



Agostino Presutti - Pierluigi Evangelista

EDIFICI MULTIPIANO IN LEGNO A PANNELLI PORTANTI IN XLAM

Progettazione e procedimenti costruttivi

[Scheda sul sito >](#)



- Elementi del sistema costruttivo ✓
- Calcolo degli elementi in XLAM ✓
- Realizzazione - Progetto strutturale ✓
- Isolamento acustico - Edifici multipiano e fuoco ✓

Agostino Presutti Pierluigi Evangelista

Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in XLAM

PROGETTAZIONE E PROCEDIMENTI COSTRUTTIVI



Dario Flaccovio Editore

A. Presutti - P. Evangelista

Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in XLAM

ISBN 9788857902715

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: marzo 2014

Presutti, Agostino <1965->

Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in XLAM : progettazione e procedimenti costruttivi / Agostino Presutti, Pierluigi Evangelista. - Palermo : D. Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0271-5

I. Costruzioni in legno.

721.0448 CDD-22

I. Evangelista, Pierluigi <1974->.

SBN PAL0267218

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, marzo 2014

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.



INDICE

Premessa

1. Gli elementi del sistema costruttivo	pag. 13
1.1. Dall'abitazione in legno all'edificio multipiano.....	» 13
1.2. Sistema costruttivo XLAM.....	» 18
1.3. Progetto SOFIE.....	» 19
1.4. Ragioni di una scelta.....	» 24
1.5. Legno e sostenibilità ambientale.....	» 25
1.6. Materiali ed elementi della struttura.....	» 27
1.6.1. Pannello di legno massiccio a strati incrociati XLAM.....	» 27
1.6.1.1. Ritiro e rigonfiamento del legno.....	» 29
1.6.1.2. Aspetti qualitativi del pannello.....	» 29
1.6.1.3. Strati e spessori.....	» 31
1.6.2. Caratteristiche del materiale XLAM.....	» 35
1.7. Connessioni.....	» 37
1.8. Funzione delle connessioni.....	» 38
1.9. Connettori a gambo cilindrico.....	» 39
1.9.1. Viti.....	» 41
1.9.2. Chiodi.....	» 42
1.9.3. Spinotti e perni autop perforanti.....	» 43
1.10. Piastre in acciaio.....	» 44
1.11. Legno lamellare.....	» 47
1.11.1. Aspetti generali e cenni storici.....	» 48
1.12. Processo di produzione del legno lamellare.....	» 50
1.13. Classi di resistenza.....	» 53
1.14. Dimensioni degli elementi in legno lamellare.....	» 55
1.15. Collanti per legno lamellare.....	» 59
2. Norme e prescrizioni tecniche	» 61
2.1. Introduzione.....	» 61
2.2. Premessa e breve storia delle norme tecniche sul legno.....	» 62
2.3. Norme tecniche vigenti.....	» 64
2.3.1. Norme tecniche sulle costruzioni – D.M. 14/01/2008.....	» 64
2.3.2. Altezza massima degli edifici in legno.....	» 66
2.3.3. Approccio al progetto.....	» 69
2.4. Principi generali per la progettazione e valutazioni della sicurezza per le costruzioni di legno.....	» 72
2.4.1. Aspetti concettuali della progettazione strutturale.....	» 73
2.4.2. Elementi generali del progetto della struttura. Vita nominale e classi d'uso.....	» 79
2.4.3. Azioni e combinazioni di carico.....	» 80
2.4.4. Classi di durata del carico e classi di servizio.....	» 83
2.4.5. Resistenza di calcolo.....	» 84
2.5. Metodi di verifica.....	» 87
2.6. Formule di calcolo delle tensioni.....	» 89
2.6.1. Compressione.....	» 89
2.6.2. Taglio.....	» 90
2.6.3. Torsione.....	» 90
2.6.4. Flessione semplice e composta.....	» 90
2.7. Calcolo e verifica dei collegamenti.....	» 91

Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in XLAM

2.8.	Collegamenti con unioni chiodate	»	97
2.9.	Bulloni e spinotti.....	»	102
2.9.1.	Bulloni soggetti a sforzi di taglio	»	103
2.10.	Spinotti.....	»	105
2.11.	Viti	»	106
2.11.1.	Esempio di calcolo pilastro-soletta in cemento armato.....	»	106
2.11.2.	Esempio di calcolo pilastro-solaio XLAM.....	»	109
3.	Calcolo degli elementi in XLAM	»	111
3.1.	Progettazione della struttura	»	111
3.2.	Verifica a flessione delle piastre	»	111
3.3.	Verifica a taglio del pannello di XLAM	»	114
3.4.	Stato di servizio e calcolo delle deformazioni.....	»	116
3.5.	Vibrazioni del solaio	»	120
3.6.	Comportamento a piastra del solaio in XLAM.....	»	121
3.7.	Considerazioni sullo spessore del solaio	»	127
3.8.	Parete	»	127
3.9.	Rigidezza a taglio nel piano della lastra	»	131
3.10.	Sforzi assiali nel piano della lastra	»	131
3.11.	Predimensionamento dei solai in XLAM	»	133
3.12.	Esempio di calcolo semplificato di un solaio in XLAM	»	136
3.12.1.	Analisi carichi solaio	»	137
3.12.2.	Determinazione dei valori caratteristici del solaio	»	137
3.12.3.	Calcolo delle rigidezze	»	139
3.12.4.	Verifica agli stati limite del pannello solaio.....	»	139
3.12.5.	Tensione di calcolo del pannello	»	140
3.12.6.	Verifiche	»	141
3.12.7.	Verifiche agli stati limite di esercizio delle deformazioni.....	»	141
4.	Realizzazione, processo costruttivo e fasi di montaggio	»	143
4.1.	Generalità.....	»	143
4.2.	Cantiere di un multipiano in legno	»	144
4.2.1.	Layout e impianti di cantiere.....	»	146
4.2.2.	Mezzi di sollevamento	»	147
4.2.3.	Aree di stoccaggio.....	»	149
4.2.4.	Ordinativi e trasporto	»	153
4.2.5.	Ponteggi e opere provvisori.....	»	156
4.3.	Realizzazione delle fondazioni e delle strutture di base	»	159
4.4.	Posa dei tirafondi e delle dime di attesa	»	168
4.5.	Posizionamento delle travi radice di tracciatura	»	172
4.6.	Montaggio pannellatura portante verticale	»	176
4.7.	Posa degli elementi secondari travi e pilastri.....	»	182
4.8.	Solai e strutture orizzontali	»	184
4.9.	Montaggio dei piani successivi.....	»	187
4.10.	Posa in opera della copertura	»	192
4.11.	Organizzazione della produzione nel cantiere multipiano in legno.....	»	199
4.11.1.	Squadre di montaggio.....	»	201
4.12.	Partizioni interne.....	»	205
4.13.	Chiusure verticali.....	»	208
4.13.1.	Pareti con rivestimento a cappotto	»	209
4.13.2.	Pareti ventilate.....	»	211
4.13.3.	Pareti rivestite.....	»	212

5. Progetto strutturale	» 215
5.1. Introduzione.....	» 215
5.2. Scelta del software.....	» 216
5.3. Modellazione.....	» 217
5.3.1. Strutture interrato e in cemento armato.....	» 218
5.3.2. Struttura in XLAM.....	» 219
5.3.3. Orientamento pannelli architrave e parapetti nella modellazione.....	» 222
5.3.4. Modellazione dei solai in XLAM.....	» 223
5.3.5. Modellazione delle scale interne.....	» 224
5.3.6. Modellazione dei pilastri e delle travi in legno.....	» 227
5.4. Determinazione dei parametri di progetto.....	» 228
5.5. Azioni agenti sull'edificio.....	» 231
5.5.1. Analisi dei carichi.....	» 231
5.5.1.1. Valutazione dei carichi permanenti portati.....	» 232
5.5.1.2. Carichi variabili.....	» 232
5.5.1.3. Azioni termiche e comportamento igrometrico degli elementi strutturali.....	» 233
5.5.2. Azione del vento.....	» 233
5.5.3. Carico neve.....	» 239
5.5.4. Azione sismica.....	» 243
5.5.4.1. Risposta sismica locale.....	» 245
5.5.5. Parametri di analisi.....	» 248
5.6. Condizioni di carico e combinazioni.....	» 251
5.7. Risultati e verifiche.....	» 252
5.8. Verifica dei collegamenti.....	» 253
5.8.1. Esempi di verifica delle connessioni.....	» 254
5.8.1.1. Esempio n. 1. Ribaltamento pareti interpiano.....	» 254
5.8.1.2. Esempio n. 2. Ribaltamento pannello-solaio.....	» 256
5.8.1.3. Esempio n. 3. Ribaltamento pannello-soletta c.a.....	» 257
5.8.1.4. Esempio n. 4. Scorrimento di piano.....	» 261
5.8.1.5. Esempio n. 5. Taglio di piano connessione pannello-solaio.....	» 264
5.8.1.6. Esempio n. 6. Scorrimento pannello-soletta c.a.....	» 266
5.8.1.7. Esempio n. 7. Nodi pannello-solaio.....	» 268
5.8.1.8. Esempio n. 8. Connessione di pareti ortogonali.....	» 269
5.8.1.9. Esempio n. 9. Collegamenti di architravi e parapetti.....	» 270
5.8.1.10. Esempio n. 10. Collegamento pareti ortogonali con viti a tutto filetto.....	» 273
5.9. Redazione dei progetti.....	» 275
6. Durabilità degli edifici in legno	» 283
6.1. Premessa.....	» 283
6.2. Cause del degrado del legno.....	» 286
6.3. Degrado per attacchi biotici.....	» 287
6.4. Degrado per agenti abiotici.....	» 293
6.4.1. Degrado abiotico per cicli di umidificazione ed essiccamento.....	» 294
6.4.2. Degrado per fotolisi.....	» 294
6.4.3. Degrado da agenti chimici.....	» 295
6.5. Protezione delle strutture in legno.....	» 295
6.6. Normativa sulla durabilità.....	» 296
6.7. Protezione attiva del legno.....	» 299
6.8. Protezione passiva del legno.....	» 303

Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in XLAM

6.9. Condensazione interstiziale e diagramma di Glaser	»	317
6.10. Considerazioni conclusive sulla durabilità	»	325
7. Isolamento acustico degli edifici in legno	»	327
7.1. Introduzione	»	327
7.2. Concetti di acustica elementare	»	328
7.2.1. Suono	»	328
7.2.2. Propagazione del rumore nelle strutture edilizie	»	329
7.2.3. Isolamento acustico	»	331
7.2.3.1. Potere fonoisolante di una parete omogenea	»	332
7.2.3.2. Potere fonoisolante di pareti stratificate	»	335
7.2.4. Tempo di riverberazione	»	336
7.2.5. Rumore da calpestio	»	337
7.3. Normativa in materia di isolamento acustico	»	338
7.4. Modelli di calcolo previsionale	»	340
7.4.1. Potere fonoisolante apparente	»	341
7.4.2. Isolamento acustico di facciata	»	343
7.4.3. Calcolo dell'indice del livello di rumore di calpestio (L'_{nw})	»	345
7.4.3.1. Determinazione dell'indice	»	347
7.4.3.2. Esempio di verifica del rumore da calpestio per solai in XLAM	»	350
7.5. Considerazioni di tipo sperimentale	»	356
7.6. Accorgimenti pratici	»	358
7.6.1. Isolamento acustico della parete di separazione tra ambiente esterno e ambiente interno: parete di tomagno	»	359
7.6.2. Isolamento acustico della parete di separazione tra due appartamenti contigui: parete comune di separazione	»	360
7.6.2.1. Esempio di parete divisoria portante. Stratigrafia	»	362
7.6.3. Isolamento acustico di una parete di separazione tra spazi comuni e parti esclusive: parete di separazione tra appartamento e corpo scala ...	»	363
7.6.4. Isolamento acustico solaio intermedio tra due unità omogenee a uso privato: solaio interpiano	»	367
7.6.5. Isolamento acustico di impianti e servizi	»	368
8. Edifici multipiano e fuoco	»	371
8.1. Introduzione	»	371
8.2. Incendio	»	372
8.3. Comportamento degli elementi in legno al fuoco	»	376
8.4. Resistenza al fuoco dei collegamenti	»	379
8.5. Analisi del comportamento meccanico delle strutture in caso di incendio	»	383
8.6. Prove sperimentali. Progetto SOFIE	»	384
8.7. Esempio di verifica al fuoco di pareti in XLAM	»	386
8.8. Situazioni di rischio e aspetti della progettazione	»	391
8.8.1. Impianti elettrici	»	392
8.8.2. Attraversamenti di tetti delle canne fumarie	»	393
8.8.3. Stufe e camini	»	398
8.8.4. Solai e coperture	»	399
8.9. Sintesi dei criteri generali di protezione al fuoco	»	400
8.10. Conclusioni	»	401
Bibliografia	»	403

Premessa

Progettare e realizzare un edificio destinato alle attività dell'uomo implica sempre impegno, conoscenza e arte. È un percorso che non dovrebbe mai cedere alle lusinghe dell'improvvisazione e della semplificazione finalizzata al conseguimento di obiettivi estranei alla logica della "regola dell'arte".

