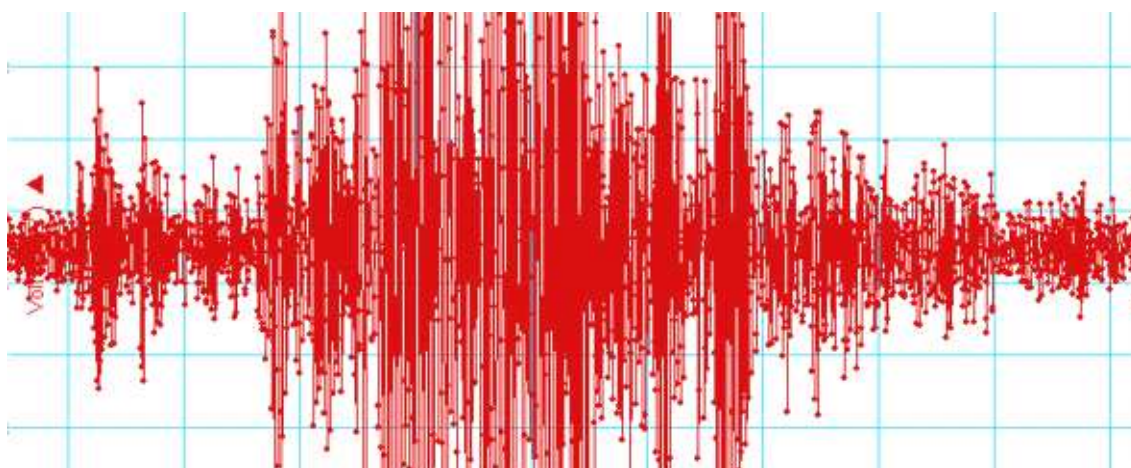


promo legno

Progettazione sismica delle strutture di legno

Maurizio Follesa



Caratteristiche generali delle strutture di legno nei confronti delle azioni sismiche

Gli edifici a pannelli portanti a strati incrociati possiedono tutte le caratteristiche che rendono le strutture di legno particolarmente adatte a resistere alle azioni sismiche. Semplificando e sintetizzando il problema, le forze sismiche che agiscono su una struttura possono essere calcolate secondo la Legge di Newton, $forza = massa \times accelerazione$. È quindi evidente che strutture realizzate con materiali leggeri come il legno (col quale un tempo si costruivano gli aerei) avranno masse ridotte e quindi saranno interessate da forze sismiche minori. Per resistere a tali forze, seppur minori, le strutture dovranno possedere delle adeguate riserve di resistenza e da questo punto di vista il legno strutturale (ossia il legno classificato secondo la resistenza e soggetto alle stesse regole di qualificazione e agli stessi requisiti richiesti per gli altri materiali secondo le Norme Tecniche del 2008 che finalmente stabiliscono pari condizioni tra il legno e gli altri materiali da costruzione) non soffre certamente di "complessi di inferiorità" rispetto ad altri materiali da costruzione. Inoltre, e questo è un concetto un po' meno intuitivo, a livello di progettazione le strutture rigide sono interessate da forze sismiche maggiori rispetto alle strutture flessibili e deformabili, come è il caso delle strutture di legno. Per comprendere meglio basta osservare l'immagine sulla destra della pagoda del tempio di Horyu-ji a Nara, antica capitale del Giappone, esempio mirabile di struttura totalmente in legno allo stesso tempo leggera, resistente e flessibile e che con i suoi 31,5 m di altezza e 14 secoli di vita è un esempio eccezionale di durabilità e di resistenza sismica.



Fig. 1: Pagoda del tempio di Horyu-ji a Nara, Giappone, anno di costruzione 607 d.C.

Oltre alle proprietà citate ne esiste una quarta, altrettanto importante, ossia la duttilità e la capacità di una struttura di dissipare l'energia trasferita dal sisma attraverso lo sviluppo di deformazioni in campo non lineare. Pur essendo il legno strutturale un materiale a comportamento fragile (solo per alcuni stati di sollecitazione), nelle strutture di legno è possibile raggiungere elevati livelli di duttilità mediante l'utilizzo di connessioni meccaniche con elementi metallici (piastre metalliche, chiodi, viti e bulloni) per collegare i vari elementi strutturali di legno. Questo in virtù delle modalità costruttive relative al sistema considerato e delle regole di duttilità, ossia alle regole specifiche per la progettazione e realizzazione dei collegamenti fra i vari componenti strutturali, specificate al fine di consentire all'intero organismo strutturale di raggiungere la classe di duttilità indicata.

Queste ultime sono infatti particolarmente importanti: una costruzione realizzata con struttura di legno non è di per sé sismo-resistente a prescindere da come è realizzata e l'esperienza dei terremoti passati (alcuni terremoti californiani recenti e il terremoto di Kobe del 1995), nei quali si sono verificati alcuni collassi di edifici di legno, lo dimostra.

Caratteristiche del sistema costruttivo e comportamento sismico

A differenza delle azioni verticali che possono interessare solamente una porzione della struttura e alcuni elementi costruttivi, l'azione sismica è un'azione orizzontale che coinvolge la struttura nel suo insieme e pertanto la continuità dei collegamenti fra le diverse porzioni di struttura, in tutte le posizioni, è particolarmente importante e deve essere effettiva sia a trazione che a compressione.

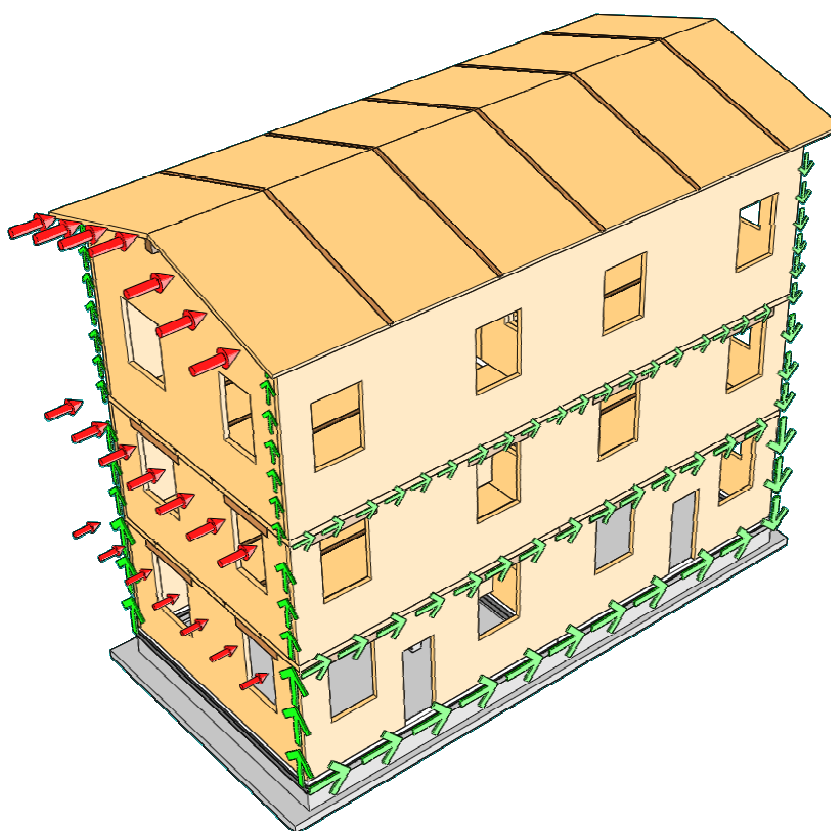


Figura 1: Forze sismiche agenti su un edificio a pannelli portanti a strati incrociati (X-Lam).

