secondo le normative applicabili [DM LL.PP. del 16/01/1996; DL n° 490 del 29/10/1999].

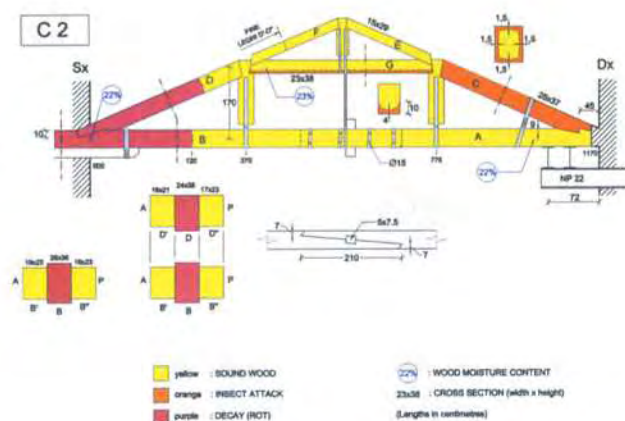


FIGURA 6 - Elaborazione grafica dei risultati delle analisi diagnostiche



FIGURA 5 - Trave principale di una copertura con evidente attacco da insetti xilofagi localizzato sullo smusso inferiore



FIGURA 7 - Nodo ceteris - puntone consolidato

I vantaggi degli adesivi epossidici strutturali ad elevata compatibilità chimico-fisica con il legno

A cura di:
Dr. Lavisci (LegnoDOC srl)

Con il termine "Sistema di intervento" si intende la somma di prodotti, metodi di calcolo e tecniche applicative. Le tre componenti sono sinergiche (Tabella 1) e contribuiscono alla qualità dell'intervento [Avent, 1992]. I sistemi più frequentemente applicati sulle strutture lignee sono:

- la realizzazione di un legno lamellare in opera, che offre la possibilità di rispettare le materie prime e le tecniche di giunzione originali, ma trova all'atto pratico notevoli limitazioni nella disponibilità sul mercato di materia prima idonea, di mano d'opera specializzata in grado di eseguire l'intervento e, soprattutto, nella difficoltà di aumentare i carichi di esercizio rispettando le sezioni originali;
- l'impiego di dispositivi metallici non incollati (piastre, spinotti, profilati, tiranti ecc.) consente di rinforzare le membrature lignee, ma comporta un impatto estetico spesso non desiderato e, in certi casi, un considerevole aumento di peso a carico delle strutture sottostanti. Inoltre, la necessità di ancoraggio dei dispositivi su zone di legno o muratura particolarmente solide e la conseguente alterazione delle condizioni di vincolo della struttura, comportano in certi casi l'aumento dei costi dell'intervento e l'insorgere di tensioni e deformazioni non previste;
- la ricostruzione mediante adesivi epossidici ed elementi di rinforzo (normalmente barre in acciaio o vetroresina, ma anche compositi). Allo stato attuale, questi sistemi risultano indubbiamente i più economici, rapidi e versatili, senza alterare significativamente l'estetica e la funzionalità della struttura. Utilizzati da oltre 20 anni in tutto il mondo, questi sistemi hanno spesso mostrato un limite nella scarsa compatibilità tra l'adesivo impiegato ed il legno, anche se in molti casi la natura "chirurgica" dell'intervento (molto localizzata) ha consentito di conservare le parti sane delle strutture lignee, che altrimenti avrebbero dovuto essere sostituite. Inoltre, gli interventi possono essere normalmente eseguiti dalle imprese edili.

In molti casi, la soluzione ottimale viene ottenuta dalla efficace combinazione delle diverse tecniche: ad esempio i sistemi legno/calcestruzzo specifici per il restauro dei solai sono basati sull'impiego di dispositivi metallici e adesivi epossidici, oppure la ricostruzione di testate di travi è facilmente realizzabile con una protesi di legno connessa mediante adesivi e barre alla parte sana di legno antico. Utilizzati in maniera più mirata ed oculata che in passato, gli adesivi epossidici sono attualmente un componente insostituibile per interventi di restauro e/o consolidamento che rispondono in maniera ottimale ai diversi requisiti di progetto: poco intrusivi, poco onerosi, di facile esecuzione e strutturalmente affidabili. Sopralluoghi effettuati da diversi ricercatori su interventi eseguiti da 5 a 25 anni evidenziano che gli adesivi epossidici, se specificatamente formulati e correttamente applicati, non presentano particolari problemi di compatibilità con il legno [Pizzo, 1999; Mettem et al, 2000].

Viceversa, in condizioni applicative, progettuali o formulative non ottimali, gli stessi autori hanno riscontrato delaminazioni, progressione delle fessurazioni nel legno (dovuta al cosiddetto "effetto cuneo" dell'adesivo) e perfino rotture coesive dell'adesivo (prodotti troppo caricati). Ciò porta a ritenere giustificata la raccomandazione ICOMOS relativa a "materiali e tecnologie contemporanee" che, riferendosi esplicitamente all'impiego degli adesivi epossidici ed i rinforzi in acciaio, suggerisce di "...utilizzarli con attenzione e solo quando la loro durabilità ed efficienza meccanica siano state provate in maniera soddisfacente...". È quindi ovvia la necessità di disporre di prodotti formulati e testati specificatamente per il restauro delle strutture lignee, dotati di buona compatibilità con il materiale da riparare. Questa raccomandazione ha trovato conferma in recenti ed approfondite ricerche sulla reologia delle barre incollate: nel progetto GIROD (*Glued-In Rods for timber structures*), finanziato dall'Unione Europea dove sono stati analizzati

gli effetti della geometria del giunto, delle variazioni di temperatura ed umidità, della durata del carico e di possibili errori di esecuzione con tre tipologie di adesivi specificatamente sviluppati (epossidico, fenol-resorcinico e poliuretano). La ricerca triennale, condotta in tre dei più prestigiosi laboratori Europei (SP, Svezia - TRADA, Inghilterra - FMPA, Germania) è giunta alle conclusioni che il tipo di adesivo più sicuro ed affidabile è quello epossidico, che tra l'altro è l'unico ad avere un comportamento del tutto simile a quello del legno massiccio in termini di resistenza con carichi di lunga durata. Ciò testimonia la compatibilità tra i due materiali dal punto di vista meccanico e consente di non variare i relativi coefficienti di sicurezza nella progettazione. I risultati del progetto GIROD sono in corso di trasferimento nella normativa tecnica [Serrano, 2000; Gustafsson, 2001].

La crescita del settore comporta il continuo sviluppo di nuovi sistemi di intervento. Pertanto, la loro classificazione risulta particolarmente utile ai fini di una corretta comparazione delle loro prestazioni: il confronto di sistemi e/o prodotti che hanno finalità od ambiti applicativi diversi tra di loro sarebbe fuorviante. La selezione dell'adesivo più idoneo per l'intervento da realizzare è la logica conseguenza della classificazione del sistema di intervento, con riferimento alla sua finalità principale, alle condizioni di esposizione esistenti, alle funzioni dell'adesivo nel sistema ed al tipo di azioni previste. Inoltre, particolare importanza assume il fatto che un adesivo sia specificatamente formulato e testato per l'applicazione nelle strutture lignee, in modo da garantire resistenza, durabilità e compatibilità nelle condizioni di esercizio previste.

