

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTA' DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

**PROGETTO DI UN MODULO ABITATIVO IN LEGNO
CON STRUTTURA PORTANTE IN ACCIAIO**

Relatore: Prof. Ing. Renato Vitaliani

Correlatore: Ing. Luca Pozza

Laureanda: Tosetto Alice

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

Sommario

1	INTRODUZIONE	1
2	SISTEMI COSTRUTTIVI.....	15
2.1	Struttura in acciaio	15
2.2	Struttura in c.a. prefabbricato o semiprefabbricato	16
2.3	Struttura in legno	20
2.3.1	Sistema costruttivo massiccio.....	23
2.3.2	Sistema costruttivo a pacchetti di tavole parallele.....	26
2.3.3	Sistema costruttivo con legno compensato di tavole	28
2.3.4	Sistema costruttivo ad ossatura portante in legno.....	37
2.3.5	Sistema costruttivo a traliccio di legno.....	40
2.3.6	Sistema costruttivo ad intelaiatura di legno	41
3	PROGETTO DELL'EDIFICIO E DEL MODULO ABITATIVO	45
3.1	Descrizione	45
3.2	Suddivisione in moduli prefabbricati	49
3.3	Il modulo abitativo	51
4	LEGNO NELLE COSTRUZIONI.....	61
4.1	Caratteristiche del legno	61
4.1.1	La struttura del legno.....	61
4.1.2	Specie legnose per uso strutturale	63
4.1.3	Caratteristiche fisiche del legno	73

4.1.4	Caratteristiche meccaniche del legno.....	85
4.2	Durabilità e protezione del legno.....	91
4.2.1	Introduzione.....	91
4.2.2	La durabilità del legno.....	92
4.2.3	Le azioni del degrado.....	96
4.2.4	Le misure di protezione.....	101
4.3	I prodotti del legno per la costruzione.....	115
4.3.1	Introduzione.....	115
4.3.2	I prodotti di tipo lineare.....	117
4.3.3	Prodotti di tipo piano.....	126
5	MATERIALI UTILIZZATI.....	153
5.1	Strutture in acciaio.....	153
5.1.1	Pilastri e travi.....	153
5.1.2	Profilo Z e profilo L.....	155
5.1.3	Angolari e piastre.....	156
5.1.4	Spinotti e viti da legno.....	156
5.1.5	Bulloni.....	158
5.1.6	Nastro forato di controvento.....	159
5.2	Strutture in calcestruzzo.....	160
5.2.1	Calcestruzzo per platea di fondazione.....	160
5.2.2	Acciaio per c.a. in barre ad aderenza migliorata (B450C).....	160
5.3	Solaio e tamponamenti.....	161
5.3.1	Controsoffitti e contropareti.....	162
5.3.2	Pannelli di fibra di legno.....	163
5.3.3	Tappeto rigido anticalpestio.....	164
5.3.4	Pannelli XLAM.....	165
6	DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE.....	173
6.1	Combinazioni di carico.....	173

6.2	Analisi dei carichi	175
6.2.1	Carichi permanenti e accidentali.....	175
6.2.2	Azione sismica.....	178
6.3	Dimensionamento del solaio XLAM.....	183
6.4	Predimensionamento di travi e pilastri	189
6.4.1	Pilastro	190
6.4.2	Trave	192
6.5	Modello FEM	193
6.6	Verifiche	197
6.6.1	Verifica SLU dei pilastri.....	197
6.6.2	Verifica SLU delle travi.....	199
6.6.3	Verifiche SLE	200
6.6.4	Verifiche SLD.....	203
6.6.5	Verifiche SLV.....	204
6.6.6	Verifica del collegamento pilastro-pilastro.....	209
6.6.7	Verifica del collegamento trave-pilastro.....	217
6.6.8	Verifica delle bandelle di controvento.....	221
6.6.9	Verifica del profilo Z.....	225
6.6.6	Dimensionamento della platea di fondazione.....	227
	NORMATIVA.....	229
	BIBLIOGRAFIA	230
	SITOGRAFIA.....	231

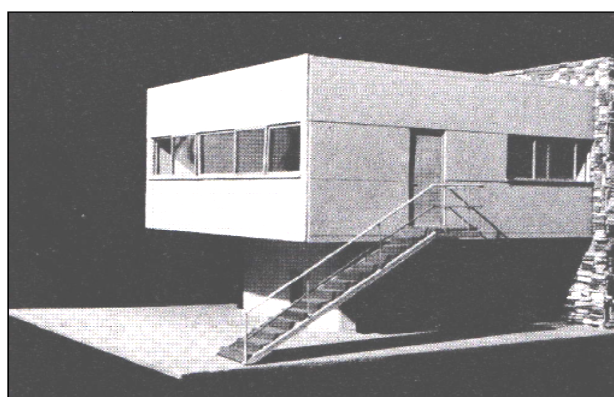
1 Introduzione

I moduli abitativi possono essere concepiti e realizzati con qualsiasi tecnologia costruttiva, da quelle tradizionali in muratura di laterizio, pietra o blocchi prefabbricati, a quelle più innovative, fino al montaggio in opera di cellule abitative industrializzate.

Questa filosofia è tutt'altro che nuova, basti pensare alle case *Loucheur* (Francia, 1929) progettate dagli architetti Le Corbusier e Pierre Jeanneret, secondo i quali, le abitazioni avrebbero dovuto essere prodotte su grande scala con componenti industriali da montare a secco, ad eccezione di un muro di sostegno laterale in pietra realizzato in opera. Utilizzando un modulo base di 45 cm, sono proposte più soluzioni planimetriche, tutte caratterizzate da un uso flessibile dello spazio tramite la combinazione di elementi mobili e variamente trasformabili. Struttura, percorsi e arredi sono studiati in modo da minimizzare lo spazio, e quindi il costo, senza danneggiare la qualità.

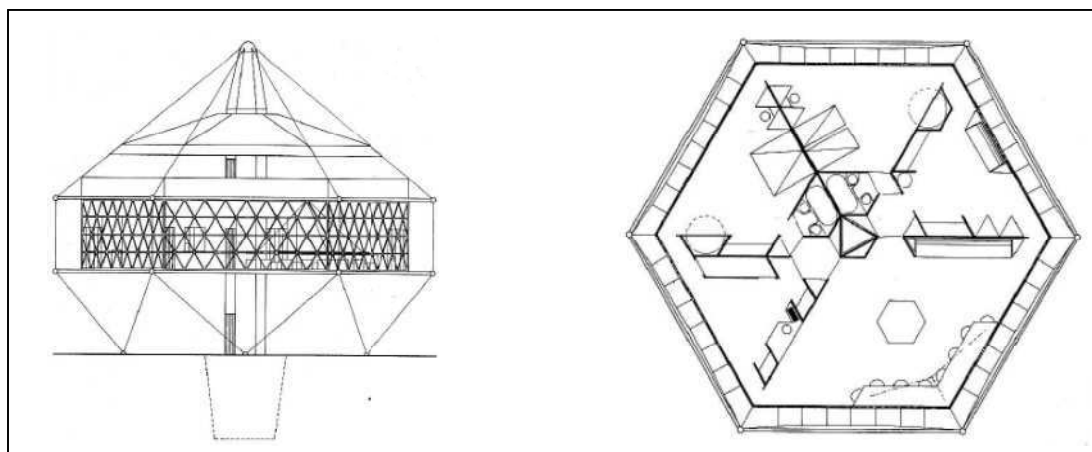


Veduta esterna di un complesso di Case Loucheur.



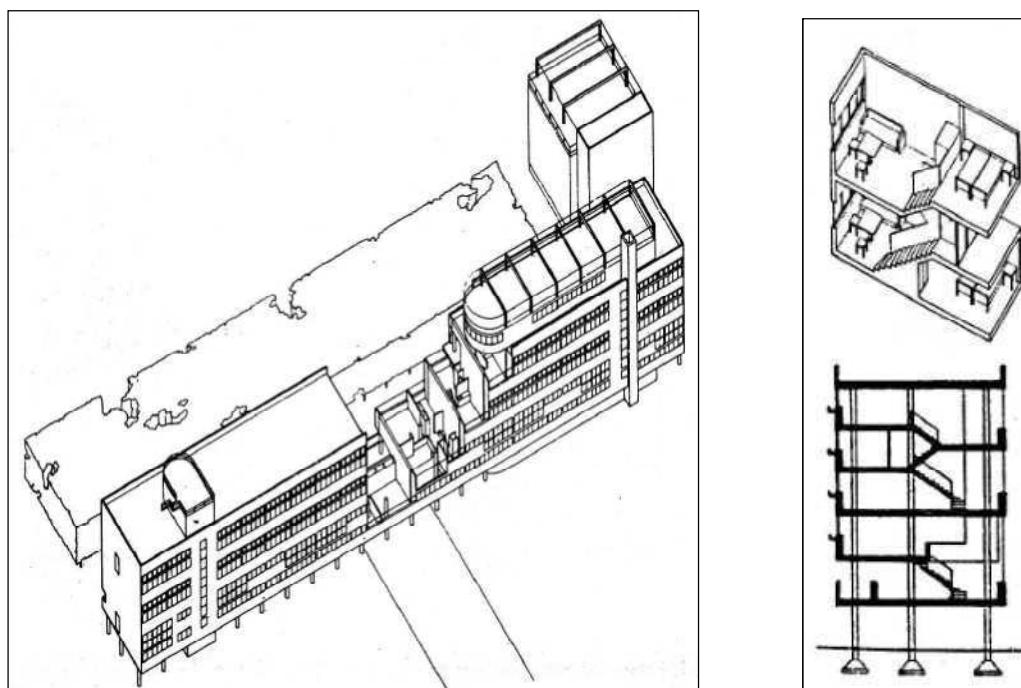
Veduta esterna del plastico di Case Loucheur.

Un altro esempio è il progetto della casa *Dymaxion* di Richard Buckminster Fuller (USA, 1927-1937), che si inserisce nella vasta serie di studi e sperimentazioni condotte da Fuller nel campo dell'industrializzazione della casa tra la fine degli anni Venti e il dopoguerra. La casa *Dymaxion*, il cui nome è un neologismo che sintetizza dinamismo ed efficienza, fu pensata come prototipo per la produzione di serie, ed è quindi un macro-oggetto spaziale di design indipendente dal contesto ambientale di installazione, verso cui c'è comunque la massima apertura visuale. I suoi caratteri principali sono la producibilità industriale, la trasportabilità, e una particolare conformazione spaziale, strutturale, formale. Larga circa 18 m per 15 m di altezza, la casa ha una distribuzione anulare attorno ad un albero strutturale centrale che contiene un ascensore e che collega il piano terra totalmente libero con il terrazzo aperto in sommità.



Prospetto e pianta della casa e di due suoi ambienti.

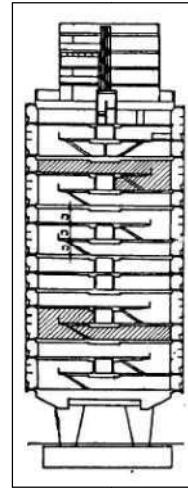
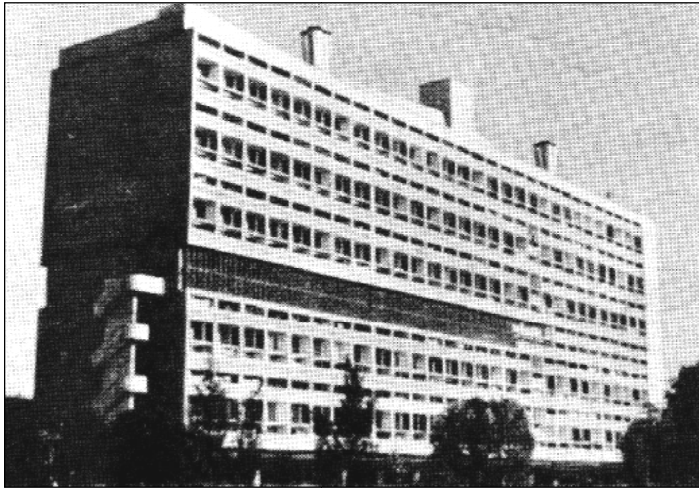
Altro esempio significativo è quello degli Alloggi del *Narkomfin* di Mosej Ginzburg e I. Milinis (Mosca - URSS, 1928), la cui realizzazione si inserisce nella ricerca per la tipizzazione e normalizzazione delle abitazioni promossa dallo Strojkom e dal Comitato per l'Edilizia dell'URSS, e coordinata da Ginzburg. Lo Strojkom aveva messo a punto sei tipi di cellule abitative di differenti dimensioni e variamente aggregabili in edifici di varie tipologie.



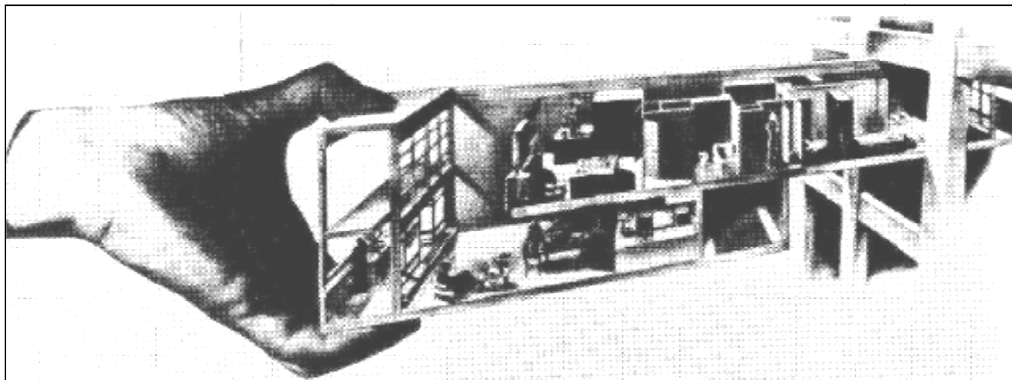
Assonometria del complesso e sezione sull'edificio delle abitazioni.

Sono ancora un progetto di Le Corbusier e Pierre Jeanneret le *Unité d'abitation* (Marsiglia – Francia, 1947-1952), che costituiscono un sottomultiplo urbanistico della “Città giardino verticale” pensata da Le Corbusier non come semplice sommatoria di case, attività lavorative e servizi, ma come insieme coordinato di organismi sociali autonomi che liberano il terreno, destinato a verde, pur in presenza di un’alta densità abitativa. L’edificio di Marsiglia, frammento di un piano comprensivo di otto Unità per 20000 abitanti promosso dal Ministero dell’Urbanistica in una situazione di grave carenza abitativa, non realizzato, comprende 337 alloggi di 23 tipi per circa 2500 persone, associati a numerosi servizi comuni: asili nido e scuola materna all’ultimo

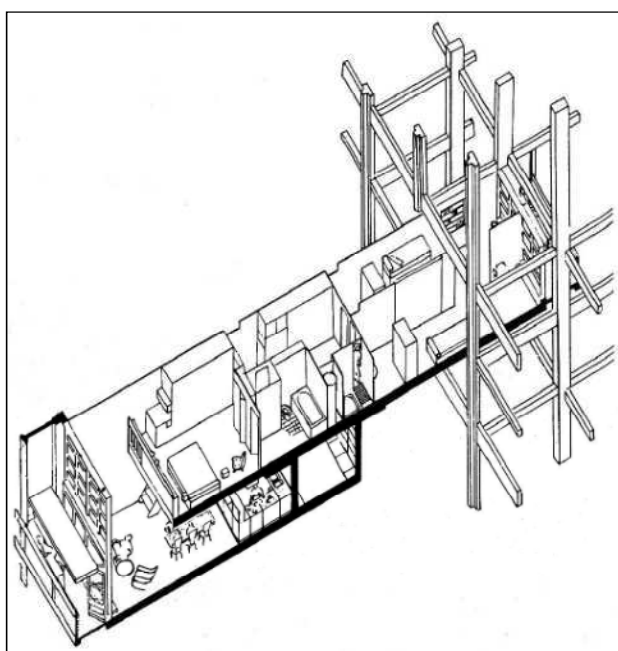
piano, attrezzature per lo sport e lo svago sul tetto a terrazza, negozi di generi di prima necessità, hotel, ateliers e altro al settimo e ottavo piano. Gli alloggi in duplex sono aggregati sovrapposti in blocchi di tre piani attorno agli ampi corridoi longitudinali posti al centro del corpo di fabbrica.



Veduta esterna e sezione trasversale dell'edificio.



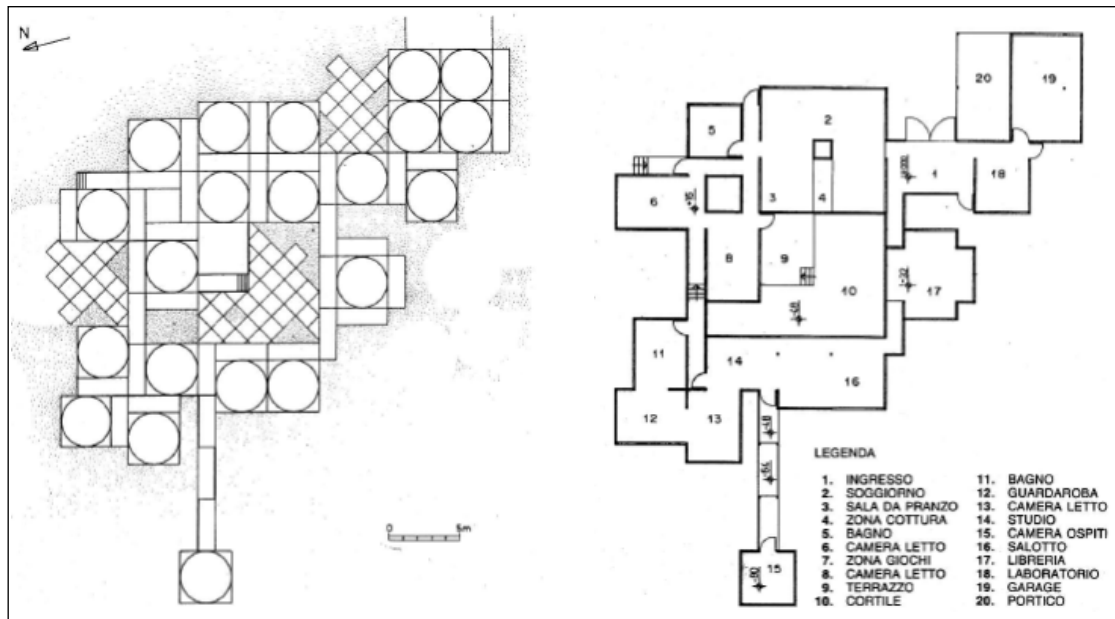
Cellula standardizzata costruita in officina, montata a piè d'opera e infilata nella struttura.



Disegno assometrico che spiega come una cellula tipo prefabbricata e totalmente arredata potrebbe essere inserita nella struttura edilizia di supporto.