Costruire è per l'appunto un'arte e chi costruisce è un professionista dell'arte.

Le regole auree e romantiche del costruire sapiente hanno vacillato spesso nei secoli. Quando queste regole sono state seguite e rispettate, le costruzioni hanno attraversato i secoli e le opere giunte ai posteri sono state considerate frutto della scienza e della sapienza dell'uomo, tracciandone i progressi e imprimendosi nella memoria come esempi.

In questo percorso, che va dalle palafitte alle moderne costruzioni *high tech*, l'uomo ha utilizzato e plasmato i materiali della natura senza mai inventare nulla che non fosse già contenuto nelle formule chimiche nascoste da qualche parte in quello stesso universo di cui l'uomo è parte.

Un percorso a tratti esaltante, qualche volta deludente ma mai inutile.

Dagli errori l'uomo ha tratto sempre insegnamenti e spinte a migliorare. Dopo ogni calamità, quando è sembrato che la natura volesse ribellarsi all'arroganza umana, sono nate nuove tecniche, nuove difese, nuove consapevolezze.

Un terremoto nel Medioevo significava distruzione certa, morte, dolore e perdita di identità. Ancora nel ventesimo secolo in Italia ogni terremoto rappresentava l'azzeramento di intere comunità e la necessità di dover iniziare nuovamente da capo ogni volta con tecniche diverse.

Apparentemente nulla è cambiato ma non è così. Il terremoto dell'Aquila del 2009, con i suoi oltre trecento morti, ha gravemente danneggiato centinaia di edifici realizzati negli anni Settanta e Ottanta, ma avrebbe certamente prodotto molte più vittime se tutto il costruito in quegli anni non avesse risentito delle esperienze e degli strumenti normativi di cui il Paese si è dotato dopo ogni calamità precedente. È proprio grazie a quegli strumenti se interi nuclei familiari sono rimasti intatti, sia pur senza un'abitazione da riutilizzare.

Per quella logica naturale che spinge a escludere la ripetizione di un errore, ogni strumento normativo in ambito tecnico evolve quello precedente. E così è accaduto sempre e molto probabilmente accadrà anche in futuro, poiché è proprio dall'esperienza, qualunque essa sia, che si trova lo stimolo che altrimenti non si troverebbe per raggiungere risultati sempre migliori.

Dunque sono le esperienze tragiche del terremoto dell'Aquila del 2009 e ancor

prima del terremoto del Molise del 2002 che convincono il legislatore a dotare il progettista italiano di uno strumento in più che prima non aveva: l'utilizzo del legno per uso strutturale.

Infatti il legno scompare come materiale a uso strutturale per un lungo periodo, non tanto dalla memoria umana, quanto piuttosto proprio da quegli strumenti normativi che si ponevano come obiettivo la salvaguardia delle vite e della salute pubblica come finalità da conseguire.

In questa sede non interessa analizzare le ragioni sociologiche (e industriali) di questa perdita di identità del costruire sapiente, poiché appare molto più interessante ragionare del perché a un certo punto si è sentito il bisogno prepotente di recuperare l'utilizzo del legno a fini strutturali. Infatti proprio l'emissione delle nuove norme tecniche del 2008 (entrate subito in vigore nel 2009) per la prima volta consente al progettista italiano di disporre di una norma chiara e finalmente utile per progettare strutture abitative anche complesse con il legno in alternativa alle tecniche nel frattempo assunte al rango di tecniche tradizionali. In realtà sarebbe più corretto parlare di tecniche "convenzionali", poiché nella tradizione dell'uomo certo non si può disconoscere la presenza del legno, mentre altre tecniche costruttive sono evidentemente comparse in epoche relativamente recenti. Quali sono le ragioni di questa inversione di tendenza? Certo ha contribuito una certa rivoluzione culturale nella direzione della bioarchitettura, nonché l'esigenza di rispondere a requisiti sempre più esigenti sul piano del contenimento energetico. In questo il legno ha oggettivamente alternative tutte più deboli.

Tuttavia la vera spinta propulsiva è derivata proprio dalla necessità di realizzare rapidamente strutture sicure e facili da controllare sismicamente, in un tessuto industriale ormai pronto a produrre elementi strutturali semplici da assemblare e con a monte anni di studi e sperimentazioni scientifiche.

In questo processo l'XLAM (o CLT), si inserisce prepotentemente riscuotendo non solo apprezzamento presso i tecnici progettisti (grazie alle caratteristiche meccaniche e prestazionali), ma anche presso l'utente finale che è assai più disposto (in Italia ma anche in altri Paesi europei), verso strutture "piene e massicce" piuttosto che nei confronti di altri sistemi costruttivi in legno quale per esempio il sistema a telaio (o *platform frame*).

Discorso completamente a parte è quello della realizzazione di strutture complesse multipiano in legno.

Sino al dicembre 2011 in Italia ha regnato un certo regime di confusione circa la possibilità di realizzare strutture oltre i quattro piani in legno. Il tutto per via di una discussione di natura giuridica circa un presunto contrasto tra il testo unico dell'edilizia (D.M. 380/2001) e le nuove norme tecniche del 2008 che sotto certe condizioni non impongono alcuna limitazione in altezza se non quella derivante da aspetti meramente prestazionali.

Nel dicembre 2011 il Governo deve intervenire con un atto di precisazione, inserendo in una manovra finanziaria un articolo di legge che scioglie i dubbi interpretativi in materia per spiegare l'ovvio e cioè che ogni volta che la normativa tecnica interviene a regolamentare un materiale o una tecnica costruttiva prima inesistente, il testo unico e le relative norme si intendono automaticamente estese anche ai nuovi materiali. Considerare "nuovo materiale" il legno è un'affermazione se non altro discutibile.

Lo scopo di questa pubblicazione è dunque quello di illustrare l'intero percorso del processo che va dal concepimento di una struttura in XLAM multipiano, sino alla sua realizzazione, fissandone i punti salienti e determinandone le criticità.

Al momento della stesura della pubblicazione, si rincorrono voci di una possibile revisione delle norme tecniche. In realtà a meno di certi piccoli e necessari aggiornamenti, legati soprattutto alle risposte sperimentali recenti, più soddisfacenti di alcune previsioni embrionali contenute nella norma, non sembra che per il legno ci si debbano attendere stravolgimenti importanti, soprattutto alla luce di una consolidata conoscenza comunitaria dell'efficacia degli Eurocodici (nei quale trova ispirazione piena la parte normativa delle NTC del 2008).

1. Gli elementi del sistema costruttivo

1.1. Dall'abitazione in legno all'edificio multipiano

L'edificio con struttura lignea oggettivamente non appartiene al comune patrimonio tecnico ed esecutivo della contemporanea attività edilizia in Italia. Né si può dire che in questo Paese sia radicata la cultura dell'abitazione di legno, poiché tale radice se c'è stata è ormai lontana nel tempo.

Soltanto a partire dai primi anni del secolo appena iniziato si è assistito a un timido risveglio, grazie soprattutto a una rinnovata esigenza di sostenibilità, anche nel mondo dell'edilizia, ma in misura più decisa il contributo di tale risveglio va senza dubbio attribuito all'esigenza di disporre di abitazioni sempre più efficienti sul piano del contenimento energetico.

Va certamente detto, a scanso di facili equivoci, che tale fenomeno ha rappresentato (e in parte ancora rappresenta) una tranquilla nicchia del mercato dell'edilizia italiana. Soltanto nel 2010, una ricerca di mercato condotta da una nota società settoriale attribuiva al mercato dell'edilizia in legno un timido 5%, rispetto all'intero comparto. Numeri destinati poi a crescere positivamente nel corso negli anni successivi, senza tuttavia rappresentare (ancora) un serio pericolo per l'edilizia tradizionale.

Le ragioni di tale dimensioni sono solo in parte legate a una ragione culturale. Molto del contributo è da attribuirsi a una normativa tecnica passata decisamente incentrata sulle tecniche convenzionali del cemento armato, della muratura e in parte dell'acciaio.

Basti pensare che il testo unico dell'edilizia (D.P.R. 380 del 2001), emanato appena nel 2001, all'art. 52 comma 2 citava testualmente: "Qualora vengano usati sistemi costruttivi diversi da quelli in muratura o con ossatura portante in cemento armato normale e precompresso, acciaio o sistemi combinati dei predetti materiali, per edifici con quattro o più piani entro e fuori terra, l'idoneità di tali sistemi deve essere comprovata da una dichiarazione rilasciata dal Presidente del Consiglio Superiore dei lavori pubblici, su conforme parere dello stesso consiglio".

Quest'articolo derivava da un miope recupero pedissequo dell'art. 1 della Legge 64 del 1974 e, come tale, non assegnava al legno lo stesso rango degli altri materiali per edifici di quattro piani (compresi i piani interrati).

Questa leggerezza normativa ha generato non poca confusione anche per gli addetti ai lavori, i quali, già orfani di una normativa tecnica adeguata, hanno finito

col considerare non opportuna la scelta di edificare in legno, a maggior ragione nel caso di un edificio che andasse oltre i quattro piani.

In realtà, alla data di emanazione del D.P.R. 380/2001, le norme tecniche vigenti (fortemente squilibrate sul sistema di calcolo e verifica alle tensioni ammissibili), non offrivano grosse chance costruttive al legno, sul quale evidentemente poco si confidava per ragioni strutturali. Questo vuoto, però, è venuto a colmarsi nel tempo con la normativa tecnica successiva che inseguiva l'onda emozionale degli eventi nel frattempo intercorsi: principalmente il terremoto del Molise del 2002. Senza ripercorrere una curiosa storia dell'evoluzione della normativa tecnica e delle resistenze anche professionali all'abbandono del metodo delle tensioni ammissibili, si giunge finalmente al D.M. infrastrutture 14/01/2008, denominato NTC, che, recependo gran parte degli Eurocodici, apre le porte finalmente anche alla dignità del legno come materiale strutturale.

Chiaramente gli ostacoli normativi precedenti hanno fossilizzato la cultura del legno, la quale è rimasta legata a sviluppi volumetrici molto contenuti e ha reso lontana anni luce la possibilità di sviluppare il legno in altezza.