TABELLA 1 - Vantaggi e svantaggi dei sistemi di intervento più frequentemente utilizzati sulle strutture lignee

Sistema di intervento	Vantaggi	Svantaggi
<p>Legno lamellare in opera</p> 	<ul style="list-style-type: none"> * Materia prima identica * Intervento più simile alle tecniche tradizionali * Reversibilità parziale ma agevole 	<ul style="list-style-type: none"> * Prestazioni limitate, normalmente è impossibile l'aumento dei carichi * Lento, difficile, costoso * Necessità di manodopera molto specializzata * Durabilità dubbia se i prodotti non sono compatibili con il legno * Necessarie precauzioni nell'uso dei prodotti
<p>Dispositivi metallici</p> 	<ul style="list-style-type: none"> * Consente l'aumento dei carichi * Distinguibile facilmente dall'originale * Reversibilità spesso abbastanza agevole 	<ul style="list-style-type: none"> * Molto visibile (a volte troppo) * Aumento di peso sulle pareti * Presuppone che le strutture in legno o in muratura, prima di effettuare l'ancoraggio, siano in ottime condizioni (vanno quindi restaurate, se necessario) * Varia lo schema statico * Scarsa resistenza al fuoco, se l'acciaio è esposto
<p>Adesivi e barre</p> 	<ul style="list-style-type: none"> * Veloce ed economico * Facile mantenere l'aspetto estetico, eventualmente distinguendo le parti nuove dall'originale * Consente l'aumento dei carichi 	<ul style="list-style-type: none"> * Durabilità dubbia se i prodotti non sono compatibili con il legno * Necessarie precauzioni nell'uso dei prodotti * Reversibilità limitata



FIGURA 8 - Operazione di restauro di un solaio ligneo

Anche se ogni singolo intervento si presenta comunque diverso dai precedenti per aspetti funzionali più o meno importanti, è quindi utile classificare schematicamente i sistemi di intervento basati su adesivi epossidici dal punto di vista della loro finalità principale:

- incremento della capacità portante di elementi sani e/o degradati. Esempio tipico: travi di solaio di cui sia necessario aumentare i carichi di esercizio, per la variazione della destinazione d'uso della struttura;
- ripristino della funzionalità e della capacità portante originale di elementi degradati. Esempio tipico: testate di travi o capriate con carie causate dal ristagno di umidità;
- stuccatura di fessurazioni su legno non degradato. Normalmente, le fessure sono una caratteristica naturale del legname strutturale. Esistono comunque casi in cui

esse hanno una estensione tale da risultare pregiudizievoli per la stabilità della struttura (ad es. le fessure passanti o comunque concorrenti tra di loro, nel piano orizzontale dell'elemento). In questi casi è necessario stuccare la fessura da un solo lato, al fine di ripristinare la resistenza al taglio senza però impedire le normali variazioni dimensionali del legno.

La classificazione è necessaria anche rispetto alle condizioni di esposizione della struttura, poiché queste hanno una diretta influenza sulle sollecitazioni e, di conseguenza, sulla durabilità dei materiali impiegati. L'Eurocodice 5 [UNI ENV 1995] definisce 3 classi di servizio (Tabella 2) in funzione delle condizioni termoigrometriche.

TABELLA 2 - Classi di servizio definite nell'Eurocodice 5

Classe di servizio secondo Eurocodice 5	1 - Interno	2 - Esterno coperto	3 - Esterno esposto
Descrizione	Umidità dell'aria superiore al 65% solo per poche settimane l'anno	Umidità dell'aria superiore all'85% solo per poche settimane l'anno	Piena esposizione alle intemperie o immerso
Umidità media del legno	minore del 12%	minore del 20%	maggiore del 20%
Esempi tipici nelle strutture lignee antiche	Ambienti riscaldati e condizionati, con limitate variazioni termoigrometriche	Ambienti non condizionati (tettoie, tetti freddi, terrazze) o umidi (piscine). Testate di travi sui muri interni, purché ben aerate e drenate	Ponti, colonne, palificazioni. Testate di travi sui muri esterni, anche per gli ambienti riscaldati

Le diverse condizioni di esposizione comportano l'adozione di diversi fattori modificativi delle caratteristiche dei materiali. Esistono inoltre altri fattori dei quali è necessario tenere conto nel caso degli adesivi epossidici: il livello di esposizione al rischio di incendi e la possibile esposizione a temperature elevate (come ad es. la vicinanza di impianti di riscaldamento, lampade etc. alle parti oggetto di intervento). Anche la durata del carico deve essere stimata nei singoli casi e per le singole azioni (ad es. l'azione della neve non è uguale come durata nelle diverse località italiane). L'Eurocodice 5 definisce le classi di durata (vedi Tabella 10 nella sezione "Modalità di applicazione") ed i relativi coefficienti di modificazione.

Relativamente alla funzione dell'adesivo nei sistemi di intervento, questi ultimi si possono classificare come segue:

- sistema adesivo, normalmente in forma di fluido con viscosità medio-bassa adatto all'iniezione, a volte tissotropico, eventualmente caricato con additivi di tipo reattivo, plastificanti, inerti o fibre. Il prodotto utilizzabile per sistemi con questa funzione deve avere ottime proprietà di adesione sia sul legno che sugli elementi in acciaio e in materiale composito. In certi casi è necessaria, oltre alla elevata resistenza al taglio ed alla delaminazione, anche una buona resistenza a compressione ed a trazione. Le cariche impiegate hanno normalmente la funzione di migliorare la resistenza alla compressione e di ridurre il volume di resina impiegato, per controllare lo sviluppo di calore al momento della reazione esotermica tra i due componenti;

- sistema riempitivo, in forma di stucco o betoncino di viscosità medio-alta, tissotropico se necessario per applicazioni in zone dalle quali non deve colare, normalmente caricato con inerti o fibre. Per svolgere questa funzione il prodotto applicato deve comunque essere capace di trasmettere sforzi di taglio nell'ordine di grandezza di quelli sopportati dal legno massiccio (valore caratteristico 2-3 N/mm²), anche in condizioni sfavorevoli come quelle di completa imbibizione del legno, con conseguente sviluppo di tensioni dovute al suo rigonfiamento;
- sistema consolidante di legno molto degradato da funghi od insetti, con scarsa coesione. L'adesivo è normalmente molto fluido e dotato di buona bagnabilità.

Infine, i diversi sistemi di intervento possono essere classificati in base al tipo di azione alla quale sono sottoposti (semplice o combinata), come segue:

- parti compresse (essenzialmente colonne);
- parti inflesse (travi di vario tipo);
- parti tese (catene di capriate, parti di travi reticolari);
- parti pressoinflesse (ad es. puntoni di capriate);
- giunti in genere.

Le diverse azioni richiedono all'adesivo una serie di prestazioni meccaniche variabili, suggerendo ai produttori una certa diversificazione nelle funzioni dei prodotti. La Tabella 3 riassume le caratteristiche meccaniche che devono essere note al progettista per i diversi tipi di intervento.

TABELLA 3 - Caratteristiche meccaniche necessarie per il calcolo del giunto incollato

Tipo di intervento	Caratt. dell'adesivo		Caratt. del giunto adesivo/legno				
	Modulo elastico	Resistenza a		con barre		con piastre	
		Compr.	Traz.	Taglio//	Estraz.	Taglio⊥	Taglio//
Base colonna, con barre		X		X	X		
Colonna a 1/2 altezza, con piastre	X			X		X	X
Testata trave, con piastre	X	X		X		X	X
Testata trave, con barre	X	X		X	X		
Trave a 1/2 lunghezza, con piastre	X	X		X		X	X
Catena capriata, con piastre	X		X	X		X	X
Nodi in capriata, barre o piastre	X	X	X	X	X	X	X

NOTE:

- Estraz. è la resistenza all'estrazione di un candelotto di resina contenente una barra di acciaio o VTR, da un foro di adeguato diametro (normalmente 2-10 mm in più del diametro della barra)
- Taglio // è la resistenza al taglio in direzione parallela alla fibratura del legno
- Taglio ⊥ è la resistenza al taglio in direzione perpendicolare alla fibratura del legno (*rolling shear*)



FIGURA 9 - Nodo di capriata decorato



FIGURA 10 - Prova di estrazione della barra

Ampia sperimentazione, elevate prestazioni, ottima compatibilità chimico-fisica con il legno

A cura di:
Ing. Pizzo (Istituto per la Ricerca sul Legno, CNR)
Sig. Misani e Dr. De Ciechi (Mapei S.p.A.)