Dal punto di vista del comportamento sismico, un edificio a pannelli portanti a strati incrociati è sostanzialmente assimilabile ad una struttura scatolare in cui le pareti e i solai sono formati da diaframmi costituiti da pannelli di legno massiccio molto rigidi e resistenti, collegati fra loro mediante collegamenti meccanici. I pannelli per le pareti e i solai vengono prefabbricati in stabilimento mediante il taglio computerizzato con macchine a controllo numerico e arrivano in cantiere pronti per il montaggio già dotati di aperture per porte e finestre, alloggiamenti per travi ed architravi, lavorazioni per i giunti, aperture per cavedi ed impianti.

Le pareti vengono realizzate o con un unico elemento dotato di tutte le aperture per porte e finestre con l'unica limitazione sulla lunghezza data dalle esigenze di trasporto (normalmente sotto gli 11 m o talvolta anche fino a 16 m), oppure mediante l'assemblaggio di più pannelli (normalmente di

larghezza uguale o inferiore ai 2.5m) collegati fra di loro mediante collegamenti meccanici realizzati con l'utilizzo di strisce di pannello multistrato o con giunti a mezzo-legno fra i pannelli e viti o chiodi. I solai di interpiano e di copertura vengono invece sempre realizzati mediante l'assemblaggio di più pannelli di larghezza uguale o inferiore ai 2.5 m con giunti meccanici realizzati con modalità simili a quelle utilizzate per il collegamento verticale fra i pannelli della parete che poggiano e sono collegati alle pareti sottostanti ed eventualmente a travi rompitratta di legno lamellare.

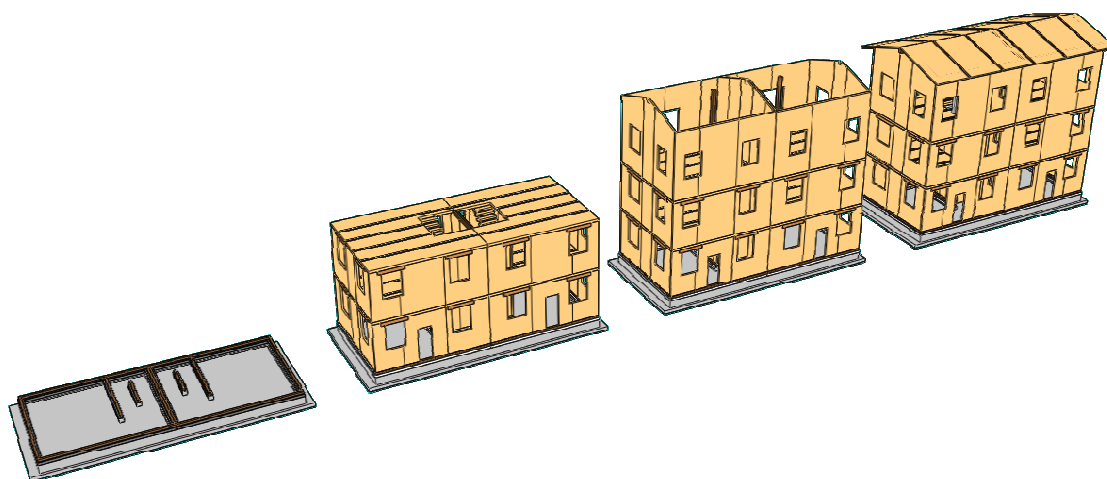


Figura 2: Fasi costruttive di un edificio a pannelli portanti a strati incrociati.

Prima di analizzare il comportamento sismico di questa tipologia di edifici occorre esaminare in dettaglio il processo costruttivo e le modalità di collegamento fra i vari componenti strutturali.

Le strutture di **fondazione** vengono realizzate o con una platea o con travi rovesce in c.a. Se viene utilizzata una platea di fondazione è comunque buona norma realizzare sopra di essa un piccolo cordolo in c.a. oppure in legno di specie durabile per evitare il contatto diretto delle pareti di legno con la platea stessa. Talvolta il cordolo può essere evitato se le strutture di fondazione fuoriescono dal livello del terreno. In tutti i casi tra la struttura di legno e la fondazione in c.a. va interposto uno strato di guaina bituminosa che deve risvoltare sulla struttura di fondazione (e non sulla parete di legno) per evitare le trappole di umidità.

Il cordolo di legno, quando previsto, deve essere realizzato con una specie legnosa durabile (ad es. larice) e può essere di legno massiccio o lamellare. E' bene che non superi un'altezza di 100-120 mm per non rendere difficoltoso il successivo collegamento delle pareti alle fondazioni generalmente effettuato con piastre metalliche angolari.

Talvolta, al contatto fra la parete e le fondazioni, oltre alla guaina viene posizionato un ulteriore strato di gomma, utilizzato anche in tutte le zone di contatto fra le pareti ortogonali e fra pareti e solaio, usato non solo con la funzione di impedire il passaggio dell'aria attraverso le zone di contatto, ma anche come smorzatore acustico (Figura 4).

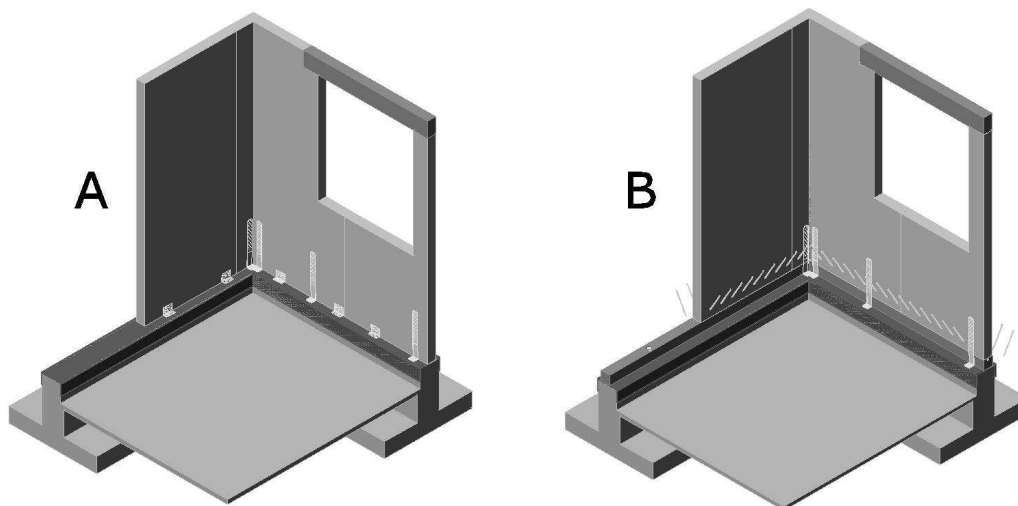


Figura 3: Collegamento delle pareti alle fondazioni. A: pareti direttamente collegate al cordolo di calcestruzzo, B: pareti collegate mediante l'interposizione di un cordolo di legno.