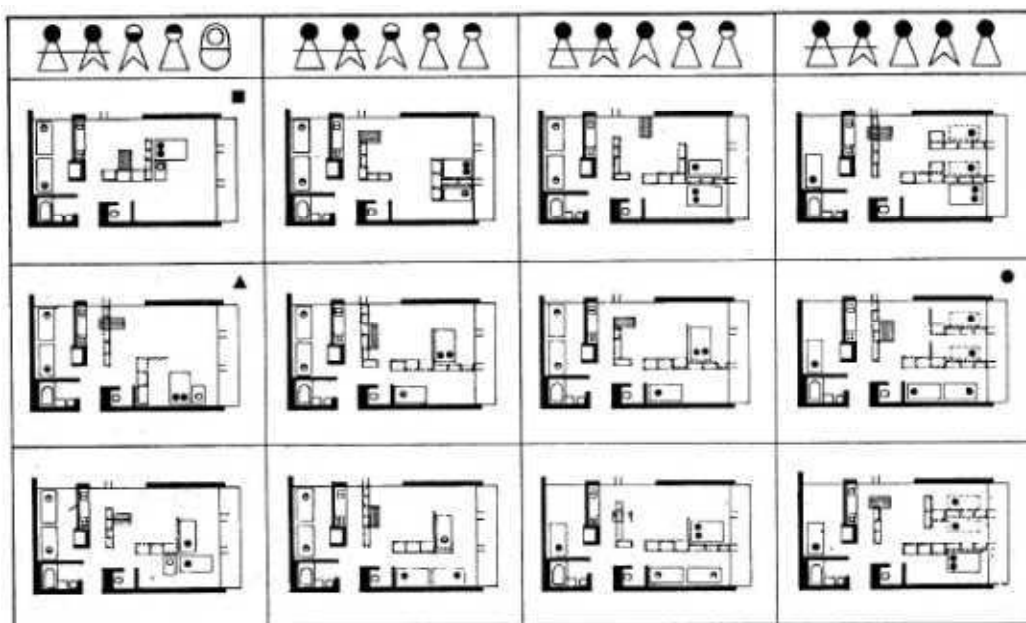
Risale agli anni Cinquanta, ed in particolare al 1957, lo studio del *Prototipo sperimentale di casa industrializzata*, condotto da George Nelson negli USA, con il quale il Progettista si propone di portare i vantaggi della produzione industriale nell'ambito del mercato edilizio, prescindendo dagli stereotipi correnti e cercando di ottenere un notevole grado di flessibilità con un numero minimo di elementi producibili in serie. L'edificio si presenta come un insieme di padiglioni ad un solo piano, la cui disposizione può variare in funzione delle esigenze del nucleo familiare e della natura dei luoghi, con la possibilità di inserire spazi aperti anche in più punti e di adeguarsi ad un terreno con dislivelli. In questo caso, lo spazio abitativo è organizzato attorno ad una corte, in una planimetria libera ottenuta collegando variamente numerose unità base quadrate. Quattro unità base e quattro elementi aggiuntivi rettangolari formano il nucleo di soggiorno, pranzo e cucina. Un corridoio ottenuto con soli moduli rettangolari collega due nuclei di camere e bagni. Camera per gli ospiti, distaccata ma connessa da un passaggio coperto a moduli rettangolari, ambiente libreria e garage con deposito presso l'ingresso completano l'insieme. Una unità modulare base può corrispondere a un ambiente oppure può essere ampliata con moduli rettangolari o altre unità base per

ottenere ambienti più grandi. Sul piano tecnologico, la casa è costituita da ritzi metallici regolabili di fondazione e da una gabbia strutturale in alluminio con piani tamponamento e copertura in vari materiali. Per ridurre al minimo la manodopera di cantiere ed eliminare l'impiego di macchinari costosi per l'impiego di terra, i ritzi di fondazione vengono direttamente impiantati nel terreno con una macchina barenatrice.



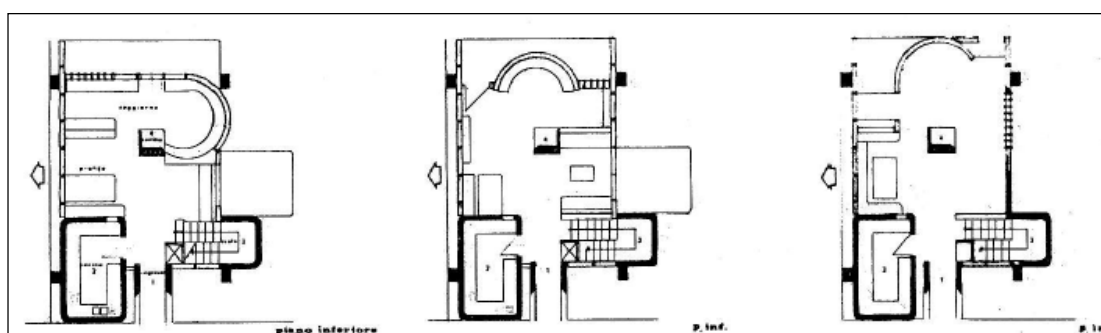
Pianta dell'alloggio sperimentale.

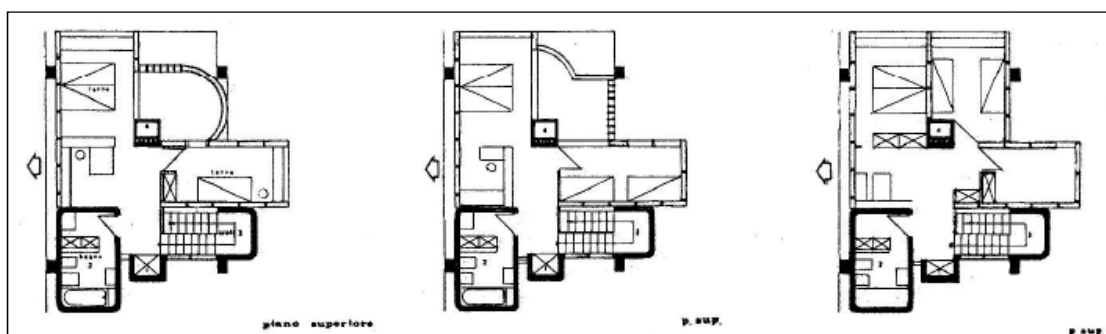
Negli anni Sessanta, a Varsavia, in Polonia, Halina Skibniewska progettava gli *alloggi al quartiere Sady Zoliborskie*. Il quartiere, realizzato gradualmente per 15000 abitanti e dotato di vari servizi sociali, è stato progettato in un situazione di pesanti necessità abitative secondo un criterio di ripetitività degli interventi, con alloggi di misure standardizzate, aperti a successive modificazioni nel tempo. Lo standard minimo di superficie è stato fissato in 11 mq per persona, tenendo conto della lunga durata media prevista per la convivenza della famiglia; l'intenso sfruttamento dello spazio si combina con un principio di flessibilità che consente usi diversi sia nel corso della giornata sia nei diversi cicli della vita familiare, con le modifiche successive della sua composizione e dei suoi bisogni.



Studio dell'organizzazione di un alloggio di 57 mq per una famiglia di 5 persone, a partire da due genitori con 3 figli piccoli a 5 adulti. In verticale le varianti per la stessa fase.

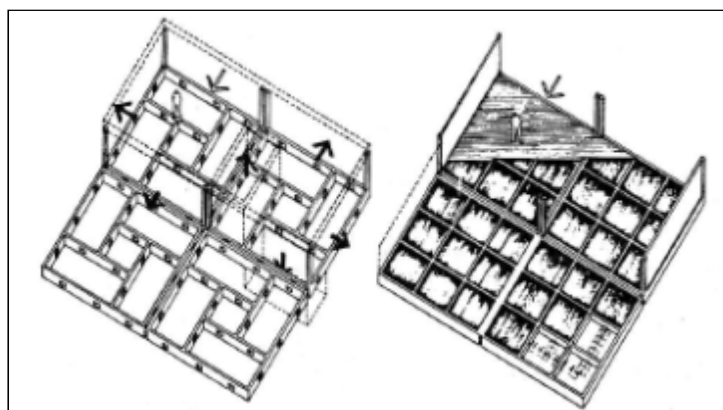
Ancora degli anni Sessanta è la *proposta di cellula prefabbricata* di Leonardo Savioli (Firenze – Italia, 1965), ossia una cellula modulare, ripetibile e inseribile con altre simili in un telaio strutturale in cemento armato aggregante un vasto complesso di abitazioni. Nel progetto complessivo, l'utente di ogni cellula dispone di un superficie fissa delimitata da quattro pilastri, in cui trovano posto quattro elementi fissi prefabbricati: il blocco cucina e bagno, sovrapposti a torre, quello di ingresso, il blocco scale e il caminetto. L'utente può far realizzare le partiture interne in muratura ordinaria, ma può anche disporre di una serie di elementi prefabbricati mobili in conglomerato cementizio leggero che possono essere assemblati in vario modo secondo le proprie esigenze.

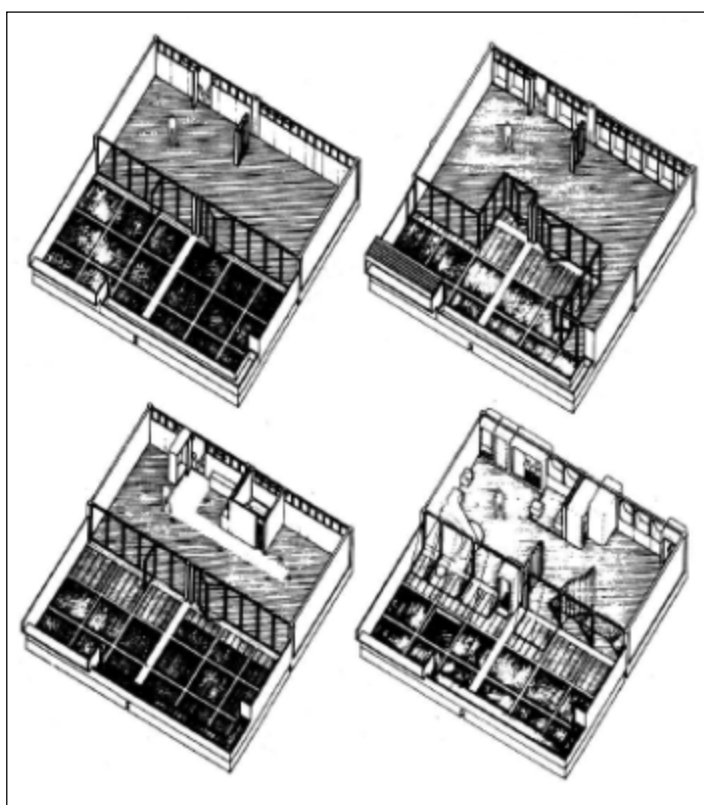




Esempi di assetti diversi ottenuti variando la disposizione dei prefabbricati mobili (in chiaro).

Ancora agli anni Sessanta risale il progetto di *Alloggi modulari flessibili* dei progettisti Erik Hultberg e Seth H. Seablom (Oslo – Norvegia, 1968), che riguarda dieci unità abitative integrate con la ex-villa estiva del sovrano, ristrutturata e destinata in gran parte ai servizi comuni, e che mira a risolvere in modo pragmatico il tema della residenza urbana tenendo conto delle esigenze di spazio aperto e di personalizzazione della propria casa da parte di chi abita. Il complesso si articola attorno ad un vasto cortile interno, soprastante il parcheggio, con funzione di piazza comune. Gli alloggi sono progettati in base ad una griglia modulare quadrata di 750 x 750 cm, pari a circa 60 mq. Essi si compongono di una parte coperta e di una scoperta di uguale superficie e poste in generale sullo stesso livello. Il tipo di struttura adottata permette che la forma e la disposizione degli spazi di abitazione non siano predefinite dai progettisti. La costruzione si svolge infatti in due fasi: costruzione completa dell'ossatura, delle solette e del tetto, e sviluppo finale del progetto per definire i singoli alloggi, la cui suddivisione interna e verso il terrazzo esterno sono lasciati alle decisioni degli utenti.

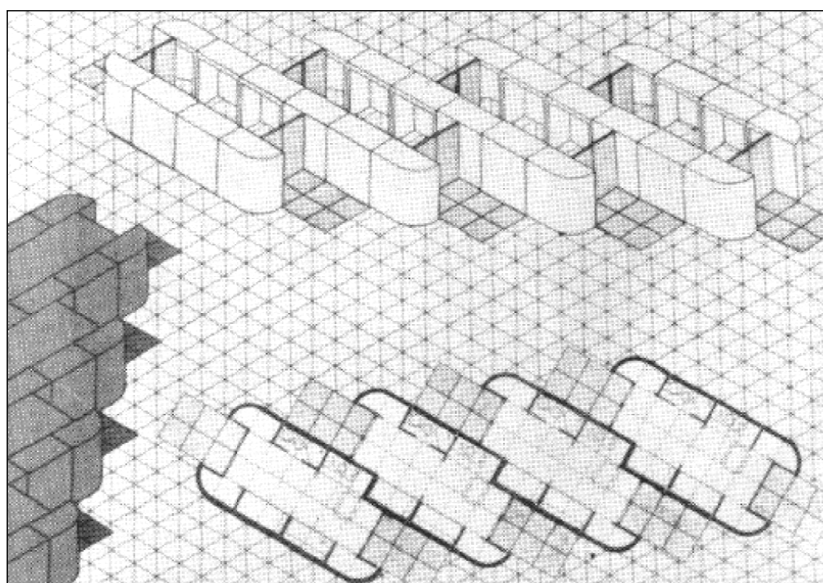




Le diverse fasi di realizzazione di un alloggio di due moduli chiusi e due aperti.

È infine degli anni Settanta il progetto del *Sistema industrializzato* di Alberto Rosselli (Italia, 1970), presentato al concorso IN/Arch-ANIACAP del 1973, che propone un sistema edilizio il quale, con ampia componibilità degli elementi semplici di base, vuol rendere possibile una nuova qualità del disegno di abitazioni e tessuti urbani assieme a una risposta ai problemi interconnessi di abitabilità per il grande numero, ambiente e tecnologia. Il sistema è costituito da un insieme di componenti a lastra piana (tamponamenti, divisori, pavimenti, coperture, elementi vetrati) e di componenti tridimensionali (blocchi sanitari, scale, camino). In un processo industrializzato di produzione in grande serie, i componenti potrebbero essere realizzati con vari materiali e tecnologie: calcestruzzo armato con intercapedini isolanti, calcestruzzo alleggerito con argille espanse, calcestruzzi gassificati, guaine di materie plastiche con interposti conglomerati cementizi preimpregnati. Il design dei componenti prevede una completa rifinitura interna ed esterna da svolgere in fabbrica, e una sola operazione di assemblaggio sul cantiere. Si vengono così ad annullare, rispetto ai sistemi tradizionali,

tutte le assistenze necessarie e tutte le sovrapposizioni in tempi successivi delle varie opere, ad eccezione dell'eventuale tinteggiatura. Il sistema dei giunti, sia orizzontali che verticali, può essere ottenuto o con tecniche a secco o con getti integrativi, a seconda che la costruzione sia ad uno o più piani. Tutti gli impianti, elettrico compreso, sono incorporati negli elementi. La disposizione planimetrica dei blocchi consente di climatizzare l'aria di tutti i locali.

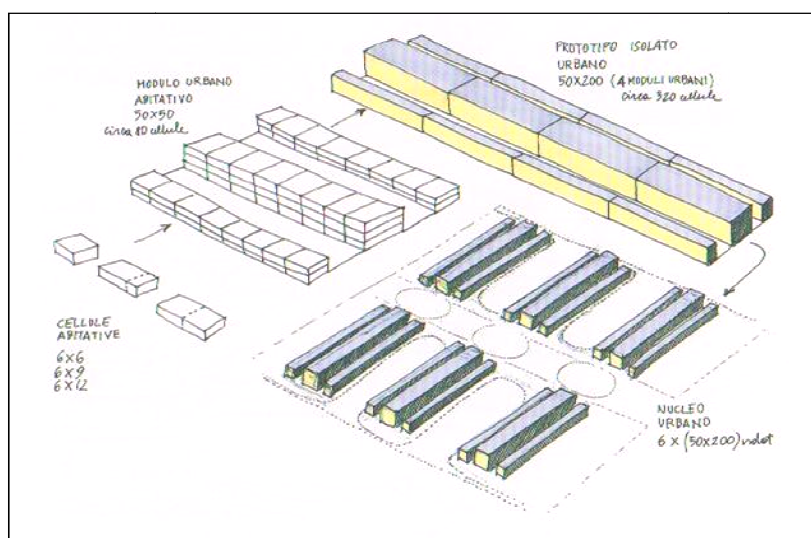


Monolocali di 20 mq disposti a schiera, ricavati dalla combinazione di due componenti attrezzati.

Con questi esempi si è voluto dimostrare come il tema della produzione di grande serie delle cosiddette “unità tridimensionali”, appoggiate o appese alla struttura portante dell'edificio, sia ricorrente anche negli anni Sessanta in risposta al fabbisogno abitativo di quel periodo, e negli anni Settanta, in relazione al rinnovato interesse per il problema dell'abitazione economica di massa.

La produzione di alloggi preassemblati è però anche un tema attuale, basti pensare al sisma che il 6 aprile 2009 ha colpito L'Aquila e alla necessità di sistemare migliaia di

persone rimaste improvvisamente senza tetto. La risposta immediata è avvenuta attraverso l'allestimento di campi tenda nelle aree libere, nel breve periodo invece, per garantire condizioni abitative più decorose e permettere un graduale ritorno alla normalità, si è ricorso alla sistemazione in strutture ricettive esistenti (alberghi, residence, appartamenti privati, uffici pubblici) e allo sfruttamento di moduli prefabbricati. Il quadro a L'Aquila era però particolarmente gravoso: prospettive di lungo termine per il recupero funzionale delle abitazioni storiche, contesto climatico difficile, elevato numero di cittadini sfollati, territorio fragile; si dimostrò da subito necessaria la realizzazione di abitazioni entro pochi mesi e si fece ampio ricorso a sistemi costruttivi non tradizionali, caratterizzati da prefabbricazione, importante contenuto tecnologico, elevata percentuale di produzione esterna al cantiere, assenza di lavorazioni umide che necessitano di lunghi tempi d'asciugatura.



Schema di aggregazione dalla cellula abitativa ad un nucleo urbano per 3000 persone.

La strategia adottata con il Progetto C.A.S.E. mirava dunque a superare, attraverso lo sfruttamento delle capacità tecnologiche offerte dal mercato delle costruzioni e dell'ingegneria, i limiti evidenziati storicamente dalla gestione del provvisorio immediatamente successivo ad un evento catastrofico, attraverso abitazioni con caratteristiche confrontabili al definitivo realizzate nei tempi propri dell'emergenza.

In tale situazione di emergenza e ristrettezza dei tempi, si è optato per sistemi costruttivi prefabbricati e in particolare sistemi costruttivi a secco.

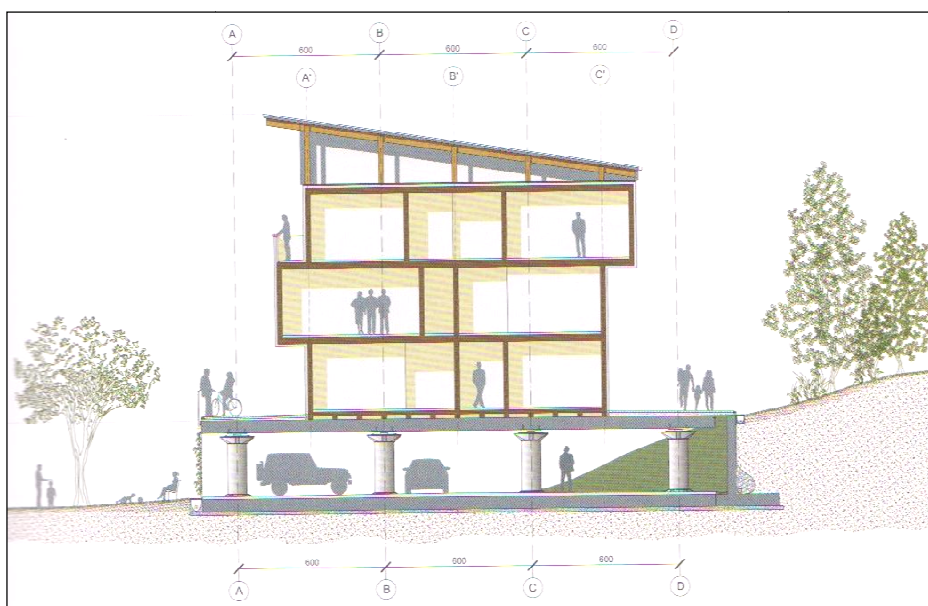


Esempi di composizione architettonica con moduli prefabbricati per edifici a due e tre piani.

Accanto alle ossature portanti prefabbricate, i progetti hanno fatto ampio ricorso a soluzioni industrializzate, a tecnologie a secco, a componenti edili pre-assemblati, con la finalità di spostare il più possibile le lavorazioni dal cantiere agli stabilimenti di produzione, diminuendo così la presenza della manodopera in sito.

Si sono impiegate tecnologie costruttive basate su pareti a stratigrafia complessa, con elevate prestazioni in termini di resistenza meccanica, isolamento termico (si sono impiegati materiali quali: fibra di legno, sughero, lana di roccia, polistirene, polistirolo, poliuretano) e acustico, già prefinite su una o entrambe le facce e precablate, ovvero contenenti all'interno del pacchetto la distribuzione e i terminali impiantistici.

