

**LEGNO** prefabbricato “*taylor made*”, la fase di concept progettuale non è disgiunta dalla produzione in fabbrica e dalla costruzione in cantiere

EUGENIA GASPARRI, ENRICO SERGIO MAZZUCHELLI



A sinistra, esempio di profilo fonoisolante in EPDM da applicare a listoni in legno. Evita la trasmissione delle vibrazioni tra il pavimento e il solaio. Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.

A destra, esempio di fresature per il posizionamento di connettori cilindrici (a sinistra) che saranno protetti con l'inserimento di apposito tappo in legno (a destra). Fonte: documentazione tecnica BigMat Pro.Ma.Italia.

#### MODULO PAROLE CHIAVE

MATERIALI DA COSTRUZIONE - LEGNO - **EDIFICI IN LEGNO** - PANNELLI CLT - FONDAZIONI - **RESISTENZA AL FUOCO** - TERMOIGROMETRIA - ACUSTICA - ANTISISMICA

A destra, fasi di produzione e montaggio di un edificio in CLT. Fonte: documentazione tecnica Stora Enso.

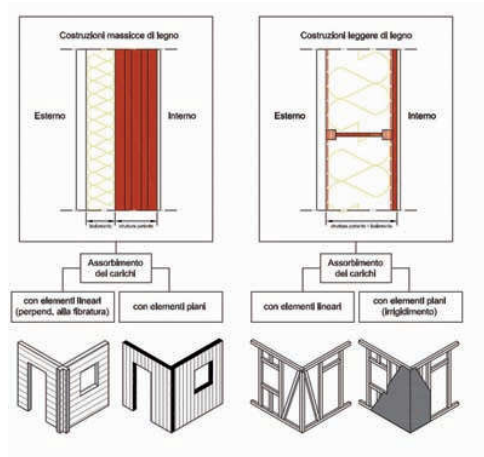
Sotto, trasporto di elementi in CLT. Se è prevista la consegna di pannelli a vista, questi arriveranno già avvolti in un rivestimento di plastica con blocco UV.

Fonte: documentazione tecnica Stora Enso.



Negli ultimi anni il mercato delle costruzioni in legno ha acquisito una rinnovata energia. In parallelo all'uso delle tecnologie più tradizionali che prevedono la realizzazione di una struttura a telaio con chiusure di tipo "leggero", si è recentemente registrata una notevole diffusione di nuove costruzioni realizzate con pannelli CLT (*Cross Laminated Timber*). Il ridotto peso, con i relativi vantaggi che ne derivano per quanto concerne trasporto e movimentazione in cantiere di lavorati e semilavorati, oltre che la propensione ad una facile lavorazione, rendono la scelta del legno vincente in svariati ambiti d'intervento, dalla nuova costruzione alla riqualificazione di edifici esistenti. Inoltre l'elevato grado di prefabbricazione, caratteristico delle tecnologie in legno, si riflette a livello di qualità operativa in una riduzione del numero delle lavorazioni in cantiere e in una maggiore rapidità di esecuzione delle stesse. Il fatto che gli elementi prodotti in stabilimento, "tagliati su misura" per ciascun progetto, siano pronti per il montaggio già in uscita dal sito di produzione, fa sì che la fase progettuale sia inevitabilmente e strettamente correlata a quelle di produzione e costruzione dell'opera in cantiere.

Ma quali sono le problematiche che richiedono una maggiore attenzione durante la fase di progettazione di un edificio in legno? Per poter rispondere correttamente a questa domanda è necessario operare una prima fondamentale distinzione tra le tipologie di costruzione in legno con chiusure di tipo "leggero" e quelle con chiusure di tipo "massiccio". Mentre in edifici del primo tipo l'isolante termico e la struttura sono "inglobati" in un unico strato funzionale, in edifici che prevedono l'impiego di pannelli in CLT, la struttura portante e gli elementi coibentanti sono invece due strati fisicamente ben distinti. Per la realizzazione della struttura portante vengono utilizzati nei due casi prodotti completamente diversi. Contrariamente alle costruzioni di tipo leggero, nelle quali i pannelli utilizzati per la realizzazione delle chiusure sono costituiti da elementi portanti di tipo lineare integrati con una pannellatura sottile verso il lato esterno e verso il lato interno, nelle costruzioni di tipo massiccio vengono impiegati elementi di tipo piano di grandi dimensioni che hanno in sé già una funzione portante. Inoltre, le costruzioni di legno di tipo massiccio, di norma, non necessitano di alcuna barriera/freno al vapore sul lato caldo delle chiusure (già a partire da una struttura a tre strati i pannelli in CLT sono in grado di garantire una buona tenuta all'aria) e possiedono una massa più elevata, con una conseguente maggiore capacità di accumulo di energia termica. Alcuni degli aspetti fondamentali da valutare per la progettazione e la realizzazione di un edificio in legno sono illustrati in questo articolo



Sistemi costruttivi in legno massicci e leggeri.

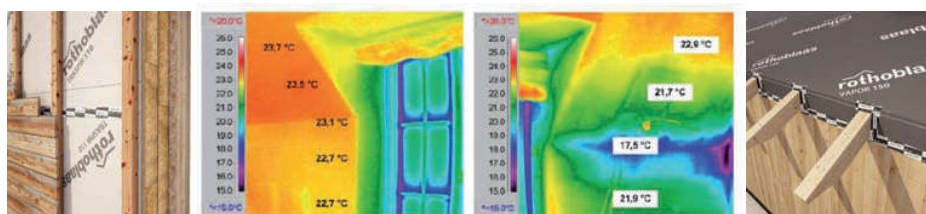
## Controllo igrometrico e tenuta all'aria (e al vento) dell'involucro: uno spazio ventilato, in prossimità delle testate delle travi, garantisce valori di umidità compatibili con le condizioni di corretto esercizio

Come noto, il controllo dell'umidità nei locali abitati è indispensabile per garantire:

- agibilità degli ambienti: in un ambiente devono essere garantite condizioni termoigrometriche ben definite e occorre perciò prevenire apporti incontrollati di umidità. Materiali da costruzione umidi possono favorire la proliferazione di funghi e di batteri, oltre che la produzione di sostanze maleodoranti (inoltre, mentre edifici realizzati con le tradizionali tecnologie a umido contengono ancora un elevato quantitativo di acqua di costruzione a completamento dei lavori, l'impiego di elementi in legno assemblati a secco diminuisce drasticamente i tempi tra la fine lavori e l'effettiva abitabilità degli edifici);
- efficace coibentazione termica: un'elevata umidità e/o la formazione di condensa all'interno delle chiusure accresce il fabbisogno energetico per il riscaldamento di un edificio, dal momento che si riduce la resistenza termica complessiva della parete esterna;
- durabilità: per preservare in buone condizioni di funzionamento una costruzione è fondamentale contenere gli effetti incontrollati dell'umidità. Le formazioni di condensa, superficiale ed interstiziale, sono tra le maggiori cause di degrado dei componenti edilizi.

Il legno è un materiale in grado di assorbire e cedere una certa quantità di vapore acqueo e dunque di scambiare umidità con l'ambiente che lo circonda (fungendo, entro certi limiti, da volano igrometrico). Esso è poco sensibile alle variazioni di umidità con frequenza elevata (giornaliera), mentre più significativi sono gli effetti delle variazioni a bassa frequenza (mensili e stagionali), sia a livello dimensionale, sia per quanto concerne le proprietà chimico-fisiche. Sebbene il legno necessiti di un minimo livello di umidità (in particolare nel caso di elementi a vista), esso va tuttavia protetto dagli eccessi: la formazione di condensa in soluzioni di chiusura può comportare, ad esempio, la riduzione della resistenza termica e dell'efficacia dello strato di coibentazione, oltre che creare condizioni potenzialmente critiche e favorevoli al degrado degli elementi lignei stessi. In un quadro generalmente corretto, situazioni locali di ristagno di umidità, per quanto limitate, possono infatti innescare processi di degrado anche estesi.