Attraverso una collaborazione triennale del proprio laboratorio "Adesivi Organici" con l'Istituto per la Ricerca sul Legno (IRL), con il CNR e la società LegnoDOC, Mapei ha sviluppato **MAPEWOOD SYSTEM**: una gamma di primer e di adesivi specifici per gli interventi sulle strutture lignee che unisce eccezionale adesione, ottima compatibilità con il legno ed elevata resistenza meccanica alle consuete doti di facilità applicativa e ridotto impatto ambientale. La Tabella 4 riassume le caratteristiche tecniche della linea MAPEWOOD, testata sia in laboratorio che in cantiere. La gamma si compone di tre prodotti che coprono le principali esigenze applicative:

- **MAPEWOOD PRIMER 100** è un impregnante epossidico di consistenza fluida, in dispersione acquosa, per il consolidamento di elementi strutturali in legno degradati da carie e la primerizzazione dei terminali degli elementi strutturali in legno di elevata densità (ad es. quercia e castagno).
- **MAPEWOOD GEL 120** è un adesivo epossidico fluido, in forma di gel, per l'incollaggio strutturale di nuove protesi di legno tramite barre e/o piastre di collegamento.
- **MAPEWOOD PASTE 140** è un adesivo epossidico a consistenza tissotropica, per l'incollaggio strutturale di nuove protesi di legno tramite barre e/o piastre di collegamento in acciaio o materiale composito.

La ricerca è stata condotta in maniera parallela e complementare a quella denominata GIROD (vedi capitolo precedente), con particolare riferimento alla verifica delle prestazioni dell'adesivo ed alla definizione della sua compatibilità con il legno. I principali risultati, già pubblicati su una delle più importanti riviste scientifiche del settore legno (*Lavisci et al 2001*) sono attualmente in corso di trasposizione in sede normativa (*CEN/TC193/SC1/WG11*). Anche un altro tema della ricerca, relativo alle relazioni tra lo spessore del giunto e la reologia dell'adesivo, ha dato risultati interessanti (in corso di pubblicazione), aprendo nuove prospettive per la progettazione di giunti incollati per impieghi strutturali.

Queste esperienze di laboratorio hanno supportato lo sviluppo di formulazioni che garantiscono prestazioni

ottimali in termini di compatibilità tra legno ed adesivo. Questa caratteristica, importantissima per la durabilità dell'intervento e nota agli addetti ai lavori come fattore critico per gli incollaggi strutturali, è stata definita per la prima volta in maniera oggettiva grazie alla metodologia di prova specificamente sviluppata presso l'Istituto per la Ricerca sul Legno del CNR, in mancanza di normative nazionali od internazionali direttamente applicabili, in funzione delle esigenze applicative tipiche del restauro strutturale (ad es. la mancanza di pressione sull'adesivo e l'utilizzo di elevati spessori del giunto). I metodi sviluppati presentano alcune sostanziali differenze rispetto alle norme più simili per scopo e campo di applicazione (*UNI EN 302 ed ASTM D 2559*), consentendo una valutazione più accurata dei prodotti ed una migliore riproducibilità dei risultati.

Nella prova un giunto simmetrico, ottenuto incollando le facce radiali (angolo degli anelli di accrescimento 45° - 90°) di due tavolette di legno con fibratura parallela tra loro, viene sottoposto all'azione di una forza di taglio per compressione parallela alla fibratura, fino a rottura. Dopo la prova sul giunto incollato, viene effettuata una prova in condizioni di carico analoghe per ogni provino, sul legno massiccio che costituisce uno degli aderenti (Figura 12, e Figura 13). I provini sono ottenuti da barre incollate senza applicazione di pressione ed interponendo una dima in compensato per fissare lo spessore del giunto ($3 \pm 0,2$ mm). Selezionati i provini, scartando quelli con eventuali difetti, si misurano le dimensioni "a e b" della sezione sottoposta a prova, con la precisione di 0,1 mm. I provini sono divisi in gruppi, in modo da sottoporre la metà di essi ad un ciclo di invecchiamento accelerato (Tabella 5) mentre gli altri vengono condizionati in camera climatica ($20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ UR) per almeno 7 giorni. La tensione di taglio viene applicata con incremento costante ($0,1$ N/mm² sec) fino alla rottura del provino, misurando il carico massimo F_{max} applicato. I provini nei quali sono presenti difetti del legno non rilevati in precedenza, oppure dovuti alla impropria applicazione dell'adesivo (bolle d'aria, mancanza di contatto...) vengono scartati.

TABELLA 4 - Caratteristiche dei prodotti della gamma MAPEWOOD

	MAPEWOOD PRIMER 100		MAPEWOOD GEL 120		MAPEWOOD PASTE 140	
Voce doganale	3907 30 00		3907 30 00		3907 30 00	
Componente	A	B	A	B	A	B
Consistenza	liquido	liquido	pasta	pasta	pasta densa	pasta densa
Colore	giallo paglierino	ambra	marrone chiaro	giallo	marrone	bianco
Peso specifico	1,11 g/cm ³	1,01 g/cm ³	1,02 g/cm ³	1,00 g/cm ³	1,6 g/cm ³	1,6 g/cm ³
Viscosità Brookfield	1.000 m Pa.s (rotore 1 - giri 5)	80 m Pa.s (rotore 1 - giri 10)	13.000 m Pa.s (rotore 3 - giri 5)	11.000 m Pa.s (rotore 2 - giri 5)	550.000 m Pa.s (Helipath F - giri 5)	220.000 m Pa.s (Helipath F - giri 5)
Conservazione	24 mesi negli imballi originali non aperti a temperatura compresa tra +5°C e +30°C					
Classificazione di pericolo secondo Direttiva 88/379 CEE	irritante	nocivo	irritante	nocivo	irritante	nocivo
Rapporto di miscelazione	A : B = 1 : 1		A : B = 4 : 1		A : B = 2 : 1	
Consistenza dell'impasto	liquido		pasta gelatinosa		pasta tissotropica	
Colore dell'impasto	giallo paglierino		marrone chiaro		marrone chiaro	
Peso specifico dell'impasto	1,08 g/cm ³		1,01 g/cm ³		1,5 g/cm ³	
Viscosità Brookfield dell'impasto	700 m Pa.s (rotore 2 - giri 10)		11.400 m Pa.s (rotore 3 - giri 5)		490.000 m Pa.s (Helipath F - giri 5)	
Tempo di lavorabilità						
(a +10°C)	—		60'		150'	
(a +23°C)	30' - 40'		40'		60'	
(a +30°C)	—		20'		30'	
Tempo di presa						
(a +10°C)	—		90'		14-16 h	
(a +23°C)	4-5 h		50'		4-5 h	
(a +30°C)	—		30'		2 h 30' - 3 h	
Temperatura di applicazione	da +10°C a +30°C		da +10°C a +30°C		da +10°C a +30°C	
Indurimento completo	12-24 h		7 giorni		7 giorni	
Adesione shear a compressione legno/legno (abete)	—		9 N/mm ² (dopo 7 gg a +23°C)		10 N/mm ² (dopo 7 gg a +23°C)	
Resistenza a trazione (ASTM D 638)	—		30 N/mm ²		18 N/mm ²	
Allungamento a trazione (ASTM D 638)	—		1,2%		1%	
Resistenza a flessione (ISO 178)	—		60 N/mm ²		30 N/mm ²	
Modulo elastico a flessione (ISO 178)	—		2.000 N/mm ²		4.000 N/mm ²	
Resistenza a compressione (ASTM D 695)	—		65 N/mm ²		45 N/mm ²	
Modulo elastico a compressione (ASTM D 695)	—		5.000 N/mm ²		3.000 N/mm ²	