Esteso è stato anche il ricorso a cellule bagno industrializzate, completamente finite internamente e semplicemente da posizionare ed allacciare alle distribuzioni principali impiantistiche.



Il prototipo si compone di due parti: la porzione inferiore, costituita dalle due piastre strutturali e dal sistema di isolamento, e la porzione superiore costituita da un edificio di tre piani.

Quello del Progetto C.A.S.E. è quindi un ulteriore recente esempio di come una spinta prefabbricazione abbia reso possibile la realizzazione di edifici dotati di elevato standard prestazionale.

Lo scopo di questa tesi è il progetto di un modulo abitativo in legno che possa essere prefabbricato in stabilimento e successivamente “inserito” all’interno di una struttura portante in acciaio montata in opera, proponendo quindi un sistema costruttivo caratterizzato da:

- rapidità di assemblaggio,
- certezza dei tempi,
- riduzione del personale e dell’organizzazione,
- riduzione di rifiuti e scarti,
- assenza di umidità e tempi di asciugatura,
- pulizia del cantiere,
- vantaggi nella gestione ai fini della sicurezza.

2 Sistemi costruttivi

In questo capitolo si descrivono i più diffusi sistemi costruttivi caratterizzati da modularità, celerità di assemblaggio, e quindi da un notevole grado di prefabbricazione. Si farà particolare attenzione ai metodi costruttivi in legno, essendo oggetto di questa tesi.

2.1 Struttura in acciaio

Tale tecnologia costruttiva prevede struttura portante in carpenteria metallica con telai imbullonati controventati e solai in lamiera grecata completata con getto in opera.

Questa tipologia edilizia comprende tecniche che possono differire per il diverso sviluppo dei nodi, ed è caratterizzata da cicli di assemblaggio a secco estremamente rapidi e ripetibili su larga scala. Le chiusure perimetrali dell'edificio possono essere realizzate con stratigrafie, a secco, dalle elevate prestazioni termiche, costituite da intelaiatura di supporto, placcaggio interno in cartongesso, rivestimento esterno in doghe di legno o pannelli rasati, con interposti strati multipli di coibente termoacustico.



Strutture in carpenteria metallica a travi e pilastri con controventi. Serraggio in opera dei bulloni con l'ausilio di piattaforme aeree e pantografo.

Tale sistema costruttivo è caratterizzato da una notevole semplificazione del cantiere e dalla riduzione di personale e scarti. Infatti tale tipo di attività, limitata alla semplice assemblaggio di elementi edilizi anche multipli (tamponature, tramezzature, controsoffittature, strutture, impianti tecnologici) consente un ridotto numero di transiti di autobetoniere, limitatamente al getto della soletta collaborante sui solai.



Montaggio a secco di tamponamenti perimetrali.

2.2 Struttura in c.a. prefabbricato

All'interno di questa categoria si possono distinguere:

- Sistema di tipo prefabbricato a telaio con collegamenti inelastici tra travi e pilastri e nodi a secco, tamponato esternamente con pannelli prefabbricati in calcestruzzo, oppure con sistemi leggeri tipo acqua-panel o cemento rinforzato. La struttura intelaiata in calcestruzzo armato può essere realizzata con pilastri interamente prefabbricati, montati a secco per l'intera altezza, e successivamente completata con impalcati formati da travi e lastre, tutti autoportanti, al fine di ridurre i tempi di messa in opera e l'impiego di manodopera in cantiere. I solai, del tipo a predalles autoportanti, hanno luce corrispondente all'interasse longitudinale dei pilastri. Strutture di questo genere devono essere opportunamente irrigidite mediante setti verticali sempre in calcestruzzo armato.



Telaio strutturale multipiano composto da elementi prefabbricati in calcestruzzo armato.



Montaggio dei pannelli esterni prefabbricati in calcestruzzo a nastro orizzontale.

- Sistema a pilastri, travi e setti prefabbricati, oltre alle rampe scala, con i soli nodi gettati ad umido. Questa tecnologia costruttiva è caratterizzata da una struttura portante in calcestruzzo armato parzialmente prefabbricata e montata a secco, per l'involucro edilizio, per i divisori e gli orizzontamenti interni. La struttura

portante è organizzata secondo lo schema tradizionale a telai piani iperstatici pluriplano costituiti da travi lineari e pilastri o setti di dimensioni contenute, consentendo da un lato flessibilità distributiva e dall'altro drastica riduzione dei tempi di cantiere, grazie alla prefabbricazione dei componenti, integralmente assemblati a secco e solidarizzati mediante la realizzazione in opera ad umido dei soli nodi di collegamento, con armature e getti integrativi.



Fasi di montaggio di strutture a pilastri e setti pluriplano prefabbricati con nodi gettati ad umido.

- Sistema con pannelli portanti prefabbricati in calcestruzzo a taglio termico. Il sistema è caratterizzato da un tecnologia di prefabbricazione di rapida posa (elementi prefabbricati per i componenti strutturali quali pareti portanti e solai in calcestruzzo, cellule bagno prefabbricate con impianti sanitari integrati). L'ossatura strutturale e i tamponamenti esterni possono essere ottenuti mediante l'accoppiamento di pareti portanti a taglio termico in calcestruzzo pieno, che costituiscono il perimetro, e alcune pareti divisorie tra gli appartamenti. Le rampe scale e i pianerottoli sono anch'essi prefabbricati in calcestruzzo armato. Tali elementi vengono assemblati in cantiere mediante autogru e sono connessi tra loro mediante giunti meccanici e getti integrativi in opera.



*Edificio con struttura in c.a. a pannelli portanti prefabbricati a taglio termico;
i vani scale e rampe sono interamente prefabbricati.*

- Sistema con pareti portanti modulari parzialmente prefabbricate, costituite da pannelli preassemblati in polistirene con rete elettrosaldata, e getto di completamento in calcestruzzo da realizzare in opera.



*Pareti portanti realizzate con pannelli modulari in polistirene e rete elettrosaldata
con getto di completamento in opera.*

Il “pannello parete” è un elemento composto da due lastre di polistirene espanso di spessore variabile con funzione di cassero, da due reti elettrosaldate interne (più eventuali armature aggiuntive da calcolo) e due reti elettrosaldate esterne collegate tra loro tramite connettori passanti. Le pareti che si ottengono sono portanti e permettono di realizzare in zona sismica edifici di altezza superiore ai tre piani. Mentre la faccia esterna è finita con intonaco fine, che accoglie il sistema delle coloriture, nella faccia interna è possibile placcare con una lastra in cartongesso per dare continuità di finitura al sistema delle partizioni interne. La massa del calcestruzzo ed il potere coibente del polistirene conferiscono alle pareti anche elevate prestazioni termoacustiche.

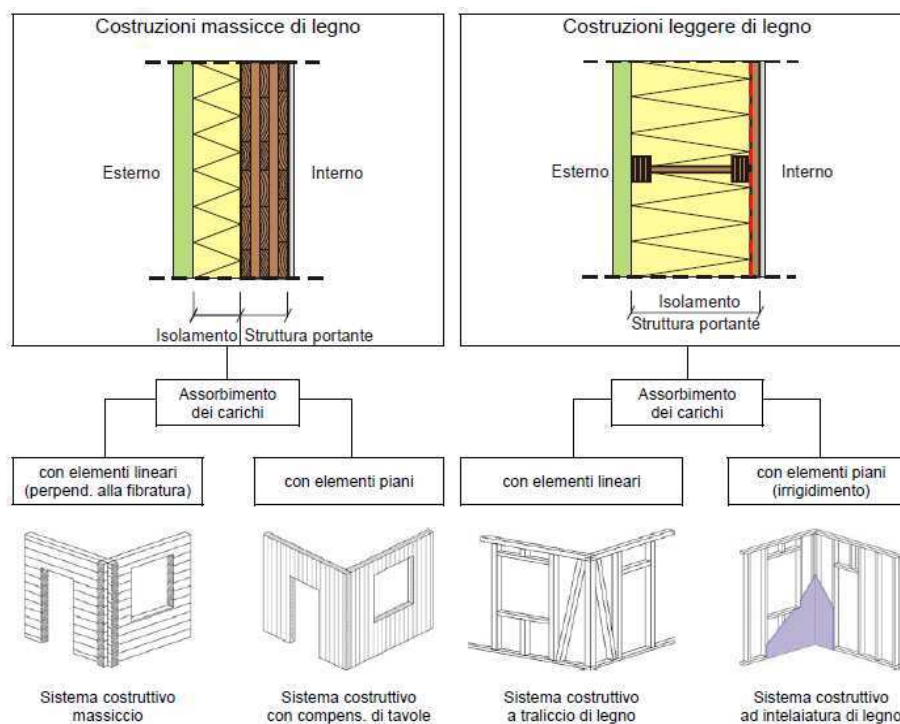
2.3 Struttura in legno

Nella letteratura tecnica si incontrano diversi modi di suddividere i vari tipi di costruzioni di legno. Una categorizzazione di base può essere fatta tra costruzioni di tipo leggero e costruzioni di tipo massiccio. Bisogna tenere presente che la denominazione di un tipo di costruzione di legno è sostanzialmente correlata alla struttura portante delle pareti.

Come risulta dalla seguente figura, la differenza fondamentale tra questi due sistemi costruttivi risiede nel fatto che, nella realizzazione di tipo massiccio, lo strato isolante è separato dalla struttura portante mentre, nelle costruzioni di legno di tipo leggero, isolamento e struttura portante si trovano nello stesso piano.

Per la realizzazione della struttura portante vengono utilizzati nei due casi prodotti completamente diversi. Contrariamente alle costruzioni di tipo leggero, nelle quali gli elementi portanti sono i prodotti di tipo lineare provvisti di una pannellatura sottile, per quelle di tipo massiccio, come ad esempio nelle strutture a base di compensato di tavole, vengono impiegati elementi di tipo piano di grandi dimensioni. Inoltre, le costruzioni di legno di tipo massiccio, di regola, non necessitano di alcuna barriera al vapore e possiedono una massa più elevata e quindi anche un'alta capacità di

immagazzinamento di energia. In entrambi i sistemi costruttivi è possibile concepire liberamente le facciate ed il rivestimento interno.



Suddivisione di base dei sistemi costruttivi di legno (sezione orizzontale ed assonometria).

I sistemi costruttivi in legno sono:

- costruzioni a tronchi sovrapposti o blocchi massicci;



Sistema a blocchi massicci.

- costruzioni a pannelli di legno;



Sistema a pannelli di legno massiccio.

- costruzioni ad ossatura portante;



Sistema ad ossatura.

- costruzioni a traliccio;



Sistema a traliccio.

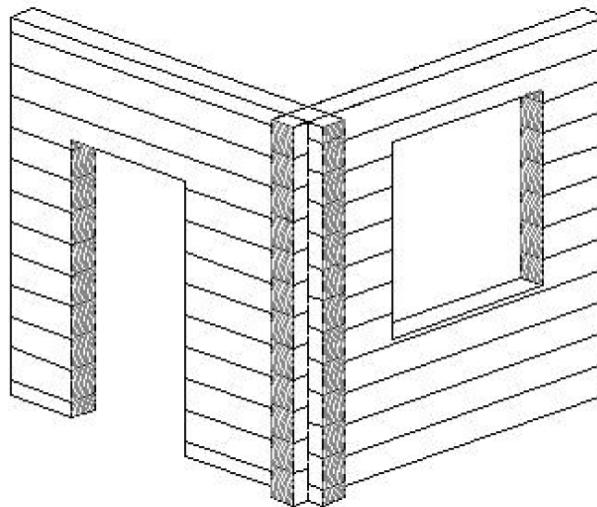
- costruzioni intelaiate;



Sistema a telaio.

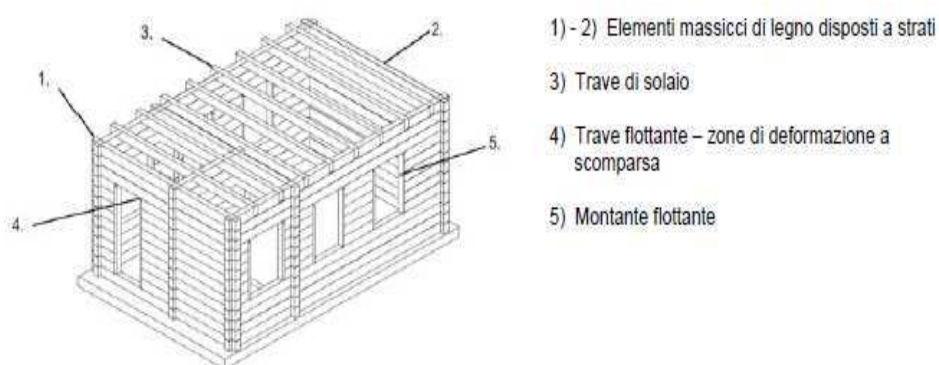
2.3.1 Sistema costruttivo massiccio

Le costruzioni massicce sono costituite da elementi massicci (quasi esclusivamente di legno di Conifere) disposti orizzontalmente che, assemblati per comporre una parete massiccia, assolvono sia funzione portante che di irrigidimento; tali elementi sono generalmente sagomati nella parte inferiore al fine di aumentare la superficie di contatto. Il collegamento degli elementi allo spigolo dell'edificio viene realizzato mediante intagli o connessioni di carpenteria classica.

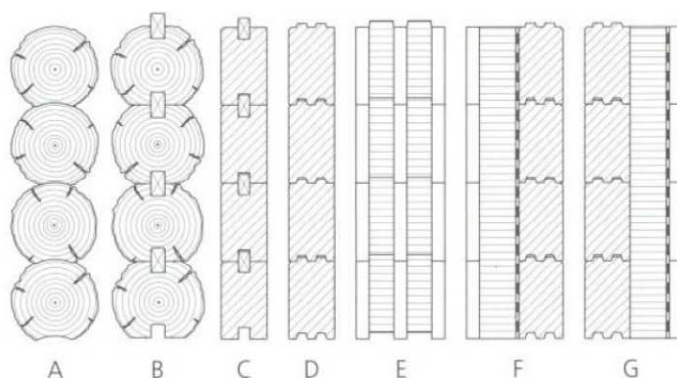


Sistema costruttivo massiccio.

La casa in tronchi massicci, blinde o “blockbau”, è quindi assimilabile agli edifici con struttura muraria in pietra, anche se l’involucro “a massa” è realizzato con materiali da costruzione, tipi di lavorazione e modalità di posa profondamente diversi. Costruttivamente, ciò che varia e caratterizza l’uso di questo tipo di costruzione, dando luogo a differenti tipi di linguaggi, è il diverso tipo di taglio o squadratura dei singoli tronchi.

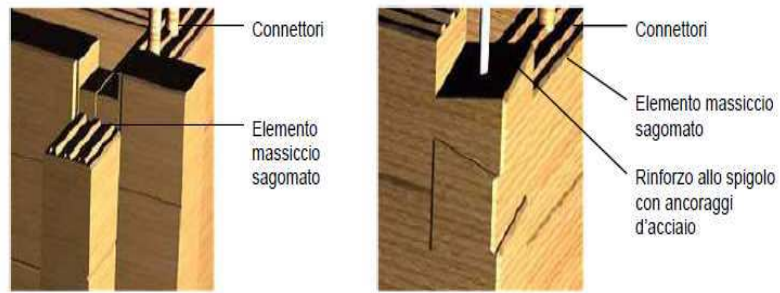


Terminologia adottata per il sistema costruttivo massiccio.



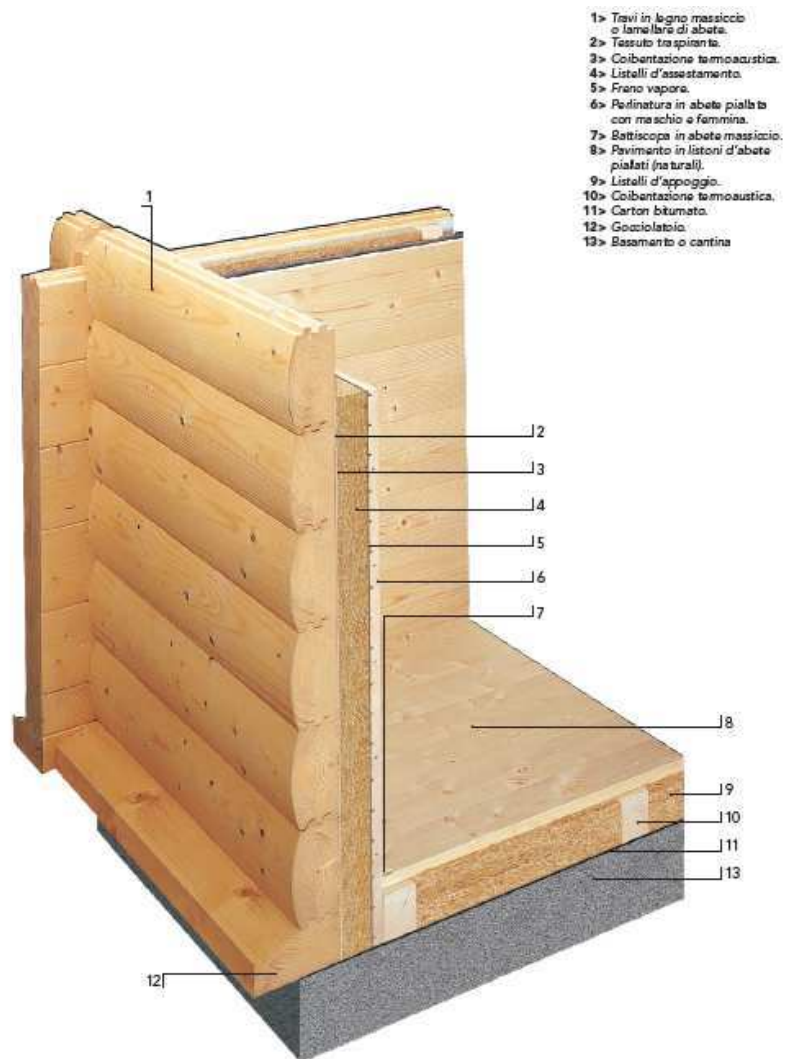
Schemi costruttivi delle pareti in tronchi.

Negli esempi di collegamento allo spigolo di una parete massiccia, riportati nella seguente figura, gli elementi sono connessi per lo più con spinotti di legno. Questa tecnica, unita alla sagomatura degli elementi massicci, permette di allineare gli elementi e garantisce l'irrigidimento delle pareti. Perciò, soprattutto ai lati delle aperture per le finestre, vengono battuti spinotti a sezione quadrata in fori circolari.



Collegamenti allo spigolo per il sistema costruttivo massiccio.

Si riporta nella seguente figura il dettaglio di una parete del tipo blockbau; si consideri che lo spessore delle pareti può variare tra i 50 e 360 mm, mentre il valore di isolamento termico U può arrivare a 0,15 W/m²K.



Dettaglio sistema blockbau.

Specialmente nella progettazione di costruzioni massicce, si deve tener conto, in modo adeguato, delle caratteristiche del materiale. Nella trasmissione dei carichi verticali, gli elementi massicci vengono sollecitati a compressione perpendicolare alla fibratura. Poiché il valore del modulo E perpendicolare alla fibratura è molto ridotto, si instaurano assestamenti importanti causati dalle deformazioni perpendicolari alla fibratura. I problemi connessi agli assestamenti possono, tuttavia, essere ridotti o eliminati completamente mediante accorgimenti costruttivi, come per esempio:

- prevedere zone “cuscinetto” o meglio zone di deformazione a scomparsa (collocando una ”trave flottante”) oppure una cavità d’aria di alcuni cm in prossimità di architravi ed elementi simili, che non possono adattarsi all'assestamento;
- realizzare il giunto con una struttura muraria (es. una canna fumaria) o con controventi a struttura reticolare relativamente rigidi in modo che la parete massiccia possa assestarsi liberamente;
- evitare colonne portanti collegate direttamente e rigidamente con le pareti;
- considerare l'assestamento della parete massiccia nella progettazione e nella posa in opera di impianti (condotte elettriche, tubazioni per il riscaldamento e per l’acqua);
- realizzare i piastrellamenti su rivestimenti liberi e non vincolati alla parete.