Il pericolo maggiore per il degrado di elementi lignei è legato all'umidità che può essere alimentata da acqua piovana o da condensato, oppure da elevati valori di umidità relativa dell'aria negli ambienti in cui gli elementi sono installati. Il primo caso può derivare dall'esposizione alle acque meteoriche o dal formarsi di condensa che il sistema non riesce a smaltire. Un classico esempio nelle costruzioni miste in legno, calcestruzzo e laterizio è quello delle testate di travi in legno alloggiato all'interno di murature che fungono da sistemi di adduzione di umidità. La buona tecnica in questo caso impone che nell'intorno di



Da sinistra, esempio di posa di teli di tenuta al vento e di protezione dell'isolante (lato freddo della parete).

Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.

Effetto del vento: rappresentazione termografica di un giunto tra tetto e parete ad una temperatura esterna di +3°C ed una temperatura interna di +24 °C (a sinistra in assenza di vento, a destra con vento di velocità 7 m/s). Fonte: documentazione tecnica Stora Enso.

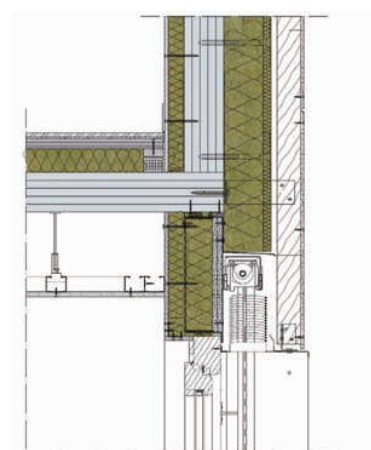
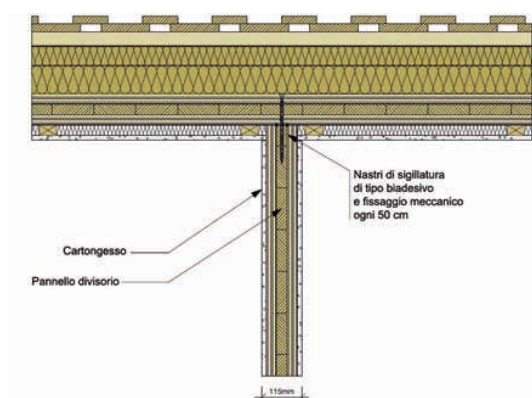
Esempio di telo di freno al vapore posato sul lato caldo di una copertura in legno. Esso garantisce la tenuta all'aria dell'involucro e l'impermeabilità all'acqua durante la fase di cantiere.



A sinistra, esempio di raccordo tra chiusura esterna e partizione interna semplice (sezione orizzontale).

Fonte: documentazione tecnica Stora Enso.

A destra, esempio di dettaglio serramento – chiusura con integrazione di sistema di schermatura esterno (sezione verticale). Fonte: documentazione tecnica Rockwool Italia.



ciascuna testata venga creato uno spazio ventilato in cui l'umidità possa mantenersi a valori compatibili con le condizioni di corretto esercizio per il legno (posto comunque in opera trattato con un idoneo preservante), senza che lo stesso venga a diretto contatto con gli elementi in laterizio o calcestruzzo della muratura. Se non correttamente realizzati, i sistemi di protezione dalle acque meteoriche degli elementi lignei possono essi stessi generare problemi. In genere vanno evitate le soluzioni di continuità delle barriere protettive ed il contatto diretto tra rivestimento e legno protetto. Tale contatto può infatti costituire una zona preferenziale per il formarsi di condensa (in caso di rivestimenti metallici) o una via di accesso per diffusione (ad esempio con pannelli di rivestimento in legno o perlinature), con tutte le conseguenze negative del caso.

Di non minore importanza è la protezione dalla pioggia durante la realizzazione dell'edificio, così come l'impiego di materiali isolanti da inserire in intercapedine ben asciutti. L'eventuale acqua presente deve avere la possibilità di evaporare: se ciò è reso impossibile per un lungo periodo di tempo (ad esempio per la presenza di strati impermeabili), è altamente probabile la formazione di muffe e il degrado degli elementi lignei impiegati.

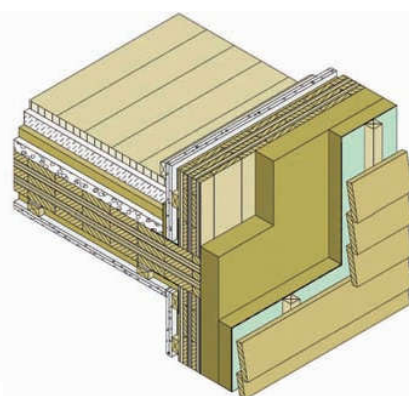
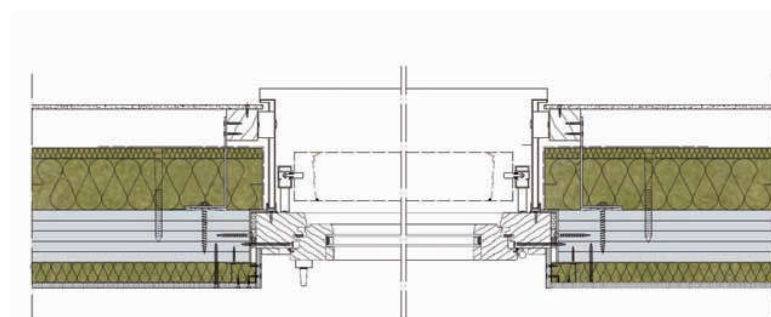
Al fine di evitare problemi di condensazione interstiziale è indispensabile che l'involucro sia in grado di garantire una buona tenuta all'aria e al vento. Infatti, in una struttura non ermetica, le correnti d'aria umida passanti attraverso pareti, solai e coperture possono generare quantità di condensa considerevolmente maggiore rispetto a quelle che si potrebbero creare ad opera della sola diffusione di vapore (Il vapore acqueo si muove analogamente al flusso di calore, cioè seguendo lo scarto termico, dalle parti più calde a quelle più fredde oppure dalle parti più umide a quelle più secche. Questo movimento avviene nell'aria, ma anche attraverso materiali porosi. Materiali perfettamente ermetici alla diffusione del vapore sono i vetri e i metalli, mentre gli altri materiali hanno un certo grado di permeabilità, pur potendo presentare valori di resistenza alla diffusione del vapore molto elevati. Per poter quantificare la traspirabilità di uno strato di materiale non è sufficiente indicare il valore della sua resistenza alla diffusione di vapore, ma è necessario conoscere anche il suo spessore). Una efficace tenuta all'aria di una chiusura esterna si può

A sinistra, esempio di dettaglio serramento – chiusura verticale (sezione orizzontale).

Fonte: documentazione tecnica Rockwool Italia.

A destra, i giunti di contatto tra pareti esterne e solaio devono essere a tenuta d'aria.

Fonte: documentazione tecnica StoraEnso.





A sinistra, dettaglio degli elementi di giunzione tra pareti in legno e fondazioni.