Figura 4: Posizionamento di uno strato di gomma al contatto fra parete e cordolo.

Il collegamento delle pareti del piano terra alle fondazioni deve svolgere una duplice funzione: impedire che per effetto delle azioni orizzontali (vento o sisma), agenti nel piano stesso della parete e in generale su tutto l'edificio si possa verificare sia il ribaltamento che lo scorrimento rispetto alle fondazioni. Il ribaltamento viene solitamente contrastato con delle piastre angolari allungate, dette comunemente *hold-down* (dall'inglese hold down ossia appunto tieni giù). Gli *hold-down* vengono collegati alle pareti di legno con chiodi o viti e alle fondazioni in calcestruzzo con delle barre filettate in acciaio inserite in fori sigillati con malta cementizia o epossidica. Devono essere posizionati in corrispondenza dei limiti estremi delle pareti e in prossimità delle aperture. I chiodi (meglio se ad aderenza migliorata) e le viti di collegamento alla parete hanno diametri variabili dai 3 ai 6 mm e le barre filettate dai 12 ai 18 mm a seconda del tipo di *hold-down* e dei carichi in gioco.

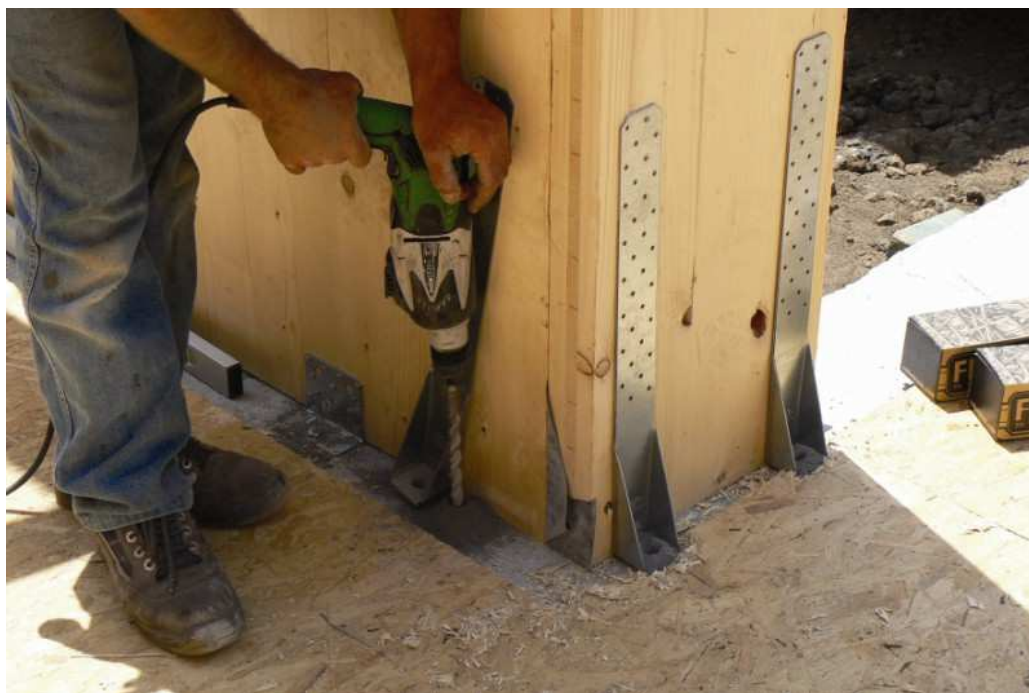


Figura 5: Hold-down sugli spigoli dell'edificio ed in corrispondenza delle aperture, di presidio al sollevamento.

Lo scorrimento invece può essere contrastato in vari modi, a seconda del metodo di collegamento delle pareti alle fondazioni. Nel caso di presenza di cordolo di legno di interposizione fra le pareti e la fondazione, deve essere previsto un doppio collegamento del cordolo di legno alle fondazioni, realizzato sempre con barre filettate, e della parete al cordolo di legno, garantito con viti auto-foranti (diametro di 8-10 mm) inserite inclinate sui due lati della parete. Nel caso invece di parete collegata direttamente al cordolo di fondazione solitamente si prevedono delle staffe angolari di acciaio collegate con chiodi o viti alle pareti (diametri come sopra) e sempre con tirafondi in acciaio alle fondazioni (diametro sempre 12-18 mm. Figura 6).

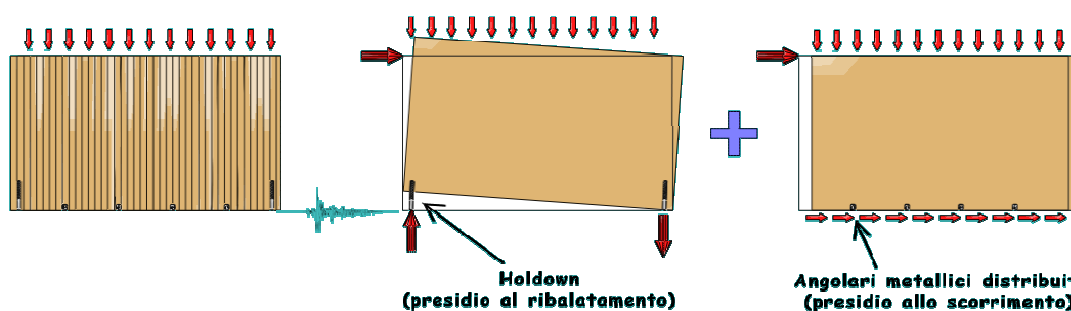


Figura 6: Effetti dell'azione sismica agente su una parete e diversa funzione degli elementi di collegamento.

Le **pareti** possono essere costituite come detto da pannelli interi per lunghezze fino a 16 m e con una altezza pari all'altezza di interpiano, preparati in stabilimento mediante il taglio con macchine a controllo numerico e già completi di aperture. Una volta arrivate in cantiere vengono issate con mezzi meccanici di sollevamento e collegate fra loro e alle fondazioni: il processo costruttivo è molto veloce, sebbene il trasporto possa risultare più difficoltoso soprattutto in aree di cantiere con accessibilità limitata. L'utilizzo di pareti intere è in diversi casi la soluzione migliore in termini di velocità di montaggio e per alcune situazioni progettuali particolari, come ad esempio il caso di pareti che fuoriescono a sbalzo rispetto al piano inferiore.