TABELLA 5 - Ciclo di invecchiamento accelerato per i provini di taglio

Fase	Trattamento
A	Impregnazione con acqua a temperatura ambiente: <ul style="list-style-type: none">• 10 min. in aria in autoclave, con un vuoto di 500 ± 50 mm Hg• 50 min. in acqua in autoclave, ad una pressione di $5 \pm 0,5$ kg/cm² I provini devono essere ben distanziati, non in contatto tra di loro
B	Essiccazione per 23 - 24 h in stufa ventilata con temperatura di $60 \pm 2^\circ\text{C}$ e velocità di circolazione dell'aria di $2 \pm 0,2$ m/sec
C	Ripetizione della fase A
D	Ripetizione della fase B
E	Ripetizione della fase A e rimozione dell'eccesso d'acqua dalla superficie dei provini

FIGURA 11 - Dettaglio di orditura lignea



FIGURA 12 - Dispositivo per l'effettuazione della prova di taglio per compressione



η_{dry} è il coefficiente di confronto in ambiente standard, calcolato come rapporto tra la resistenza a taglio dell'adesivo e quella del legno, entrambe relative a provini condizionati in ambiente asciutto in camera climatica (20°C e 65% UR);

η_{wet} è il coefficiente di invecchiamento, calcolato come rapporto tra la resistenza a taglio dell'adesivo e quella del legno, entrambe misurate allo stato imbibito (**wet**) su provini sottoposti ai cicli di invecchiamento accelerato.

Con il coefficiente di compatibilità strutturale $k_{a,w}$ è possibile confrontare in maniera semplice e diretta le prestazioni dell'adesivo e quelle del legno scelto per la valutazione. Un valore del coefficiente uguale a 1 indica infatti che il legno incollato si comporta esattamente come il legno massiccio. Un valore > 1 indica che il legno incollato si comporta meglio del legno massiccio, perché l'interfaccia che si forma tra l'adesivo e il legno ha proprietà fisico-meccaniche superiori a quelle proprie del legno. Viceversa, un valore < 1 significa che il giunto incollato, nelle condizioni di invecchiamento accelerato utilizzate, ha una diminuzione delle prestazioni superiore a quella del legno massiccio. Il coefficiente di compatibilità esprime quindi in maniera quantitativa una proprietà del giunto incollato che è riferibile alla sua durabilità nelle condizioni di servizio previste.

Il risultato della prova, per ciascun provino valido, viene calcolato come $R_t = F_{max} / (a \cdot b)$, dove:

R_t è la resistenza a taglio per compressione, in N/mm^2 , espressa con due cifre decimali;

F_{max} è il carico massimo misurato in N;

a e b sono le dimensioni della sezione sottoposta a prova, in mm.

Per ognuno dei 4 gruppi di provini (giunto condizionato; giunto invecchiato; legno condizionato; legno invecchiato) si calcolano: la media aritmetica, lo scarto quadratico medio ed il coefficiente di variazione di R_t riferiti ad almeno 10 provini validi.

Per valutare i risultati è stato definito un *coefficiente di compatibilità strutturale* $k_{a,w}$ tra adesivo e legno (*wood*). Il coefficiente consente di giudicare in maniera sintetica e facilmente comprensibile, attraverso la comparazione delle loro prestazioni, la durabilità dell'interfaccia tra i due materiali, ed è calcolato come:

$k_{a,w} = \eta_{dry} \cdot \eta_{wet}$ dove:

$k_{a,w}$ è il coefficiente di compatibilità strutturale (adimensionale) tra adesivo e legno:



FIGURA 13 - Aspetto dei provini dopo le fasi di imbibizione (sinistra) ed essiccamento in stufa ventilata (destra). Le condizioni di invecchiamento accelerato, particolarmente severe, comportano lo sviluppo di forti tensioni all'interfaccia legno/adesivo.

La Tabella 6 riassume i risultati ottenuti con gli adesivi **MAPEWOOD PASTE 140** e **MAPEWOOD GEL 120** con legno di Abete rosso (*Picea abies* Karst.) e Castagno (*Castanea sativa* Mill.). In quest'ultimo caso è stato fatto un trattamento preliminare delle superfici da incollare con **MAPEWOOD PRIMER 100**.

Entrambi gli adesivi, sottoposti a prova in condizioni di giunto spesso 3 mm, hanno evidenziato una resistenza a taglio maggiore o vicina a quella del legno massiccio. Il metodo di prova adottato ed il ciclo di invecchiamento accelerato applicato, particolarmente severo, hanno consentito di valutare la compatibilità tra i due materiali,

che è riferibile alla durabilità dell'interfaccia che essi formano.

Facendo riferimento alla classificazione della *UNI EN 301* si può ritenere, con sufficiente margine di sicurezza, che già con un $k_{a,w}$ maggiore di 0,8 (le resistenze dell'adesivo sono almeno l'80% di quelle del legno massiccio), l'adesivo sia utilizzabile in condizioni climatiche di piena esposizione alle intemperie, corrispondenti alla classe di servizio 3 della *UNI ENV 1995* (Eurocodice 5).

MAPEWOOD PASTE 140 e **MAPEWOOD GEL 120** si collocano ai vertici della gamma di prodotti attualmente disponibili sul mercato (Tabella 7).

TABELLA 6 - Risultati delle prove di resistenza a taglio tra adesivo e legno (N/mm²) e calcolo del coefficiente di compatibilità (adimensionale)

		Legno di ABETE			Legno di CASTAGNO		
		condizionato	invecchiato	$k_{a,w}$	condizionato	invecchiato	$k_{a,w}$
MAPEWOOD PASTE 140	Resistenza	10,4	5,5	1,71	15,1	6,0	1,13
	Coefficiente	$\eta_{dry}=1,28$	$\eta_{dry}=1,34$		$\eta_{dry}=1,26$	$\eta_{dry}=0,89$	
MAPEWOOD GEL 120	Resistenza	9,0	5,5	1,44	10,0	7,7	0,80
	Coefficiente	$\eta_{dry}=1,13$	$\eta_{dry}=1,36$		$\eta_{dry}=0,90$	$\eta_{dry}=0,89$	

TABELLA 7 - Comparazione tra gli adesivi della linea MAPEWOOD ed i prodotti concorrenti attualmente disponibili sul mercato (comparazione per il legno di Abete)

Adesivo	Coefficiente di compatibilità			Utilizzo in Classe di Servizio (Eurocodice 5)		
	η_{dry}	η_{dry}	$k_{a,w}$	1	2	3
A1	1,31	0,51	0,67	SI		NO
B1	1,10	0,73	0,80		SI	NO
B2	0,97	0,67	0,65	SI		NO
C1	1,07	0,91	0,97		SI	
D1	1,03	0,66	0,68	SI		NO
E2	0,39	0,00	0,00		NO	
F1	1,15	0,90	1,04		SI	
F2	1,07	0,57	0,61	SI		NO
G1	1,04	0,52	0,54	SI		NO
H1	0,68	0,00	0,00		NO	
MAPEWOOD PASTE 140	1,28	1,34	1,71		SI	
MAPEWOOD GEL 120	1,13	1,36	1,44		SI	



FIGURA 14 - Iniezione di Mapewood Gel 120 per il restauro di una capriata

Esempi di calcolo secondo i criteri dell'Eurocodice 5

A cura di:
Ing. Lauriola (LegnoDOC srl)

Il rispetto delle corrette modalità operative nella preparazione ed applicazione dei materiali è indispensabile per la riuscita di ogni intervento di restauro. Nel caso delle strutture lignee, la durabilità dell'intervento è legata alla qualità dell'interfase (volume di legno impregnato dall'adesivo) ed alla qualità dell'interfaccia formata tra l'adesivo ed il materiale di rinforzo (barre, piastre). La schematizzazione di un giunto incollato mostra queste zone come altrettanti anelli di una catena, la cui resistenza dipende dall'anello più debole (Figura 15). Attraverso la modellazione dello stato tensionale in una barra incollata (Figura 16) è possibile analizzare la ripartizione e la tipologia delle sollecitazioni che interessano le varie parti del giunto, evidenziando l'importanza delle tensioni normali all'interfaccia legno/adesivo e quindi l'utilità di formare una ottima interfase tra i due materiali.