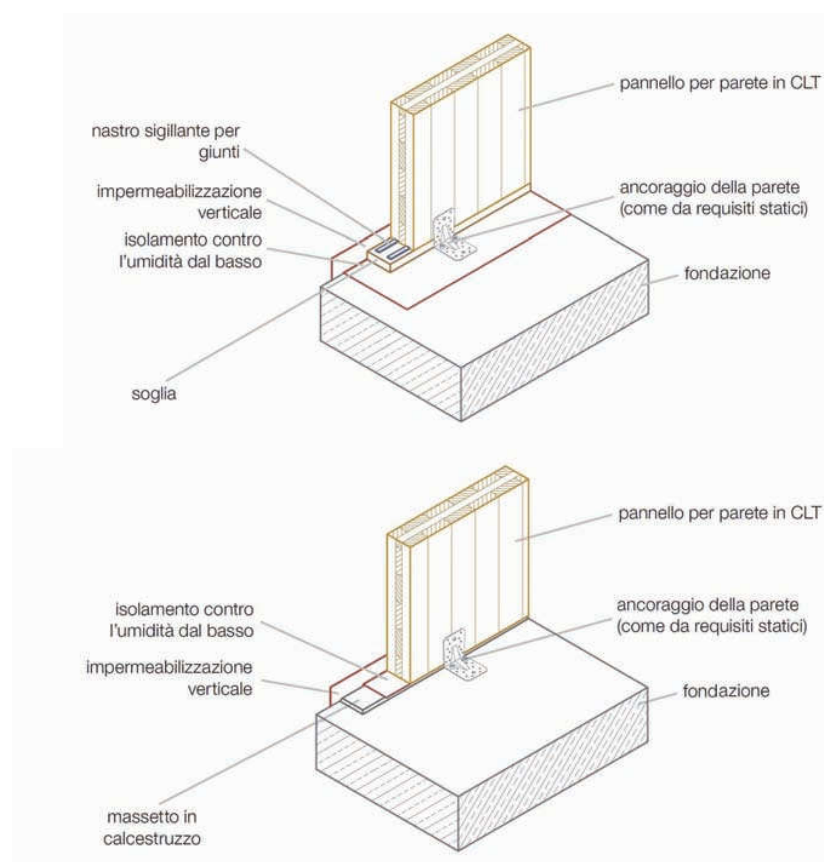
Fonte: Marinopavone

A destra, esempio di piastra in acciaio per il fissaggio di un pannello in legno.

Fonte: Woodbeton

garantire realizzando due strati ermetici al passaggio d'aria: uno strato interno di tenuta all'aria (e/o freno al vapore) e uno strato esterno di barriera al vento (ad esempio realizzabile con un telo impermeabile ad alta traspirabilità). In mancanza di tale requisito è possibile la formazione di condensato nel pacchetto di chiusura, con conseguente riduzione del potere coibentante che si può riflettere anche in un abbassamento della temperatura superficiale interna della chiusura. I rischi connessi sono legati a: degrado dei materiali da costruzione, formazione di muffe, correnti d'aria, maggiore consumo energetico, etc. L'ermeticità all'aria e al vento dell'involucro di un edificio, come anche di sue singole parti (pannelli per pareti, solai e tetto), rappresenta pertanto un requisito essenziale che influenza il mantenimento delle condizioni di benessere interne, le proprietà acustiche, l'integrità della struttura, il ricambio d'aria e il bilancio energetico di un edificio.

A differenza delle soluzioni di involucro leggero con struttura a telaio, che necessitano di uno strato ermetico all'aria (con funzione anche di freno al vapore) sul lato caldo dell'isolante, la particolare struttura a



Esempi di soluzioni del dettaglio fondazione – parete in legno. Nella soluzione in basso la parete è posata su un elemento ligneo di bassa sensibilità all'umidità.

Fonte: documentazione tecnica Stora Enso.

Esempi di dettagli del nodo fondazione – chiusura verticale.

Fonte: documentazione tecnica StoraEnso.



A sinistra, dettaglio di un elemento angolare per il collegamento a taglio della parete in legno alla sottostruttura in cemento armato.

Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.

A destra, dettaglio di un elemento angolare per il collegamento a trazione della parete in legno alla sottostruttura in cemento armato. Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.

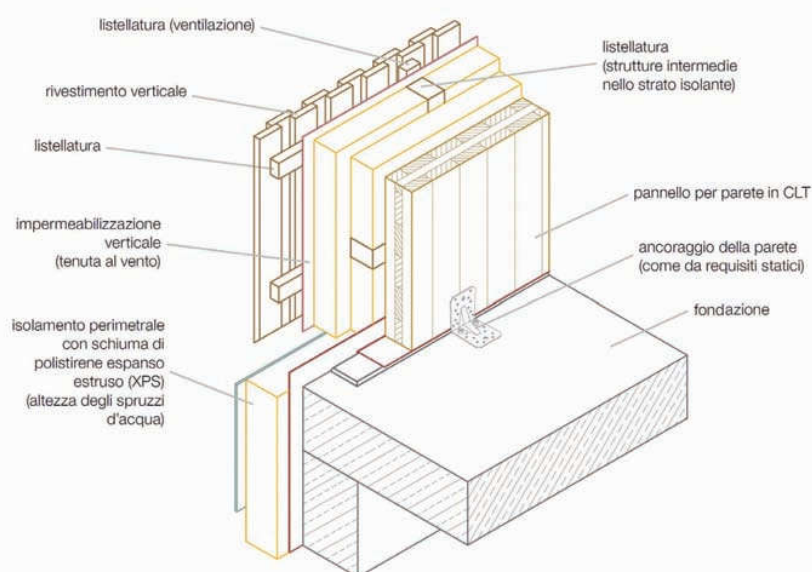
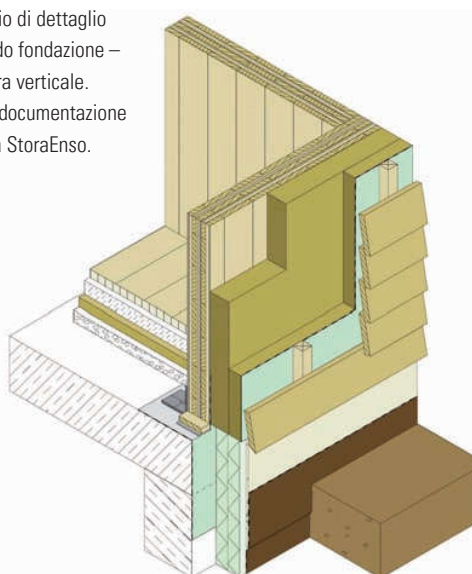
pannelli monostrato degli elementi in CLT crea uno strato di per sé ermetico che, di norma, non richiede l'applicazione di alcuno strato aggiuntivo. Ciò ha una ripercussione positiva sui costi per la realizzazione della chiusura verticale e, contemporaneamente, riduce il rischio di errori in fase di costruzione, nonché i tempi di realizzazione e di messa in opera.

L'impiego di pannelli in CLT di grande formato (fino a 2,95 m x 16 m) limita inoltre il numero di giunti tra elementi e, di conseguenza, anche dei punti critici da controllare (per isolare i giunti in maniera semplice ed efficace è sufficiente l'uso di nastri coprigiunto comprimibili, mentre meno frequente è l'uso di schiume sigillanti elastomeriche e di nastri adesivi o di guarnizioni in gomma). Un fattore altrettanto importante da tenere in grande considerazione durante la progettazione dell'involucro di un edificio (specialmente se si parla di tecnologie "leggere" come quelle in legno) è la sua ermeticità al vento. L'assenza di tale requisito può generare fenomeni analoghi alla mancanza di ermeticità all'aria. Lo strato di isolamento al vento, posto sul lato esterno dell'edificio, impedisce all'aria di penetrare all'interno degli elementi costituenti le chiusure, proteggendo lo strato coibentante e preservando le caratteristiche isolanti degli stessi.

Di seguito, a titolo esemplificativo, alcune delle soluzioni possibili per garantire la tenuta all'aria di alcune tipologie di involucro.

Esempio di dettaglio del nodo fondazione – chiusura verticale.

Fonte: documentazione tecnica StoraEnso.



Fondazioni senza dislivelli e irregolarità per accogliere le pareti prefabbricate che non tollerano errori in fasi di posa. E che devono essere adeguatamente protette dall'umidità di risalita

**L**e chiusure verticali di un edificio in legno sono rese solidali con gli elementi di fondazione (di norma costituiti da travi rovesce o platee realizzate in calcestruzzo armato) al fine di contrastare l'effetto di azioni orizzontali (vento e sisma) che possono generare forze di scorrimento e forze di sollevamento degli stessi rispetto alla fondazione.