Tale tecnologia è un “sistema chiuso”, in quanto ogni parete ha funzione portante; il legno utilizzato è quello di larice o di abete rosso. Questo metodo ha degli svantaggi: richiede grandi quantità di tronchi lunghi e dritti, con conseguenti costi elevati e con la necessità di isolare le pareti.

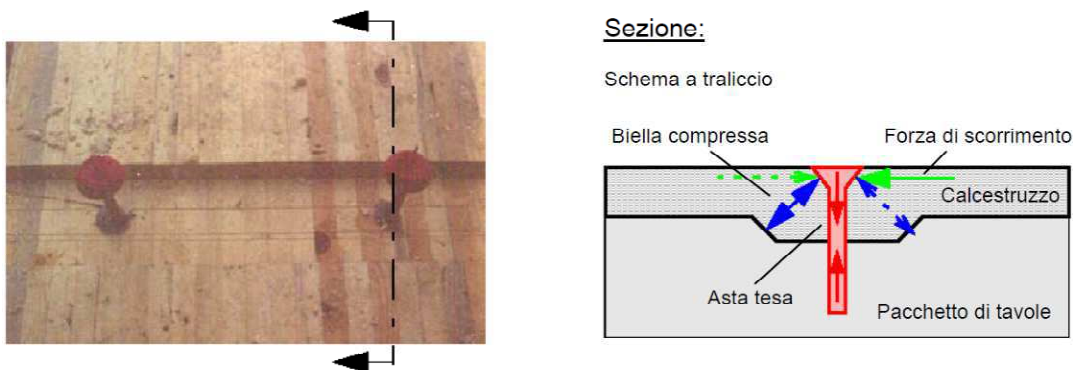
2.3.2 Sistema costruttivo a pacchetti di tavole parallele

A partire dai pacchetti di tavole si realizzano elementi costruttivi di tipo piano massicci, costituiti da tavole o lamelle disposte di costa ("in piedi") l’una affianco all’altra. Lo spessore di questi elementi, coincidente con la larghezza delle tavole, è compreso di

regola tra 8 cm e 12 cm per le pareti, e tra 12 cm e 20 cm per i solai a seconda delle luci e dei carichi.

Gli elementi di pacchetti di tavole sono costituiti primariamente da tavole ricavate dalla porzione esterna del tronco di spessore compreso tra 24 mm e 30 mm. Le tavole vengono prima essiccate e piallate, successivamente collegate di costa l'una con l'altra mediante una chiodatura continua (o con spinotti di legno duro). I chiodi servono per la trasmissione degli sforzi di taglio tra le tavole. In questo modo si ottiene un elemento di legno di larghezza a piacimento in grado di ripartire parzialmente i carichi trasversalmente. L'accoppiamento delle tavole una di fianco all'altra permette, a certe condizioni, anche giunti di testa delle tavole nel mezzo dell'elemento.

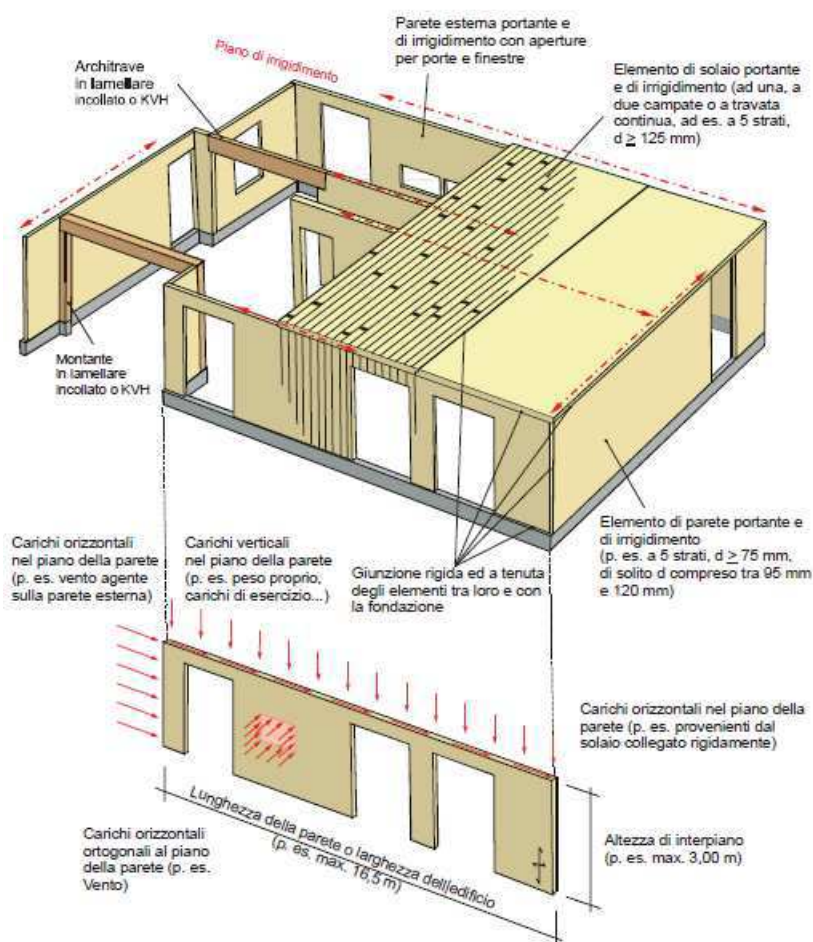
Gli elementi di pacchetti di tavole possono anche essere impiegati, in caso di luci maggiori di 6 m, in strutture miste legno-calcestruzzo. Per motivi di natura statica e/o di fisica tecnica, nelle strutture miste legno-calcestruzzo viene gettata una soletta in calcestruzzo al di sopra dell'elemento di pacchetti di tavole. La connessione deformabile tra il legno ed il calcestruzzo può essere realizzata mediante mezzi di collegamento meccanici (bulloni, connettori a piolo, piastre dentate, ecc.). Il modulo di scorrimento ed il coefficiente di scorrimento necessari sono fissati, di regola, solo nelle omologazioni o devono essere determinati sperimentalmente. Con strutture miste legno-calcestruzzo si possono coprire luci fino a 10 m circa.



Connessione tra gli elementi di pacchetti di tavole e calcestruzzo.

2.3.3 Sistema costruttivo con legno compensato di tavole

Le costruzioni di tipo massiccio con legno compensato di tavole sono caratterizzate dall'impiego di elementi massicci piani multistrato con funzione portante, nei quali le dimensioni lungo entrambi gli assi principali sono di gran lunga maggiori dello spessore. Gli elementi piani portanti di compensato di tavole assumono, in base alle condizioni di carico, funzione portante di piastre e/o lastre. La struttura della sezione trasversale del compensato di tavole (pannelli monostrato disposti di solito alternativamente ad angolo retto l'uno rispetto all'altro) permette di ottenere con un unico pannello una capacità portante nelle due direzioni principali del loro piano.



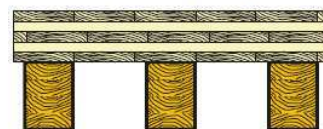
Impiego di elementi di legno compensato di tavole per solai e pareti in costruzioni di tipo massiccio.

La figura precedente mostra una delle molteplici possibilità di impiego del sistema costruttivo con legno compensato di tavole, che comprendono sia le case unifamiliari, che le abitazioni multipiano, come pure gli edifici pubblici, gli uffici ed i capannoni. Le possibilità di impiego del compensato di tavole in edilizia residenziale sono caratterizzate dalla varietà dei prodotti e degli elementi costruttivi. Infatti non solo possono essere realizzati solai, pareti interne ed esterne ed elementi di copertura di grandi dimensioni ma anche solette per scale e balconi, nonché elementi strutturali di tipo lineare come architravi e colonne.

Lo spessore di un elemento di compensato di tavole a 5 strati solitamente utilizzato per un edificio multipiano (max. 3 piani) è di circa 95 mm. Lo spessore minimo di elementi portanti massicci dipende inoltre dal tipo di prodotto e dalle relative grandezze caratteristiche, tuttavia generalmente non dovrebbe essere mai inferiore a 75 mm. Con pannelli di compensato di tavole a 5 strati di spessore compreso tra 125 mm e 160 mm, a seconda della struttura del pannello e del solaio nonché dell'entità delle sollecitazioni, si possono coprire luci di 4.0-5.0 m, in modo economico. Per luci maggiori ed elementi di parete di altezza maggiore privi di sostegni intermedi sono indicati pannelli nervati con travi incollate di lamellare o sezioni a cassone con montanti di lamellare.



Pannello nervato,
compensato di tavole a 5 strati +
lamellare incollato (da GL24 a GL36)



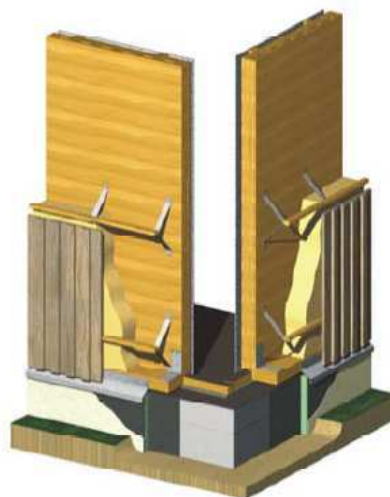
Sezione a cassone,
compensato di tavole a 3 strati +
lamellare incollato (da GL24 a GL36) +
compensato di tavole a 3 strati



Pannello di compensato di tavole con nervature di lamellare incollato e variante a sezione a cassone.

Gli elementi massicci di parete, solaio e copertura possono essere prodotti esattamente e singolarmente in base alle indicazioni di progetto e possono essere collegati con sistemi di connessioni semplici e standardizzati. Vengono a mancare, quindi, quelle lunghe e

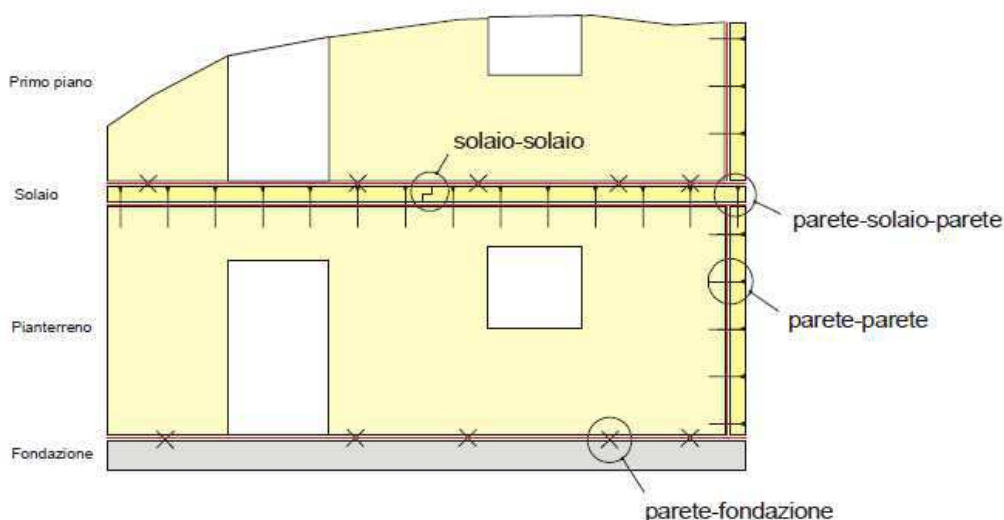
complicate operazioni di finitura e di montaggio in cantiere. Isolamento, rivestimenti ed elementi di facciata possono essere facilmente fissati agli elementi in compensato di tavole (montaggio rapido).



Montaggio di un elemento preassemblato (sinistra) e fissaggio di elementi di isolamento e di facciata (destra).

L'irrigidimento di edifici ad uso abitativo realizzato con elementi di compensato di tavole avviene utilizzando pareti irrigidenti, le quali, in combinazione con i solai, costituiscono una struttura rigida tridimensionale. In questo caso grazie all'uso di elementi di compensato di tavole, i tipici controventamenti non sono di regola necessari. L'irrigidimento orizzontale presuppone un sistema di connessione dei singoli elementi in grado di trasmettere gli sforzi. Il numero e la posizione degli elementi di irrigidimento presenti in un edificio sono determinati dalla geometria del fabbricato, dal tipo di sezione nonché dalla geometria dei singoli elementi irrigidenti e dai carichi orizzontali (sisma, vento). Per la trasmissione dei carichi orizzontali è fondamentale, insieme al tipo di connessione, soprattutto la lunghezza della parete non indebolita. Grandi aperture (finestre, porte), che interrompono i percorsi verticali e/o orizzontali dei carichi, ne disturbano il comportamento a lastra. Poiché gli elementi di parete di tipo massiccio sono "più rigidi", per esempio, delle pareti impiegate per le costruzioni di tipo leggero (strutture intelaiate), il numero e la lunghezza di questi irrigidimenti possono essere ridotti. Un'adeguata verifica è tuttavia alla base di ogni elaborazione di tipo statico-costruttivo.

Utilizzando elementi di compensato di tavole di grandi dimensioni per la realizzazione di un edificio sono necessarie poche giunzioni a contatto. Fondamentalmente si fa distinzione tra giunzioni a contatto parete-parete, parete-fondazione, parete-solaio-parete e solaio-solaio. Il collegamento necessario, in grado di trasmettere gli sforzi, dei singoli elementi di grandi dimensioni in compensato di tavole avviene solitamente mediante connettori meccanici.



Posizione dei giunti degli elementi di parete di un edificio.

Il collegamento degli elementi di compensato di tavole nelle citate giunzioni a contatto e la relativa trasmissione dei carichi avvengono di solito in maniera puntiforme tramite i consueti sistemi di connessione per le strutture di legno come, per esempio, bulloni per il legno, aste filettate incollate, chiodi, spinotti, viti calibrate, nonché altri mezzi di collegamento provvisti di omologazione.

Occorre tener presente che, nelle giunzioni a contatto parete-solaio-parete e parete-fondazione, insorgono per lo più sforzi di compressione a causa del peso proprio degli elementi massicci, portanti e irrigidenti, delle pareti e dei solai. Solo in condizioni di carico particolari (condizioni di carico dovute al montaggio) e/o in presenza di una geometria particolare del fabbricato (edifici multipiano con pareti irrigidenti dalla larghezza ridotta) possono presentarsi sforzi di trazione nelle giunzioni a contatto. Queste forze di trazione, per limitare l'aprirsi dei giunti, devono essere portate in fondazione mediante un adeguato ancoraggio.

I particolari costruttivi di seguito riportati vogliono mostrare alcune possibilità per le più importanti giunzioni degli elementi di compensato di tavole impiegati in edilizia residenziale (utilizzo di elementi di parete di altezza pari ad un interpiano). Nella maggior parte dei dettagli costruttivi, si presuppone che le singole lamelle degli elementi di compensato di tavole siano incollate lateralmente. Se ciò non accade, la tenuta del giunto nei confronti del vento deve essere garantita in altro modo (chiusura della superficie laterale del compensato di tavole con lamelle o disponendo fogli di plastica). I singoli connettori devono essere disposti in base alle esigenze di natura statico-costruttiva.

Giunzioni a contatto solaio-solaio (giunto trasversale)

Per motivi legati alla produzione ed al trasporto, le larghezze degli elementi di compensato di tavole sono limitate (a seconda del prodotto larghezza massima di 3,0 m fino a 4,8 m). Si rende quindi necessaria la giunzione dei singoli elementi per ottenere solai di maggiori dimensioni. Una possibilità è rappresentata dal giunto a intaglio bullonato. Questo giunto viene applicato, di solito, nella direzione portante principale del solaio, dato che con esso può essere trasmesso solo il taglio e non la flessione (cerniera). Soprattutto per sollecitazioni non uniformemente ripartite sul solaio, possono presentarsi, nella giunzione, trazione o compressione perpendicolare alla fibratura e perciò sussiste il pericolo di fessurazione trasversale.



Giunto longitudinale a cerniera tra due elementi di solaio.

Disponendo coprigiunti (ad esempio di legno compensato, pannelli a tre strati, Kerto), incassati nelle parti superiore ed inferiore degli elementi di legno compensato di tavole,

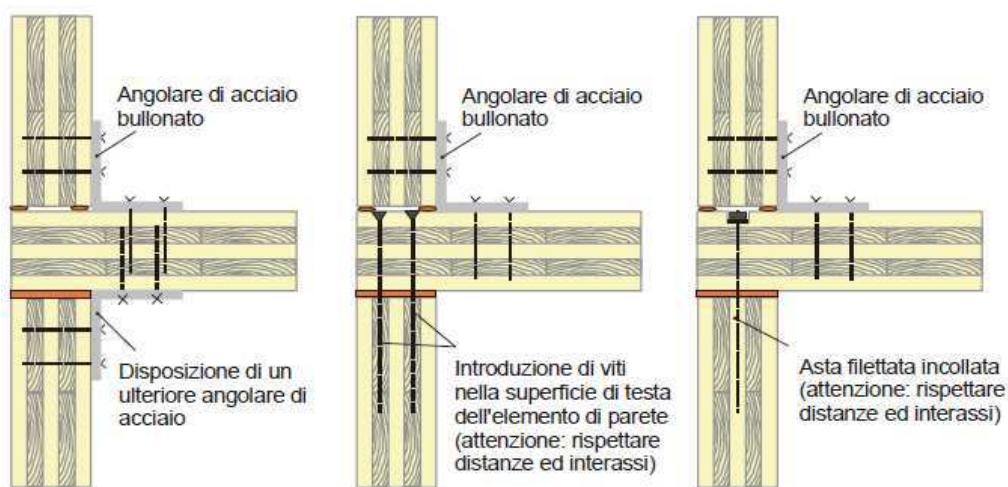
può essere realizzata una connessione rigida a flessione. È possibile, inoltre, incollare questi elementi (la pressione necessaria è ottenuta con bulloni o chiodi); questa operazione di incollaggio è tuttavia da evitare in cantiere.



Giunto longitudinale rigido fra due elementi di solaio.

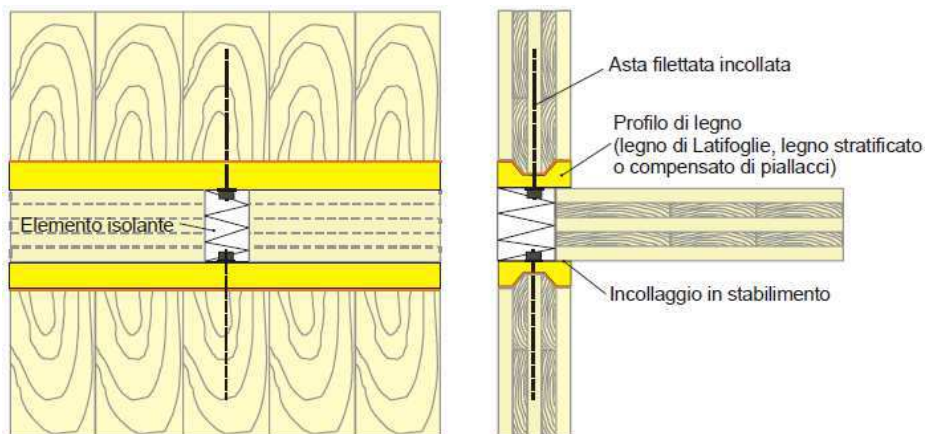
Giunzioni a contatto parete-solaio-parete

Le giunzioni fra gli elementi di solaio e gli elementi di parete sottostanti possono essere eseguite tramite l'introduzione di viti avvitate nella superficie di testa dell'elemento piano, tramite aste filettate incollate o con l'aggiunta di angolari d'acciaio. Con questi sistemi di connessione, possono essere trasmessi ai solai sia i carichi orizzontali (per esempio il vento sugli elementi di parete) che gli sforzi di trazione.