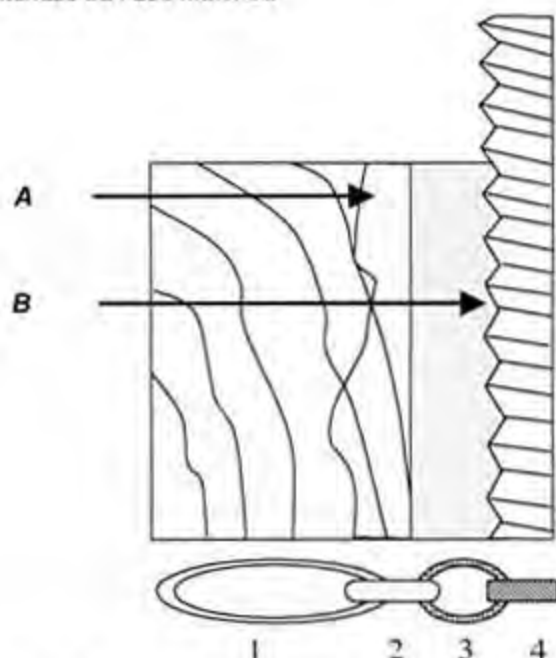


FIGURA 15 - Schematizzazione di un giunto incollato con barra filettata. Materiali: 1 = legno; 2 = interfase legno/adesivo; 3 = adesivo; 4 = acciaio. Interfacce: A = legno/adesivo; B = adesivo/acciaio. La resistenza del giunto è quella del componente più debole. Le fratture nei materiali si dicono "coesive"; quelle all'interfaccia si dicono "adesive".

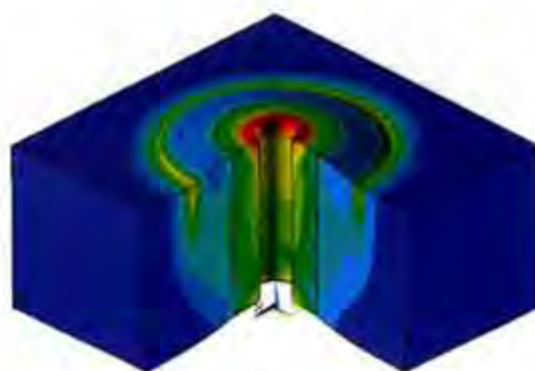


FIGURA 16 - Mediante la modellazione di un giunto incollato è possibile analizzare la tipologia delle sollecitazioni applicate. Si evidenzia l'importanza delle tensioni normali all'interfaccia legno/adesivo.

Salvo casi eccezionali, la progettazione degli interventi di restauro con adesivi è semplice e di facile esecuzione in cantiere. In attesa di una normativa specifica, in corso di elaborazione nell'ambito del Gruppo di Lavoro "Legno" della Commissione "Beni Culturali" UNI-NORMAL [Piazza e Del Senno, 2001], gli interventi possono essere progettati facendo riferimento alle indicazioni disponibili nell'Eurocodice 5 [UNI ENV 1995], negli altri Eurocodici e nei relativi documenti di applicazione nazionale. I pregiudizi esistenti sulla scarsa compatibilità degli adesivi epossidici con il legno sono ormai superati, nel caso dei prodotti della linea **MAPEWOOD**, specificatamente sviluppati per gli interventi sulle strutture lignee, dall'evidenza sperimentale e dall'esperienza applicativa.

Gli esempi seguenti illustrano le principali modalità di progettazione e verifica nei due casi più tipici:

- ricostruzione della testata di una trave (ad es. di un solaio);
- ricostruzione di catena o puntone di capriata.

Un semplice programma, utile per ottimizzare il dimensionamento delle barre ed assicurarne la rispondenza ai criteri di verifica dell'Eurocodice 5, è disponibile presso l'Assistenza Tecnica Mapei.

Esempio 1: TESTATA DI TRAVE

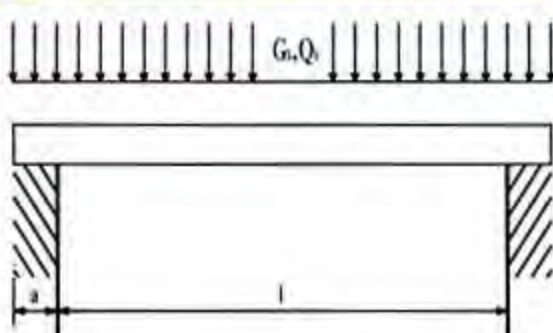
Si prevede il restauro della testata della trave, degradata da carie, che sarà sostituita con una protesi di legno massiccio stagionato, connessa alla restante parte mediante quattro barre in acciaio ad aderenza migliorata, fissate in apposite fresature sigillate con **MAPEWOOD PASTE 140** e richiuse con un listello di legno.

Normalmente, l'intervento si svolge attraverso le seguenti fasi:

1. puntellatura della testata degradata e realizzazione di breccia nella muratura;

2. taglio a 45° della trave per asportare la porzione di legno degradata;
3. predisposizione di protesi in legno stagionato di specie uguale (o migliore, come durabilità naturale), rispetto a quella esistente. È importante che l'umidità del legno sia corrispondente a quella prevista in servizio (comunque non superiore del 6% a quella prevista in servizio);
4. realizzazione di fori o scassi nella trave e nella protesi, ed ancoraggio delle barre con adesivo;
5. a maturazione completa dell'adesivo (circa una settimana), ricostruzione della breccia, smontaggio dei puntelli e finitura superficiale del legno.

CARICHI

Modalità di progettazione/calcolo	Esempio	
	1. carichi permanenti	kN/m²
	pavimento	0,40
	sottofondo di malta 2 cm	0,38
	massetto 7cm	0,70
	compensato 24 mm	0,11
	tavolato	0,12
	travicelli	0,07
	travi	0,34
	totale permanenti G_k	2,12
	2. carichi accidentali	
	locali suscettibili di affollamento	3,00
	totale accidentali Q_k	3,00

G_k carico permanente (peso proprio + altri carichi permanenti) per unità di superficie