Il montaggio a secco di un edificio in legno impone un'accurata fase di realizzazione delle fondazioni, che dovranno perciò risultare perfettamente orizzontali e senza dislivelli e irregolarità. Infatti, mentre nella costruzione di chiusure in muratura di tipo tradizionale, che vengono realizzate direttamente in cantiere, le eventuali pendenze ed irregolarità del piano di appoggio possono essere facilmente compensate, ad esempio aumentando o diminuendo lo spessore della malta di allettamento, nelle costruzioni prefabbricate in legno le pareti giungono in cantiere già finite, complete di infissi, isolante termico, cartongessi, predisposizioni impiantistiche, etc., e non tollerano errori ed approssimazioni in fase di posa. Al termine della costruzione degli elementi di fondazione e prima della messa in opera delle pareti, è pertanto necessario verificare quote e planarità della superficie su cui le stesse andranno posizionate.

Come si è già anticipato, il legno assorbe facilmente l'acqua ed è, inoltre, un materiale biodegradabile. Tali caratteristiche fanno sì che il giunto fondazione-parete debba essere necessariamente in grado di garantire la protezione degli elementi lignei dall'umidità di risalita. A tal fine si possono adottare alcuni semplici accorgimenti costruttivi quali, ad esempio, la realizzazione lungo il perimetro dell'edificio di un marciapiede provvisto di canale di raccolta e smaltimento delle acque piovane (in questo caso, la struttura in legno potrà anche essere sopraelevata di alcune decine di centimetri rispetto al piano esterno del marciapiede). Per evitare infiltrazioni nelle zone in cui è frequente l'accumulo di neve, è preferibile rialzare di circa 30-40 centimetri il piano di calpestio interno rispetto a quello esterno. Nel caso di isolamento esterno a cappotto è consigliabile inoltre, per i primi 30-40 centimetri



Solaio misto acciaio – legno. Esempio di nastro in schiuma PUR. Precompresso, si espande dopo la posa, garantisce la tenuta all'aria ed è resistente alla pioggia battente.

Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.



Esempio di spinotti autoforanti per giunzioni legno/acciaio con piastre a scomparsa.

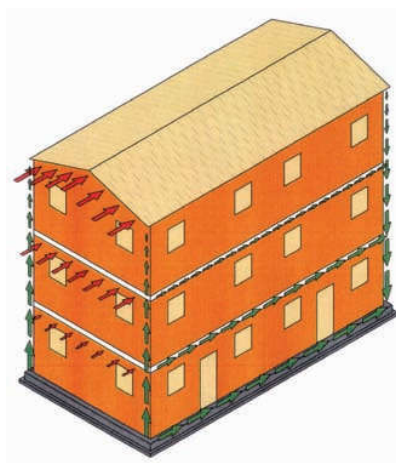
Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.





Sistemi di connessioni di carpenteria con elementi di protezione al fuoco.

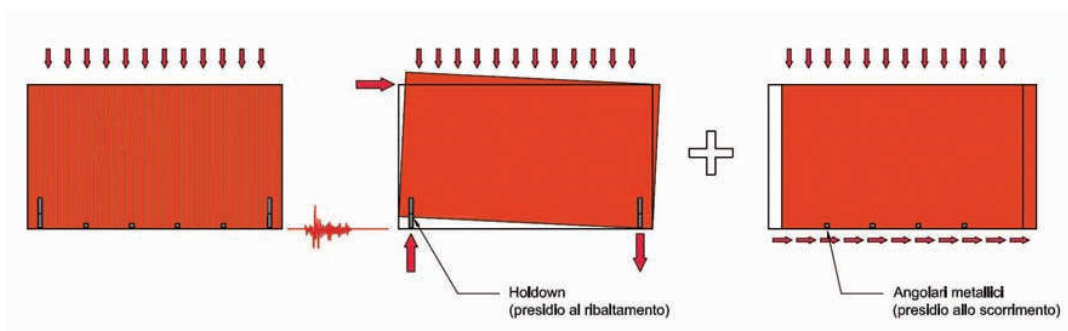
da terra (porzione maggiormente colpita dal rimbalzo delle gocce di pioggia, nonché maggiormente soggetta all'usura dell'intonaco esterno), l'impiego di isolanti non sensibili all'azione dell'acqua (ad esempio pannelli in polistirene estruso).



Più semplicemente, in corrispondenza di chiusure verticali e divisori interni, è sempre opportuno interporre tra parete in legno e fondazione una striscia di materiale impermeabile, avente la funzione di bloccare la risalita dell'umidità e di evitare il contatto diretto tra elementi lignei e fondazioni in calcestruzzo armato. Il collegamento meccanico tra basamento ed elementi in legno avviene poi tramite l'impiego di apposite piastre angolari in acciaio in grado di trasmettere gli sforzi orizzontali e verticali, collegate agli elementi lignei con chiodi o viti, ed alle fondazioni in calcestruzzo con barre filettate e/o tasselli chimici o meccanici.

Nelle immagini sono illustrate alcune delle possibili soluzioni di raccordo tra elemento di fondazione e pareti in legno.

Forze sismiche agenti su un edificio in CLT



Effetti dell'azione sismica agenti su una parete e diversa funzione degli elementi di collegamento.



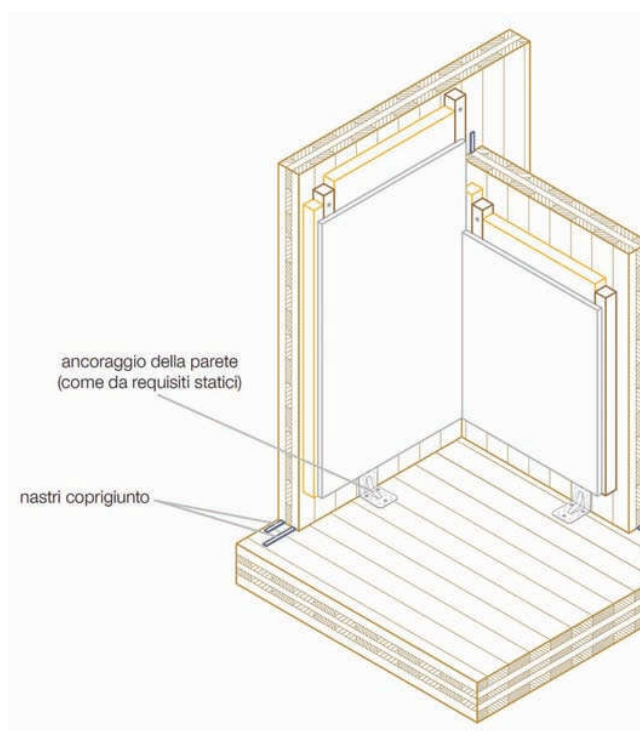


Esempio di striscia fonoisolante in EPDM utilizzabile per i più frequenti carichi lineari presenti nelle strutture in legno (è comunque consigliato un calcolo specifico per analizzare il profilo più idoneo in base al carico trasmesso dal solaio alla parete).

Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.

## Le connessioni tra elementi in legno: comportamento al fuoco e al sisma

Le connessioni nelle costruzioni in legno, così come in edifici con struttura ibrida (legno-acciaio e legno-calcestruzzo armato) svolgono un ruolo essenziale nel garantire resistenza, rigidità, stabilità e duttilità alla struttura di un edificio. In fase di esercizio, gli elementi lignei con funzione strutturale risultano soggetti a sforzi di vario tipo (compressione, trazione, flessione, taglio, ecc.) di cui occorre tenere conto in fase di progettazione e dimensionamento delle giunzioni. Queste infatti, una volta in opera, devono essere in grado di resistere a tutti gli sforzi che possono sollecitarle e di conservare tale capacità nel tempo. L'interruzione della continuità degli elementi in legno dovuta alla presenza di collegamenti può comportare una riduzione della resistenza complessiva e della rigidità della struttura (se non correttamente progettata) che può implicare, di riflesso, un incremento della sezione degli elementi in legno da assemblare.



Dettaglio di interfaccia tra partizioni interne verticali ed orizzontali. Qualora vi sia l'esigenza di "chiudere" ermeticamente all'aria i singoli ambienti di un edificio si dovranno inserire nastri sigillanti per giunti tra un pannello e l'altro. Si noti come l'elemento di CLT della partizione interna non si interrompa in corrispondenza della controparete ma invece prosegua fino ad attestarsi contro l'altro pannello in CLT.