Ciò che veniva, regolarmente o meno, realizzato in Italia era un certo tipo di edilizia a uno o due piani (quando anche su questo alcuni uffici del genio civile nelle varie province non trovavano motivi di discussione) e soprattutto all'appannaggio di poche ditte costruttive, per lo più localizzate nel nord-est d'Italia.



Figura 1.1
Edificio a telaio in legno
su due livelli

I sistemi costruttivi impiegati per la realizzazione delle strutture residenziali in legno hanno visto una discreta diffusione del sistema a telaio (montanti e traversi

irrigiditi da fogli di OSB o da tavolati), del *blockhaus* (le pareti sono formate dalla sovrapposizione di blocchi o tronchi di legno massiccio, sagomati con inserto a secco) e poi successivamente del sistema a pannelli portanti in XLAM.

Il mercato ha quindi iniziato a offrire un'ampia gamma di soluzioni sia estetiche che funzionali, arrivando a realizzare praticamente qualsiasi unità che potesse scaturire dalla matita di un architetto e sdoganando così il concetto di casa in legno legata all'immagine della baita di montagna, traghettandola verso un'idea di efficienza energetica e di comfort difficilmente conseguibili con le tecniche costruttive convenzionali.

L'uso delle macchine a controllo numerico e degli impianti di prefabbricazione ha consentito la realizzazione di pareti prefabbricate in officina il cui montaggio in cantiere ha velocizzato le fasi di montaggio accorciando in maniera sensibile i tempi di montaggio.



Figura 1.2
Sollevamento di una parete
prefabbricata in legno

A cavallo del 2009-2010 il concetto di casa in legno aveva già aperto un varco nella cultura cemento-centrica delle professioni e dell'utenza più esigente, soprattutto in materia di sostenibilità e bioedilizia.

Il 2009 è anche l'anno del sisma che ha colpito l'Abruzzo e la città dell'Aquila. Tutte le certezze acquisite dall'edilizia convenzionale sono state improvvisamente messe in crisi dal primo vero test sugli edifici realizzati sulla scorta delle normative tecniche degli anni Ottanta e Novanta.

Il fatto che alla fine del 2013 la ricostruzione della città dell'Aquila non sia praticamente ancora cominciata dà l'idea della rilevanza in termini di costo e di impegno sociale che un sisma di proporzioni tutto sommato neanche tanto eccezionali possa comportare, prima su una comunità e poi sull'intero Paese.

Per una serie di professionisti e ricercatori già da tempo impegnati nella ricerca e

nella sperimentazione delle soluzioni sismo-resistenti dell'edilizia in legno¹ è iniziata la fase dell'applicazione sul campo, grazie anche all'entrata in vigore delle nuove norme tecniche che hanno definitivamente fatto decadere le limitazioni in altezza degli edifici in legno delle precedenti norme.

Il piano C.A.S.E. per L'Aquila, avente lo scopo di fornire abitazioni dignitose in tempi rapidi alle decine di migliaia di famiglie senza casa, ha mostrato le potenzialità delle strutture in legno, quando in pochissimi mesi si sono realizzati complessi abitativi di quattro livelli con tecnologie diverse, forti dei livelli di conoscenza nel frattempo acquisiti dal mondo scientifico e dal livello raggiunto dall'industria delle costruzioni in legno.

Nel 2010 il mercato delle costruzioni in legno aveva con decisione iniziato ad accarezzare l'idea di utilizzare le potenzialità di questo materiale anche nella realizzazione di tutti quegli edifici rimasti fino ad allora fuori dall'industria dell'edilizia, cioè per gli edifici multipiano, intesi come eccedenti il quarto piano fuori e dentro terra.

L'Alexander Residence di Roccaraso (AQ), edificio di sette piani, fu consegnato alla ditta esecutrice per l'inizio cantiere nel maggio 2011.



Figura 1.3
Modello dell'Alexander
Residence

In soli sei mesi di lavoro si arrivò al completamento significativo dell'opera che aveva nelle soluzioni estetiche e architettoniche dei prospetti esterni facciate ventilate in zinco-titanio, vetrate continue in vetro strutturale, finiture in pietra bocciardata e utilizzo di materiali di finitura dall'intonaco tradizionale all'acciaio inox traforato.

Veniva utilizzato il legno strutturale unitamente a materiali antichi e moderni senza pregiudizio alcuno.

¹ Si veda il progetto SOFIE-2005-2008.

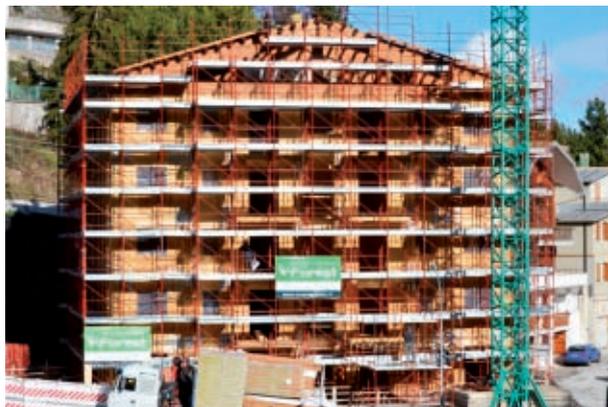


Figura 1.4
Alexander Residence
in una fase della realizzazione



Figura 1.5
Particolare di un prospetto
dell'Alexander Residence

Dal piano C.A.S.E. a oggi l'edilizia dei multipiano in legno è diventata una realtà molto apprezzata sia dai professionisti, sia dal mondo dell'imprenditoria che ne hanno cominciato ad apprezzare le qualità prestazionali e i vantaggi anche sul piano esecutivo.

1.2. Sistema costruttivo XLAM

Il sistema costruttivo che utilizza il pannello portante in XLAM è relativamente recente. Nasce in Germania alla metà degli anni '90 e ha avuto un avvio piuttosto lento in Europa, sino a diventare negli ultimi dieci anni la vera novità dell'intero settore dell'edilizia.

Il pannello XLAM ha rivoluzionato totalmente il sistema delle costruzioni di legno, sovvertendo il modo di concepire le superfici portanti rispetto ai sistemi già consolidati di realizzazione a telaio o a traliccio tipo *platform frame* che non sono mai diventati un fenomeno di massa soprattutto in Italia.

La rivoluzione dell'XLAM consiste nel passaggio culturale dall'elemento lineare e unidirezionale, (travi e pilastri o montanti e traversi) a un elemento sostanzialmente bidirezionale efficace strutturalmente sia come piastra (solaio) sia come lastra (pareti) che può essere tranquillamente utilizzato anche come mensola.

Il nuovo elemento costruttivo per l'edilizia di legno, capace di essere sollecitato in ogni direzione, è quindi il pannello.

Un edificio realizzato con questa tecnica costruttiva è un edificio a struttura scatolare in cui le pareti e i solai sono diaframmi rigidi collegati meccanicamente tra loro. L'edificio affida proprio al comportamento "a scatola" la propria efficienza strutturale, caratterizzata dalla continuità del materiale e dalla distribuzione delle sollecitazioni meccaniche in modo pressoché uniforme su tutto il materiale disponibile. Il pannello XLAM ha permesso di superare i tradizionali limiti delle costruzioni in legno a telaio, che sono stati un obiettivo ulteriore freno alla diffusione specie in Italia, delle costruzioni di legno, e ha spinto il mondo accademico e scientifico a ricercare in maniera approfondita la definizione dei parametri comportamentali soprattutto in relazione a eventi di natura sismica e a casi di incendio.

Rispetto al sistema costruttivo a telaio, il sistema XLAM impiega una maggiore quantità di materiale poiché l'intera sezione orizzontale del pannello è costituita da legno. Si tratta tuttavia di legno di qualità inferiore rispetto a quello utilizzato per la realizzazione dei montanti e traversi del *platform frame* e che non avrebbe avuto collocazione negli altri sistemi costruttivi che pure prevedono il legno come materiale base. Questa caratteristica rende praticamente a parità di costi le pareti realizzate con i due sistemi costruttivi, con il vantaggio a favore del sistema a pannelli portanti di poter esprimere a parità di sezione orizzontale portanze maggiori (paragonabili a quelle di un pannello in calcestruzzo come ordine di grandezza). È la ragione per la quale oltre i tre/quattro piani, l'utilizzo del pannello portante in XLAM diventa praticamente la sola soluzione ragionevolmente perseguibile nell'edilizia dei multipiano in legno. Il che non vuol dire in assoluto che non possono realizzarsi edifici multipiano con struttura a telaio anche oltre i tre/quattro piani, tuttavia le dimensioni dei montanti e dei telai iniziano a diventare tali da lasciar preferire la soluzione a pannelli portanti.

Sono proprio i risultati conseguiti, grazie anche alla ricerca italiana (progetto SOFIE), che fanno di questo sistema costruttivo il principio ispiratore di quasi tutti gli edifici multipiano in legno che vengono oggi realizzati in Italia e in Europa.



Figura 1.6
Edificio a struttura XLAM
in costruzione

1.3. Progetto SOFIE

Affrontare la tematica degli edifici multipiano in legno è praticamente impossibile senza citare il punto di partenza di tipo sperimentale che ha in pratica generato l'evoluzione del fenomeno dei multipiano in XLAM in Italia.

Il progetto SOFIE è un progetto di ricerca scientifica finanziato dalla Provincia autonoma di Trento e coordinato e condotto dal CNR-IVALSA (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree) che, sebbene partito nell'ormai lontano 2005, rappresenta un vero e proprio riferimento per tutto il settore dei multipiano in legno. Lo scopo principale del progetto di ricerca era quello di analizzare il comportamento di edifici multipiano realizzati con tecnologia XLAM, sia dal punto di vista della risposta sismica, sia per quanto riguarda il comportamento acustico, termico e nei confronti del fuoco. Intuendo in anticipo (cosa poi puntualmente verificatasi) l'interesse che il mercato dell'edilizia avrebbe riservato a questo tipo di costruzioni, questa ricerca tutta italiana ha dimostrato in termini scientifici la validità del sistema costruttivo e le potenzialità in termini di risposta alle esigenze abitative e costruttive dell'edilizia moderna.

Fino al 2006 in Italia e in Europa nessuno studio aveva affrontato in maniera sperimentale l'individuazione del fattore di struttura di edifici multipiano in XLAM, né erano mai state effettuate prove sismiche su tavola vibrante su edifici interi.

Per raggiungere i risultati a cui poi è giunto il progetto SOFIE, l'Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree del CNR ha definito e condotto il programma di ricerca in collaborazione con il NIED (National Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Giappone), articolandolo in una serie di momenti e fasi così riassumibili:

- prove monotone e cicliche su giunti;
- prove monotone e cicliche su pannelli parete con diverse configurazioni di giunti, aperture, dimensioni dei pannelli e aliquota di carichi verticali applicati;
- prove pseudo-dinamiche su un provino di edificio a un piano in dimensioni reali con 3 differenti configurazioni delle aperture nelle pareti esterne parallele alla direzione di applicazione del terremoto condotte presso il laboratorio prove materiali e strutture della Facoltà di Ingegneria di Trento;
- prove su tavola vibrante su un edificio di tre piani con dimensioni in pianta di 7×7 m e 10 m di altezza totale con copertura a due falde in 3 differenti configurazioni delle aperture nelle pareti esterne parallele alla direzione di applicazione del terremoto e con tre diversi terremoti (Kobe, El Centro e Nocera Umbra) a due valori crescenti di accelerazione di picco al suolo (0,15g e 0,50g);
- con riferimento all'edificio di tre piani in scala 1:1, è stato provato con i terremoti di Kobe e Nocera Umbra con livelli di accelerazione crescenti fino al raggiungimento dello stato di "quasi-collasso";

Lo stesso programma è poi stato implementato per un edificio di sette piani nel 2007. Tuttavia sebbene il primo esperimento (nel 2006) su tavola vibrante interessò un modello di soli tre piani, i risultati che ne derivarono incoraggiarono la ricerca fino a spingerla a verificare gli effetti di azioni sismiche simulate, anche su un edificio di sette piani (2007).