Q_k carico accidentale (sovraccarico variabile) per unità di superficie

$\gamma_G = 1,35$ coefficiente parziale di sicurezza sulle azioni permanenti

$\gamma_Q = 1,5$ coefficiente parziale di sicurezza sulle azioni variabili

GEOMETRIA

FIGURA 17 - Esempio di ricostruzione dell'intestazione della trave

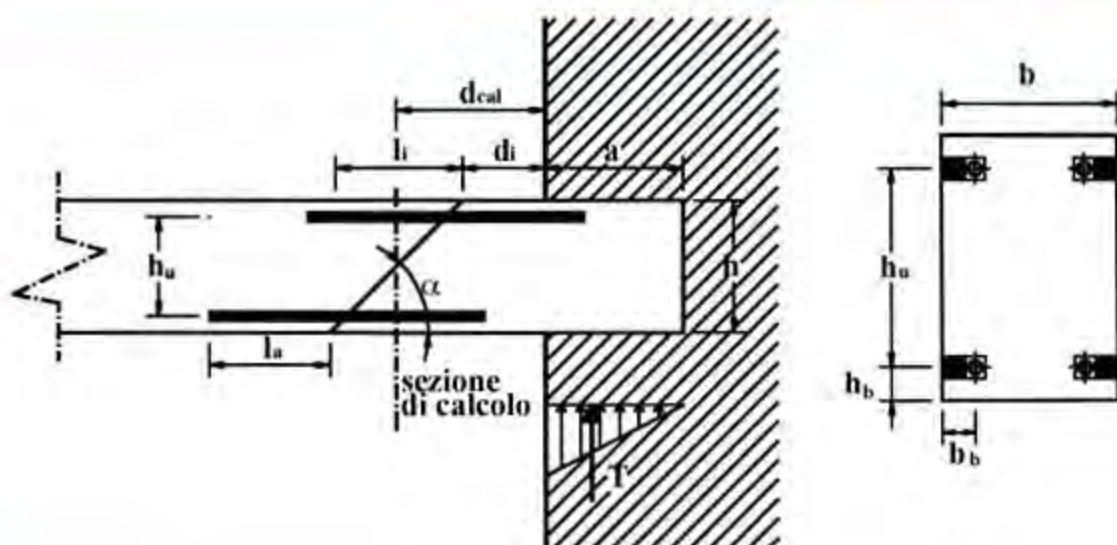




FIGURA 18 – Impiego di una barra in acciaio ad aderenza migliorata

Modalità di progettazione/calcolo	Esempio
i interasse travi	0,75 m
l luce netta	6,3 m
a lunghezza di appoggio sulla muratura	0,25 m
b base sezione	0,16 m
h altezza sezione	0,24 m
d_l lunghezza zona degradata misurata dal filo muro	0,1 m
α angolo di taglio, consigliato 45°, in ogni caso compreso fra 30° e 60°	45°
n numero totale delle barre, consigliato e minimo 2 + 2	4
d_{nom} diametro nominale della barra	12 mm
d diametro esterno della barra. Per barre lisce e barre filettate coincide con d_{nom} , per barre ad aderenza migliorata si può assumere $d = 1,10 \times d_{nom}$	13,2 mm
d_{foro} foro diametro del foro, consigliato $d_{nom} + 4$ mm	16 mm
A_{res} area resistente della barra (Tabella 8)	113 mm ²
l_a lunghezza di ancoraggio della barra. La lunghezza minima consentita dall'EC5 è la massima fra $0,4 \times d^2$ e $8 \times d$	200 mm
b_b distanza fra il centro della barra ed il bordo laterale della sezione, minimo $2,5 \times d$	35 mm
h_b distanza fra il centro della barra ed il bordo inferiore/superiore della sezione, minimo $2,5 \times d$	35 mm

MATERIALI

Modalità di progettazione/calcolo	Esempio
Legno	C16
$f_{t,0,k}$ resistenza caratteristica a trazione del legno parallela alla fibratura (Tabella 9)	10 N/mm ²
ρ_k massa volumica (densità) caratteristica del legno (Tabella 9)	310 kg/m ³
$\gamma_{m,l}$ coefficiente parziale di sicurezza sul legno = 1,3 (da Eurocodice 5)	1,3
k_{mod} coefficiente di modificazione, da scegliere in base alla durata del carico accidentale (Tabella 11).	0,80
Acciaio	Fe B 44 k, in barre ad aderenza migliorata
f_y tensione di snervamento dell'acciaio (Tabella 11)	430 N/mm ²
$\gamma_{m,s}$ coefficiente parziale di sicurezza sull'acciaio, come da documenti di applicazione nazionale contenuti nel DM LL.PP. 9/1/96 (Tabella 12)	1,15

AZIONI E SOLLECITAZIONI

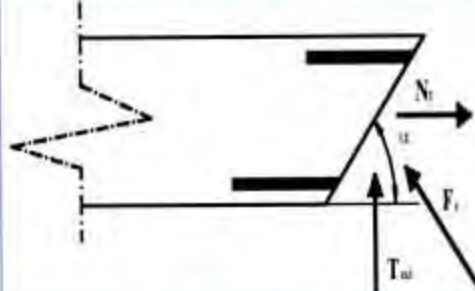

Azione/sollecitazione	Esempio di progettazione calcolo
Carico sulla singola trave (combinazione di carico allo stato limite ultimo)	$q = i \times (\gamma_G \times G_k + \gamma_Q \times Q_k) = 0,75 \times (1,35 \times 2,12 + 1,5 \times 3,00) = 5,52 \text{ kN/m}$
Reazione vincolare all'appoggio	$T = \frac{q \times l}{2} = \frac{5,52 \times 6,30}{2} = 17,4 \text{ kN}$
Altezza utile (braccio della coppia interna)	$h_u = h - 2h_b = 240 - 2 \times 35 = 170 \text{ mm}$
Lunghezza zona di taglio	$l_t = \frac{h}{\tan \alpha} = \frac{240}{\tan 45^\circ} = 240 \text{ mm}$
Distanza della sezione di calcolo dal filo muro	$d_{\text{cal}} = d_i + \frac{l_t}{2} = 100 + \frac{240}{2} = 220 \text{ mm}$
Taglio nella sezione di calcolo	$T_{\text{cal}} = T - q \times d_{\text{cal}} = 17,39 - 5,52 \times 0,22 = 16,2 \text{ kN}$
Momento flettente nella sezione di calcolo	$M_{\text{cal}} = T \times \left[d_{\text{cal}} + \frac{a}{3} \right] - \frac{q \times d_{\text{cal}}^2}{2} = 17,39 \times \left[0,22 + \frac{0,25}{3} \right] - \frac{5,52 \times 0,22^2}{2} = 5,14 \text{ kNm}$
Sforzo di trazione totale nelle barre dovuto al taglio	 $N_1 = \frac{T_{\text{cal}}}{\tan \alpha} = \frac{16,18}{\tan 45^\circ} = 16,2 \text{ kN}$
Sforzo di compressione nel legno dovuto al taglio	$F_c = \frac{T_{\text{cal}}}{\cos \alpha} = \frac{16,18}{\cos 45^\circ} = 22,88 \text{ kN}$
Sforzo di trazione totale nelle barre inferiori dovuto al momento flettente	 $N_2 = \frac{M_{\text{cal}}}{h_u} = \frac{5,14}{0,17} = 30,3 \text{ kN}$
Sforzo di trazione in ciascuna barra inferiore	$N_d = \frac{N_1}{4} + \frac{N_2}{2} = \frac{16,18}{4} + \frac{30,25}{2} = 19,2 \text{ kN}$

TABELLA 8 - Valori di area resistente per diversi tipi di barra in acciaio

Diametro nominale (mm)	Area resistente (mm ²)	
	Barre lisce e barre ad aderenza migliorata	Barre filettate
8	50	-
10	79	-
12	113	84
14	154	115
16	201	157
18	254	192
20	314	245
22	380	303
24	452	353
26	531	-
27	-	459
28	616	-
30	707	561

TABELLA 9 - Valori caratteristici di resistenza e densità del legno

Classi di resistenza UNI EN 338	C16	C24	C30
$f_{t0,k}$ (N/mm ²)	10	14	18
ρ_k (kg/m ³)	310	350	380

TABELLA 10 - Coefficiente di modificazione in funzione della durata del carico accidentale

classe di durata del carico	esempi di carico	k_{mod}
lunga durata	carico utile in depositi	0,70
media durata	carico di esercizio	0,80
breve durata	neve	0,90

TABELLA 11 - Tensione di snervamento dell'acciaio

	classe acciaio	f_y (N/mm ²)
barre filettate	4.6	240
	5.6	300
	6.6	360
	8.8	640
	10.9	900
acciaio da carpenteria	Fe 360	235
	Fe 430	275
	Fe 510	355
barre ad aderenza migliorata	Fe B 38 k	375
	Fe B 44 k	430

TABELLA 12 - Coefficiente parziale di sicurezza dell'acciaio

barre filettate	$\gamma_{M,b}$	1,35
acciaio da carpenteria	$\gamma_{M,1}$	1,05
barre ad aderenza migliorata	γ_s	1,15