Fonte: documentazione tecnica StoraEnso.



Esempi di striscia fonoisolante ad alte prestazioni. Il prodotto è specifico per differenti gamme di carico ed è univocamente identificato dalla sua colorazione.

Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.

Indagini condotte dopo eventi sismici o eventi atmosferici di elevata intensità hanno evidenziato come cedimenti strutturali si verificano spesso a causa di connessioni mal progettate o realizzate. Nella tecnica costruttiva delle strutture in legno si distinguono connessioni meccaniche e di carpenteria. La scelta del tipo di connessione segue le regole di buona progettazione, che riguardano la realizzazione di giunzioni duttili, soprattutto nelle strutture di edifici situati in zona sismica.

Particolare attenzione va prestata alla problematica di resistenza al fuoco. Molto spesso sono i collegamenti realizzati con elementi metallici (o le parti della struttura realizzate con elementi metallici) a rappresentare il vero punto di debolezza di una struttura lignea esposta al fuoco.

La parte metallica costituisce infatti un elemento di trasmissione di calore anche all'interno della massa lignea e può presentare deformazioni a caldo incompatibili con la statica della struttura (elementi di controvento, elementi tesi in genere, etc.), oltre che una repentina caduta delle proprietà meccaniche alle alte temperature.

Le cosiddette unioni non protette, purché a comportamento statico globalmente simmetrico, sono considerate dalla Normativa Europea come soddisfacenti la classe di resistenza R15.

Un valore più elevato di resistenza al fuoco per un collegamento può essere ottenuto, in genere, con una adeguata progettazione del medesimo o mediante apposite protezioni da applicare in opera: in caso di collegamenti con chiodi, viti o perni, ad esempio aumentando gli spessori degli elementi lignei e la distanza dal bordo in funzione della velocità di carbonizzazione (spessore minimo dell'elemento ligneo e distanza minima da bordi ed estremità devono pertanto essere garantiti anche al tempo richiesto di resistenza al fuoco), oppure proteggendo completamente il collegamento con un "copriferro" di legno o altro materiale (ad esempio tappi in legno incollati, pannelli in legno, cartongesso o lastre in calcio-silicato), il quale dovrà avere spessore tale da garantire il tempo minimo di protezione al fuoco richiesto in sede di progetto, tenuto conto della resistenza minima già garantita.

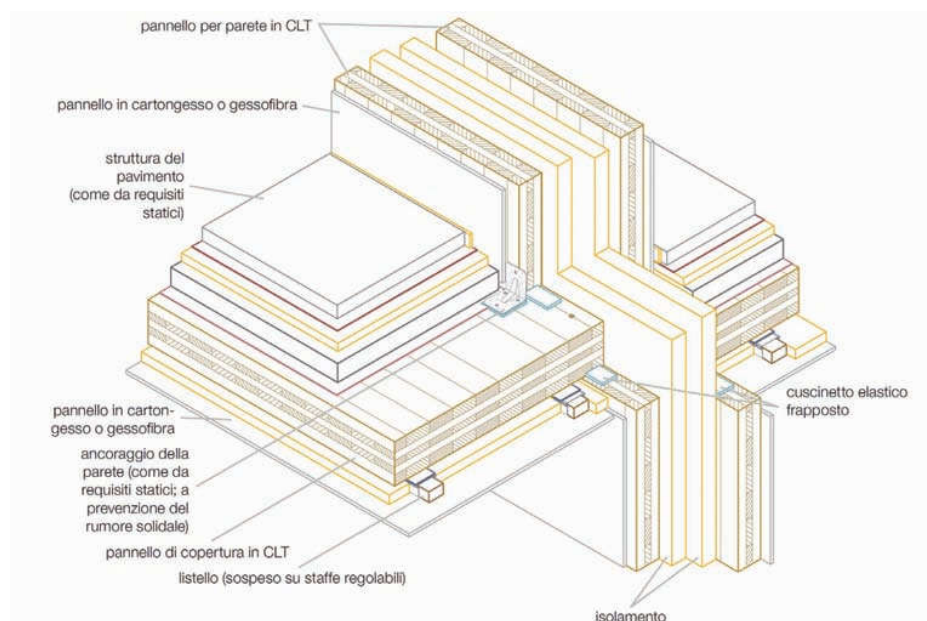
Le regole per la protezione delle piastre interne in acciaio sono fornite al punto 6.2.1.3 dell'Eurocodice EN 1995-1-2. Le piastre di acciaio più strette dell'elemento di legno possono essere considerate come protette nei seguenti casi:

- per piastre con uno spessore non maggiore di 3 mm dove la profondità della fuga  $d_g$  (gap depth) è maggiore di 20 mm per una resistenza al fuoco di 30 minuti, dove la profondità della fuga  $d_g$  (gap depth) è maggiore di 60 mm per una resistenza al fuoco di 60 minuti;



Esempi di applicazione di nastro monoadesivo acrilico per uso esterno per la sigillatura dei giunti parete-solaio.

Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.



Raccordo parete del piano inferiore-solaio-parete del piano superiore.

Fonte: documentazione tecnica StoraEnso

- per unioni con strisce incollate di legno o pannelli a base di legno protettivi, in cui la profondità della striscia incollata, dg, oppure lo spessore del pannello, hp (fire protective panel thickness), è maggiore di 10 mm per una resistenza al fuoco di 30 minuti, se maggiore di 30 mm per una resistenza al fuoco di 60 minuti.

La protezione delle unioni nei confronti dell'incendio è quindi essenziale per garantire all'intera struttura quella classe di resistenza al fuoco che il semplice elemento ligneo può offrire. La realizzazione di giunzioni a scomparsa, se progettate correttamente, garantisce una buona resistenza al fuoco in quanto gli elementi metallici sono protetti dal legno che li circonda in quanto, essendo inserite nel legno, non cedono immediatamente sotto l'azione delle fiamme. Si segnala infine che l'impiego di vernici intumescenti, a differenza delle strutture di tipo metallico, è rivolto principalmente alla riduzione della reazione al fuoco dell'elemento ligneo.

Per quanto concerne invece il comportamento al sisma degli elementi di connessione è opportuno fare alcune considerazioni preliminari. L'evoluzione della tecnica delle costruzioni riguardante gli edifici in CLT e la ricerca sul comportamento statico e sismico condotta in Europa negli ultimi anni hanno permesso di stabilire delle regole di progettazione in campo statico e dinamico. Dal momento che questi edifici hanno una massa molto ridotta rispetto ad edifici di analoghe dimensioni realizzati in calcestruzzo armato, solitamente l'azione del vento è dello stesso ordine di grandezza di quella sismica e non è pertanto trascurabile. Anche in zone a bassa sismicità, la progettazione per azioni orizzontali è quindi estremamente importante.

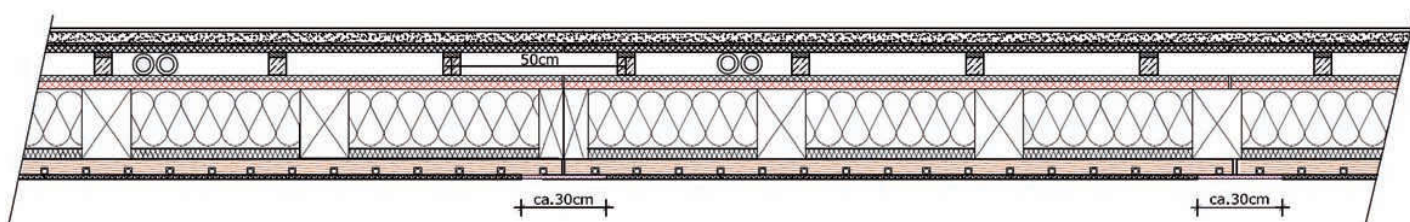
Un edificio realizzato con elementi in CLT è sostanzialmente una struttura scatolare in cui solai e pareti sono costituiti da diaframmi composti da pannelli in legno massiccio connessi tra loro mediante sistemi di collegamento meccanici. Considerando il comportamento scatolare, quando l'edificio è sottoposto all'azione di un sisma l'energia accumulata viene trasferita dagli orizzontamenti, ipotizzati rigidi nel proprio piano, alle pareti di piano in funzione della propria rigidità e da queste ai piani sottostanti fino ad arrivare alle fondazioni (Ovviamente, ipotizzando i diaframmi rigidi, il taglio sismico di piano andrà ripartito tra le varie pareti in funzione della propria rigidità, considerando gli effetti torsionali

calcolati sommando all'eccentricità effettiva (tra il baricentro delle masse ed il baricentro delle rigidità) un'eccentricità accidentale, come prescritto dalla normativa, ottenuta spostando il centro di massa di ogni piano in ogni direzione, considerata una distanza pari a circa  $\pm 5\%$  della dimensione massima del piano in direzione perpendicolare all'azione sismica). Le pareti saranno quindi sollecitate da azioni orizzontali nel proprio piano e soggette, per effetto di queste ultime, ad azioni di scorrimento e sollevamento per le quali andranno verificati i corrispondenti elementi di connessione.