In alternativa, soprattutto per esigenze di trasporto e facilità di maneggevolezza e montaggio in cantiere, vengono suddivise in pannelli di larghezze variabili a seconda del produttore fino ad un massimo di 3m e collegate fra loro con la realizzazione di giunti verticali. Questi ultimi vengono solitamente eseguiti con l'interposizione di una striscia di pannello multistrato a base di legno che può essere inserita in apposite fresature internamente alla parete o su una sua faccia. Talvolta viene realizzato anche un giunto a mezzo legno a tutta altezza. Il collegamento avviene sempre mediante l'inserimento di viti auto-foranti di diametro variabile dai 6 ai 10 mm o chiodi di 3mm di diametro e interasse variabile in funzione dei carichi (Figura 7).

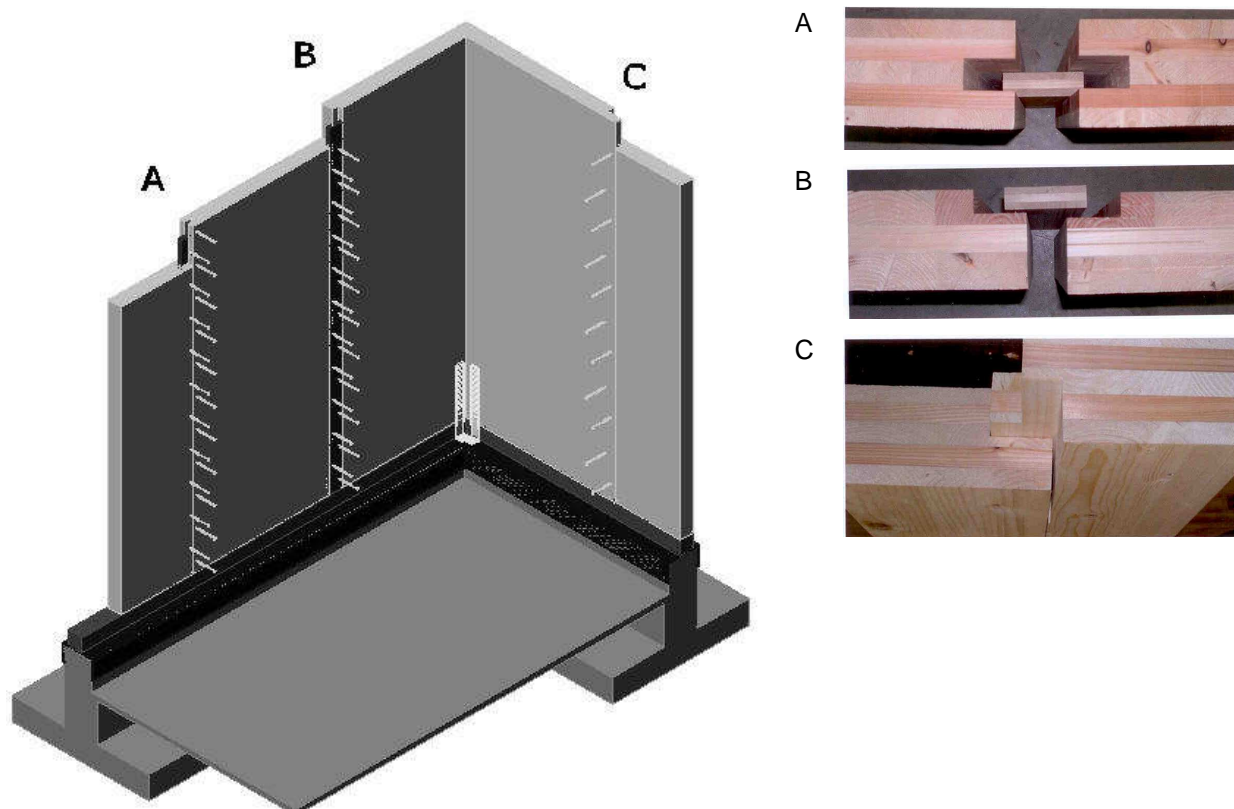


Figura 7: Tre diversi modi di realizzare il giunto verticale fra pannelli parete. A: con striscia di pannello multistrato inserita in fresatura interna ai pannelli e viti, B: con striscia di pannello multistrato inserita in fresatura sul lato interno parete e viti, C: con giunto a mezzo legno a tutta altezza e viti.

La sperimentazione scientifica finora effettuata ha dimostrato che edifici realizzati con pareti composte da più pannelli di larghezza massima fino a 3 m e collegati verticalmente con giunti meccanici, se progettati nel pieno rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze come espresso nel seguito, dimostrano un livello di duttilità maggiore rispetto a edifici formati da pareti intere e quindi una maggiore capacità dissipativa dell'energia trasferita dal sisma. Tuttavia in attesa di ulteriori indagini che confermano e chiariscano meglio questi aspetti e soprattutto in attesa della definizione delle regole di duttilità applicabili e della loro integrazione in chiare indicazioni normative, le norme attualmente in vigore indicano un unico valore del fattore di struttura ($q=2$) da impiegare nella progettazione, utilizzabile per entrambi i casi di pareti intere o pareti a pannelli.

Il collegamento fra pareti ortogonali avviene sempre mediante l'inserimento di viti auto-foranti. Occorre fare attenzione nell'inserimento delle viti ad intercettare gli strati del pannello con direzione della fibratura verticale, diversamente, se si intercettano gli strati con direzione della fibratura orizzontale, l'unione diventa totalmente inefficace essendo la resistenza dell'unione con viti infisse

parallelamente alla fibratura molto bassa. Dato che l'inserimento nello strato "corretto" non è sempre agevole e preciso (caso C di *Figura 8*), la cosa migliore è realizzare il collegamento con la vite infissa con asse leggermente inclinato rispetto alla direzione del piano della parete come nei casi D ed E in modo da essere assolutamente sicuri di andare a intercettare gli strati di tavole a fibratura ortogonale e quindi dell'efficacia del collegamento.

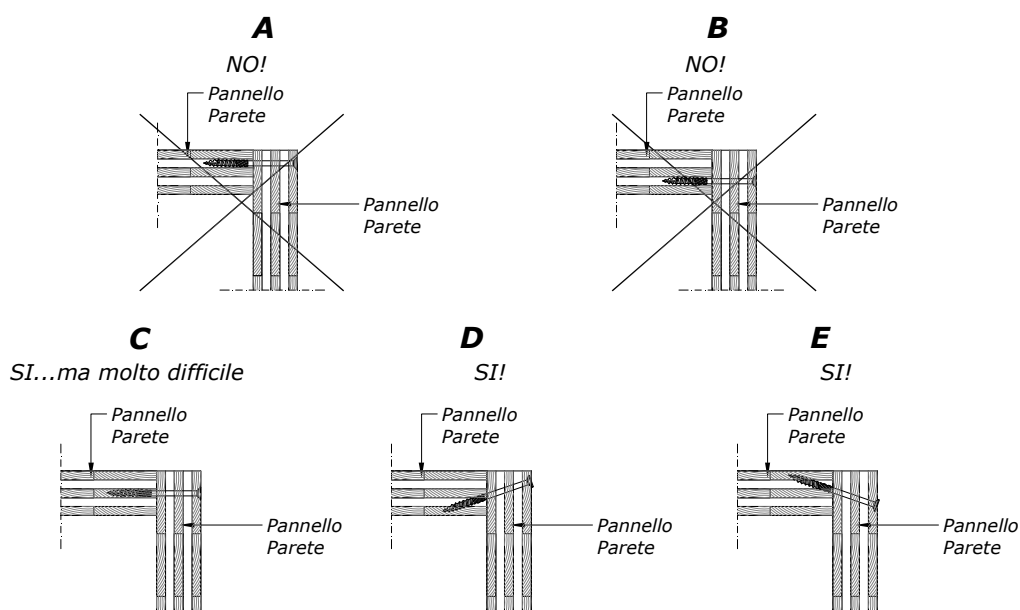


Figura 8: Collegamento verticale fra pannelli parete ortogonali con viti auto-foranti.