CALCOLO DELLA RESISTENZA ALL'ESTRAZIONE

Azione/verifica	Esempio di progettazione
Diametro equivalente	$d_{eq} = \min \left[\begin{array}{l} d_{foro} \\ 1,25 \times d \end{array} \right] = 16 \text{ mm}$
Resistenza a taglio del legno in corrispondenza dell'incollaggio	$f_{v,k} = \frac{1,2 \times \rho_k^{1,5}}{1.000 \times d_{equ}^{0,2}} = \frac{1,2 \times 310^{1,5}}{1.000 \times 16^{0,2}} = 3,76 \text{ N/mm}^2$
Resistenza all'estrazione di calcolo per rottura dell'incollaggio	$f_{ax,Rd,1} = \frac{k_{mod} \times \pi \times d_{equ} \times l_a \times f_{v,k}}{\gamma_{m,j}} =$ $\frac{0,8 \times \pi \times 16 \times 200 \times 3,76}{1,3} = 23.261 = 23,26 \text{ kN}$ <p>Eventualmente, per classe di servizio 2, usare:</p> $F_{ax,Rd,1} = \frac{0,8 \times k_{mod} \times \pi \times d_{equ} \times l_a \times f_{v,k}}{\gamma_{m,j}}$
Area di influenza di ciascuna barra	$A_{ef} = (3d + b_b) \times (3d + h_b) = (3 \times 13,2 + 35) \times (3 \times 13,2 + 35) = 5565,16 \text{ mm}^2$ <p>Eventualmente, se $b_b \geq 3d$ e $h_b \geq 3d$ usare: $A_{ef} = 6d \times 6d$</p>
Resistenza all'estrazione di calcolo per rottura del legno per trazione	$f_{ax,Rd,2} = \frac{k_{mod} \times f_{t,0,k} \times A_{ef}}{\gamma_{m,l}} = \frac{0,8 \times 10 \times 5565,16}{1,3} = 33939 \text{ N} = 33,94 \text{ kN}$
Resistenza di calcolo della barra per rottura dell'acciaio. Si consiglia di limitare il valore f_y/γ a 300N/mm^2	$f_{ax,Rd,3} = \frac{f_y \times A_{res}}{\gamma_s} = 300 \times 113 = 33.900 \text{ N} = 33,90 \text{ kN}$ <p>Eventualmente, per:</p> <p>barre filettate, usare: $f_{ax,Rd,3} = \frac{0,9 \times f_y \times A_{res}}{\gamma_{M,b}}$</p> <p>acciaio da carpenteria, usare: $f_{ax,Rd,3} = \frac{f_y \times A_{res}}{\gamma_{M,1}}$</p>
Resistenza all'estrazione di calcolo	$f_{ax,Rd} = \min \left[\begin{array}{l} F_{ax,Rd,1} \\ F_{ax,Rd,2} \\ F_{ax,Rd,3} \end{array} \right] = 23,26 \text{ kN}$
Verifica della barra	$N_d = 19,16 \text{ kN} < F_{ax,Rd} = 23,26 \text{ kN}$
Verifica legno a tensioni di compressione inclinate rispetto alla fibratura	Richiesta da Eurocodice 5, ma non necessaria in questo caso

Esempio 2: CATENA O PUNTONE DI CAPIRIATA

Nel caso delle capriate il problema del degrado si può presentare in diverse forme, ad esempio:

- degrado dell'estremità del puntone;
- degrado dell'estremità della catena;
- degrado di ambedue le estremità (puntone e catena);
- degrado del solo dente di contrasto dell'unione puntone-catena.

Il calcolo differisce rispetto al caso delle testate di travi in quanto normalmente le aste di una capriata sono sollecitate essenzialmente a sforzo normale, pertanto il progetto dell'unione fra protesi e legno sano esistente si riconduce ad una semplice verifica ad estrazione della barra più sollecitata.

Quando il degrado si presenta in corrispondenza di un giunto ed interessa una o più aste convergenti nel giunto stesso, è importante ricostruire le estremità degradate senza modificare il tipo di vincolo preesistente fra le varie aste, ad esempio se il degrado interessa sia la catena che il puntone in corrispondenza dell'appoggio sulla muratura bisogna ricostruire le due estremità degradate mediante l'applicazione di due distinte protesi, ripristinando la geometria originale del giunto o migliorandola senza aumentare il grado di vincolo fra le due aste.

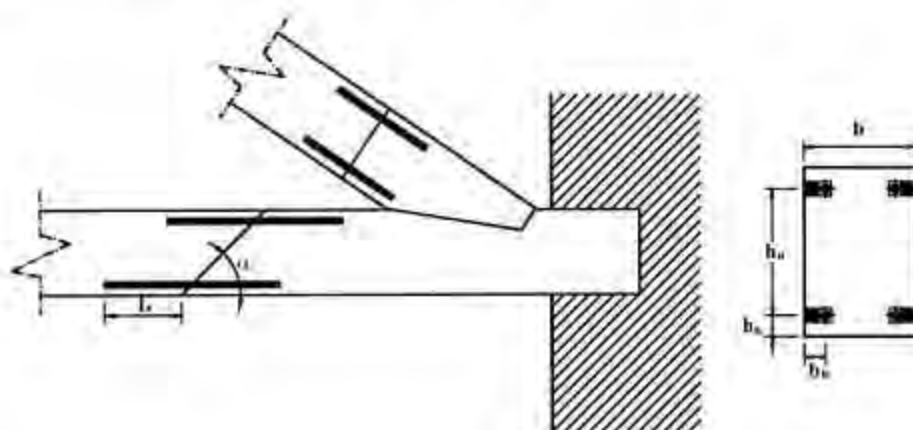
La catena è sollecitata essenzialmente da sforzo di

trazione; è comunque opportuno effettuare il taglio inclinato (60° circa) per meglio trasferire anche lo sforzo di taglio.

Eseguita l'analisi dei carichi allo stato limite ultimo come nell'esempio precedente, si determina lo sforzo di trazione nella catena; quindi si divide lo sforzo per il numero di barre di unione (consigliato 2+2 barre) e si verifica l'ancoraggio come nell'esempio precedente.

Nel caso in cui si debba ricostruire anche l'estremità di un'asta prevalentemente compressa (ad esempio il puntone) è opportuno eseguire il taglio a 90° . Lo sforzo viene trasferito per contatto fra legno e legno, pertanto le barre di unione hanno solo la funzione di trasferire i deboli sforzi di flessione presenti; in tal caso è sufficiente ancorare le barre per la lunghezza minima consentita (quella indicata dall'Eurocodice 5 è la massima fra $0,4xd^2$ e $8 \times d$), senza effettuare ulteriori verifiche.

FIGURA 19 - Esempio di ricostruzione dell'estremità della catena e del puntone di una capriata





Qualità ed affidabilità in varie tipologie di intervento

A cura di:
Ing. Lauriola (LegnoDOC srl)
Dr. De Ciechi (Mapel S.p.A.)

Le esperienze di cantiere, vera "cartina di tornasole" per le applicazioni nel campo del restauro dove le esigenze applicative e la qualità anche estetica del lavoro finito sono molto importanti, hanno evidenziato i vantaggi della gamma **MAPEWOOD** in termini di versatilità d'impiego. L'applicazione dell'adesivo, per iniezione o colatura, deve spesso tenere conto della necessità di:

- evacuare aria dalla parte superiore o posteriore dell'elemento da consolidare (se necessario, occorre realizzare fori che fungono anche da mezzo di controllo dell'effettivo riempimento);
- riempire cavità o fessure non visibili durante la preparazione delle superfici.

In alcuni casi è possibile limitare questi inconvenienti utilizzando **MAPEWOOD PASTE 140** (tissotropico) applicato a spatola in scassi da richiudere con listelli, od altre tecniche di intervento che consentono di vedere bene le superfici da incollare prima dell'applicazione dell'adesivo. Attraverso 4 esempi di interventi realizzati con la supervisione dell'Istituto per la Ricerca sul Legno (IRL), si descrivono sinteticamente le tecniche applicative utili nelle diverse situazioni di cantiere (Figure 22-25), che

si possono comunque ricondurre ad un approccio comune:

- dopo aver messo in sicurezza la struttura, asportare la porzione di legno degradato praticando un taglio netto e cercando di evitare la formazione di scheggiature e di bruciature superficiali (impiegare utensili specifici per legno, con idonee guide e supporti e rimuovere spesso i trucioli);
- preparare la protesi con i relativi alloggiamenti per gli elementi di collegamento, scegliendo legname di natura corrispondente a quello esistente (o con durabilità naturale e caratteristiche meccaniche migliori) e umidità prossima a quella di equilibrio nelle condizioni di impiego previste;
- eseguire la preparazione finale delle superfici in legno entro le 24 ore precedenti l'applicazione di **MAPEWOOD**, per evitare fenomeni di ossidazione superficiale, contatto con agenti inquinanti e depositi di polvere;
- preparare ed applicare i prodotti secondo le indicazioni descritte nelle schede tecniche, rispettando i tempi di lavorabilità e di presa;
- piallare, carteggiare e tinteggiare le superfici con le modalità normalmente impiegate per il legno.