La deformazione di un sistema di chiusura realizzato con pannelli di legno CLT collegato con unioni meccaniche è causata principalmente dalla deformazione delle unioni meccaniche (angolari e piastre hold-down) che può essere dell'ordine di 1 cm, mentre la deformazione del pannello resta inferiore al millimetro, quindi ai fini di calcolo si può schematizzare il pannello come infinitamente rigido nel proprio piano e collegato con unioni meccaniche deformabili.

La rigidità di ciascuna parete può essere considerata proporzionale alla lunghezza della parete stessa solo se le connessioni, sia quelle verticali fra i singoli pannelli di cui è composta la parete, sia quelle orizzontali tra parete e solai, sono distribuite uniformemente lungo tutte le pareti di ciascun piano.

Le sollecitazioni derivanti dalle azioni sismiche agenti sui vari elementi strutturali possono essere calcolate per edifici rispondenti ai criteri di regolarità strutturale in pianta ed elevazione indicati dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 (Per fare questo è necessario procedere secondo un'analisi statica lineare considerando l'azione sismica agente nelle due direzioni principali ortogonali e assumendo il primo modo di vibrare dell'edificio come una distribuzione di spostamenti che aumentano in modo lineare al crescere dell'altezza dell'edificio). Diversamente, per edifici non rispondenti ai criteri di regolarità strutturale indicati dalle norme, è necessario procedere con una analisi dinamica, e quindi l'edificio dovrà essere modellato nella sua interezza, schematizzando sia le pareti a pannelli che le unioni meccaniche come diaframmi rigidi. E' possibile effettuare una modellazione affidabile in campo lineare con appositi software di calcolo strutturale agli elementi finiti disponibili in commercio, schematizzando le pareti come elementi "shell" (a cui vanno opportunamente assegnate le caratteristiche di rigidità a taglio e a compressione equivalente dei pannelli a strati incrociati) e le connessioni meccaniche mediante elementi biella di rigidità equivalente. Per garantire il comportamento scatolare è necessario che non intervengano prima cedimenti per la perdita di geometria locale o globale, cioè la "scatola strutturale" non si apra ma resti sempre connessa. A tal fine, alcune connessioni tra i vari elementi strutturali devono possedere un'adeguata riserva di resistenza in modo da rimanere sempre in campo elastico-lineare evitando così eccessive deformazioni. Ciò al fine di consentire, in accordo con il criterio di gerarchia delle resistenze, agli elementi ed alle connessioni un comportamento duttile, finalizzato a dissipare l'energia trasferita dal sisma. In questa tipologia di connessione rientrano: le connessioni tra i pannelli del solaio (in modo da assicurare la quasi assenza di scorrimento relativo e garantire l'ipotesi di diaframma rigido), le connessioni tra il solaio e la sottostante parete (in modo che ad ogni piano ci sia un diaframma rigido al quale le sottostanti pareti risultano rigidamente collegate e che quindi faccia da cintura di piano), le connessioni verticali tra le pareti che si intersecano tra loro, in particolare



Esempio di solaio con struttura in legno e pavimento galleggiante su supporti elastomerici discreti. Si noti l'intercapedine per l'alloggiamento delle reti impiantistiche.





Esempio di posa di elementi elastomerici discreti per la formazione di pavimentazione galleggiante.  
Fonte: [www.cdm.eu](http://www.cdm.eu)

agli spigoli dell'edificio (in modo che la stabilità delle stesse pareti e dell'intera scatola strutturale risulti sempre garantita).

Gli elementi che invece sono utilizzati per la dissipazione di energia attraverso un comportamento duttile (e che quindi vanno progettati garantendo sufficienti riserve di resistenza) per le relative azioni di progetto sono: le connessioni verticali tra i pannelli-parete, le connessioni a taglio alla base delle pareti, le connessioni hold-down all'inizio ed alla fine di ciascuna parete ed in corrispondenza delle aperture.

Allineandosi al criterio di gerarchia delle resistenze è necessario che gli elementi siano progettati per resistere alle azioni sismiche di competenza, senza effettuare sovradimensionamenti. Risulta infatti di notevole importanza che la resistenza alle azioni orizzontali sia maggiore ai piani bassi e diminuisca ai piani alti in proporzione alla variazione in altezza del taglio di piano. Si deve quindi evitare il sovradimensionamento delle unioni o, almeno, è opportuno adottare un fattore di sovradimensionamento unico per tutti i piani, cercando di ottenere la plasticizzazione contemporanea di tutte le unioni meccaniche. Ciò è fondamentale per garantire il livello di duttilità e di dissipazione dell'intero organismo strutturale. In relazione a questo è opportuno osservare come la resistenza delle connessioni con mezzi metallici di unione a gambo cilindrico (chiodi, spinotti, bulloni, viti) risenta fortemente dell'effetto della laminazione incrociata. Recenti ricerche hanno dimostrato come le tavole incollate perpendicolarmente alla direzione dello sforzo riducano notevolmente il fenomeno dello splitting, cioè la rottura prematura per divaricazione delle fibre, e che pertanto la resistenza a rottura possa risultare maggiore del 50% rispetto a quella calcolata secondo la teoria classica delle connessioni meccaniche descritta dall'Eurocodice 5, qualora la connessione interessi una parte di pannello in cui è presente l'effetto della laminazione incrociata. In alternativa è sempre possibile progettare nell'ipotesi di comportamento scarsamente dissipativo, assumendo per il fattore di struttura il valore di 1,5 senza considerare alcun comportamento duttile. Tuttavia, anche in questo caso, è opportuno rispettare i criteri di gerarchia delle resistenze espressi sul sovradimensionamento di alcune tipologie di collegamento.

La duttilità nei giunti è quindi un elemento molto favorevole che le strutture di legno possono sfruttare in caso di sisma. I giunti realizzati con connettori metallici presentano uno spiccato comportamento plastico, a patto che vengano rispettate le prescrizioni riguardanti gli interassi fra i connettori e le distanze dai bordi e dalle estremità degli elementi lignei. Questo è dovuto a due fenomeni che avvengono contemporaneamente: il rifollamento del legno e la plasticizzazione dei connettori metallici. La combinazione di questi due comportamenti permette, soprattutto nel caso di applicazione di un carico ciclico con una rapida inversione della forza applicata (come nel caso dell'azione sismica), di raggiungere quel comportamento duttile e dissipativo che è indispensabile per la resistenza all'azione sismica.