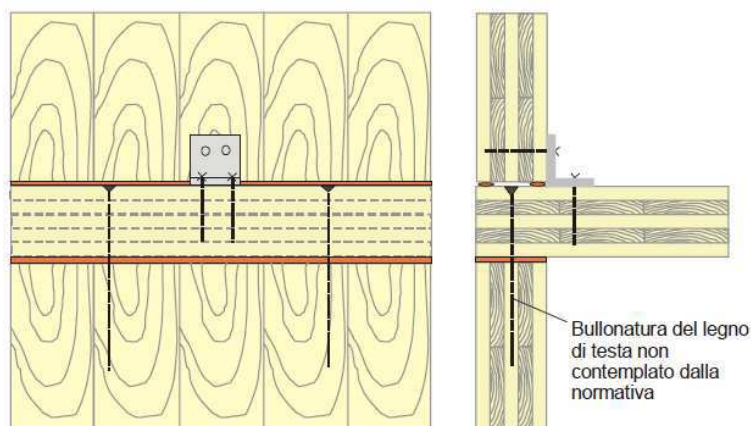
Giunzione parete-solaio-parete, esempi rappresentativi della realizzazione della connessione.

Il collegamento parete-solaio-parete può essere anche realizzato con l'aiuto di profili di legno applicati in stabilimento all'elemento di solaio. Come materiale per questi correnti orizzontali speciali si prestano bene gli stratificati e i compensati di piallacci, i profili di legno di quercia o di robinia oppure di altre Latifoglie. Appositi spazi vuoti ricavati nell'elemento di compensato di tavole permettono di avvitare aste filettate incollate montate in sede di preassemblaggio degli elementi.



Giunzione parete-solaio-parete con profili di legno.

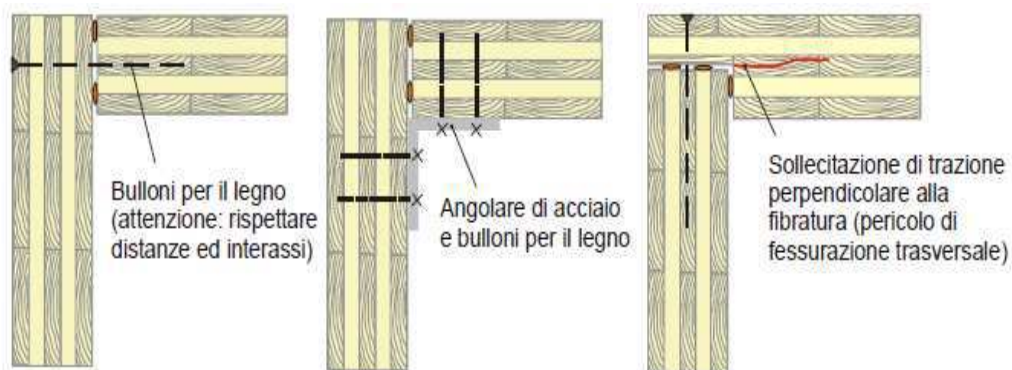
La bullonatura diretta (con bulloni per il legno) dell'elemento di solaio con il sottostante elemento di parete deve essere evitata, poiché sussiste il pericolo di bullonare il legno di testa. Inoltre, per connessioni strutturali con bulloni per il legno di diametro nominale inferiore a 10 mm, devono essere realizzate almeno quattro sezioni resistenti.



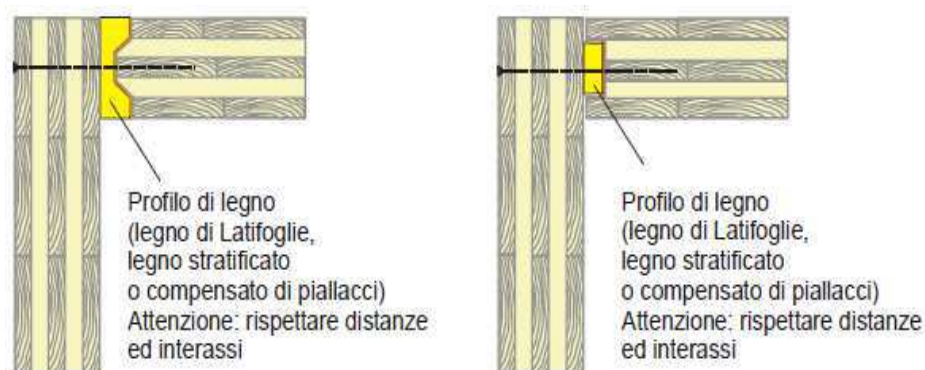
Giunzione parete-solaio-parete, bullonatura del legno di testa da evitare.

Giunzioni a contatto parete-parete (giunto d'angolo)

Il collegamento d'angolo parete-parete può essere risolto con diversi tipi di connessioni bullonate.

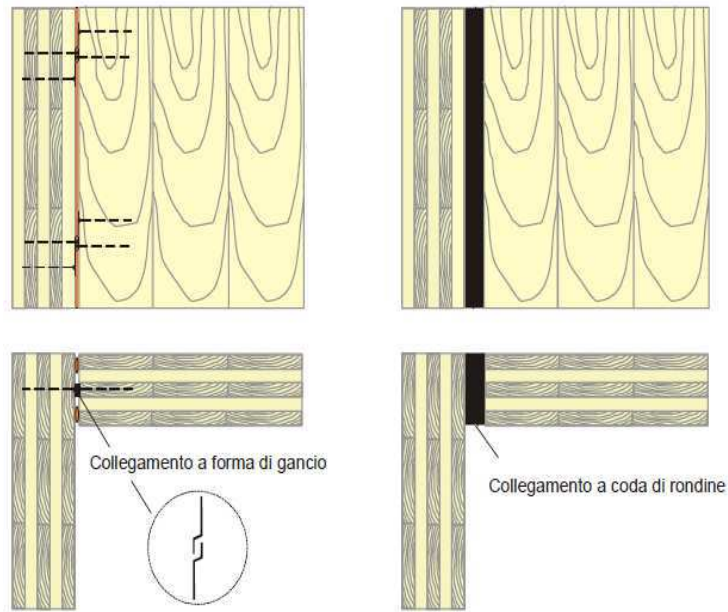


Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura.



Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura e profili di legno.

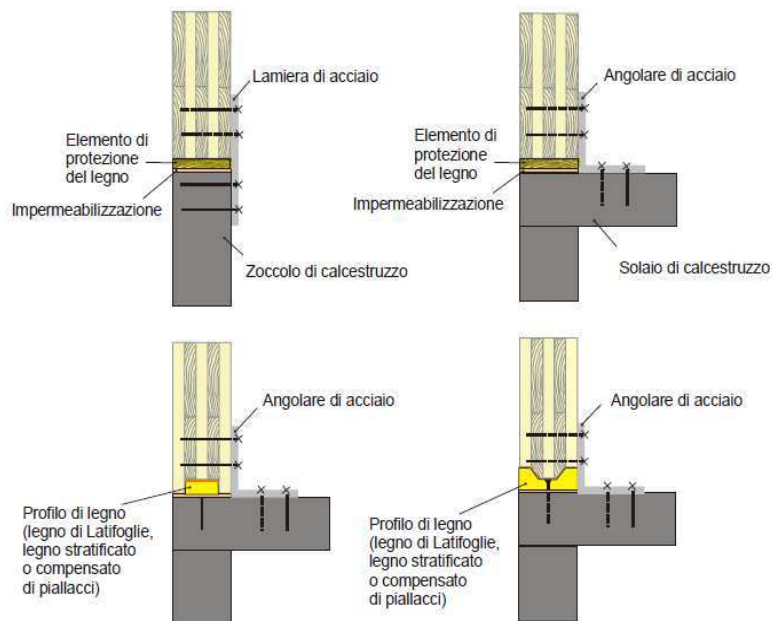
Un altro possibile tipo di collegamento parete-parete è dato da elementi di connessione a forma di gancio o a coda di rondine. Questi sistemi di connessione, se adeguatamente preparati, permettono il montaggio (autocentrante) degli elementi di compensato di tavole senza ulteriori accorgimenti.



Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura e profili di legno.

Giunzioni a contatto parete-fondazione

Per assicurare gli elementi di parete allo zoccolo o al solaio di calcestruzzo sono disponibili una serie di sistemi di connessioni.



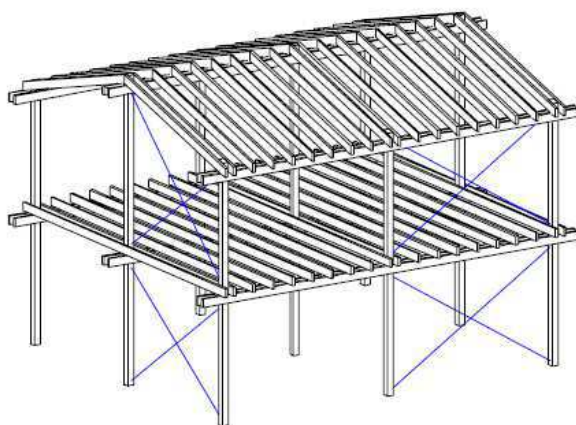
Giunzione parete fondazione, disposizione di lamiere e angolari d'acciaio come rinforzo ed ancoraggio per gli sforzi di trazione.

2.3.4 Sistema costruttivo ad ossatura portante in legno

Questo tipo di costruzione si è sviluppato sin dai tempi del primo neolitico. Oltre al metodo di disporre tronchi d'albero orizzontalmente l'uno sull'altro (costruzione massiccia), uno dei primi modi di costruire edifici consisteva nell'interrare pali verticalmente e collegarli l'uno con l'altro mediante traversi (costruzione di palafitte). Le pareti tra questi pali venivano completate con intrecci ed argilla.

Le moderne costruzioni ad ossatura portante sono state realizzate sin dalla fine degli anni '60 per lo più in Europa, ed in Giappone dall'inizio degli anni '80. Dimensioni del reticolo in pianta grandi a piacimento, rese possibili dallo sviluppo del legno lamellare incollato, aprivano, grazie all'aumento dei possibili interassi di travi e colonne, ampi spazi per la concezione dello spazio interno ed il suo utilizzo. Colonne e travi sono disposte a grande interasse per poter inserire facciate e pareti divisorie realizzate a piacimento.

Sopra o in mezzo alla struttura portante principale sono inseriti gli elementi portanti secondari. Essi possono essere travi e puntoni (per luci ridotte anche tavoloni) o elementi di tipo piano di legno compensato di tavole (per luci ridotte anche pannelli a base legno).



Costruzione ad ossatura portante di legno.

Facciate e pareti divisorie non assorbono di regola alcuna forza verticale nelle costruzioni ad ossatura portante di legno ma possono essere utilizzate come irrigidimento. I tamponamenti possono essere realizzati con sistemi costruttivi a

piacimento come elementi intelaiati, elementi di legno compensato di tavole, costruzioni con vetro ma anche murature. I solai sono costituiti da travature in legno. Per il fatto che il sistema costruttivo ad ossatura portante permette grande flessibilità nella scelta degli elementi di tamponamento (eventualmente senza alcuna funzione portante), esso può essere definito piuttosto come tipo di struttura portante, che come tipo di costruzione.

Le caratteristiche del sistema costruttivo ad ossatura portante di legno sono:

- distribuzione in pianta delle pareti intercambiabile e pareti facilmente spostabili;
- libertà di organizzazione sulla base di reticoli e moduli variabili;
- ossatura portante e pareti non portanti indipendenti da essa;
- struttura portante per lo più immediatamente riconoscibile;
- elementi costruttivi portanti per lo più di legno lamellare incollato;
- impiego di mezzi di collegamento d'acciaio;
- elevato grado di prefabbricazione;
- possibilità di "fai da te" per gli elementi costruttivi non portanti;
- irrigidimento per lo più mediante solai con comportamento a lastra, diagonali di acciaio o di legno oppure lastre di parete.

Riguardo alla distinzione tra costruzioni ad ossatura portante di legno e costruzioni intelaiate di legno si può notare che, nelle costruzioni intelaiate, vengono realizzate lastre per le quali non c'è alcuna separazione tra elementi portanti e di tamponamento. Nelle costruzioni ad ossatura portante, i carichi vengono assorbiti da elementi strutturali di tipo lineare, che possono rimanere a vista indipendentemente dagli elementi di tamponamento.

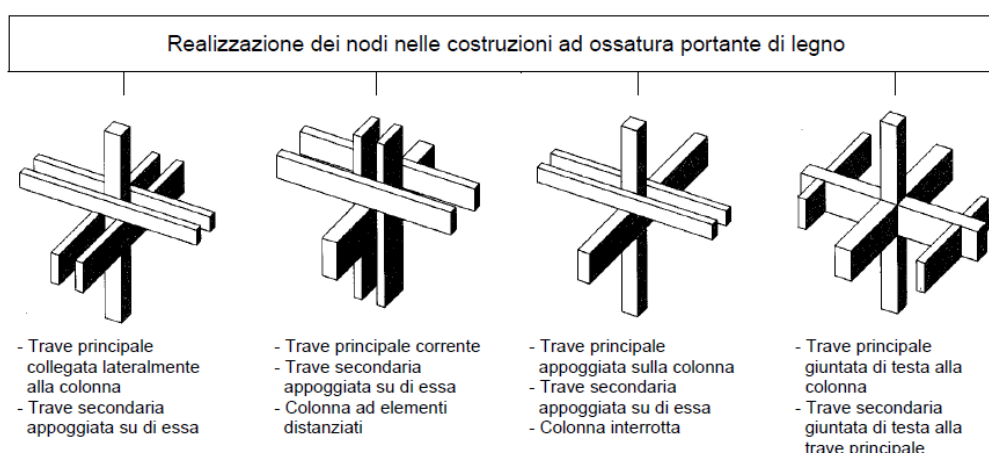
La maggior parte degli edifici ad ossatura portante sono costruiti secondo un reticolo orizzontale e spesso anche secondo uno verticale. Per le costruzioni ad ossatura portante, il reticolo utilizzato (come aiuto per il progetto e la realizzazione del fabbricato) stabilisce la disposizione degli elementi e la distribuzione degli spazi, definisce la posizione delle colonne portanti e la lunghezza delle travi, e quindi le luci libere nella direzione portante principale ed in quella secondaria.

In fase progettuale si sceglie un modulo di base e quindi il reticolo ottenuto come multiplo di questo modulo. Tale reticolo viene fissato soprattutto in base all'utilizzazione degli spazi, alle dimensioni dell'edificio e dei locali, all'organizzazione

architettonica e ai desideri del committente. Le dimensioni del modulo di base possono essere definite ex novo in base alle esigenze più varie legate al singolo fabbricato secondo le priorità che ci si è posti.

Le dimensioni consuete del reticolo nelle costruzioni ad ossatura portante sono: 120/120 cm, 120/360 cm, 125/125 cm, 360/360 cm, 480/480 cm. Le luci libere nelle direzioni portanti principale e secondaria sono quindi un multiplo delle dimensioni del reticolo, che possono essere regolari o anche irregolari. A seconda del tipo di costruzione, le luci delle travi principali sono comprese tra 3,0 m e 8,0 m. Luci comprese tra 3,5 m e 4,5 m (5,0 m) si sono rivelate economicamente convenienti in relazione ai carichi che normalmente agiscono su solai di edifici adibiti a civile abitazione o ufficio.

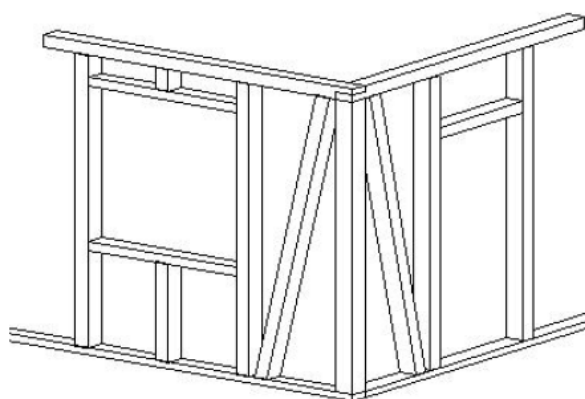
Generalmente viene indicato come nodo il “punto” in cui convergono (almeno) due aste. Esso ha il compito di collegare le aste l’una con l’altra permettendo la trasmissione delle forze tra di esse. Nel metodo costruttivo ad ossatura portante si distinguono diverse tipologie di costruzioni, che si differenziano tra loro in base alla strutture delle colonne, delle travi e degli elementi di connessione. La scelta del sistema costruttivo dipende da una parte dagli aspetti architettonici e del reticolo in pianta, dall’altra parte dai carichi: perciò si sceglie prima il reticolo in pianta e si predimensiona la struttura portante principale, per poi scegliere il tipo di costruzione ad ossatura portante opportuno. Di seguito sono rappresentati alcuni nodi e i tipi di costruzione ad ossatura portante:



Realizzazione dei nodi nelle costruzioni ad ossatura portante in legno.

2.3.5 Sistema costruttivo a traliccio di legno

Le costruzioni a traliccio si sono sviluppate in quelle Regioni dove il legno non era disponibile nella quantità necessaria, ad esempio, per le costruzioni massicce. Senza le attuali capacità di trasporto l'impiego dei materiali da costruzione si orientava generalmente secondo la loro provenienza geografica. Perciò esistono molte costruzioni a traliccio in Europa dell'est e centrale, ma anche in Inghilterra, Germania settentrionale, Danimarca e Olanda.



Costruzione a traliccio di legno.

Le peculiarità delle costruzioni a traliccio sono:

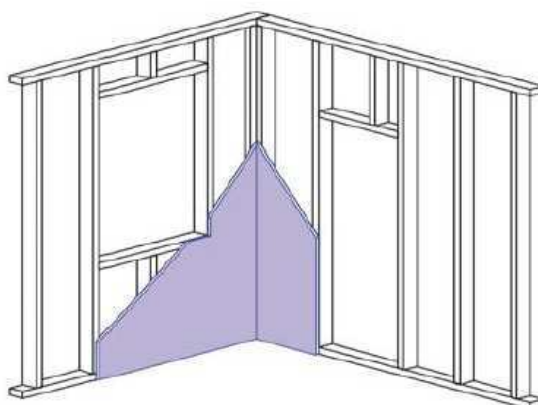
- libertà nell'organizzazione (architettonica): l'ossatura portante viene rivestita da entrambi i lati o rimane a vista da un lato solo;
- sono possibili edifici ad un piano o multipiano;
- disposizione fissa per tutti i piani in pianta;
- avanzamento della costruzione piano per piano;
- impiego prevalente di connessioni senza elementi meccanici di collegamento (connessioni di carpenteria) con incastri e sovrapposizioni;
- gli elementi portanti hanno sezioni di grande dimensione e di forma quadratica;
- tempi di realizzazione relativamente brevi;
- strutture relativamente facili da erigere.

Moderne e precise macchine a controllo numerico, insieme alle nuove conoscenze e metodologie riguardo l'essiccazione del legno, rendono le costruzioni a traliccio

economicamente competitive. Gli incastri, in questo tipo di costruzione, sono collegamenti economicamente più vantaggiosi rispetto a lamiere o elementi di forma particolare in acciaio. Questo a causa del fatto che i collegamenti vengono sollecitati poco, in quanto gli elementi di legno sono ad interasse piccolo gli uni dagli altri. Inoltre nelle costruzioni a traliccio la trasmissione dei carichi verticali avviene direttamente mediante giunti a contatto.

2.3.6 Sistema costruttivo ad intelaiatura di legno

Mentre nelle costruzioni a traliccio e ad ossatura portante i carichi vengono assorbiti da elementi di tipo lineare, nelle costruzioni intelaiate ci si trova di fronte ad un sistema costruttivo a lastre, per il quale gli elementi portanti non sono separati da quelli di irrigidimento e tamponamento. La definizione di “costruzione intelaiata di legno” deriva dall’inglese "timber frame", ossia telaio di legno. L’ossatura portante, con montanti disposti a distanza piuttosto ravvicinata, il telaio di legno appunto, viene rivestito con pannelli per costituire così una lastra. Vengono impiegate sezioni e materiali di rivestimento standard, connessi mediante semplici mezzi di collegamento come chiodi, cambrette e bulloni. Presupposto di base per tutte queste costruzioni è che il legno utilizzato sia stato essiccato artificialmente.