Relativamente al primo esperimento l'edificio sottoposto a prova di tre piani, aveva una dimensione in pianta di 7×7 m circa e 10 m di altezza totale con una classica copertura a due falde.

I pannelli parete e solaio sono stati realizzati tutti con tecnologia XLAM.

Il collegamento alla tavola vibrante venne realizzato attraverso un telaio d'acciaio a sua volta connesso con bulloni alla piastra vibrante.

Venne in sostanza riprodotto il classico sistema di vincolo tra parete e fondazione, che poi nella pratica esecutiva costituisce una consuetudine operativa e progettuale. I pannelli verticali del piano terra furono collegati al telaio d'acciaio con elementi angolari tipo *holdown* e questi chiodati al pannello con elementi a gambo cilindrico.

I pannelli esterni dell'edificio avevano spessore di 85 mm, mentre per i solai fu utilizzata una lastra solaio di 145 mm di spessore.

Tralasciando la descrizione puntuale delle modalità esecutive che, va detto erano in linea con i criteri costruttivi di tipo operativo, il modello riproduceva un sistema di aperture (finestre, porte e varchi) rispondente a una tipologia abitativa ordinaria.

Si trattava in definitiva di un'abitazione vera sottoposta a prova.

Sui due solai del primo e secondo piano dell'edificio furono posizionate delle masse aggiuntive di lastre d'acciaio a simulare il peso dei materiali costruttivi di completamento del pacchetto del solaio (rivestimento soffitto, isolamento acustico con strato di sabbia, massetto di calcestruzzo alleggerito, pavimentazione) normalmente ipotizzabili in condizioni ordinarie di esercizio. La tabella 1.1 mostra i tipi di carichi applicati al modello.

Tabella 1.1. Progetto SOFIE, carichi imposti

Piano	Permanenti (kN)	Aggiuntivi (kN)	Totali (kN)
Primo	60	150	210
Secondo	60	150	210
Copertura	45	0	45
Totale	165	300	465

Al modello è stato applicato un sistema di 20 accelerometri. Per misurare gli spostamenti di ciascun piano relativamente alla base in direzione parallela a quella d'applicazione dell'accelerogramma, sono state posizionate e collegate rigidamente alla tavola due torri di misura rigide d'acciaio sul lato est dell'edificio sulle quali sono stati posizionati 8 trasduttori di spostamento a filo e 6 laser (2 per piano), oltre a due trasduttori di spostamento per misurare lo scorrimento dei pannelli del piano terra rispetto alla base.

La valutazione sperimentale degli spostamenti di interpiano ha comportato il posizionamento di 15 strumenti composti da pannelli spessi di compensato collegati al soffitto e al pavimento di ogni piano, ai quali sono stati collegati dei trasduttori di spostamento.

Gli stessi spostamenti sono stati misurati mediante un sistema composto da barre d'alluminio e *strain gages*.

Per misurare i sollevamenti sono stati posizionati 12 trasduttori di spostamento (4 a ciascun piano) e altri 14 trasduttori di spostamento sono stati posizionati per misurare lo scorrimento relativo tra i pannelli parete e solaio.

Il modello è stato sottoposto a un totale di 26 accelerogrammi, secondo configurazioni diverse dell'edificio.

Dei diversi accelerogrammi proposti, 15 hanno avuto un valore dell'accelerazione di picco uguale o maggiore a 0,5g.

Tabella 1.2. Elenco prove effettuate progetto SOFIE

N.	Data	Configurazione	Accelerogramma	Accelerazione di picco (g)
1	23/06/06	A	Kobe	0,15
2	23/06/06	A	Kobe	0,15
3	23/06/06	A	El Centro	0,15
4	23/06/06	A	Nocera Umbra	0,15
5	23/06/06	A	Kobe	0,60
6	28/06/06	A	El Centro	0,50
7	28/06/06	A	Nocera Umbra	0,50
8	03/07/06	B	Kobe	0,15
9	03/07/06	B	El Centro	0,15
10	03/07/06	B	Nocera Umbra	0,15
11	03/07/06	B	Kobe	0,50
12	03/07/06	B	El Centro	0,30
13	04/07/06	B	El Centro	0,50
14	04/07/06	B	Nocera Umbra	0,50
15	05/07/06	C	Kobe	0,15
16	05/07/06	C	El Centro	0,15
17	05/07/06	C	Nocera Umbra	0,15
18	05/07/06	C	Nocera Umbra	0,50
19	05/07/06	C	El Centro	0,50
20	07/07/06	C	Kobe	0,50
21	07/07/06	C	Kobe	0,82
22	07/07/06	C	Kobe	0,50
23	07/07/06	C	Kobe	0,50
24	10/07/06	C	Kobe	0,82
25	10/07/06	C	Nocera Umbra	1,20
26	10/07/06	C	Kobe	0,90

I risultati delle prove sono stati riassunti nella tabella 1.3 per i terremoti di intensità maggiore o uguale a 0,50g. Lo stato limite di “quasi-collasso” è stato raggiunto con il terremoto di Kobe (0,90g) al termine del quale è stato rilevato il collasso di un numero limitato di *holdown* (due).

La rilevanza delle accelerazioni sismiche imposte, rapportata al limitato stato di danno rilevato è un dato che chiaramente ha portato a concludere l'esistenza di un'elevatissima efficienza strutturale del sistema costruttivo.

Non deve per altro spaventare l'insorgenza del collasso dell'elemento di connessione, poiché questa condizione di danno non coincide con il collasso del

pannello, il quale a differenza dell'elemento di connessione conserva intatta la sua condizione.

In termini economici la rilevanza del danno è sostanzialmente irrisoria poiché la riparazione dell'edificio con ripristino delle condizioni iniziali ante-sisma, consiste nella sostituzione delle piastre angolari danneggiate e nella sostituzione delle viti deformate nei giunti verticali tra i pannelli, interventi che non compromettono l'uso dell'edificio e che consentono la quasi immediata rioccupazione dell'immobile. L'edificio, al termine di tutte le prove effettuate, è ritornato perfettamente nella sua posizione originaria senza evidenziare alcuna deformazione permanente.

Tabella 1.3. Risultati delle prove (configurazione C) in termini di dato osservato

Accelerogramma	PGA (g)	Intervento di riparazione ante-prova	Danno osservato post-prova
Nocera Umbra	0,50	Serraggio bulloni <i>holddown</i>	Nessuno
El Centro	0,50	Serraggio bulloni <i>holddown</i> Sostituzione viti nei giunti verticali tra i pannelli	Nessuno
Kobe	0,50	Serraggio bulloni <i>holddown</i> Sostituzione viti nei giunti verticali tra i pannelli	Nessuno
Kobe	0,80	Serraggio bulloni <i>holddown</i> Sostituzione viti nei giunti verticali tra i pannelli	Piccole deformazioni nelle viti dei giunti verticali
Kobe	0,50	Serraggio bulloni <i>holddown</i> Sostituzione viti nei giunti verticali tra i pannelli	Nessuno
Kobe	0,50	Serraggio bulloni <i>holddown</i>	Nessuno
Kobe	0,80	Sostituzione degli <i>holddown</i> e degli angolari e serraggio bulloni Sostituzione viti nei giunti verticali tra pannelli	Piccole deformazioni nelle viti dei giunti verticali
Nocera Umbra	1,20	Serraggio bulloni <i>holddown</i> Sostituzione viti nei giunti verticali tra i pannelli	Deformazioni nelle viti dei giunti verticali tra pannelli
Kobe	0,90	Nessuno	Collasso degli <i>holddown</i> e marcate deformazioni nelle viti dei giunti verticali tra pannelli

Il territorio italiano è considerabile sismico nella sua interezza. Il fatto che alcune porzioni di territorio hanno tempi di ritorno molto lunghi per quanto riguarda terremoti considerabili significativi, non vuol dire che tali aree possano considerarsi immuni da potenziali eventi tellurici.

Il terremoto dell'Emilia del 2012 né è una prova più che consistente. Tuttavia le massime accelerazioni sismiche attualmente ipotizzabili sul nostro territorio sono dell'ordine di 0,35g, mentre, come si è visto, il modello sperimentale provato nel 2006 ha mostrato segni sensibili di danno nella prova con accelerazione di picco pari a 0,90g.

Il progetto SOFIE ha avuto un'evoluzione nel 2007 con un modello di entità maggiore pari a sette piani sul quale sono state effettuate le medesime considerazioni e tratte conclusioni sostanzialmente in linea con i primi risultati, che hanno incoraggiato e convinto sulla possibilità di poter utilizzare la tecnologia XLAM come difesa dall'azione sismica anche per edifici complessi e di dimensioni consistenti.

1.4. Ragioni di una scelta

La scelta di realizzare una struttura, prima ancora in legno e successivamente con pannelli XLAM, sia essa un multipiano o una semplice costruzione a uno o due piani, è la sintesi di un processo di analisi che oltre ad andare nella direzione della sostenibilità, risponde evidentemente anche a esigenze di tipo prestazionale. L'approccio al legno come materiale da costruzione per uso strutturale, implica già di per sé un certo percorso culturale e quindi l'aver maturato il convincimento che l'utilizzo del pannello di legno possa concretamente risolvere alcune delle esigenze di partenza e cioè:

- resistenza meccanica: il pannello XLAM è dotato di un ottimo rapporto massa/prestazioni con una buona stabilità dimensionale, buona isotropia nel piano. È relativamente semplice ottenere strutture duttili controllando accuratamente il sistema delle connessioni;
- sicurezza in caso di incendio: la conoscenza delle modalità di propagazione del fuoco nel legno ne permette il controllo degli spessori quasi sempre sovrabbondanti rispetto alle reali necessità meccaniche. Questo determina tempi lunghi di perdita di resistenza. Assenza in caso d'incendio di fumi scuri o tossici;
- sostenibilità: si tratta di un materiale naturale a bassa emissione di CO₂ in grado di essere completamente riciclato a fine utilizzo. Le fasi di cantiere avvengono a bassa emissione di rumori e polveri sottili. I pannelli non contengono formaldeide;
- facilità di esecuzione: le fasi di cantiere sono semplici e veloci e a basso impatto di pericolosità e con impiego di risorse di cantiere molto modeste;
- contenimento energetico: la conducibilità del legno ($U = 0,12-0,13$ W/mK) permette che il pannello sia di per sé un materiale isolante e con una discreta inerzia termica. Le costruzioni a pannelli di XLAM sono praticamente prive di ponti termici e molto semplici da completare con cappotti isolanti che risultano molto contenuti dimensionalmente a parità di trasmittanza.

Dunque l'avvicinamento al sistema costruttivo in legno e in particolare al sistema a pannelli portanti non è una casualità, né una risposta di tendenza. Appare molto più spesso come una reazione progettuale "naturale" che deve avere una genesi e uno sviluppo altrettanto naturale.

È quindi fondamentale conoscere i materiali, le tecniche di assemblaggio e i passaggi in capo al progettista che concorrono, insieme alla fase di montaggio, al raggiungimento dell'insieme complessivo dei requisiti prestazionali di partenza.