FIGURA 21 - Applicazione di MAPEWOOD PRIMER 100 mediante scovolino



VILLA "POGGIO CUSIANO" (MIASINO - NO)

Progettazione generale e direzione dei lavori:
Arch. Daniele Scalcon
Esecuzione: LegnoDOC srl

Descrizione dell'intervento:

Sulle travi in legno di quercia di un controsoffitto affrescato (Figura 22A) in cui è necessario lavorare dall'estradosso, alla tecnica degli scassi è stata affiancata quella dei fori longitudinali che consente una maggior rapidità di esecuzione ed un minor spreco di resina. La notevole compattezza del legno di quercia ha consigliato l'utilizzo di **MAPEWOOD PRIMER 100** (Figura 22B), applicato mediante scovolino nei fori o negli scassi laterali (Figura 22C). Successivamente, **MAPEWOOD PASTE 140** viene miscelato e incartucciato, la barra viene posizionata e l'adesivo è iniettato da un foro laterale (Figura 22D).



FIGURA 22A



FIGURA 22B



FIGURA 22C



FIGURA 22D

PIEVE DI BORGO S. LORENZO (FI)

Direttore dei lavori: Arch. M. Santoni
Esecuzione: IRES spa

Descrizione dell'intervento:

L'intervento è stato effettuato con due tecniche differenti. In entrambi i casi, l'indagine diagnostica ha dimostrato che non c'era la necessità di sostituire l'intera parte ammalorata ma solo una "guancia" di essa: in un caso la guancia è costituita da un tavolone già forato collegato alla parte sana della catena tramite due barre filettate (Figura 23A), incollate con **MAPEWOOD PASTE 140** (Figura 23B); nel secondo invece la guancia è stata realizzata incollando alcune lamelle di legno in opera (Figura 23C). In entrambi i casi è stato impiegato **MAPEWOOD PASTE 140**. Per il fissaggio di barre oblique che contrastano lo spostamento laterale relativo di catena e puntone (Figura 23D) è stato invece iniettato **MAPEWOOD GEL 120**.



FIGURA 23A



FIGURA 23B



FIGURA 23C

FIGURA 23D



VILLA DI GEGGIANO (SI)

Progettazione e direzione dei lavori: Ing. Tatiana Campioni
Progettazione strutture: Ing. Marco Lauriola
Esecuzione: LegnoDOC srl

Descrizione dell'intervento:

L'intervento, effettuato sulla copertura della cappella privata della villa (Figura 24A), è stato effettuato mediante scassi laterali per il collegamento tra protesi e parte sana del legno mediante barre in acciaio ad aderenza migliorata (Figura 24B). Il parziale riempimento degli scassi con **MAPEWOOD PASTE 140** ha consentito un facile posizionamento della barra nello scasso (Figura 24C), seguito dall'inserimento di un tassello in legno, che consente una facile rifinitura dell'intervento con pialletto per l'ottenimento di un aspetto finale gradevole (Figura 24D). La tecnica utilizzata ha evitato la completa scopertura del tetto, con notevole risparmio in termini economici e di tempo. La versatilità di **MAPEWOOD PASTE 140** si è evidenziata in questo intervento, reso difficile dal momento che le travi erano a sezione molto irregolare per cui è stato necessario intervenire per il piazzamento delle barre su spigoli arrotondati.



FIGURA 24A



FIGURA 24B

FIGURA 24C



FIGURA 24D



BAGNO A RIPOLI (FI)

Progettazione: Ing. Falzone
Esecuzione: LegnoDOC srl

Descrizione dell'intervento:

L'intervento, effettuato per aumentare la portanza e la rigidità del solaio, è stato eseguito con la tecnica "Turrini-Piazza", ben nota nel settore del restauro:

- foratura (Figura 25A),
- aspirazione dei trucioli (Figura 25B)
- iniezione di **MAPEWOOD PASTE 140** (tissotropico)
- inserimento immediato del connettore (Figura 25C)

La rete elettrosaldata deve essere messa prima del posizionamento dei connettori. Anche i fogli di polietilene possono essere applicati prima dei connettori. La successiva gettata di calcestruzzo può essere effettuata già dopo 24 ore dall'applicazione del prodotto (Figura 25D), mentre per la messa in carico del solaio è preferibile aspettare una settimana.



FIGURA 25A



FIGURA 25B

FIGURA 25C



FIGURA 25D





MAPEWOOD PRIMER 100

Impregnante epossidico di consistenza fluida, in dispersione acquosa, per il consolidamento e la primerizzazione di strutture in legno

MAPEWOOD PRIMER 100 si usa per il consolidamento di elementi strutturali porosi in legno (travi, pilastri e capriate) interessati da carie (funghi) o degradati a causa dell'attacco di insetti xilofagi e per la primerizzazione, dopo la rimozione della parte degradata, dei terminali degli elementi strutturali in legno che devono essere ricostruiti mediante l'incollaggio di nuove protesi.

MAPEWOOD PRIMER 100 è un impregnante epossidico, in dispersione acquosa, costituito da due componenti predosati che devono essere miscelati tra loro prima dell'uso (componente A = resina e componente B = indurente). Dopo la miscelazione, **MAPEWOOD PRIMER 100**, grazie alla bassa viscosità è in grado di impregnare efficacemente ed in profondità qualsiasi superficie lignea porosa migliorandone la coesione e la resistenza agli attacchi biologici.

MAPEWOOD PRIMER 100, utilizzato su superfici poco assorbenti come quercia e castagno, migliora l'adesione di **MAPEWOOD GEL 120** e **MAPEWOOD PASTE 140**.

Applicare **MAPEWOOD PRIMER 100** sull'elemento in legno a rullo, a pennello o con scovolino.



MAPEWOOD GEL 120

Adesivo epossidico in forma di gel, per il restauro di elementi strutturali in legno

MAPEWOOD GEL 120 si usa per il riempimento dei fori realizzati nelle strutture in legno da ripristinare come travi, pilastri, capriate e nella protesi allo scopo di ancorare barre o piastre di collegamento.

MAPEWOOD GEL 120 è un adesivo epossidico di consistenza gelatinosa, esente da solventi, costituito da due componenti predosati che devono essere miscelati tra loro prima dell'uso (componente A = resina e componente B = indurente).

MAPEWOOD GEL 120 si applica facilmente ed indurisce senza ritiro trasformandosi in un composto di eccezionale adesione, compatibilità con il legno e resistenza meccanica.



MAPEWOOD PASTE 140

Adesivo epossidico a consistenza tissotropica, per il restauro di elementi strutturali in legno

MAPEWOOD PASTE 140 si usa per il riempimento dei fori realizzati nell'elemento strutturale in legno da ripristinare come travi, pilastri e capriate e nella protesi allo scopo di effettuare incollaggi legno/legno oppure per ancorare la barra o piastra di collegamento in metallo o in materiale composito.

MAPEWOOD PASTE 140 è un adesivo epossidico a consistenza tissotropica, costituito da due componenti predosati che devono essere miscelati tra loro prima dell'uso (componente A = resina e componente B = indurente).

MAPEWOOD PASTE 140 si applica facilmente sia su superfici verticali sia orizzontali ed indurisce senza ritiro trasformandosi in un composto di eccezionale adesione, compatibilità con il legno e resistenza meccanica.