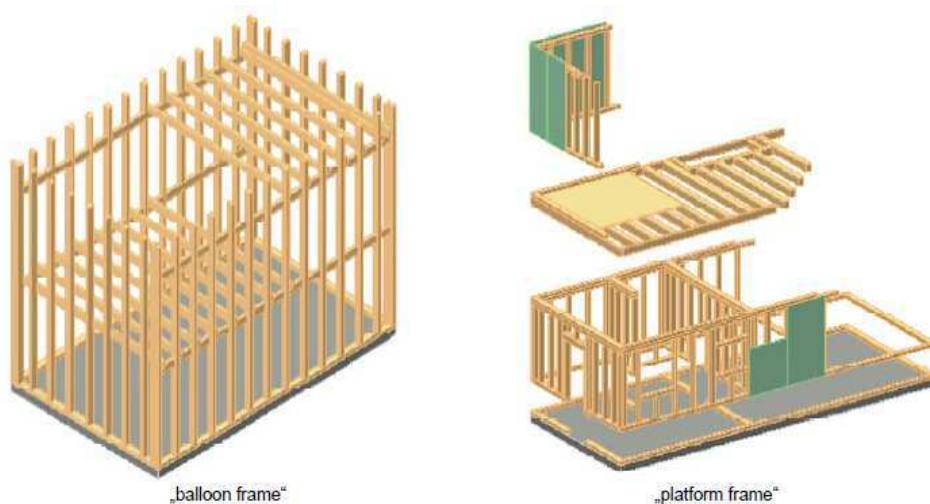
Costruzione intelaiata.

Gli elementi di parete, solaio e copertura realizzati in questa maniera possono essere prodotti in stabilimento a differenti livelli di prefabbricazione e montati in cantiere. Questo permette la rapida chiusura della costruzione (montaggio rapido), a patto però che i piani esecutivi siano completamente pronti prima dell'inizio dei lavori.

Le peculiarità delle costruzioni intelaiate di legno sono:

- “dispendio” tecnico limitato a causa dell'utilizzo sistematico di sezioni di legno standard;
- il reticolo con la disposizione delle colonne è determinato dalle dimensioni dei pannelli a base legno (o gesso), (maglia di base di regola = 62,5 cm), il che evita lo spreco di resti di materiale
- nessuna connessione di carpenteria;
- in cantiere vengono messe in opera gli elementi di parete assemblate in stabilimento;
- la tenuta all'aria è garantita senza complicate soluzioni tecniche;
- gli elementi irrigidenti l'edificio sono le pareti stesse (tre pareti, i cui assi geometrici in pianta non convergono in un punto solo, costituiscono un sistema rigido).

Gli edifici a struttura intelaiata di legno vengono di regola costruiti piano per piano ("platform frame"). Occasionalmente (soprattutto in America) vengono impiegati anche elementi di altezza pari a più piani ("balloon frame").



Sistemi costruttivi per strutture ad intelaiatura di legno.

Le pareti vengono realizzate come elementi composti, costituiti da un'ossatura portante con montanti verticali e telai, rivestiti da uno o da ambo i lati con materiali a base legno o gesso, che collegano montanti ai telai, con all'interno l'isolante. I montanti assorbono generalmente i carichi verticali provenienti dalla copertura e dai solai di piano. Inoltre, quelli disposti lungo le pareti esterne assorbono anche i carichi orizzontali dovuti al vento agenti sulle pareti stesse. Essi possono essere dimensionati molto snelli, dato che il rivestimento ha anche funzione stabilizzante per loro. Il rivestimento assorbe essenzialmente i carichi agenti nel piano della lastra (carichi dovuti alla funzione di irrigidimento) e viene a sua volta stabilizzato all'imbozzamento dai montanti stessi.

Poiché le giunzioni dei pannelli devono essere realizzate sempre sui montanti, essi sono disposti ad interasse ridotto, di regola di 62,5 cm. Questa misura dipende dalle dimensioni dei materiali di rivestimento comuni sul mercato (larghezza pari a 125 cm), per minimizzare il loro scarto. Anche un gran numero di fabbricanti di materiali isolanti si sono adattati a questa misura nelle dimensioni dei loro prodotti. In caso di pannelli di altre dimensioni, il reticolo può essere variato. Le aperture possono essere previste, in linea di principio, ovunque sull'elemento di parete. Un'apertura non allineata con il reticolo viene delimitata da ulteriori montanti e da un architrave disposto su di essi. Adattando la progettazione a questo reticolo è possibile collocare le aperture in modo tale da non necessitare l'impiego di montanti non strettamente necessari.



Assemblaggio di pannelli platform frame con predisposizioni impiantistiche.

3 Progetto dell'edificio e del modulo abitativo

3.1 Descrizione

Questa tesi riguarda il progetto di un modulo abitativo in legno da collocare all'interno di una struttura in acciaio di quattro piani fuori terra, costituita da travi e pilastri disposti con interasse regolare e pari a 4 metri, ad esclusione della zona dove si sono collocati i vani scale e ascensori, in cui si è utilizzato un interasse dei pilastri pari a 3 - 3,5 metri.

Lo studio si è focalizzato, oltre che sul progetto di un edificio a maglia regolare, sullo studio del dettaglio costruttivo e quindi delle stratigrafie di solai, tamponamenti esterni, interni e tramezzature dalle elevate prestazioni termoacustiche; ma anche di sistemi di connessione e trasferimento dei carichi alla struttura portante principale, tecnologie esecutive e materiali innovativi.



Realizzazione in stabilimento di moduli abitativi prefiniti.

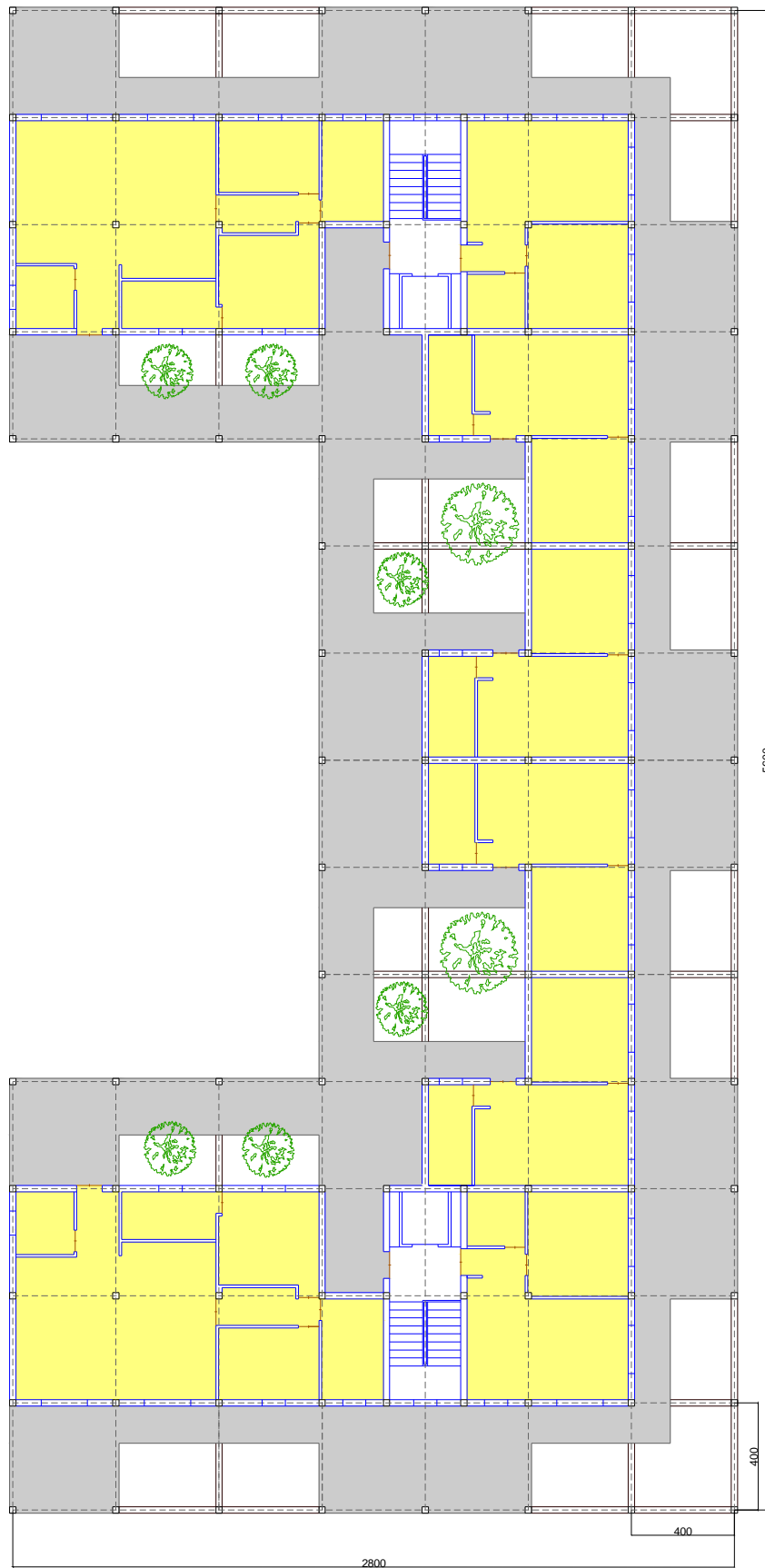
Lo scopo di questo progetto è l'utilizzo di una tecnologia costruttiva caratterizzata da rapidità di assemblaggio, certezza dei tempi, riduzione del personale e dell'organizzazione, riduzione di rifiuti e scarti, assenza di umidità e tempi di asciugatura (si tratta infatti di una struttura realizzata completamente a secco, ad esclusione della platea di fondazione, in conglomerato cementizio armato, su cui si erge la costruzione), pulizia del cantiere e vantaggi nella gestione ai fini della sicurezza.

Accanto all'ossatura portante prefabbricata, si è optato per tecnologie di assemblaggio a secco (che consentono cicli rapidi e ripetibili su grande scala) e componenti edili preassemblati, con la finalità di spostare il più possibile le lavorazioni dal cantiere agli stabilimenti di produzione, permettendo così di diminuire la presenza della manodopera in sito.



Sollevamento e trasporto di un modulo abitativo prefabbricato.

Si riportano nelle pagine seguenti la pianta e il prospetto dell'edificio progettato.





L'edificio ha pianta a forma di C, i suoi lati hanno lunghezza pari a 56 metri e 28 metri rispettivamente e si compone di quattro piani fuori terra (lo studio è stato limitato a quattro piani, ma può essere esteso ad un numero maggiore; maggiore potrebbe essere anche la dimensione dell'edificio in pianta, avendo quest'ultima una maglia molto regolare), ciascuno dei quali è servito da due nuclei scala e ascensore. Il piano terra è caratterizzato dalla presenza di negozi e uffici; i tre piani soprastanti comprendono invece due tipologie di appartamento: il cosiddetto "miniappartamento" (sei per ciascun piano) che comprende cucina, servizio e camera; l'appartamento tricamere (due per ciascun piano) composto da cucina e soggiorno, due servizi e tre camere.

Come si può notare dal prospetto e dalla pianta dell'edificio, gli appartamenti godono di notevole illuminazione, grazie alle ampie finestre che per la maggior parte sono a tutta altezza e che danno accesso alle ampie terrazze che circondano l'edificio e di cui ciascun appartamento dispone.

Il sistema costruttivo scelto, con telaio portante in carpenteria di acciaio (resistente sia ai carichi verticali sia al sisma agente nelle due direzioni X e Y principali dell'edificio), orizzontamenti in legno e stratigrafie di tamponamento a secco, è caratterizzato da una notevole semplificazione del cantiere e dalla riduzione di personale e scarti. Infatti tale tipo di attività si limitata al semplice assemblaggio, all'interno della struttura portante, di moduli edilizi che comprendono solaio e tamponamenti già solidarizzati in stabilimento tramite elementi metallici che verranno descritti successivamente.

3.2 Suddivisione in moduli prefabbricati

Per poter essere trasportati, i moduli preassemblati devono avere larghezza inferiore ai 2.5 m e lunghezza inferiore a 12 m. Per questo motivo si è suddiviso il piano tipo in moduli di dimensioni massime 8 m x 2 m, per quanto riguarda i moduli abitativi (essendo dotati anche di tamponamenti esterni o interni, e quindi di pannelli connessi al solaio aventi altezza pari a 2.8 metri circa); i solai delle terrazze invece, essendo privi di tamponature, sono stati suddivisi in moduli di dimensioni 8 m x 4 m, trasportabili accostati l'uno all'altro.

L'ascensore che si è inserito è del tipo oleodinamico; le scale invece, sono state pensate anch'esse come moduli, ciascuno dei quali comprende una rampa di altezza pari a metà interpiano, da adagiare sulle travi di estremità come tutti gli altri moduli di cui si compone l'edificio.



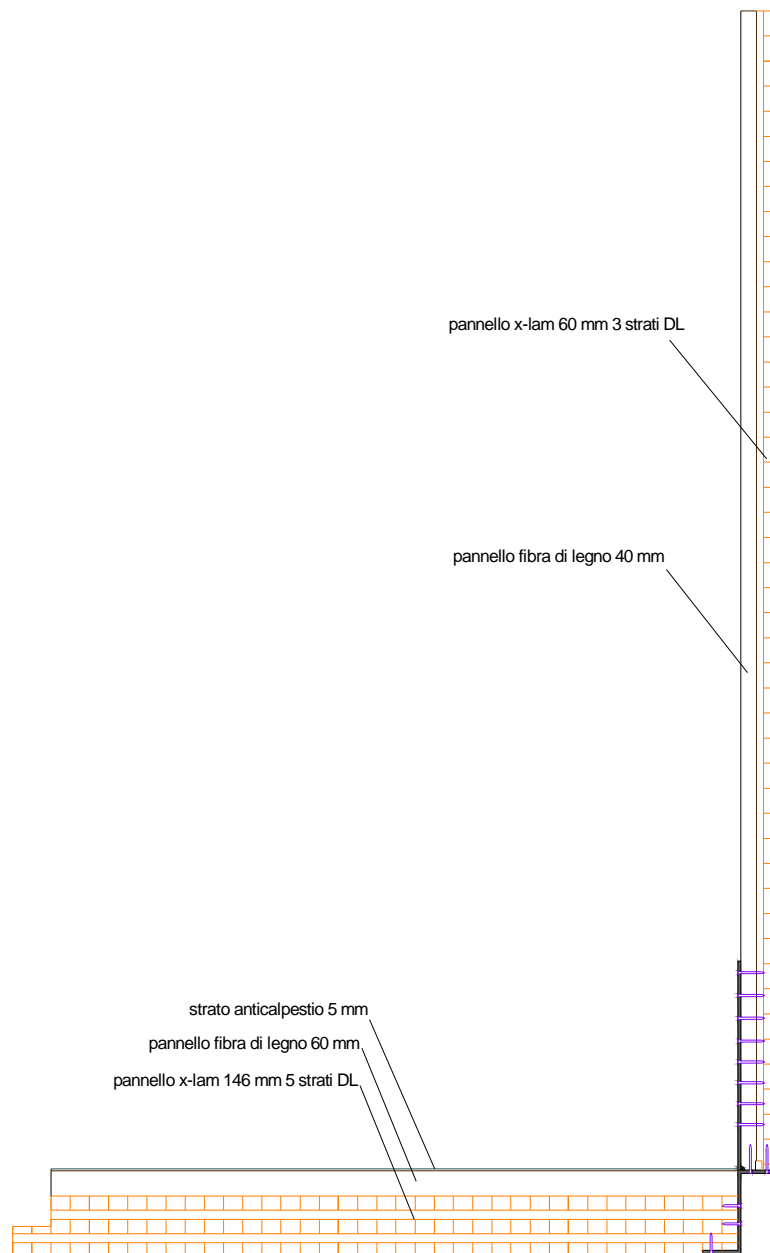
Modulo scale prefabbricato.

Nella figura successiva si riporta la pianta dell'edificio con evidenziata, attraverso vari colori, la suddivisione in moduli, e, attraverso un tratteggio, il modulo studiato.



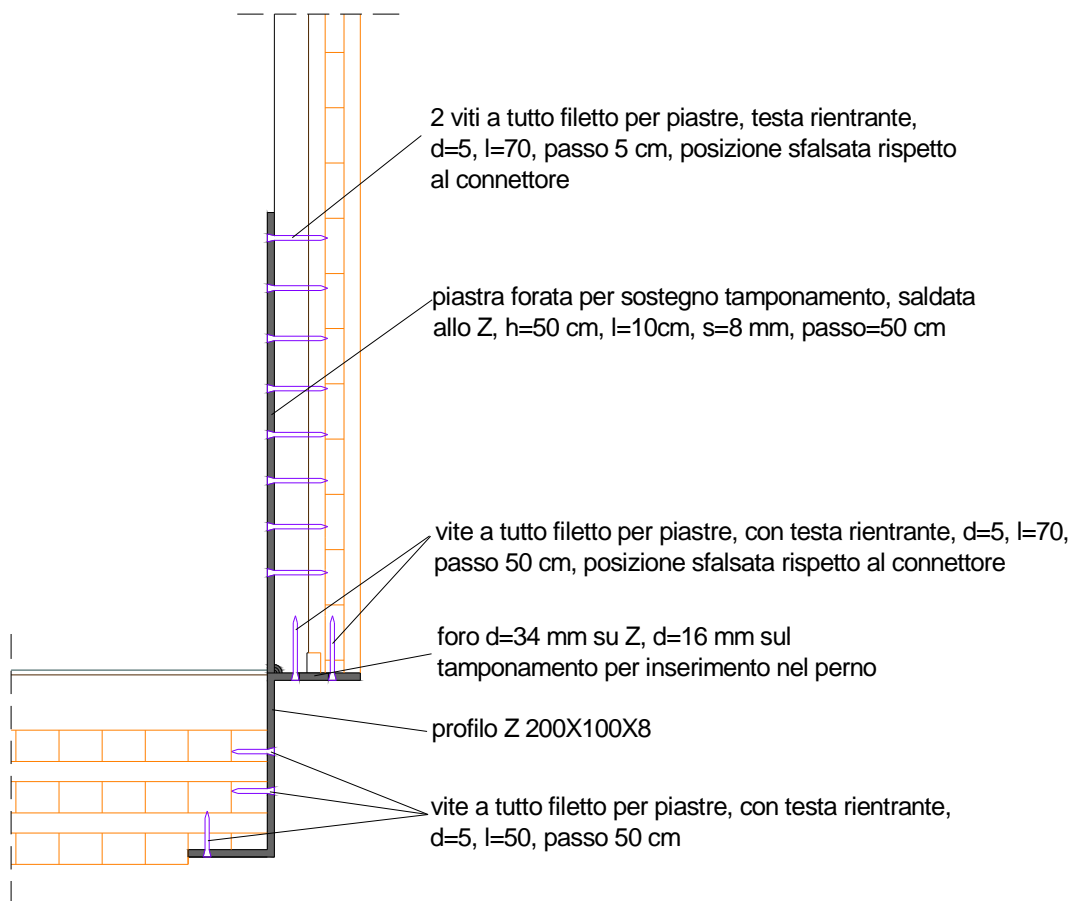
3.3 Il modulo abitativo

Dopo aver definito la maglia regolare in cui inserire il modulo, si è studiato il dettaglio costruttivo dello stesso; ciò ha permesso di determinare i carichi permanenti e portati agenti, e di realizzare quindi un modello FEM dell'edificio per determinare le sollecitazioni agenti e poter quindi dimensionare i principali elementi costruttivi (travi, pilastri, controventi, profili di sostegno, ecc.).

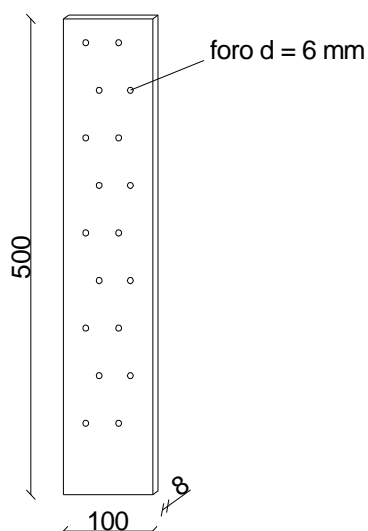


Sezione del modulo prefabbricato; in evidenza le stratigrafie di solaio e tamponamento.