1.5. Legno e sostenibilità ambientale

Prima di entrare nello specifico della trattazione delle costruzioni multipiano in legno, è doveroso spendere qualche parola sulla sostenibilità delle costruzioni realizzate utilizzando questo straordinario materiale.

Nella conferenza sulla protezione del clima di Kyoto in Giappone del 1997 sono stati fissati gli obiettivi vincolanti a livello legale per la riduzione delle emissioni dei gas serra. Il protocollo di Kyoto è stato ratificato dall'Italia con la Legge 120 del 2002. Il protocollo è entrato in vigore il 16 febbraio 2005 perché questa data segna il novantesimo giorno successivo alla data in cui almeno 55 parti della convenzione lo hanno ratificato.

Il trattato prevede l'obbligo in capo ai paesi industrializzati di operare una riduzione delle emissioni di elementi inquinanti (biossido di carbonio e altri cinque gas serra, ovvero metano, ossido di diazoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi ed esafluoruro di zolfo) in una misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990 – considerato come anno base – nel periodo 2008-2012. L'atmosfera terrestre contiene circa 3 milioni di megatonnellate (Mt) di CO₂. Il protocollo prevede che i Paesi industrializzati riducano del 5% le proprie emissioni di questo gas.

Secondo un rapporto del Global Carbon Project, le emissioni di CO₂ nel 2012 sono state di circa 35,6 miliardi di tonnellate: un dato che rispetto ai valori del 1990 è risultato in crescita del 58%. Ciò è attribuibile solamente a un ristretto numero di Stati. Basti pensare che le emissioni cinesi sono cresciute del 9,9% nel 2011 e del 10,4% l'anno precedente (oggi il gigante asiatico è responsabile del 28% della CO₂ emessa nel mondo, contro il 16% degli USA). In India, inoltre, l'aumento nel 2012 è stato del 7,5%, mentre nel 2010 si era toccato il 9,4%. Quanto all'Europa l'incremento di produzione di anidride carbonica nel 2012 ha registrato un + 2,8%.

A oggi, 177 Paesi e un'organizzazione di integrazione economica regionale (EEC) hanno ratificato il protocollo o hanno avviato le procedure per la ratifica. Questi paesi contribuiscono per circa il 62% alle emissioni globali di gas serra. Abbattere il contenuto in atmosfera di anidride carbonica è un impegno sociale per le future generazioni oltre che un obbligo normativo.

L'utilizzazione del legno a uso strutturale per l'edilizia abitativa va nella direzione del protocollo di Kioto. Per avere un'idea di come l'utilizzo del legno sia una risorsa per il pianeta è sufficiente fare un riferimento territoriale anche limitato.

La quasi totalità del legno per la produzione industriale destinata all'edilizia oggi per quanto riguarda il mercato italiano proviene dall'Austria. Nella foresta austriaca sono immagazzinati circa 800 milioni di tonnellate di carbonio (C). Quindi il legno immagazzina anidride carbonica. Questa rimane legata anche quando l'albero viene abbattuto per essere usato. In Austria l'area boschiva si estende per 4 milioni di ettari, che corrispondono al 47% della superficie nazionale (in Italia la superficie boschiva copre circa il 32% del territorio nazionale molto più esteso però di quello austriaco). Nella foresta austriaca è disponibile un miliardo circa di metri cubi di legno. Ogni anno nella foresta crescono circa 31 milioni di m³ di legno.

Il taglio per la produzione industriale interessa circa 20 milioni di m³ di legno. La foresta austriaca accresce il proprio volume di legno di un metro cubo al secondo. L'intero quantitativo per la produzione di un edificio multipiano di sette livelli per circa 26 appartamenti equivale alla produzione di legno delle foreste austriache di un solo quarto d'ora.

Un albero, con una superficie fogliare di circa 7.000 m², assorbe nel corso di un'ora 2,5 kg di CO₂ contenuti in 4.800 m³ di aria e libera 1,7 kg di ossigeno nell'aria, coprendo i bisogni di ossigeno di 10 persone; durante questo processo vengono utilizzate oltre 6.000 calorie di energia solare e viene traspirata una notevole quantità di acqua (circa 300-400 dm³) migliorando il microclima di 8.000 m³ di aria.

Chiaramente una volta che l'albero è tagliato e non ritorna immediatamente al proprio ciclo biologico, il suo spazio è occupabile da un nuovo albero capace di immagazzinare altra CO₂.

Quindi una parte della CO₂ precedentemente immagazzinata viene destinata a un settore che notoriamente invece produce CO₂.

Durante la fase post terremoto del sisma che ha colpito L'Aquila nel 2009 il quantitativo totale di legno per pannelli XLAM fornito da una singola azienda (11.000 m³ di legno per 29.000 m² di alloggi) è stato riprodotto dalle foreste di origine in sole 3,5 ore di attività. Si stima che il quantitativo di materiale utilizzato per la produzione dei 29.000 m² di alloggi a struttura in legno abbia permesso di fissare a lungo termine circa 9.900 tonnellate di CO₂.



Figura 1.7. Ciclo dell'utilizzo del legno

Da questa rapida panoramica sulla funzione regolatrice di anidride carbonica dell'albero e quindi del legno è certamente evidente che l'utilizzo a uso strutturale del legno, in una società che produce anidride carbonica depauperando le risorse fossili, è certamente una scelta in direzione della sostenibilità.

1.6. Materiali ed elementi della struttura

La struttura di un edificio in legno realizzato con tecnologia a pannelli portanti in XLAM è costituita da pochi elementi e sostanzialmente da soli due materiali: legno e acciaio. Il primo, ormai solo residualmente utilizzato nella forma tradizionale di legno massiccio uso "Fiume", è impiegato in forma di pannelli (XLAM) ed elementi *beam* (travi e pilastri) in legno lamellare. L'acciaio è utilizzato per le connessioni tra elementi in legno e in termini di peso è assolutamente minoritario (pur considerando la leggerezza del legno) rispetto al quantitativo totale di materiale utilizzato (nell'ordine del 5-10 per mille del peso totale), tuttavia svolge una funzione assolutamente imprescindibile poiché è proprio attraverso le unioni metalliche che avviene la trasmissione degli sforzi tra un elemento e l'altro.

Gli elementi base di un multipiano in legno sono dunque:

- pannelli portanti disposti nello spazio in senso verticale (setti) e orizzontale (lastre solaio), opportunamente collegati tra loro;
- connessioni metalliche;
- elementi strutturali in legno (generalmente legno lamellare).

1.6.1. Pannello di legno massiccio a strati incrociati XLAM

Con il termine XLAM si intende un pannello di legno (generalmente di conifera) realizzato accoppiando strati di tavole incrociati fra loro. La sigla XLAM sta per l'appunto a indicare un incrocio (la "X") di lamelle ("LAM") di legno. L'altro acronimo utilizzato per indicare il materiale è CLT, cioè *Cross Laminated Timber*, che contiene nella formula estesa la concezione del procedimento utilizzato per realizzare il pannello.

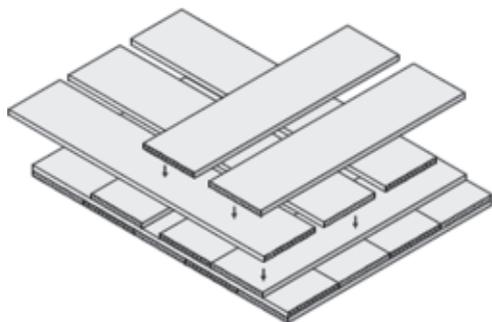


Figura 1.8
Stratigrafia del pannello

La tecnica di accoppiaggio di lamelle di materiale ricorda molto da vicino quella utilizzata per la costruzione di elementi in legno lamellare di cui per certi versi la tecnica XLAM è figlia. Non a caso i pannelli attualmente utilizzati più efficacemente sono proprio prodotti per incollaggio delle varie lamelle che vengono sovrapposte le une sulle altre a strati incrociati e sottoposte ad azione meccanica di pressaggio (generalmente $> 8 \text{ N/mm}^2$).

Esistono produzioni di XLAM inchiodato o parzialmente inchiodato e parzialmente incollato, ma rappresentano al momento una produzione di nicchia che tende progressivamente a perdere quota di mercato. La scelta del tipo di materiale da impiegare è quasi sempre legata alla sensibilità del progettista e quindi anche alla sua capacità di riconoscere, nel panorama delle offerte commerciali, quella che meglio risponde alle proprie esigenze.

Le singole lamelle vengono giuntate a pettine, piallate e posate sciolte l'una accanto all'altra e gli strati così ottenuti vengono incollati a tutta superficie con orientamento perpendicolari



Figura 1.9
Pannelli di XLAM
di vario spessore a 5 strati

Come effetto della diffusione del materiale e con il conseguente crescente interesse da parte dei progettisti, il mercato ha risposto con un'eterogeneità dell'offerta e quindi con la disponibilità di spessori, strati, moduli e risposte commerciali molto differenti in grado di coprire quasi tutte le esigenze progettuali.

Per essere classificato pannello XLAM, è necessario che il numero minimo di strati sia pari a tre. Generalmente si trovano in commercio pannelli di spessore diverso (e quindi prestazioni meccaniche diverse) che variano dai tre fino ai nove strati. Lo spessore delle lamelle influenza sia lo spessore che le prestazioni meccaniche. Quanto alle dimensioni dei pannelli, queste sono legate essenzialmente a problemi di trasporto, per questa ragione le dimensioni massime dei pannelli raramente raggiungono i 4×16 metri e più frequentemente sono disponibili in moduli che partono da 1,20 metri a seconda del tipo e della casa produttrice.

Relativamente alle essenze impiegate la maggior parte della produzione impiega abete (rosso o bianco), pino, douglasia, larice.

Al momento in Italia manca una specifica normativa sui pannelli XLAM, che ne fissi le caratteristiche minime per l'accettazione del materiale; esiste invece un riferimento generico al paragrafo 11.7.5 delle NTC 2008 che rimanda per i "pannelli a base di legno per uso strutturale" alla norma europea armonizzata UNI EN 13986.

Più in generale valgono, per il materiale a uso strutturale, i disposti del paragrafo 11.1 delle NTC 2008 relativa alla possibilità di utilizzare materiale (quindi anche pannelli XLAM) recante la marcatura CE prevista dalla Direttiva 89/106/CEE, *Prodotti da costruzione*.

Quindi il primo e principale accertamento sul materiale riguarda la marcatura CE (in alternativa benessere tecnico europeo ETA) e il possesso quindi di certificazione di accompagnamento obbligatoria per l'accettazione. In assenza di certificazione è bene abbandonare l'idea di rifornirsi di quel materiale e optare per produttori in grado di fornire tutte le certificazioni successivamente necessarie al colludo strutturale dell'opera.

1.6.1.1. Ritiro e rigonfiamento del legno

È noto che il legno è un materiale sensibile all'umidità e che tende naturalmente a porsi in equilibrio igrometrico con l'ambiente.

Un elemento in legno a vista esposto in un ambiente confinato interno a un'abitazione, normalmente ha la tendenza a porsi in condizioni di umidità prossime al 10% con variazioni che oscillano intorno al 2%. Lo stesso elemento posto in esterno, in condizioni ordinarie, riparato dalla pioggia diretta troverà un equilibrio igrometrico che si aggira intorno al 17% con variazioni percentuali in più o in meno del 5%.

Le variazioni dimensionali legate all'umidità sono praticamente irrilevanti in senso longitudinale, mentre in senso trasversale sono dell'ordine dello 0,2% per ogni punto percentuale di aumento o diminuzione di umidità.

Per i pannelli di XLAM la variazione dimensionale legata all'umidità in senso longitudinale è trascurabile e non produce grosse variazioni dello stato tensionale del pannello. Può assumere (in base allo spessore) un certo rilievo nella dimensione trasversale solo se il pannello è esposto all'umidità.