Una volta montate le pareti del piano terra è possibile posare il primo **solaio**. Quest'ultimo è formato da pannelli a strati incrociati di spessore solitamente maggiore di quello delle pareti, ovviamente in funzione delle luci e dei carichi che poggiano sulle pareti del piano inferiore e su travi di legno lamellare quando previste. Anche per il solaio, per esigenze di trasporto e montaggio, si preferisce il montaggio a pannelli di larghezza inferiore ai 2.5 m, che vengono poi collegati fra loro mediante giunti orizzontali realizzati con le stesse tecniche utilizzate per la realizzazione dei giunti verticali fra pannelli parete e alle pareti sottostanti viene effettuato sempre mediante l'utilizzo di viti auto-foranti.

Una volta realizzato il primo solaio il processo costruttivo si ripete: ossia il primo solaio fa da piattaforma per la realizzazione dei piani successivi. Le pareti del primo piano devono essere collegate al solaio sottostante sempre con mezzi di collegamento meccanico (piastre metalliche angolari, chiodi e viti) di presidio al sollevamento e allo scorrimento, con le stesse modalità del collegamento alle fondazioni. Per il sollevamento si possono continuare ad utilizzare gli stessi hold-down utilizzati in fondazione che però questa volta andranno posti a coppie di due, uno sopra e uno sotto il solaio, collegati da un bullone, per garantire la trasmissione dell'azione di sollevamento dalla parete del piano superiore a quella del piano inferiore. In alternativa possono essere utilizzate delle più pratiche bande forate da collegare esternamente alla parete con chiodi sia alla parete del piano inferiore che a quella del piano superiore.



Figura 9: Angolare di collegamento fra la parete ed il sottostante solaio e bande forate sul lato esterno dell'edificio.

La **copertura** può essere realizzata a pannelli oppure con metodo tradizionale, ovvero con travi principali, secondarie e sovrastante tavolato a doppio strato incrociato o pannello a base di legno. Il collegamento, nel caso di copertura a pannelli avviene come per i solai, mentre nel caso di copertura a travi il metodo di prefabbricazione in stabilimento dei pannelli consente di realizzare con estrema precisione le sedi di alloggiamento per le travi di copertura che poi possono essere più praticamente collegate con l'utilizzo sempre di viti auto-foranti oppure viti a doppio filetto o in alternativa anche con le classiche scarpe metalliche (che però in caso di edifici pubblici soggetti a requisiti di resistenza al fuoco vanno adeguatamente protette con pannelli di rivestimento, Figura 10).

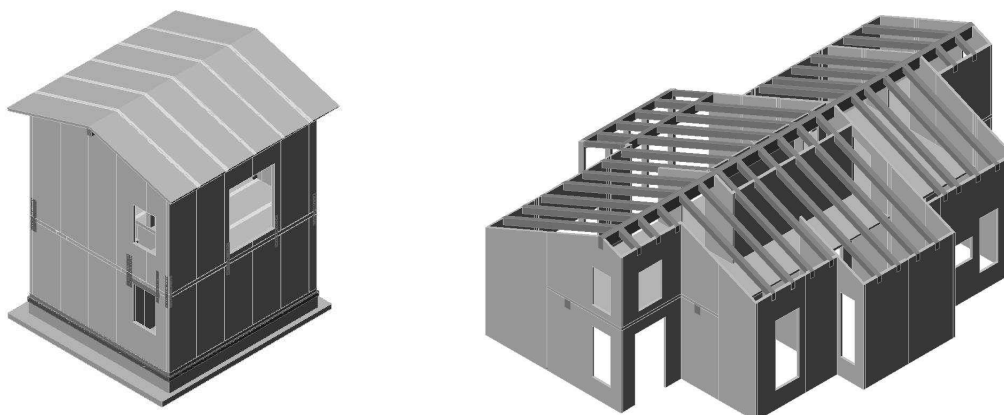


Figura 10: Copertura a pannelli (a sinistra) e copertura tradizionale a travi (a destra).

Criteri generali di progettazione strutturale in zona sismica

La progettazione antisismica, come suggerito dall'Eurocodice 8 e dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, prevede che le strutture debbano essere concepite secondo il "Criterio della gerarchia delle resistenze", ossia occorre prevedere che gli elementi strutturali a comportamento plastico raggiungano lo stato post-elastico quando gli elementi a comportamento fragile sono ancora in fase elastica e ben lontani dal raggiungimento della rottura. Questo significa che nelle strutture in acciaio ad esempio, i giunti saldati vengano progettati in modo da essere molto più resistenti delle aste (avendo le saldature un comportamento fragile). La funzione dissipativa, essendo insita nelle caratteristiche del materiale, verrà svolta dalle parti di struttura non interessate dalle saldature. Nel C.A. invece, tale comportamento si ottiene progettando le sezioni con una opportuna staffatura, in

modo tale da evitare la rottura a taglio che è sempre una rottura fragile. Nel caso delle strutture in legno tale criterio viene perseguito progettando adeguatamente i giunti con connettori meccanici, avendo ovviamente cura nel rendere gli elementi di legno più resistenti dei giunti (esattamente l'opposto quindi del criterio seguito nella progettazione delle strutture in acciaio).

Della duttilità si tiene conto nella progettazione attraverso l'introduzione del fattore di struttura q che consente di ridurre lo spettro di risposta per ottenere lo spettro di progetto da utilizzare nella analisi lineare. Il fattore di struttura è definibile come il rapporto fra l'accelerazione di picco del terremoto che porta al crollo la struttura e l'accelerazione di picco che porta la struttura al raggiungimento del limite elastico:

$$q = \frac{a_u}{a_y}$$

In pratica attraverso l'introduzione del fattore di struttura q , che tiene conto della capacità di dissipazione di energia della struttura attraverso un comportamento duttile, si consente al progettista di progettare la struttura in campo lineare tenendo conto dell'effettivo comportamento non lineare, semplicemente dividendo le ordinate dello spettro di risposta per il valore di questo coefficiente. I valori del fattore di struttura sono ovviamente diversi in funzione del tipo di materiale utilizzato, delle caratteristiche dei giunti e del tipo di struttura. Ovviamente nel caso di strutture poco dissipative tale valore è pari a 1,5 (in realtà a rigore di ragionamento dovrebbe essere 1, ma nella versione attuale dell'Eurocodice 8 e delle Norme Tecniche tale valore minimo del fattore di struttura è stato portato appunto a 1,5 per tenere conto del contributo dissipativo favorevole dato dalla presenza di strutture secondarie).