Il modulo progettato ha superficie rettangolare in pianta di lati 2 m x 8 m, ed è costituito da una porzione di solaio di 2 m x 8 m, e da metà del tamponamento divisorio tra due appartamenti adiacenti. Questi due elementi sono solidarizzati mediante un profilo a Z di dimensioni 200 x 100 x 8 mm e viti di diametro 5 mm e lunghezza 50 mm sul solaio, mentre sulla parete si sono utilizzate viti di diametro 5 mm e altezza 70 mm; per entrambe si è adottato un passo di 50 cm. Inoltre, a sostegno della parete, si sono predisposte piastre (10 cm x 50 cm) preforate verticali, di spessore 8 mm saldate al bordo superiore dello Z ogni 50 cm, solidarizzate al tamponamento con viti di diametro 5 mm e altezza 70 mm.



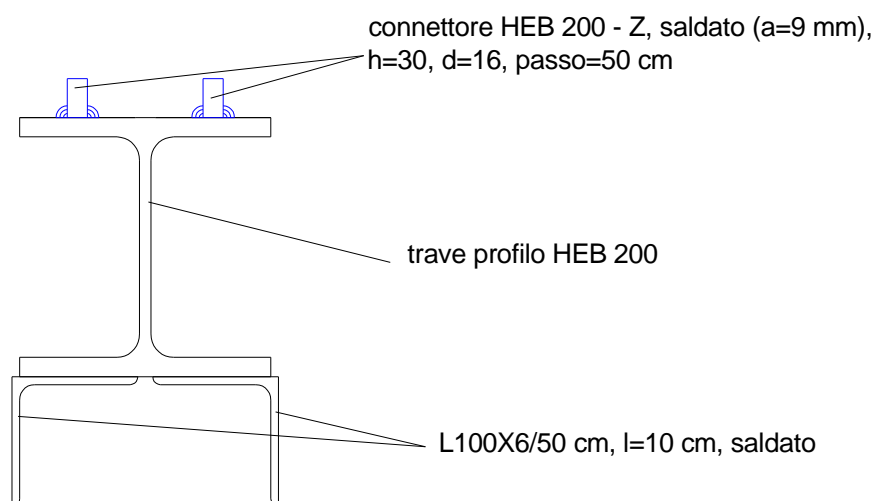
Ingrandimento della sezione del modulo.



Dettaglio della piastra forata per sostegno del tamponamento (misure in mm).

L'insieme di questi elementi costituisce il modulo prefinito, che una volta prodotto in stabilimento e trasportato in cantiere, viene inserito nella maglia di travi (HEB200) precedentemente imbullonate ai pilastri (HEB240) e montate piano per piano.

Le travi dispongono di due file di spinotti ($d=16$ mm, $h=30$ mm, passo 50 cm) saldati sull'ala superiore, entro i quali viene calato il modulo preforato in corrispondenza di tali connettori. Sulle ali inferiori della trave vengono saldati ogni 50 cm due profili a L 100 x 6 lunghi 10 cm, che hanno la funzione di sostenere la parete del modulo inferiore; le travi del piano superiore vengono infatti posizionate dopo aver appoggiato il modulo inferiore.



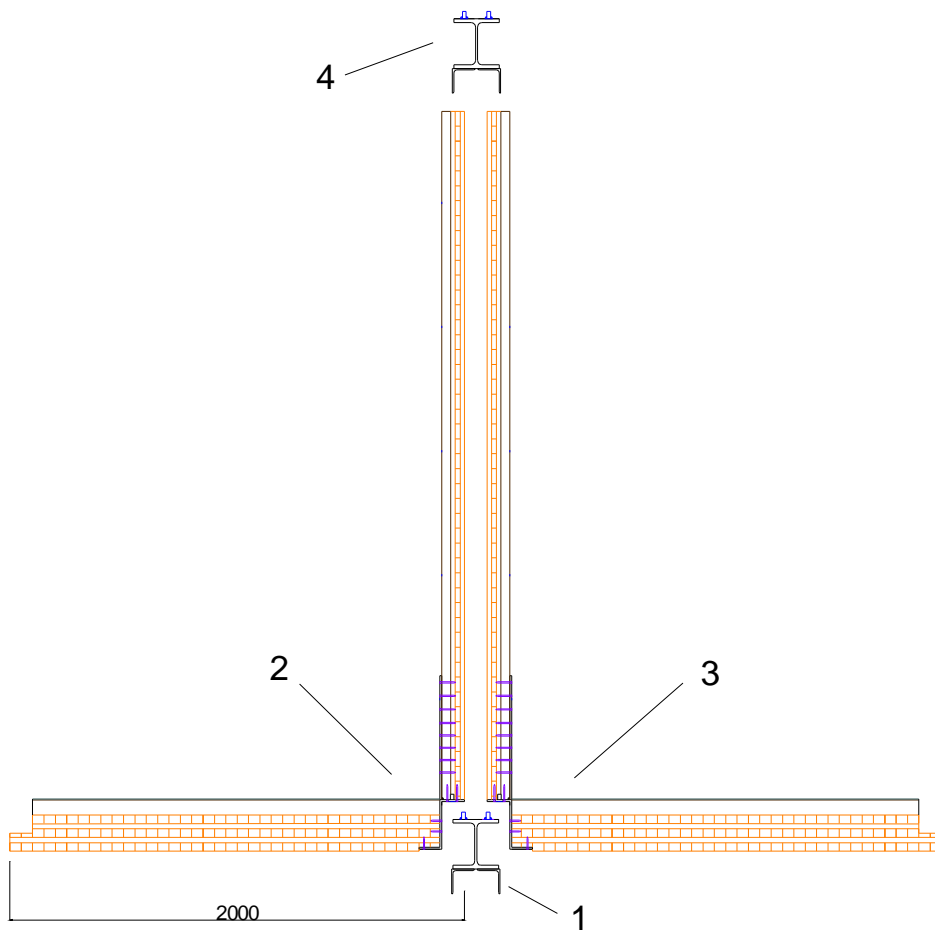
Sezione della trave con saldati perni-portamodulo e profili a L per sostegno pareti inferiori.

Modulo e struttura portante (pilastri e travi) sono stati studiati in modo da consentire un rapido e agevole montaggio dei vari elementi in opera.

La realizzazione dell'edificio, al di sopra della platea di fondazione, avviene infatti secondo le seguenti fasi:

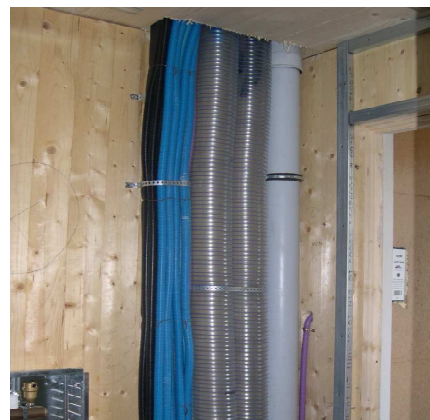
- montaggio dei pilastri;
- montaggio dei tamponamenti e delle vetrate dei negozi del piano terra;
- montaggio delle travi del piano primo;
- posa dei moduli abitativi del piano primo;
- collegamento delle due porzioni di tamponamento adiacenti, ove necessario, tramite viti;
- posa delle bandelle di controvento, connesse alle estremità delle ali inferiori delle travi e al solaio ogni 20 cm;
- montaggio delle travi e dei moduli del piano superiore, secondo la medesima sequenza, fino al montaggio delle travi dell'ultimo piano e del solaio della terrazza praticabile dell'ultimo piano;
- dopo aver montato la struttura si procederà con le finiture, ovvero: posa degli impianti; realizzazione dei controsoffitti e delle contropareti; posa del pavimento a parquet; posa di serramenti tipo monoblocco e persiane a due ante con lamelle orientabili; montaggio delle ringhiere di protezione su tutte le terrazze, private e comuni.

Si riportano di seguito alcuni disegni sulle fasi di montaggio e finitura, prima di passare alla descrizione dei materiali utilizzati per la realizzazione della struttura portante, delle stratigrafie di solai e tamponamenti, delle finiture in generale.

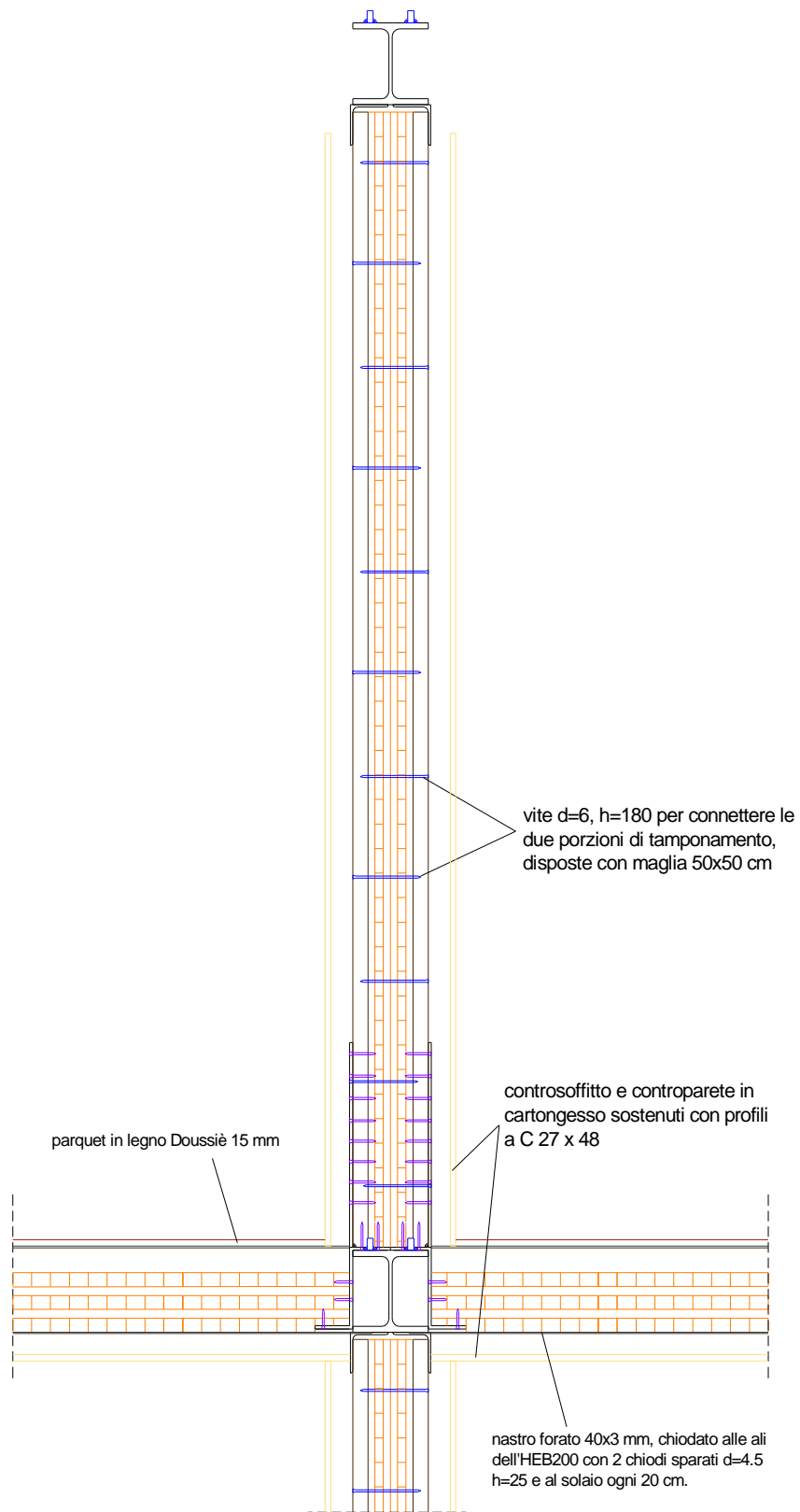


Sezione delle fasi di montaggio dei moduli:

- 1) posa della trave inferiore (mediante imbullonatura); 2) posa di uno dei due moduli adiacenti;
3) posa dell'altro modulo; 4) posa della trave superiore.*

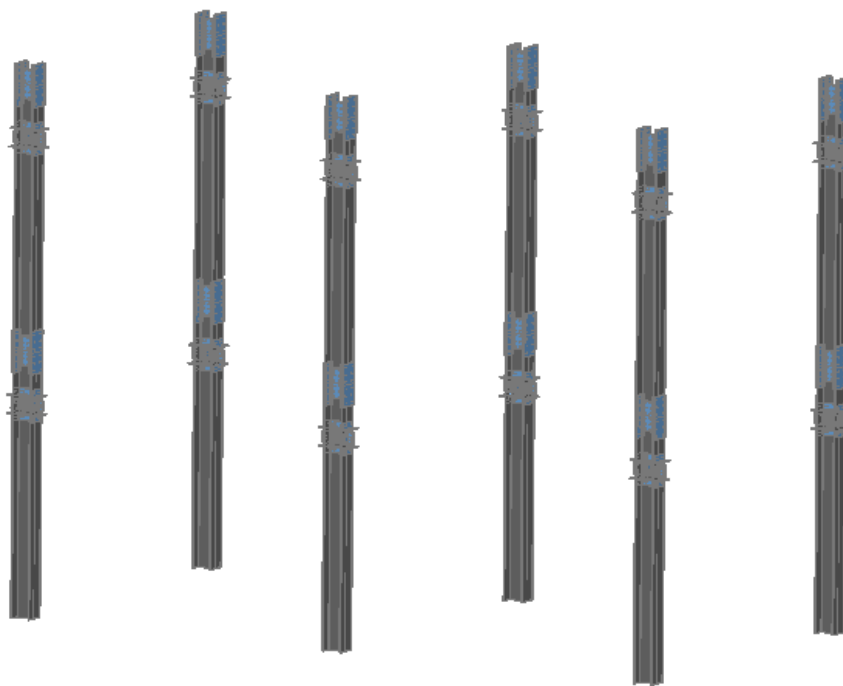


Installazione degli impianti successivamente coperti con contropareti e controsoffitti.

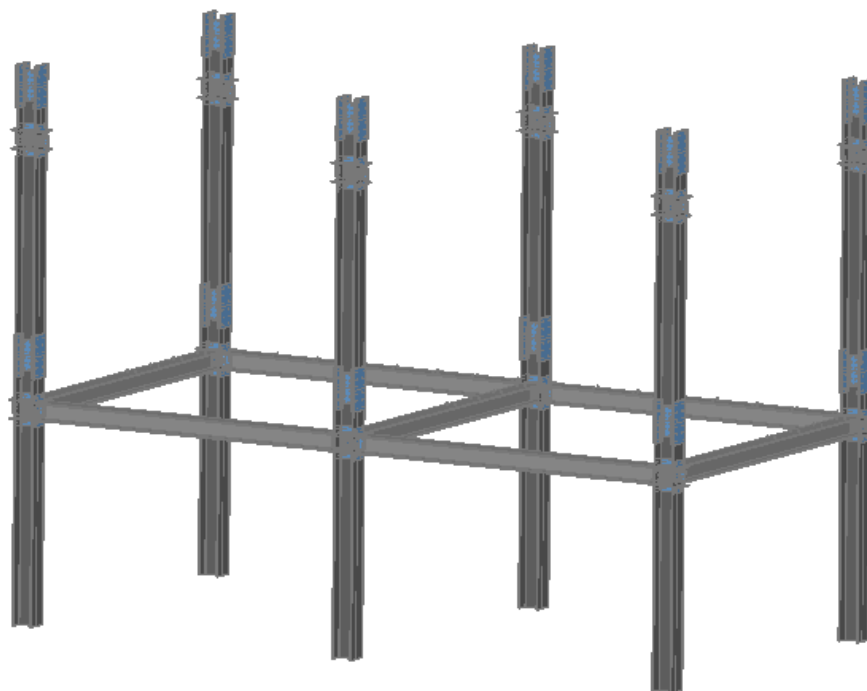


Sezione dopo la realizzazione delle finiture.

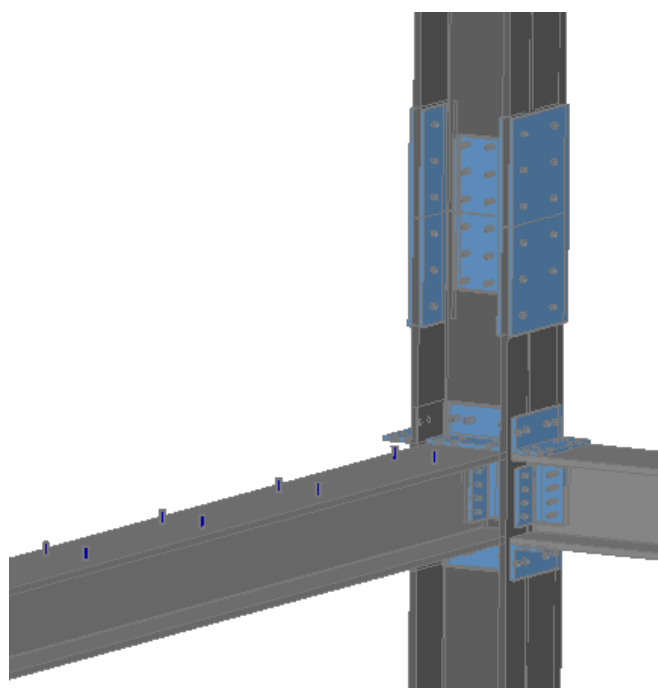
Si riporta di seguito una visualizzazione 3D delle fasi di montaggio di un modulo e della sua struttura portante:



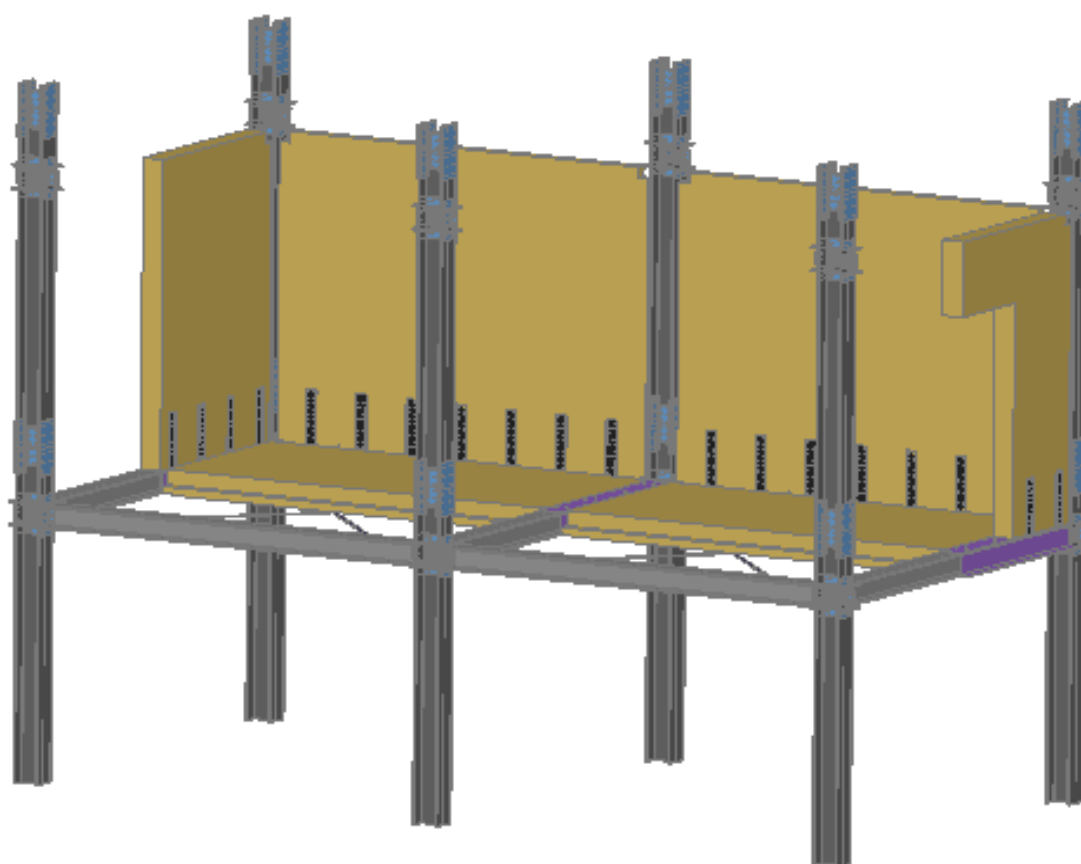
Montaggio dei pilastri.