In genere nelle applicazioni legate all'edilizia multipiano è quasi del tutto esclusa la possibilità di esposizione diretta del pannello, proprio perché questo è normalmente inglobato in un pacchetto che comprende anche i rivestimenti e gli isolamenti.

1.6.1.2. Aspetti qualitativi del pannello

Una caratteristica abbastanza importante del pannello riguarda l'aspetto qualitativo che è una funzione della destinazione del pannello stesso e dell'uso a cui il materiale è chiamato.

I produttori hanno diversi approcci alla qualificazione del materiale sotto il piano strettamente qualitativo per cui, pur esistendo una normativa di riferimento (EN 13017-1) è assai più probabile che le case produttrici adoperino una propria terminologia per distinguere i vari tipi di superficie, quasi sempre significativamente distinti per costi unitari.

Una classificazione abbastanza interessante e piuttosto comune nell'approccio con i maggiori produttori europei è quella che distingue il materiale su tre livelli qualitativi:

- a vista
- standard
- industriale.

La qualità a vista è quella che si presenta da un punto di vista estetico con il materiale grezzo o piallato perfettamente allineato e con pochissimi nodi o imperfezioni. Chiaramente viene impiegato materiale grezzo delle classi di selezione delle lamelle più elevate. Di solito anche il processo di lavorazione è più accurato e le lamelle vengono pre-incollate o pre-lavorate, assicurando nell'accostamento aperture minime dei giunti. Inoltre i pannelli si presentano privi di smussature in maniera da risultare praticamente omogenei nell'accostamento tra pannello e pannello. Di solito la qualità a vista implica una perfetta piallatura e complanarità del materiale.

Ovviamente nella posa in opera e nel montaggio è necessario che la manipolazione e le giunzioni siano particolarmente accurate poiché, se il materiale è destinato a essere percepito esteticamente a vista, esso deve essere privo di macchie indelebili e difetti di montaggio.

La qualità standard è una qualità intermedia, che può anche essere usata anche a vista se si vuole un effetto particolare. Tuttavia, comprensibilmente, presenta standard qualitativi più bassi della categoria precedente: di solito nella qualità standard vengono ammessi piccole quantità di nodi cadenti, piccoli difetti e tasche di resina.

La qualità industriale è destinata a un uso prettamente strutturale ed è inevitabilmente inserita in una stratigrafia che ne occulta i difetti estetici. Sul piano della resistenza meccanica non presenta grosse differenze rispetto alle categorie precedenti, pur tuttavia la classificazione delle lamelle avviene esclusivamente in base alla resistenza. Vengono ammesse variazioni cromatiche e fiammature, nodi cadenti, inclusioni di corteccia e tasche di resina.

È chiaro che il legno è un materiale organico naturale che perviene all'utilizzo con una manipolazione quasi esclusivamente meccanica. Anche la massima cura nella scelta delle lamelle può implicare variazioni ottiche e dimensionali rilevabili.

Tabella 1.4. Caratteristiche qualitative dei pannelli XLAM

Criteri	A vista (A)	Standard (B)	Industriale (C)
Giunzioni aperte	Fino a 2 mm	Fino a 4 mm	Fino a 4 mm
Finitura superficiale	Levigata	Levigata	Piallata a rotazione
Combinazioni di essenze	Non ammessa	Sporadicamente	Ammessa
Nodi legati	Ammesso	Ammesso	Ammessi
Nodi neri, morti	Sporadicamente	Sporadicamente	Ammessi
Tasche di resina	Ammesse 5 × 50 mm	Ammesse 10 × 90 mm	Ammessi
Inclusioni di corteccia	Non ammesse	Sporadicamente	Ammessi
Fessurazioni	Sporadicamente	Ammesse	Ammesse
Smussi	Non ammessi	Non ammessi	Ammessi
Punti vuoti	Sporadicamente	Sporadicamente	Nessun requisito
Variazioni cromatiche	Non ammesse	Non ammesso	Ammesse
Legno di compressione	Sporadicamente	Ammesso	Ammesso

Con il tempo tra le singole tavole possono verificarsi piccole fughe per ritiri e fessurazioni dovute al proseguire della stagionatura che non inficiano le caratteristiche meccaniche del pannello ma che è bene considerare dal principio “fisiologiche”.

Inoltre la precisione delle lavorazioni eseguite presso i centri di taglio meccanizzati può determinare la convenienza a non eseguire tali lavorazioni direttamente in cantiere poiché l’effetto che ne conseguirebbe potrebbe avere conseguenze sul materiale a vista.

1.6.1.3. Strati e spessori

Il numero di strati e gli spessori da impiegare per ogni pannello della costruzione sono spesso il primo problema progettuale che si affronta nello studio dell’edificio multipiano in XLAM. Già in fase di analisi di preventivazione dei costi dell’investimento è necessario avere un chiaro prospetto di quelli che saranno i quantitativi di materiale da impiegare e la tipologia richiesta.

Infatti il costo della struttura dipende in maniera proporzionale dalla quantità di materiale utilizzato e quindi, a parità di superficie, dagli spessori impiegati nella progettazione. A prescindere dagli aspetti prestazionali e normativi, ci sono molti altri fattori che possono determinare la scelta degli spessori, non da ultimo quello esecutivo e la facilità della cantierizzazione. Dunque se ragionare in termini di costo significa certamente valutare correttamente la quantità di materiale strettamente necessario, dall’altra parte è sempre necessario partecipare in maniera intima a tutta la genesi progettuale, al fine di stabilire tutte quelle variabili che

non sono il costo diretto della costruzione ma che concorrono alla determinazione della stima globale e della qualità del prodotto. È altresì vero che qualità non sempre significa costi fuori budget, poiché molto spesso la qualità abbassa alcuni costi complementari e soprattutto incide sui costi di manutenzione ordinaria e straordinaria dell'edificio.

Quanto agli spessori e agli strati, si è fatto accenno a una certa eterogeneità del settore industriale di riferimento che non è certamente quello italiano ma è quello europeo.

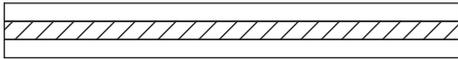
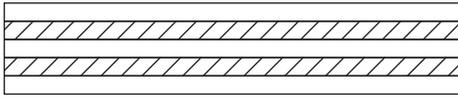
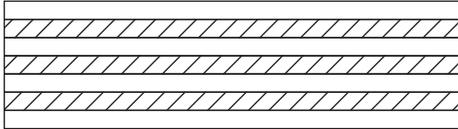
In Europa esistono alcuni grandi costruttori, che investono moltissimo anche in ricerca e marketing, e una serie di produttori minori ma non per questo meno validi. Le varie strategie commerciali collocano le rispettive produzioni in fasce di mercato molto spesso influenzate dagli stessi progettisti e professionisti del settore.

Fino a qualche anno fa si assisteva a una differenziazione di prodotto, a seconda della provenienza industriale, legata soprattutto alla personalizzazione aziendale più che a esigenze prestazionali.

Negli ultimi anni, grazie alla diffusione del prodotto e all'apprezzamento dei progettisti, si sta verificando un'inversione di tendenza con una certa uniformazione e standardizzazione dei prodotti. Questo aiuta non poco il progettista che non è obbligato in fase di progetto a individuare preventivamente il fornitore.

In questo paragrafo si cercherà di individuare gli elementi comuni e le modalità di orientamento per il progettista.

Tabella 1.5. Schema stratigrafico e dimensione degli strati nei pannelli

Numero di strati	Schema	Da (mm)	A (mm)
3		50	130
5		85	215
7		190	340

I dati industriali dipendenti dal produttore sono:

- spessore delle lamelle;
- larghezza massima dei pannelli;
- lunghezza massima dei pannelli.

Anche in ambito dello stesso produttore gli spessori possono essere ottenuti con diverse composizioni degli strati. Ad esempio un pannello verticale da 120 mm di spessore può essere realizzato con un 3 strati 40 + 40 + 40 ma anche con un 5 strati 20 + 20 + 20 + 20 + 20.

Nel primo caso la superficie totale di strati orientati con le fibre in verticale è 40 + 40 = 80 mm ($A_{eff} = 800 \text{ cm}^2$), mentre nel secondo caso si ha 20 + 20 + 20 = 60 mm ($A_{eff} = 600 \text{ cm}^2$). Oltre all'area resistente varia anche il valore del momento resistente netto W , il momento d'inerzia netto I e il raggio d'inerzia netto i . Cioè variano gli aspetti geometrici che influiscono sulla resistenza del pannello.

Ad esempio, con riferimento a un pannello di lunghezza 200 cm, la diversa stratigrafia produce le variazioni indicate in tabella 1.6.

Tabella 1.6. Esempio di variazione dei parametri geometrici e di resistenza a parità di spessore

Spessore 120 mm	W_{eff} (cm^3)	I_{eff} (cm^4)	i_{eff} (cm)
3 strati 40 + 40 + 40	2086	9991	3,53
5 strati 20 + 30 + 20 + 30 + 20	1623	7743	3,59

Un altro produttore potrebbe produrre per lo spessore 120 mm un pannello 5 strati 30 + 20 + 20 + 20 + 30, dove la parte resistente è data da 30 + 20 + 30 = 80 mm ($A_{eff} = 800 \text{ cm}^2$), con valori ancora diversi dei vari moduli geometrici. Dunque, a parità di spessori e strati si possono ottenere prestazioni differenti.

La sensibilità del progettista è un fattore sempre fortemente caratterizzante il prodotto finale. Per tale motivo non è semplice individuare a priori tutte le variabili che in seguito daranno forma e corpo al progetto e quindi all'opera.

È vero però che ogni progettista, così come ogni sportivo o ogni artista, segue un proprio stile che è il frutto delle proprie esperienze e del proprio modello comportamentale (e in certi casi anche della propria etica professionale), quindi la scelta di una strada (quindi di una tipologia di pannello) o di un'altra dipende non solo da ragioni oggettive, ma anche da questioni meramente soggettive.

L'esperienza maturata in ambito diretto professionale ha portato gli autori a privilegiare a parità di spessore un maggior numero di strati, per ragioni non solo comportamentali del pannello ma anche e soprattutto in prospettiva delle possibili variabili legate all'estemporaneità della fase di montaggio non sempre controllabile in ogni suo momento.

Il momento di Inerzia efficace I_{eff} determina la rigidità flessionale efficace che è calcolata secondo le prescrizioni delle norme UNI EN 1995-1-1:

$$I_{eff} = \sum_1^n (I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2)$$

Il fattore γ_i tiene conto della deformazione di taglio (scorrimento) degli strati trasversali del pannello e vale:

$$\gamma_i = \frac{t_i}{E_{90} \cdot b}$$

dove

t_i = spessore dello strato i riferito ai soli strati resistenti

E_{90} = modulo elastico perpendicolare alle fibre

b = larghezza del pannello.

Relativamente alla resistenza del legno per sollecitazioni di taglio perpendicolari e parallele alle fibre, giova ricordare che nel taglio perpendicolare alle fibre le modalità di rottura sono abbastanza infrequenti, poiché di solito si innescano prima rotture per esempio degli appoggi o dei meccanismi di appoggio.

Assai più pericolose sono le sollecitazioni di taglio agenti parallelamente alle fibre in quanto il tipo di orientamento favorisce lo slittamento delle fibre le une sulle altre e quindi la rottura.

Per una struttura di XLAM simmetrica a 5 strati (con solo tre strati resistenti 1-3-5) si ha lo schema riportato in figura 1.10.