## Una buona massa superficiale garantita dai pannelli CLT e il sistema massa aria massa per le pareti leggere pluristrato garantiscono adeguate prestazioni acustiche

La scelta e la definizione di soluzioni per chiusure e partizioni ad elevate prestazioni acustiche non è di per sé sufficiente a garantire il pieno rispetto dei requisiti acustici di un edificio così come richiesto dal DPCM 5/12/1997. Molteplici sono gli aspetti da considerare, dalla presenza di superfici finestate (con relativa interfaccia con la parete di chiusura), ad elementi impiantistici (scatole elettriche, corpi illuminanti, aperture di ventilazione, etc.), che possono incidere, in modo anche significativo, sul raggiungimento delle prestazioni desiderate. Mentre le chiusure realizzate con pannelli in CLT sono dotate di una buona massa superficiale (in questo caso i punti critici sotto l'aspetto acustico sono le giunzioni tra pannelli, in cui è necessario inserire materiali e nastri sigillanti comprimibili), per le pareti leggere pluristrato, non è la massa della chiusura ad avere un peso fondamentale sul valore del potere fonoisolante, bensì il funzionamento del sistema massa-aria-massa. La prestazione della chiusura è legata infatti ad un meccanismo dinamico basato sul principio della risonanza: la parete si può paragonare ad un sistema meccanico costituito da due masse collegate tra loro da una molla che, se sottoposto ad un'eccitazione con frequenza pari alla propria, entra in risonanza. Quando la frequenza principale dell'onda sonora incidente è superiore alla frequenza di risonanza del sistema, l'elasticità della "molla d'aria" smorza le vibrazioni da una massa all'altra ed il potere fonoisolante ne risulta sensibilmente incrementato. Per progettare dal punto di vista acustico una parete leggera occorre considerare quindi tre parametri fondamentali: spessore e tipologia di lastre di rivestimento (che possono essere applicate in uno o più strati accoppiati), spessore dell'intercapedine (variabile in funzione del tipo di orditura metallica di sostegno) e tipo di coibentazione presente nell'intercapedine stessa. La scelta del materiale isolante da inserire in una soluzione di chiusura o partizione interna è pertanto uno dei fattori che incide maggiormente sul raggiungimento di adeguati livelli di comfort acustico. Gli isolanti di tipo fibroso (lana di roccia, fibra di legno, etc.) hanno un buon comportamento fonoassorbente, che dipende dalla frequenza del suono: sovrapponendo due strati fibrosi di diversa densità è possibile ottenere un buon comportamento acustico a diverse frequenze.

Particolare attenzione va prestata ai punti di interfaccia tra più elementi che separano diversi ambienti: i test di laboratorio non considerano infatti la trasmissione laterale del suono (flanking transmission) ed è pertanto consigliabile individuare in sede di progetto delle soluzioni in grado di garantire prestazioni superiori a quelle minime richieste. Soluzioni di dettaglio perimetrale non efficaci sotto questo aspetto possono ridurre significativamente le prestazioni in opera di partizioni potenzialmente in grado di offrire un buon comportamento acustico. A tal fine è opportuno inserire strati intermedi resilienti fra elementi costruttivi di pareti e solai.

Onde migliorare le caratteristiche generali di comportamento acustico e di ridurre la trasmissione di vibrazioni è opportuno che tra gli elementi strutturali e gli altri elementi costituenti l'edificio vengano inseriti appositi cuscinetti di materiale elastico, in grado di ridurre la propagazione di rumori e vibrazioni.

Le prestazioni acustiche di un tipico solaio in legno dipendono fondamentalmente dalla scelta della corretta stratigrafia del pacchetto, dalle proprietà dei materiali, dallo spessore e dalla modalità di collegamento tra gli strati, oltre che dei dettagli costruttivi. Per la riduzione della trasmissione sonora da calpestio vengono comunemente utilizzate le cosiddette pavimentazioni galleggianti. Tale soluzione consiste in una massa, cioè il massetto di alletta-



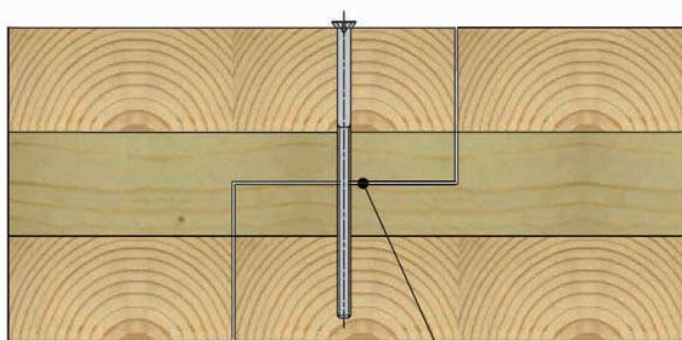
Esempio di soluzione tradizionale di isolamento acustico ai rumori da calpestio: al di sotto del massetto di pavimento è posizionata una membrana acustica in materiale accoppiato bitume/agugliato sintetico. Fonte: documentazione tecnica Rotho Blaas.



Immagine della  
prova a combustione  
effettuata sulla casa  
Sofie Fonte: [www.  
progettosofie.it](http://www.progettosofie.it)

mento (a secco o a umido) più la soprastante pavimentazione, separata dal solaio attraverso uno strato continuo di materiale resiliente. Fisicamente la struttura è analoga a un sistema smorzato massa-molla (Il sistema smorzato massa-molla, grazie alla sua capacità di attenuare la trasmissione vibratoria, può essere applicato anche per incrementare il potere fonoisolante delle partizioni verticali. Lo stesso principio può essere sfruttato per migliorare l'isolamento acustico anche in copertura, ad esempio posizionando sopra un isolante fibroso un secondo tavolato che faccia da massa (tetto a doppio assito) e sopra il quale sarà poi posato il manto di copertura, oppure in soluzioni di pavimento galleggiante per ridurre la trasmissione dei rumori da calpestio), caratterizzato da una propria frequenza di risonanza. Affinché un pavimento galleggiante possa offrire un buon isolamento è necessario che la sua frequenza di risonanza sia bassa, che la massa galleggiante sia molto pesante (cosa che tuttavia mal si concilia con le strutture in legno, il cui pregio è la leggerezza e la posa a secco) e che sia ridotta la costante di smorzamento del sistema, in modo che il fenomeno vibratorio tenda a dissiparsi velocemente al suo interno anziché trasmettersi alle strutture di contorno. Soluzioni tradizionali con riempimento dello strato di distribuzione impiantistica con graniglia di marmo e materassino elastomerico soprastante presentano una prestazione, per quanto concerne l'isolamento acustico da rumore aereo, di medio livello. Di contro la soluzione non è altrettanto performante per quanto concerne l'indice di riduzione del rumore da calpestio.

L'idea base di alcune tra le soluzioni più innovative è quella di sostituire il pacchetto di finitura del solaio con un sistema di bassa rigidità dinamica e di costo contenuto, oltre che di notevole velocità e semplicità di posa, creando al contempo un'intercapedine sottopavimento sfruttabile, qualora fosse necessario, per la distribuzione delle principali dorsali impiantistiche. Tali sistemi prevedono l'impiego di supporti discreti in materiale elastomerico che consentono di ottenere una disconnessione meccanica in grado di migliorare sia la prestazione di isolamento aereo che quella di isolamento al calpestio, con costi paragonabili a quelli di un buon materassino in opera. Il sistema è estremamente flessibile: nel caso in cui si volesse incrementare lo spessore dell'intercapedine basterebbe aumentare lo spessore del supporto ligneo, se al contrario lo si volesse diminuire occorrerebbe ridurre lo spessore del materiale elastomerico fino al limite inferiore di tre centimetri di spessore.



Nelle costruzioni in CLT fondamentale è la tenuta dei giunti tra pannelli, che non deve ridurre la resistenza al fuoco dell'insieme della costruzione e non deve permettere il passaggio di aria e prodotti di combustione.