L'introduzione del fattore di struttura ci consente pertanto di calcolare agevolmente le forze sismiche di progetto agenti sulla struttura:

$$F_{sd} = \frac{S_e(T_0, \nu) \times a_g \times m}{q}$$

dove:

$S_e(T, \nu)$ è l'ordinata dello spettro di risposta elastico, funzione del periodo proprio della struttura e del suo rapporto di smorzamento elastico

a_g è il valore massimo dell'accelerazione di picco al suolo, definita in funzione della zona sismica in cui viene costruito l'edificio;

m è il valore totale delle masse proprie e portate dell'edificio;

q è il valore del fattore di struttura.

Pertanto tanto maggiore sarà il valore del fattore di struttura, tanto minore sarà il valore delle forze sismiche da considerare nella progettazione, perché si terrà conto della maggiore capacità della struttura di dissipare energia attraverso lo sviluppo di un comportamento duttile.

Inquadramento normativo

Data la recente diffusione del sistema costruttivo a "pannelli portanti a strati incrociati" i riferimenti normativi presenti nel DM14/01/2008 "Norme tecniche per le costruzioni" e nelle norme tecniche di riferimento e supporto per la progettazione (CNR/DT 206 e Eurocodici 5 e 8) sono mancanti.

Infatti il sistema costruttivo, pur garantendo pienamente la sicurezza e le prestazioni attese di cui al Capitolo 2 del DM, è significativamente diverso dagli altri sistemi costruttivi a struttura di legno trattati nella norma, tanto da ricadere nella tipologia del paragrafo 11.7.6 "Altri prodotti derivati dal legno per uso strutturale".

Non fanno eccezione le prescrizioni per la progettazione in zona sismica contenute nel paragrafo 7.7, all'interno del Capitolo 7 "Progettazioni per azioni sismiche", che definisce le regole aggiuntive per la progettazione delle strutture di legno nei confronti delle azioni sismiche ed è la pressoché

fedele traduzione del corrispondente capitolo dell'Eurocodice 8 relativo alla progettazione delle strutture nei confronti delle azioni sismiche.

Il paragrafo definisce le tipologie strutturali ammesse in zona sismica ed i corrispondenti valori del fattore di struttura q , ossia del fattore da utilizzare nella progettazione per ridurre le forze ottenute da un'analisi lineare tenendo conto della risposta non lineare della struttura in funzione del materiale, del sistema strutturale e del procedimento di progettazione adottato dividendo, come per gli altri materiali, le tipologie strutturali ammesse in due classi di duttilità, le strutture aventi una bassa capacità di dissipazione energetica (Classe B e valori di q compresi fra 2 e 2,5) e le strutture aventi una alta capacità di dissipazione energetica (Classe A e valori di q compresi fra 3 e 5).

Classe		q	Esempi di strutture
A	Strutture aventi una alta capacità di dissipazione energetica	3,0	Pannelli di parete chiodati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi e bulloni; strutture reticolari con giunti chiodati
		4,0	Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (con le precisazioni contenute nei seguenti capoversi del §7.7.3)
		5,0	Pannelli di parete chiodati con diaframmi chiodati, collegati mediante chiodi e bulloni
B	Strutture aventi una bassa capacità di dissipazione energetica	2,0	Pannelli di parete incollati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi e bulloni; strutture reticolari con collegamenti a mezzo di bulloni o spinotti; strutture cosiddette miste, ovvero con intelaiatura (sismoresistente) in legno e tamponature non portanti Portali isostatici con giunti con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (con le precisazioni contenute nei seguenti capoversi del §7.7.3)
		2,5	Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (con le precisazioni contenute nei seguenti capoversi del §7.7.3)

Tabella 1: Tipologie strutturali e fattori di struttura massimi q per le classi di duttilità definite dalle Norme Tecniche per le costruzioni (DM 14/01/2008).

Tra le tipologie strutturali citate, la più vicina come descrizione al sistema a pannelli portanti a strati incrociati è quella evidenziata in grassetto per la quale viene indicato come valore del fattore di struttura da utilizzare nella progettazione $q=2$.

Mancano tuttavia totalmente le regole di duttilità sulle modalità di realizzazione di giunti e orizzontamenti. Regole di duttilità che sono invece ben dettagliate per altri sistemi costruttivi a struttura di legno come il sistema a telaio e pannelli leggeri (sistema Platform) per il quale sono specificati i corrispondenti valori del fattore di struttura da adottare rispettivamente nel caso di rispetto o non rispetto delle regole di duttilità.

Esperienze scientifiche recenti effettuate nel nostro paese, nelle quali il comportamento sismico di edifici a pannelli portanti a strati incrociati è stato analizzato mediante prove sperimentali effettuate sia su singoli elementi costruttivi (pannelli parete e solaio) che su edifici interi e mediante simulazioni numeriche, progettati nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze e realizzati con pareti composte da più pannelli collegati con giunti verticali realizzati con connessioni meccaniche, hanno dimostrato come in tali casi sia possibile assumere come valore del fattore di struttura $q=3$ [6].

Tuttavia, per quanto tale risultato sia sicuramente utile e indicativo, non può essere generalizzato al sistema costruttivo nel suo insieme, e non può essere pertanto ancora utilizzato non essendo riconosciuto dalla normativa in vigore.

Occorre inoltre approfondire ulteriormente con altre indagini sperimentali l'effettiva applicabilità di tale valore e vanno definite le regole di duttilità, ossia le regole specifiche sulla progettazione e la realizzazione dei diversi particolari relativi a elementi strutturali e giunti caratteristici del sistema costruttivo che consentano l'assegnazione ad una delle classi di duttilità definite all'interno della normativa vigente, senza le quali manca la necessaria cornice all'interno della quale tale valore risulti applicabile.

A questo proposito occorre precisare che, per quanto la capacità di dissipare energia attraverso un comportamento duttile sia una caratteristica importante da considerare nella progettazione di una struttura nei confronti delle azioni sismiche, questo non significa che una struttura con un livello maggiore di duttilità sia migliore di una struttura con un livello di duttilità più basso. Sono due strategie di progetto differenti, egualmente corrette, per le quali, mediante la precisa definizione delle regole di duttilità da applicare, verranno utilizzati valori diversi del fattore di struttura da utilizzare nella progettazione.

Nel frattempo, in attesa di studi più approfonditi e dell'integrazione dei risultati di tali studi in riferimenti normativi applicabili, l'unico valore utilizzabile rimane quello espresso all'interno della tabella dei fattori di struttura espressa all'interno del Par. 7.7 del DM 2008. Tale valore, per quanto sicuramente molto cautelativo, consente di progettare, in assenza della definizione delle regole di duttilità, in completa sicurezza.