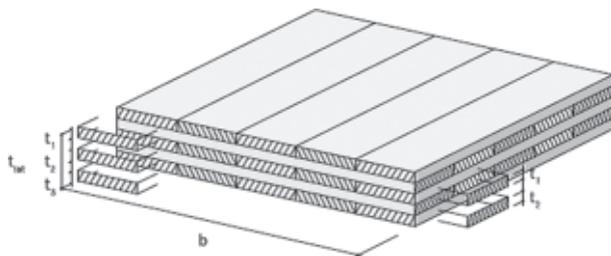


Figura 1.10
Strati resistenti
in funzione della sollecitazione

Le distanze dei baricentri degli strati sono:

$$a_1 = \frac{t_1}{2} + t_1 + \frac{t_2}{2}$$

$$a_3 = \frac{t_3}{2} + t_1 + \frac{t_2}{2}$$

$$a_2 = 0$$

Il momento d'inerzia efficace vale:

$$I_{eff} = I_1 + I_2 + I_3 + \gamma_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2 + \gamma_3 \cdot A_3 \cdot a_3^2$$

Inoltre:

$$I_i = \frac{b_i \cdot t_i^3}{12}$$

$$A_i = b \cdot t_i$$

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{1,3} \cdot A_1 \cdot t_1}{l^2 \cdot E_{90} \cdot b} \right)^{-1}$$

$$\gamma_3 = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{1,3} \cdot A_3 \cdot t_3}{l^2 \cdot E_{90} \cdot b} \right)^{-1}$$

$$\gamma_2 = 0$$

dove

$E_{1,3}$ = modulo di elasticità parallela alle fibre.

Quindi:

$$W_{eff} = \frac{2 \cdot I_{eff}}{t_{tot}}$$

con $t_{tot} = \sum_i t_i + t_i$.

1.6.2. Caratteristiche del materiale XLAM

Uno degli aspetti più importanti della progettazione è la determinazione delle caratteristiche del materiale per poi poter procedere alle operazioni di calcolo e verifica.

Ogni produttore di solito rende disponibile le caratteristiche del proprio materiale che provengono da prove sperimentali tramite le quali lo stesso produttore è pervenuto alla certificazione del materiale.

Le proprietà meccaniche del pannello possono essere in via preliminare inquadrare in un quadro complessivo che, sebbene variabile tra produttore e produttore, rimane abbastanza vicino ai dati della tabella 1.7 dai quali si discostano in maniera poco apprezzabile.

Poiché uno degli aspetti della progettazione più rilevanti è proprio quello di stabilire le caratteristiche del materiale, sarebbe opportuno che già in fase di progettazione si stabilisse la tipologia di materiale da impiegare, in maniera da poter utilizzare in maniera corretta i valori tabellari dichiarati. Quando ciò non è possibile

è bene stabilire in anticipo quanto meno la successione degli strati ed il relativo spessore, cercando di offrire più di una alternativa in fase di scelta del produttore. La tabella 1.7 può dunque essere usata come riferimento di partenza per una prima verifica di progetto, poiché i dati riportati sono fra quelli ritenuti più attendibili per un corretto uso in fase di progettazione.

Tabella 1.7. Tabella di riferimento proprietà meccaniche dei pannelli XLAM

Simbolo	Significato	Valore
$E_{0,mean}$	Modulo di elasticità parallelo alla direzione delle fibre delle tavole	11.600,00 N/mm ²
$E_{90,mean}$	Modulo di elasticità perpendicolare alla direzione delle fibre	370,00 N/mm ²
$G_{0,mean}$	Modulo di taglio parallelo alla fibratura delle tavole	650,00 N/mm ²
$G_{90,mean}$	Modulo di taglio perpendicolare alla direzione delle fibre	50,00 N/mm ²
$f_{t,0,d}$	Resistenza di calcolo a trazione parallela alla fibratura	14,00 N/mm ²
$f_{t,90,d}$	Resistenza di calcolo a trazione perpendicolare alla fibratura	0,12 N/mm ²
$f_{c,0,d}$	Resistenza di calcolo a compressione parallela alla fibratura	21,00 N/mm ²
$f_{c,90,d}$	Resistenza di calcolo a compressione ortogonale alla fibratura	2,50 N/mm ²
$f_{m,0,d}$	Resistenza di calcolo a flessione, parallelo alla fibratura	24,00 N/mm ²
$f_{v,0,d}$	Resistenza di calcolo a taglio parallelo alla direzione delle fibre	2,50 N/mm ²
$f_{v,90,d}$	Resistenza di calcolo a taglio perpendicolare alla direzione delle fibre	1,10 N/mm ²

Il peso dei singoli pannelli dipende chiaramente dal tipo di essenza con il quale il pannello è realizzato nonché dallo spessore del pannello stesso. Indicativamente i pannelli in XLAM si aggirano intorno ai 450 kg/m³ con punte oltre i 500 kg/m³. Altri aspetti tecnici di interesse per il progettista sono le caratteristiche del pannello che riguardano la fisica tecnica dell'edificio. Sotto quest'aspetto le caratteristiche sono quelle tipiche del legno e quindi dell'essenza utilizzata per la realizzazione del materiale.

Per il progettista è utile disporre di un quadro riassuntivo delle caratteristiche fisiche del materiale da poter valutare e utilizzare nella fase di progettazione degli involucri, degli isolamenti e per il calcolo delle dispersioni termiche.

Tabella 1.8. Proprietà fisiche del pannello

Proprietà	Simbolo	Valore	Unità
Conducibilità termica	λ	0,10-0,13	W/m ² K
Capacità termica	c	1,60-1,80	kJ/kgK
Resistenza alla diffusione vapore	μ	50-60	-
Umidità del legno stagionato	v	12%	Variazione +/- 2%

Ricordando che:

- la conducibilità termica indica la capacità di un materiale di condurre il calo-

re. Tanto più è bassa tanto più il materiale è un cattivo conduttore di calore. Il valore si esprime in W/m^2K ed è fortemente influenzato dall'umidità del materiale;

- la capacità termica indica la capacità di accumulo del calore e valori elevati di c significano grandi capacità di accumulo del materiale. In relazione alla massa il legno sotto questo aspetto ha un ottimo comportamento se paragonato ad altri materiali a parità di massa;
- la resistenza alla diffusione di vapore indica il rapporto adimensionale tra il passaggio di vapore del materiale rispetto a uno strato d'aria dello stesso spessore. Il legno sotto quest'aspetto ha un'ottima traspirabilità dovuta alle caratteristiche organiche e alla distribuzione delle fibre.

1.7. Connessioni

Nella realizzazione degli edifici multipiano con struttura di legno, le connessioni metalliche assumono un'importanza fondamentale poiché permettono la trasmissione degli sforzi tra pannello e pannello o tra pannello e elemento strutturale in calcestruzzo (fondazioni, nuclei, muri, setti), e specie in zona sismica, costituiscono l'insieme degli elementi attraverso i quali avviene la dissipazione d'energia.

Le moderne ed efficaci tecniche di costruzione con pannelli in XLAM prevedono sempre l'utilizzo di connessioni metalliche. Queste vanno scelte e dimensionate tenendo conto di esigenze non soltanto di tipo meccanico o prestazionale, ma anche di tipo costruttivo e realizzativo.

In buona sostanza si vuole che una connessione metallica sia:

- capace di trasmettere le sollecitazioni tra i vari elementi;
- che abbia un comportamento sufficientemente plastico;
- semplice da montare;
- facilmente reperibile;
- che comporti modeste lavorazioni sul legno.

Queste ultime infatti incidono in termini di costo sul pannello in XLAM e quindi sul costo complessivo della struttura.

È possibile avere diversi tipi di connessione che possono essere sintetizzati nel quadro di tabella 1.9.

Tabella 1.9. Tipi di connessione

Pannello – cemento armato	Pannello – legno
Pannelli verticali – fondazione o elemento di base	Pannello verticale – pannello orizzontale
Solaio – setto	Pannello verticale – pannello verticale
Pannello verticale – setto	Pannello verticale – struttura in legno

Ovviamente sono in linea teorica possibili anche altre combinazioni, così come anche se rare, possono verificarsi combinazioni di collegamento tra legno (inteso ovviamente come pannello) e acciaio, specie se utilizzato come rinforzo locale o elemento di giunzione per la risoluzione di problemi locali o di dettaglio. Il caso di collegamento legno-legno del pannello verticale con una struttura in legno è ovviamente riferito al collegamento tra pannello verticale e struttura di copertura in legno lamellare.

Come si diceva sono possibili anche altre combinazioni, così come in linea del tutto teorica è possibile realizzare una struttura portante a pannelli XLAM con una copertura in acciaio, ma ciò appare abbastanza estraneo alla filosofia di partenza che spinge alla scelta del materiale legno per la realizzazione della struttura. Inoltre vanno ben considerate e controllate le problematiche relative al differente coefficiente di dilatazione tra legno e acciaio poiché si potrebbero verificare tensioni locali con effetti anche sgradevoli per le finiture estetiche e i materiali di completamento.

Quindi la soluzione che prevede per la copertura una struttura in legno lamellare (più raramente in legno massello) è senza dubbio la più frequente.

Le connessioni metalliche rappresentano per certi versi il cuore della progettazione delle strutture in legno. Realizzare una struttura duttile e progettare agli stati limite con i pannelli a strati incrociati è relativamente semplice e rappresenta un'eccellente opportunità per il progettista.

Il concetto che sta a monte di tutta la progettazione è quello di evitare rotture fragili del pannello. Questo dovrà rimanere in campo elastico quando la connessione progettata per lo stato limite di riferimento sarà completamente plasticizzata.

Data la particolare concezione del sistema dissipativo, e l'influenza delle scelte sulla tipologia di connessione, l'insieme delle connessioni può in termini economici raggiungere l'ordine di grandezza del 15% sul costo della struttura per zone ad alta intensità sismica e con pressioni orizzontali del vento particolarmente gravose.

Chiaramente al costo del materiale per l'acquisto e il montaggio delle connessioni va aggiunto il costo per la posa in opera delle stesse.

Qualora si abbiano come riferimento i parametri di incidenza della ferramenta per costruzioni di uno-due piani, è bene considerare che tali parametri non trovano riscontro negli edifici multipiano dove le azioni in gioco sono prevedibilmente più complesse e consistenti.

1.8. Funzione delle connessioni

Una parete in XLAM è genericamente sottoposta a una serie di sollecitazioni lungo i bordi che sono:

- sollecitazioni verticali che sottopongono la parete a pressoflessione;
- sollecitazioni orizzontali che sottopongono la parete a taglio e a ribaltamento.

Lo schema della figura 1.11 indica le possibili sollecitazioni risultanti lungo i bordi di un generico pannello.



Figura 1.11
Schema sollecitazioni
lungo i bordi di un pannello

La trasmissione dei carichi verticali avviene attraverso le fibre del pannello orientate nel senso della sollecitazione.

Per quanto riguarda le sollecitazioni di taglio e per quelle che producono il ribaltamento nel piano del pannello, la trasmissione avviene attraverso le connessioni metalliche.

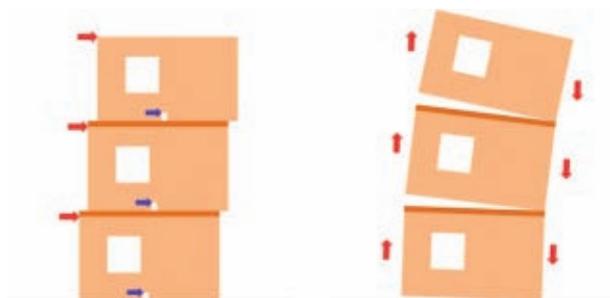


Figura 1.12
Sollecitazioni ed effetti
della sollecitazione

1.9. Connettori a gambo cilindrico

Con *connettori a gambo cilindrico* si indica l'insieme degli elementi metallici quali chiodi, bulloni, perni, barre filettate, ecc. In pratica elementi di acciaio con o senza filetto concepiti per trasmettere gli sforzi di taglio o ribaltanti da un elemento all'altro.