## Resistenza al fuoco: la perdita di efficienza di una struttura di legno avviene per riduzione della sezione e non per decadimento delle caratteristiche meccaniche, i tempi di collasso della struttura consentono una sicura evacuazione

Il legno massiccio è più resistente al fuoco di quanto comunemente non si creda. I pannelli in CLT hanno ad esempio un contenuto d'umidità di circa il 12% e prima che il legno bruci è necessario che l'acqua in essi contenuta evapori. Infatti, a differenza delle costruzioni in acciaio o in cemento, se soggetto ad incendio un elemento strutturale di legno brucia lentamente e la carbonizzazione procede dall'esterno verso l'interno della sezione (lo strato carbonizzato riduce, tra l'altro, l'innalzamento della temperatura negli strati più interni della sezione e li protegge dall'azione del fuoco). Il legno non ancora carbonizzato rimane efficiente dal punto di vista meccanico anche se la sua temperatura aumenta (le ridotte dilatazioni termiche inoltre impediscono il collasso della struttura per deformazione), mentre la rottura meccanica dell'elemento avviene solo quando la parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente ridotta da non riuscire più ad assolvere alla sua funzione portante. Pertanto la perdita di efficienza di una struttura di legno avviene per riduzione della sezione e non per decadimento delle caratteristiche meccaniche, permettendo dunque di stimare i tempi che di collasso della struttura al fine di consentire una sicura evacuazione dell'edificio. Osservando infatti il comportamento di un elemento strutturale soggetto ad incendio si nota che:

- il legno brucia lentamente e il processo di carbonizzazione procede dall'esterno verso l'interno;
- il legno che non si è ancora bruciato conserva l'efficienza strutturale nonostante l'incremento di temperatura;
- il raggiungimento della rottura avviene lentamente, solo quando la sezione utile si è talmente ridotta da non poter sopportare il carico applicato. Quindi, la perdita di efficienza della struttura in legno soggetta al fuoco avviene per riduzione della sezione utile e non per degrado fisico-meccanico. Osservando inoltre il processo di carbonizzazione, si osserva che questo avviene lentamente con tempi che vanno da alcuni minuti ad alcuni ore, lasciando quindi un intervallo notevole per l'evacuazione di sicurezza.

Confrontando poi il comportamento del legno soggetto ad incendio con quello di altri materiali da costruzione, si osserva che il legno offre addirittura diversi vantaggi:

- gli elementi strutturali in acciaio non bruciano ma l'incremento di temperatura porta ad un pericoloso aumento della duttilità e quindi delle deformazioni;
- nelle costruzioni in cemento armato la resistenza al fuoco dipende quasi esclusivamente dallo spessore del copriferro.

Dall'analisi del comportamento al fuoco del legno, è possibile trarre alcune regole generali sulla progettazione al fuoco degli edifici in CLT. Secondo quanto riportato dall'attuale normativa italiana, non esiste alcun divieto alla realizzazione di edifici con struttura in legno anche di molti piani. Si hanno però alcune limitazioni riguardanti la resistenza minima al fuoco delle strutture portanti e di separazione che prescindono dal materiale con il quale la struttura è stata realizzata e che per un elevato numero di piani (oltre 50 m) rendono piuttosto difficoltoso l'impiego di strutture portanti in legno. Relativamente alla velocità di carbonizzazione, non esistono ancora riferimenti precisi in normativa. L'unico riferimento ad oggi applicabile è quello della tabella 3.1 dell'Eurocodice 5, parte 1-2, in cui per i pannelli a base di legno diverso dal compensato viene dato un valore di 0,9 mm/min. Tuttavia questo valore fa riferimento a pannelli di spessore minore o uguale a 20 mm, e quindi molto più sottili di quelli utilizzati ad esempio per i pannelli in CLT. Dalle prove sperimentali effettuate in laboratorio risulta che la velocità di carbonizzazione media presenta velocità simili a quelle del legno massiccio (0,65 mm/min). Comunque, considerando i pacchetti costruttivi utilizzati normalmente per solai e pareti, le strutture portanti in legno sono solitamente protette dai materiali di rivestimento interni ed esterni, che forniscono una protezione aggiuntiva al fuoco delle strutture portanti. A titolo esemplificativo, secondo la EN 1995-1-2 un rivestimento applicato ad una parete (oppure ad un solaio) composto da un pannello in cartongesso standard dello spessore di 15 mm fornisce una resistenza al fuoco aggiuntiva di 19 min se posato con una intercapedine vuota superiore ai 2 mm di spessore. Se invece l'intercapedine è di 4 cm e riempita con lana di roccia tale valore può aumentare fino a 35 min.



## La fase di produzione e la gestione del cantiere: due momenti essenziali nella realizzazione dell'edificio in legno da pensare a monte del progetto

La produzione, il trasporto e il montaggio costituiscono le fasi finali del processo di realizzazione di una costruzione prefabbricata e rappresentano due voci fondamentali della costruzione di un edificio in legno, sia dal punto di vista progettuale che da quello economico. Queste fasi vengono programmate accuratamente nel progetto di produzione, che viene redatto dal progettista solo dopo che il progetto strutturale esecutivo è stato approvato. Il progetto di produzione prevede la redazione di distinte di produzione e/o disegni di officina relativi ai diversi componenti, agli apparecchi di collegamento e agli altri possibili accessori.

Per ogni elemento è necessario preparare un disegno accurato e quotato, che consenta di programmare i tempi e le fasi di montaggio in cantiere. Nel progetto di produzione vengono analizzati gli aspetti logistici ed economici delle varie fasi, dalla produzione vera e propria dei semilavorati in fabbrica sino all'edificio finito. Talvolta progettare una struttura con elevata modularità consente di contenere le dimensioni dei singoli elementi che la costituiscono, e di conseguenza i costi di trasporto.

Questa soluzione, che spesso risulta ottimale anche ai fini della semplicità di realizzazione, può comunque comportare un costo per il montaggio a piè d'opera maggiore rispetto al caso in cui si prefabbrichino grandi elementi non necessariamente modulari (ad esempio pannelli in CLT di grandi dimensioni costituenti un'intera parete di facciata). Fondamentale è, come si è visto, il rilievo della corretta esecuzione delle strutture di fondazione da eseguirsi da parte del fornitore/esecutore, insieme al progettista e al direttore lavori.

I programmi di disegno tridimensionali utilizzati per la progettazione di un edificio in legno sono predisposti per trasferire alle macchine a controllo numerico i dati per la produzione degli elementi. La base di lavoro di tali programmi è la definizione precisa delle geometrie di ogni singolo componente della costruzione. Pertanto, variazioni apparentemente anche di poco rilievo, possono comportare la necessità di procedere alla rielaborazione complessiva del disegno iniziale.

Se il trasporto delle strutture in legno non presenta in genere problemi di portata, esso può presentare criticità relative alle dimensioni degli elementi. Lo scarico può essere effettuato a piè d'opera con i mezzi di sollevamento predisposti sul cantiere. Lo stoccaggio rappresenta una fase spesso breve, ma estremamente importante. In questo lasso di tempo i prodotti a base legno devono "acclimatarsi" senza però subire danni né tantomeno rappresentare fonte di pericolo per le persone presenti in cantiere. Fondamentale è la protezione degli elementi dall'umidità proveniente dal terreno e dall'acqua meteorica e, qualora i tempi di stoccaggio si potessero rivelare lunghi, l'impiego di teloni impermeabili al vapore (traspiranti) ma impermeabili all'acqua piovana, al fine di evitare la formazione di condensa. E' inoltre preferibile garantire la ventilazione su entrambi i lati degli elementi stoccati al fine di evitare l'insorgere di macchie e di muffe.

La preparazione dei pezzi in cantiere è normalmente più onerosa che in stabilimento, dove tagli, fresature, incassi, etc. possono essere eseguiti con macchinari appositi ed in condizioni più agevoli e sicure. Ciò significa non lasciare nulla all'improvvisazione in opera ma prevedere in fase di progetto, con sviluppo di dettagli e particolari costruttivi, tutte le situazioni peculiari che si verificheranno nell'ambito della realizzazione dell'opera. Spesso, ove gli spazi di cantiere sono limitati, non è possibile neppure procedere allo stoccaggio, ma sarà indispensabile coordinare perfettamente fase di approvvigionamento e fase di montaggio degli elementi, che avverranno in stretta sequenza.

Il montaggio rappresenta pertanto il momento di "verifica" della correttezza delle fasi precedenti: il corretto montaggio è condizione necessaria, anche se non sufficiente, per la buona riuscita dell'opera.