Criteri di progettazione di edifici XLam in zona sismica

La tecnica delle costruzioni degli edifici a pannelli di legno a strati incrociati e la ricerca sul comportamento statico e sismico condotta soprattutto in Europa negli ultimi anni, consente ad oggi di stabilire delle regole di progettazione sia in campo statico che sismico.

Essendo questo tipo di edifici piuttosto leggeri, generalmente l'azione orizzontale indotta dal vento è dello stesso ordine di grandezza di quella sismica e non è affatto trascurabile, pertanto, anche in zone a bassa sismicità, la progettazione per azioni orizzontali è particolarmente importante.

Come spiegato in precedenza, un edificio a pannelli portanti è sostanzialmente una struttura scatolare in cui le pareti e i solai sono formati da diaframmi costituiti da pannelli di legno massiccio collegati fra loro mediante collegamenti meccanici.

La concezione strutturale a scatola è quindi alla base della progettazione strutturale.

Nell'ipotesi di comportamento scatolare, quando l'edificio viene investito dall'azione sismica, questa viene trasferita dagli orizzontamenti, considerati rigidi nel proprio piano, alle pareti di piano in funzione della propria rigidezza e da queste ai piani sottostanti fino ad arrivare alle fondazioni.

Naturalmente nell'ipotesi di diaframmi orizzontali rigidi il taglio sismico di piano andrà ripartito fra le varie pareti in funzione della loro rigidezza considerando gli effetti torsionali calcolati sommando all'eccentricità effettiva tra baricentro delle masse e baricentro delle rigidezze un'eccentricità accidentale come prescritto dalla normativa, calcolata spostando il centro di massa di ogni piano in ogni direzione considerata di una distanza pari a +/- 5% della dimensione massima del piano in direzione perpendicolare all'azione sismica.

Le pareti saranno pertanto caricate da azioni orizzontali nel proprio piano e soggette, per effetto di queste ultime, ad azioni di scorrimento e sollevamento (vedi Figura 6) per le quali andranno verificati i corrispondenti elementi di collegamento (hold-down e angolari metallici e/o viti).

E' utile ricordare che la deformazione di un sistema parete realizzato con pannello di legno a strati incrociati fissato con unioni meccaniche è causata principalmente dalla deformazione delle unioni meccaniche (angolari lavoranti a taglio ed hold-down lavoranti a trazione) che può essere dell'ordine del centimetro, mentre la deformazione a taglio del pannello resta sotto il millimetro, quindi ai fini pratici si può schematizzare il pannello infinitamente rigido nel proprio piano collegato con unioni meccaniche deformabili.

Si può considerare la rigidezza di ciascuna parete proporzionale alla lunghezza della parete stessa solo se le connessioni, sia quelle verticali fra singoli pannelli che compongono la parete nel caso di parete formata da più pannelli che quelle orizzontali fra parete e solai, sono uniformemente distribuite lungo tutte le pareti a ciascun piano.

Le sollecitazioni sismiche agenti sui vari elementi strutturali possono essere calcolate per edifici rispondenti ai criteri di regolarità strutturale in pianta ed elevazione enunciati dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, 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 maniera lineare al crescere dell'altezza dell'edificio. In alternativa, per edifici non rispondenti ai criteri di regolarità strutturale, è necessario eseguire una analisi dinamica (lineare o non lineare a seconda dei casi) e pertanto l'edificio andrà modellato nel suo insieme schematizzando sia le pareti a pannelli che le unioni meccaniche, nell'ipotesi di diaframmi rigidi. E' possibile effettuare una modellazione in campo lineare sufficientemente affidabile con diversi software agli elementi finiti disponibili in commercio, schematizzando le pareti mediante elementi shell ai quali vanno opportunamente definite le caratteristiche di rigidezza a taglio e a compressione equivalente dei pannelli a strati incrociati, e le connessioni meccaniche mediante elementi biella di rigidezza equivalente.

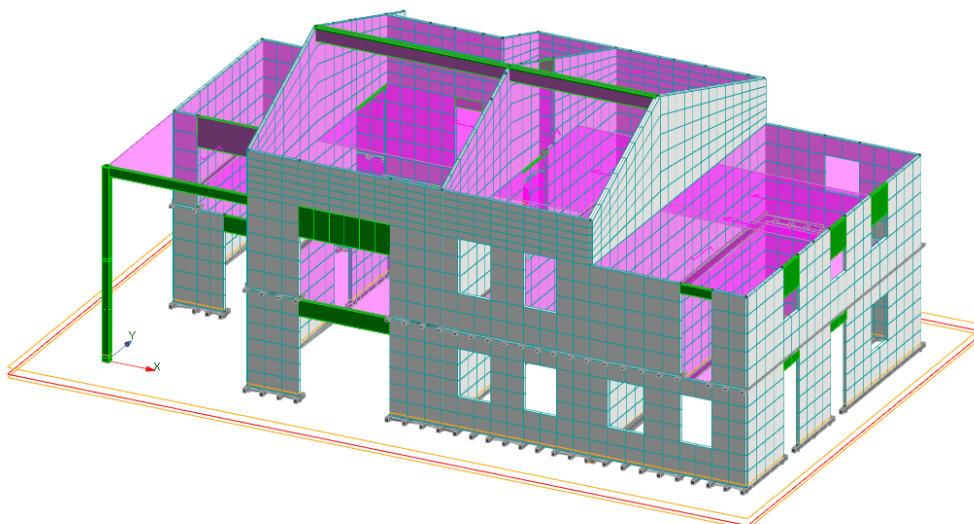


Figura 11: Modello numerico per l'analisi dinamica di un edificio a pannelli a strati incrociati.

Allo scopo di garantire il comportamento scatolare dell'intero organismo strutturale è necessario che non intervengano prima cedimenti per perdita di geometria locale o globale, cioè la scatola strutturale non si apra ma resti connessa.

A tale scopo alcune connessioni fra i diversi elementi strutturali devono essere dotate di adeguate riserve di sovrarigidità in maniera tale da rimanere sempre in campo elastico evitando eccessive deformazioni, in modo da consentire, in accordo con il criterio della gerarchia delle resistenze, agli elementi e alle connessioni a comportamento duttile di dissipare l'energia trasferita dal sisma. Queste sono:

- la connessione fra i pannelli del solaio in modo da assicurare la pressoché totale assenza di scorrimento relativo e garantire l'ipotesi di diaframma rigido;
- la connessione fra solaio e sottostante parete in modo che ad ogni piano ci sia un diaframma rigido al quale le sottostanti pareti risultano rigidamente connesse e che quindi faccia da cintura di piano;

- la connessione verticale fra pareti che si intersecano fra loro, in particolare agli spigoli dell'edificio, in maniera che la stabilità delle pareti stesse e dell'intera scatola strutturale risulti sempre garantita.