L'elevata duttilità delle connessioni metalliche a gambo cilindrico le rende particolarmente adatte per la risoluzione delle problematiche connesse alla progettazione di una struttura multipiano in legno.

La normativa tecnica² dispone che le capacità portanti, nonché le relative deformabilità dei collegamenti, debbano far riferimento a prove meccaniche o essere valutate con riferimento a norme di comprovata validità.

In realtà succede che in commercio sono disponibili elementi differenti che a seconda delle case produttrici sono accompagnati da schede tecniche che indicano tutti i valori di riferimento necessari alla determinazione sia della capacità portante che della deformabilità.

Le schede tecniche di accompagnamento di solito sono completate da prescrizioni di posa e schemi geometrici che fanno riferimento a norme UNI (in alcuni casi a norme DIN) che permettono al progettista un rapido predimensionamento o una progettazione di dettaglio abbastanza attendibile.³



Figura 1.13
Viti autofiletteanti – plasticità

Nel calcolo della capacità portante del singolo collegamento a gambo cilindrico, è obbligatorio considerare la capacità ultima del singolo connettore, il numero di sezioni resistenti e la geometria del sistema di collegamento.

Il riferimento italiano alle norme di comprovata validità è certamente il contenuto delle istruzioni del CNR-DT 206/2007 (*Istruzioni per la progettazione l'esecuzione e il controllo delle strutture in legno*), nonché quello dell'Eurocodice 5.

Dunque il rispetto delle prescrizioni delle istruzioni CNR 206/2007 o l'applicazione dell'Eurocodice 5, evita il ricorso alle prove meccaniche previste dalla normativa tecnica, qualora si disponga di materiale base (connettori cilindrici) dotati di certificazione CE e accompagnati da scheda tecnica che riporti le caratteristiche meccaniche del connettore (verificate queste su base sperimentale). È chiaro che la resistenza del collegamento è legata al rifollamento del legno e allo snervamento del connettore cilindrico.

² Punto 4.4.9 NTC 14/01/2008.

³ Si vedano le schede tecniche dei sistemi di fissaggio Rothoblaas, ad esempio.

Il rifollamento è quel processo di deformazione locale che porta a un'ovalizzazione del foro a seguito delle pressioni di contatto del connettore.

La resistenza al rifollamento è influenzata, oltre che da fattori intrinseci legati alla qualità del materiale, anche dalle caratteristiche geometriche del foro, dal vettore della forza applicata al connettore, nonché dalla direzione della fibratura del legno. La resistenza del collegamento può essere valutata con la formulazione della teoria di Johansen che è alla base delle principali normative in uso tra cui anche la CNR 206/2007 e l'Eurocodice 5.

I principi di calcolo e verifica dei collegamenti secondo la teoria di Johansen verranno trattati in un apposito paragrafo.

1.9.1. Viti

La vite da legno è un elemento cilindrico dotato di filettatura che può essere a testa piatta o a testa esagonale.

Il tipo di filettatura e il diametro dipendono dal tipo di utilizzo della vite e dalle modalità di impiego.

Esistono viti a filetto semplice, a tutto filetto (cioè filettate per tutta la lunghezza) o a doppio filetto (filettate nella parte iniziale e in quella terminale).

Il diametro nominale varia dai 4 ai 12 mm mentre la lunghezza varia dai 25 ai 600 mm.



Figura 1.14
Esempio di utilizzo vite per
connessione pannello-piastra

Le viti sono dotate di punta autoforante, e possono anche essere utilizzate con l'aggiunta di semplici rondelle per legno. La posa in opera normalmente è effettuata senza preforo con ausilio di avvitatori muniti di un'adeguata coppia torcente, evitando l'impiego di avvitatori a impulsivi.

L'uso del preforo è sconsigliabile per evitare difetti di posa della vite.

Le viti negli edifici multipiano vengono utilizzate in genere per le seguenti giunzioni:

- pannello-piastra metallica
- pannello-pannello
- pannello-solaio
- pannello-elementi *beam* (travi, pilastri, architravi).



Figura 1.15
Esempio di utilizzo vite per
connessione pannello-solaio



Figura 1.16
Vite VGZ (fonte: Rothoblaas)

1.9.2. Chiodi

I chiodi utilizzati nella realizzazione di edifici multipiano in legno sono in alcuni casi preferiti alle viti, per la facilità di posa dato che possono essere sparati con chiodatrici pneumatiche o elettriche.

Si distinguono in chiodo a gambo liscio e a gambo segnato e sono commercializzati con diametro da 2,75 a 8 mm e lunghezze variabili tra i 40 e i 200 mm. L'impiego dei chiodi è limitato alle connessioni nelle quali l'elemento è sollecitato solo a taglio e non a estrazione. Per quest'ultima applicazione esistono anche chiodi che presentano una scanalatura elicoidale detti *chiodi ad aderenza migliorata* (chiodi Anker).

Questi ultimi sono ideati per la connessione di lamiere piane esterne di acciaio, piastre, nastri forati, scarpe, profili angolari e staffe. Sono disponibili chiodi ad aderenza migliorata anche rilegati in fasce per pistola automatica.

Un possibile impiego nella realizzazione di edifici multipiano in legno risiede nella connessione di tavole di giunzione tra un pannello XLAM e l'altro.



Figura 1.17
Chiodo ad aderenza migliorata



Figura 1.18. Chiodi a gambo liscio per sparatrice automatica

1.9.3. Spinotti e perni auto perforanti

Gli spinotti sono elementi cilindrici parzialmente filettati o a superficie liscia e vanno inseriti in fori precedentemente realizzati.

Sono elementi abbastanza impiegati nelle connessioni delle travi in legno lamellare e dunque trovano applicazione anche nella realizzazione di edifici multipiano in legno poiché quasi sempre esistono parti della struttura (ad esempio la copertura) che presentano elementi in lamellare.

I fori del legno devono avere diametro pari a quello dello spinotto il quale deve essere inserito nel foro con azione di forza (martello), mentre i fori delle piastre è bene che abbiano un millimetro di foratura superiore al gambo poiché è assai probabile che nell'azione di inserimento del gambo cilindrico vengano asportate parte di materiale ligneo che finirebbero per ostruire il foro nel metallo e quindi creare azione di occlusione.

Assai più frequente è l'utilizzo di perni autoforanti.

Si tratta di perni in acciaio con una punta speciale in grado di forare sia il legno che la piastra metallica fino a spessori di solito di un centimetro.

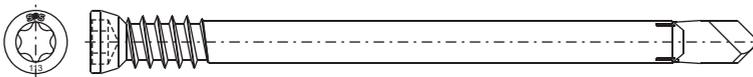


Figura 1.19. Perno auto perforante WS (fonte: Rothoblaas)

L'utilizzo di perni autoforanti, oltre a garantire un più efficace collegamento tra spinotto-piastra-legno, riduce sensibilmente le operazioni in cantiere e quelle in officina poiché si elimina la fase di foratura fuori opera o in opera.



Figura 1.20
Posa in opera
di perni autoforanti

1.10. Piastre in acciaio

Le piastre in acciaio hanno la funzione di trasmettere le sollecitazioni dei pannelli a elementi di diversa natura o a pannelli contigui.

Si tratta di elementi a L o rettangolari che normalmente è bene che siano zincati a caldo per evitare fenomeni di ossidazione non controllabili, tenendo conto che una volta posti in opera è abbastanza difficile controllarne lo stato.

Esistono in commercio elementi standard con un certo numero di fori predisposti che, unitamente ai connettori cilindrici adoperati, determinano la resistenza della connessione. Ma per edifici di notevoli dimensioni e superiori ai quattro piani, per zone sismiche caratterizzate da valori elevati dell'accelerazione di progetto, è possibile che le connessioni commerciali siano sottodimensionate rispetto alle esigenze derivanti dalle sollecitazioni di progetto.

In tal caso le piastre vanno predisposte in officina e devono essere rispondenti alle prescrizioni sui materiali imposte dal progettista.

Dal momento che le piastre in acciaio hanno una funzione di collegamento tra elementi diversi, è normale che presentino una doppia foratura e cioè una per la parte A da collegare (per esempio il pannello verticale) e una per la parte B (ad esempio piastra di fondazione o setto).

È abbastanza diffuso l'utilizzo di angolari commerciali sia per basse forze di taglio che per forze di taglio elevate. Altrettanto diffuso è l'utilizzo di bloccaggi meccanici su calcestruzzo tramite tasselli metallici e ancoraggi chimici.

Questa tecnica di fissaggio deve essere usata con molta attenzione, soprattutto se i tasselli sono ravvicinati, per dar modo ai relativi bulbi di influenza di non sovrapporsi limitando la resistenza complessiva del fissaggio. Inoltre è abbastanza probabile che nell'azione di foratura si possano intercettare le armature della parte in calcestruzzo.

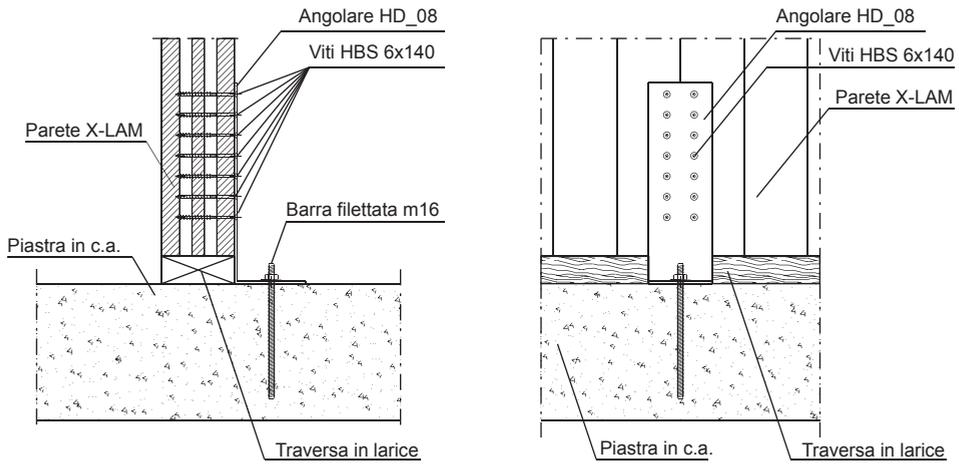


Figura 1.21. Esempio di elemento a L di collegamento



Figura 1.22. Piastre attacco legno-calcestruzzo



Figura 1.23. Piastre rettangolari per collegamento pareti

Questo genere di casistica incontra molte ripetizioni in cantiere e dà quasi sempre risultati pessimi sotto il profilo realizzativo se non è sottoposta a controllo diretto da parte dei soggetti preposti⁴.



Figura 1.24
Angolare WKR fissaggio
meccanico⁵ (fonte: Rothoblaas)

Quando non si è sicuri di poter realizzare un fissaggio adeguato, e soprattutto in presenza di forze di taglio particolarmente severe, è necessario adoperare tecniche di posa in opera più accurate con la predisposizione di tirafondi e dime annegate nel calcestruzzo, da prevedere prima della posa degli angolari.



Figura 1.25
Esempio di tirafondo e dima

⁴ Direttore di cantiere, direttore dei lavori, capo cantiere.

⁵ Edificio su 5 livelli in località Paganica, Comune di L'Aquila – anno 2011.