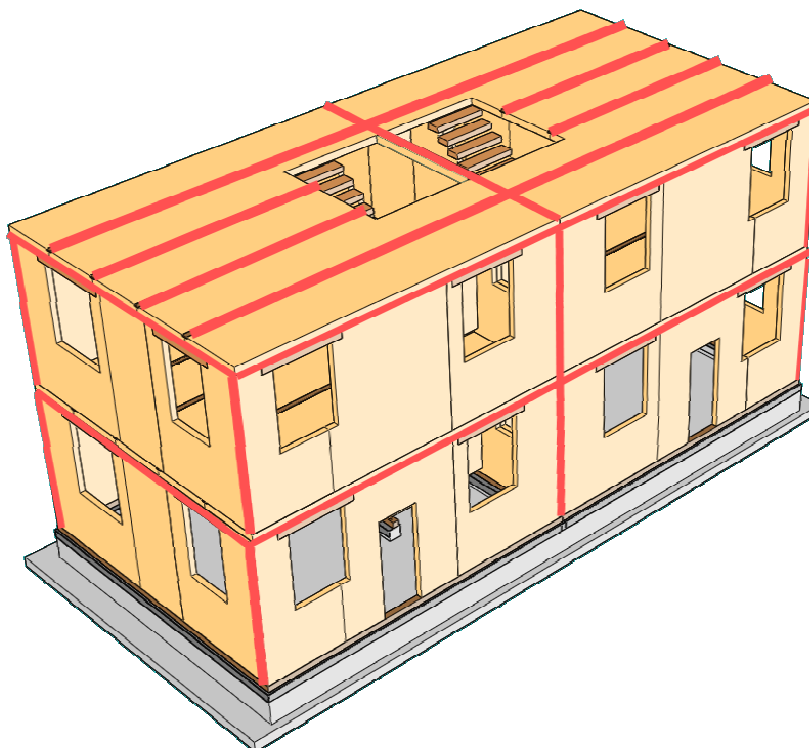


Figura 12: Connessioni che in un edificio a pannelli devono essere dotate di sovraresistenza (evidenziate in rosso) al fine di garantire il funzionamento della scatola strutturale.

Gli elementi che invece sono devoluti alla dissipazione di energia attraverso un comportamento duttile e che pertanto vanno progettati, garantendo sufficienti riserve di resistenza, per le relative azioni di progetto sono:

- le connessioni verticali fra pannelli-parete, quando presenti;
- le connessioni a taglio alla base delle pareti;
- le connessioni a sollevamento (hold-down) all'inizio ed alla fine di ciascuna parete ed in corrispondenza delle aperture.

In accordo con il criterio della gerarchia delle resistenze è necessario che questi elementi siano progettati per resistere alle azioni sismiche di competenza, senza effettuare sovradimensionamenti. È quindi importante che la resistenza alle azioni orizzontali sia maggiore ai piani bassi e diminuisca ai piani alti proporzionalmente alla variazione in altezza del taglio di piano; va quindi evitato il sovradimensionamento delle unioni o quantomeno è opportuno adottare un fattore di sovradimensionamento unico a tutti i piani. In altre parole bisogna progettare in modo che, in linea teorica, a tutti i piani le unioni meccaniche si plasticizzino contemporaneamente.

Questo aspetto è importante sia al fine di garantire il necessario livello di duttilità e di dissipazione all'intero organismo strutturale, sia al fine di evitare sovradimensionamenti di queste connessioni rispetto a quelle devolute al mantenimento del comportamento scatolare e che per questo motivo devono garantire una maggiore resistenza.

A questo proposito è opportuno osservare come la resistenza delle connessioni con mezzi di unione a gambo cilindrico (chiodi, spinotti, bulloni, viti) risenta fortemente dell'effetto della laminazione incrociata. Studi scientifici recenti in particolare hanno evidenziato come le tavole incollate ortogonalmente alla direzione dello sforzo scongiurano il pericolo dello "splitting" cioè della prematura rottura per divaricazione delle fibre, e che pertanto la resistenza possa risultare maggiore del 50% rispetto a quella calcolata secondo la teoria classica delle connessioni meccaniche di Johansen descritta sull'Eurocodice 5 qualora la connessione interessi una parte di pannello in cui è presente l'effetto della laminazione incrociata [7]. Tuttavia, in assenza di chiare indicazioni normative a riguardo, la resistenza delle connessioni deve essere calcolata secondo le formule attualmente riportate in normativa.

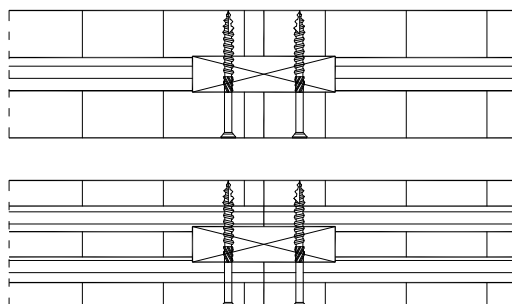


Figura 13: In questo caso la connessione fra due pannelli prevede l'inserimento di una striscia di multistrato e viti. Nel caso del pannello a tre strati le viti interessano una zona in cui non è presente l'effetto della laminazione incrociata..

In alternativa è sempre possibile progettare nell'ipotesi di comportamento scarsamente dissipativo, assumendo pertanto per il fattore di struttura q il valore 1,5 senza considerare alcun comportamento duttile. Tuttavia, anche in questo caso, è opportuno rispettare i criteri di gerarchia delle resistenze sopra espressi sul sovradimensionamento di alcune tipologie di collegamento.

Riferimenti bibliografici

- [1] D.M. II.TT. - 14/01/08 "Norme tecniche per le costruzioni"
- [2] Circolare 2 febbraio 2009 n°617 – Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008
- [3] UNI EN 1998-1: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Regole generali, azione sismica e regole per gli edifici.
- [4] Giunta Regionale Toscana, Direzione generale della Presidenza (2009) – "Linee guida per l'edilizia in legno in Toscana". AA.VV. Gratuitamente scaricabile all'indirizzo <http://www.regione.toscana.it/>
- [5] Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P. (2006), Le strutture di legno in zona sismica - Criteri e regole per la progettazione ed il restauro II ediz., CLUT, Torino.
- [6] Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P. (2007), *Quale fattore di struttura per gli edifici multipiano a struttura di legno con pannelli a strati incrociati?*, XII Convegno ANIDIS L'ingegneria sismica in Italia, Pisa.
- [7] Uibel T, Blaß H.J., (2006). "Load Carrying Capacity of Joints with Dowel Type Fasteners in Solid Wood Panels" 39th CIB W18, Firenze, Italy, paper 39-7-5
- [8] Uibel T, Blaß H.J., (2007). "Edge joints with dowel type fasteners in cross laminated timber" 40th CIB W18, Bled, Slovenia, paper 40-7-2
- [9] Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P. (2007), *La sperimentazione sismica sulle costruzioni di legno: attualità e prospettive*, Seminario internazionale CIAS "Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni", Cipro.
- [10] Follesa M., Fragiaco M., Lauriola M.P., (2011). "A proposal for revision of the current timber part (Section 8) of Eurocode 8 Part 1", 44th CIB W18, Alghero, Italy paper 44-15-1.