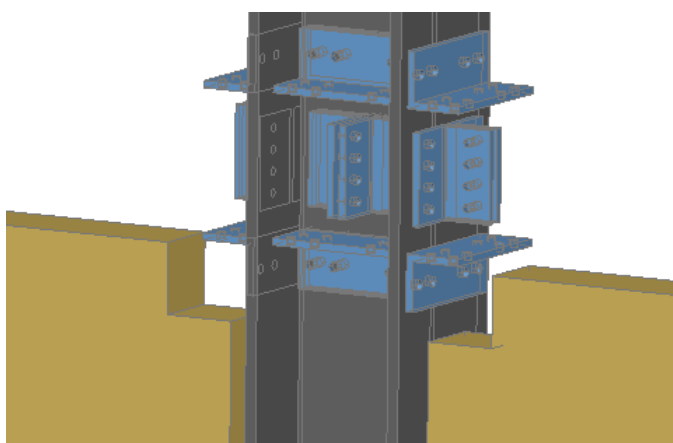
Montaggio delle travi con connettori già saldati.



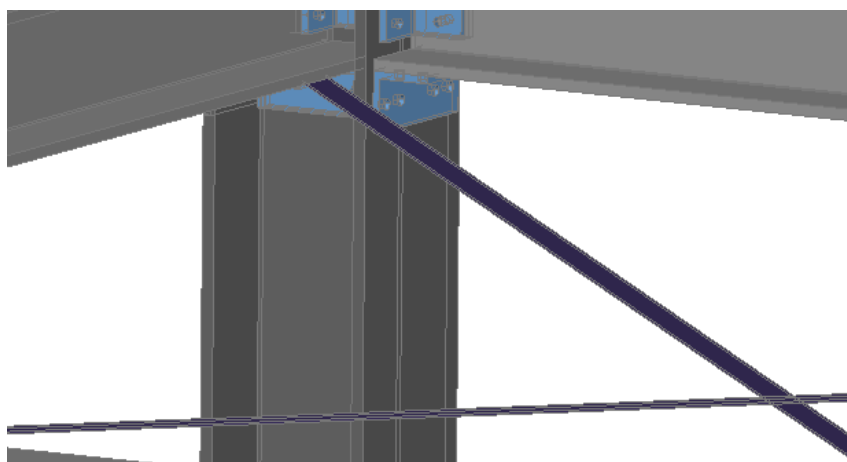
Dettaglio del nodo pilastro-pilastro; nodo trave-pilastro; connettori saldati sulle travi.



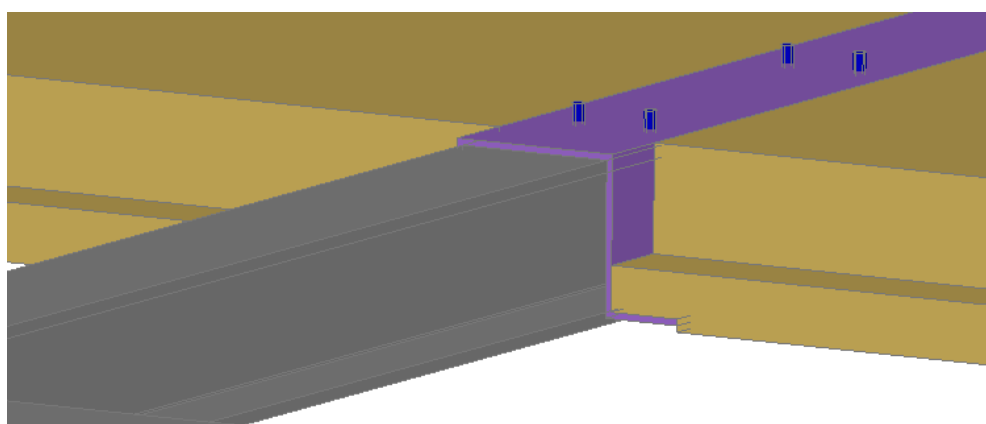
Inserimento del modulo sugli appositi connettori e montaggio delle bandelle.



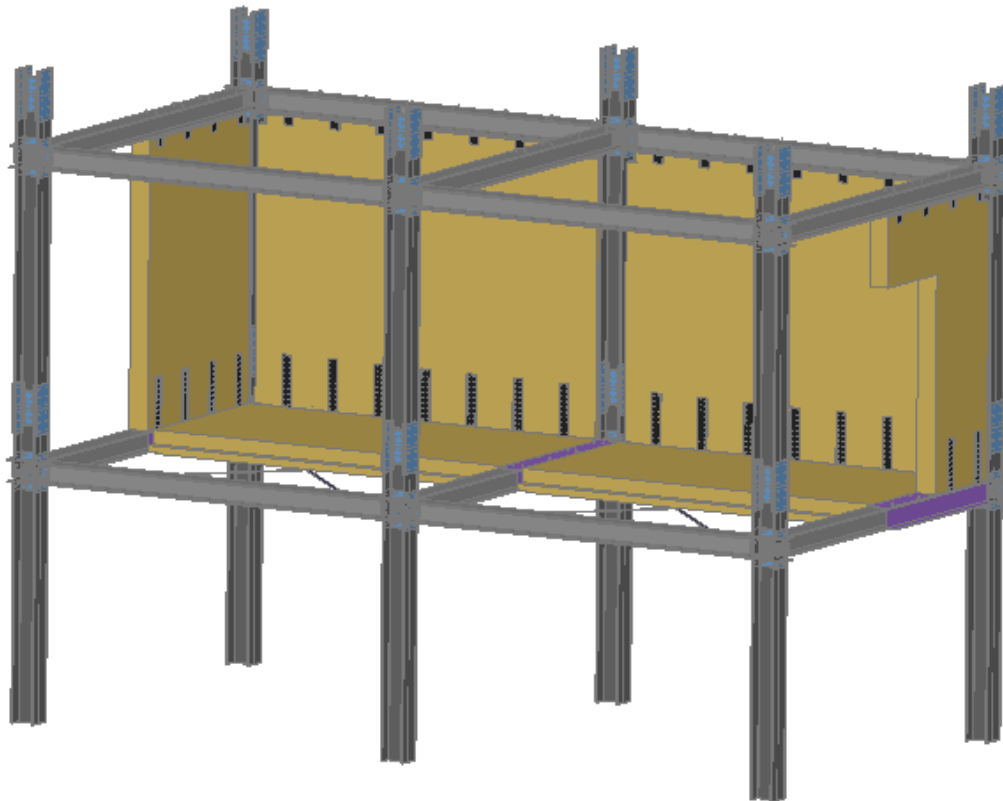
Dettaglio della tasca creata sulla parete per imbullonare la trave superiore.



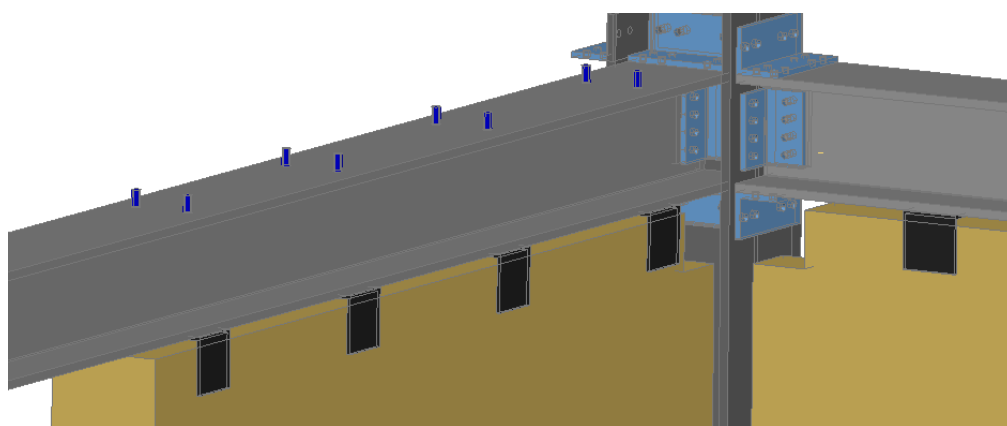
Dettaglio delle bandelle fissate sotto l'ala inferiore della trave e sul solaio ogni 20 cm.



Dettaglio della sagomatura del solaio in corrispondenza del giunto con il solaio del modulo adiacente.



Imbullonatura della trave superiore provvista di profili a L per sostegno tamponamenti.



Dettaglio dei profili a L, lunghi 10 cm e disposti con interasse di 50 cm.

4 Legno nelle costruzioni

4.1 Caratteristiche del legno

4.1.1 La struttura del legno

Gli alberi sono costituiti da tre organi fondamentali con differenti funzioni biologiche e meccaniche: le foglie, il tronco con i rami e le radici.



Funzione biologica	Funzione meccanica
FOGLIA Fotosintesi: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$	Resistenza al vento; (peso proprio)
RAMO Nell'alburno: trasporto di acqua e sostanze nutritive dalla radice alle foglie; nel libro: trasporto delle sostanze assimilate dalle foglie verso il basso	Esporre le foglie alla luce; sostegno
TRONCO Nell'alburno: trasporto di acqua e sostanze nutritive dalla radice alle foglie; nel libro: trasporto delle sostanze assimilate dalle foglie verso il basso; immagazzinamento delle sostanze assimilate come riserva	Sostegno; correzione della direzione
RADICE Assorbimento di acqua e sostanze nutritive dal terreno	Ancoraggio al suolo

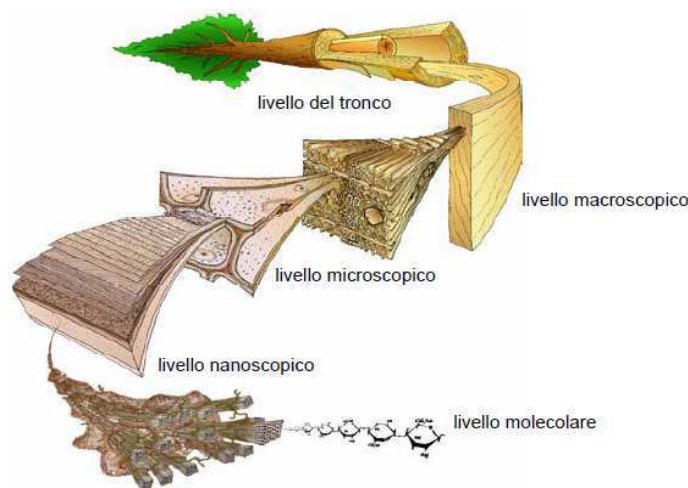
Principali elementi costitutivi di un albero e loro funzioni.

Il legno rappresenta il tessuto del tronco, dei rami e delle radici di un albero e degli arbusti. Esso viene prodotto da uno strato di forma anulare detto “cambio”. Da esso, durante il periodo vegetativo, si differenziano nella parte interna le cellule del legno (xilema, di cui l'alburno rappresenta la parte più esterna, che invecchiando si trasforma in durame) e nella parte esterna le cellule del libro (floema), che forma la parte più interna della corteccia, la cui crescita è decisamente inferiore a quella del legno.

Il legno del tronco assume le tre funzioni di sostegno, immagazzinamento e trasporto. L'albero può adattare molto bene le proprietà del legno alle esigenze legate a queste tre funzioni. La composizione chimica del legno rimane completamente invariata; le sue proprietà sono influenzate dal modo in cui le sostanze chimiche principali vengono assemblate a formare la struttura micro e macroscopica del legno stesso.

Fondamentalmente la struttura del legno può essere esaminata a cinque livelli:

- a livello della struttura del tronco;
- a livello della struttura macroscopica;
- a livello della struttura microscopica;
- a livello della struttura nanoscopica;
- a livello della struttura molecolare.



Rappresentazione schematica dei vari livelli a cui può essere esaminato il legno.

Il legno può essere univocamente definito e caratterizzato soltanto considerando le tre direzioni anatomiche fondamentali, in quanto il tessuto e le cellule, che ne determinano l'aspetto, sono differenti a seconda della sezione considerata. La figura seguente mostra le tre sezioni:

- trasversale (perpendicolare all'asse del tronco);
- radiale (piano della sezione parallelo all'asse del tronco e praticamente parallelo ai raggi midollari);
- tangenziale (piano della sezione parallelo all'asse del tronco e perpendicolare ai raggi midollari).



Sezioni anatomiche fondamentali.

4.1.2 Specie legnose per uso strutturale

Abete rosso, *Picea abies* Karst.

Caratteri macroscopici della struttura

“**Durame chiaro**”: albarno e durame da biancastri (giallognoli) a giallo paglierino-rossastri; con l'esposizione alla luce cambiamento in giallastro bruno scuro

L: anelli annuali ben distinti; legno tardivo giallo-rossastro, legno primaverile biancastro; transizione prevalentemente graduale tra zona primaverile e zona tardiva; tenero, canali resiniferi poco numerosi (caratteristica essenziale che lo differenzia dall'abete bianco!)

T: le zone tardive formano venature

R: struttura rigata

Durabilità e lavorazione:

- durame poco resistente agli attacchi fungini;
- albarno difficilmente impregnabile, durame da difficilmente a molto difficilmente impregnabile;
- buona essiccazione;
- buon incollaggio;
- abbastanza resistente agli acidi deboli ed agli alcali.



Impiego:

- edilizia (come legno da costruzione, strutture di copertura, costruzioni di legno incollato, ecc.) e come materiale per costruzioni ausiliarie (casseri e ponteggi);
- finiture di interni ed esterni (mobili, pannellature, porte, finestre, scale, profilati, ecc.);
- in grandi quantità come legno per la produzione industriale di cellulosa, pasta di legno e pannelli a base legno;
- il legno di abeti delle zone di montagna, con anelli di crescita molto sottili è impiegato per la produzione di strumenti musicali.

Abete bianco, *Abies alba* Mill.

Caratteri macroscopici della struttura:

“Durame chiaro”: alburno e durame di colore uguale biancastro-giallognolo (come nell’abete rosso, ma spesso con un luccichio da grigio a grigiovioletto)

L: anelli annuali ben distinti; legno tardivo giallo-roseo opaco; transizione graduale tra zona primaverile e zona tardiva; senza canali resiniferi e senza sacche di resina (caratteristica essenziale che lo differenzia dall’abete rosso!)

T: venature linguiformi

R: struttura rigata

Talvolta durame scuro e “umido” (u fino a 160%) con debole odore acidulo



Durabilità e lavorazione:

- durame poco resistente agli attacchi fungini;
- alburno moderatamente impregnabile, durame da moderatamente a difficilmente impregnabile;
- buona essiccazione (a causa del durame umido l'essiccazione insieme all'abete rosso può essere problematica, e/o richiedere una essiccazione successiva);
- buon incollaggio;
- abbastanza resistente agli acidi ed agli alcali.

Impiego:

Generalmente impiegato come l'abete rosso (spesso nessuna differenza tra abete bianco e rosso nell'utilizzo; in alcuni casi sono disponibili solo assortimenti misti); preferibile laddove non è gradita la presenza di resina dell'abete rosso;

- legno da costruzione per finiture di interni e per costruzioni;
- strumenti musicali (casse armoniche, canne d'organi);
- contenitori di sostanze chimiche;
- industria della carta e della cellulosa.

Pino silvestre, Pinus sylvestris L.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame differenziato obbligatoriamente: durame bruno-rossastro distinto nettamente dall'alburno giallo chiaro

L: anelli annuali ben distinti; transizione da graduale fino a piuttosto brusca tra zona primaverile e zona tardiva; canali resiniferi nettamente riconoscibili (più grandi che nell'abete rosso e nel larice)

T: venature decorative; i canali resiniferi appaiono come linee sottili da gialle a brune

R: fortemente rigato



Durabilità e lavorazione:

- durame da moderatamente a poco resistente agli attacchi fungini;
- alburno ben impregnabile, durame da difficilmente a molto difficilmente impregnabile
- buona essiccazione;
- buon incollaggio (in caso di non eccessiva presenza di resina).

Impiego:

- legno da costruzione per finiture di interni ed esterni, nell'industria mineraria, nelle costruzioni navali e di carrozze;

- legno di piallacci, legno compensato;
- mobili e ristrutturazione di interni (con tocco "rustico");
- piloni e traversine;
- Industria dei prodotti a base legno (soprattutto pannelli truciolari).

Larice (europeo), *Larix decidua* Mill.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame differenziato obbligatoriamente: di regola durame rossastro-bruno intenso, diventa molto scuro; albarno abbastanza sottile, da giallastro a bianco-rossastro

L: anelli annuali ben distinti;

transizione piuttosto netta tra zona primaverile e zona tardiva; nonostante l'elevata presenza di resina i canali resiniferi sono non particolarmente numerosi, molto piccoli e si trovano primariamente nella zona tardiva

T: rilevanti venature decorative

R: struttura ad evidenti rigature



Durabilità e lavorazione:

- durame da moderatamente a poco resistente agli attacchi fungini;
- albarno moderatamente impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile;
- buona essiccazione (in caso di legno più resinoso eventualmente più difficile);
- buon incollaggio.

Impiego:

- legno da costruzione per finiture di interni ed esterni o a contatto con il terreno;
- industria mineraria, imbarcazioni, costruzioni idrauliche e di ponti (p. es. pali infissi), sili e torri di raffreddamento;
- finestre e porte;
- scandole;
- piloni e traversine;

- mobili, rivestimenti interni ed esterni;
- botti, tini e contenitori particolari per soluzioni chimiche.

Douglasia strutturale, Pseudotsuga menziesii Franco

Caratteri macroscopici:

Durame differenziato obbligatoriamente: durame giallastro-bruno e rossastro-bruno tendente ad inscurirsi se esposto alla luce (molto simile al legno di larice!); albarno chiaro, giallastro e sottile

L: anelli annuali ben distinti da sottili a molto ampi; transizione tra zona

primaverile e zona tardiva distinta o non distinta; canali resiniferi distinti

T: con venature decorative

R: fortemente rigato



Durabilità e lavorazione:

- durame da moderatamente a poco resistente agli attacchi fungini;
- albarno da moderatamente a difficilmente impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile;
- facile da essiccare (evitare la fuoriuscita di resina!);
- buon incollaggio;
- abbastanza resistente agli acidi deboli ed agli alcali.

Impiego:

- legno da costruzione per finiture di interni ed esterni (balconi, portoni, finestre);
- costruzioni idrauliche, di ponti, navali, di carrozze, di imbarcazioni e di aeroplani;
- piallacci sfogliati per legno compensato;
- botti, serbatoi, sili.

Faggio, *Fagus sylvatica* L.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame chiaro: durame ed alburno normalmente ugualmente da biancorossastri a bruno-rossastri;

Eventualmente durame differenziato facoltativamente, in età avanzata, (“falso durame”): durame bruno-rosso, per lo più non chiaramente distinto o irregolarmente a stella

L: diffuso-poroso; anelli annuali ben distinti per zone povere di pori (→legno tardivo più scuro); vasi riconoscibili solo con una lente d’ingrandimento; grandi raggi midollari ben distinti e chiaramente visibili ad occhio nudo

T: grandi raggi midollari chiaramente visibili ad occhio nudo come trattini caratteristici, sottili, di colore bruno

R: grandi raggi midollari chiaramente visibili ad occhio nudo leggermente rigato



Durabilità e lavorazione:

- durame non resistente agli attacchi fungini;
- alburno e durame chiaro ben impregnabili, eventuale falso durame molto difficilmente impregnabile;
- essiccazione possibile senza problemi, richiede comunque particolare attenzione;
- buon incollaggio.

Impiego:

- piallacci sfogliati per legno compensato e stratificato, piallacci tranciati per mobili;
- mobili e finiture per interni (anche quale legno piegato);
- costruzione di aeroplani e di macchine, attrezzi, piccoli apparecchi e giocattoli di legno;
- traversine ferroviarie (a causa della modesta stabilità dimensionale non per gli scambi);

- costruzioni idrauliche;
- prodotti a base legno (soprattutto legno compensato e stratificato, ma anche pannelli truciolari e di fibre), cellulosa e carta;
- carbone.

Quercia; propriamente: Farnia, Quercus robur L. e Rovere, Quercus petraea Liebl

Caratteri macroscopici della struttura: (Farnia e Rovere non distinguibili con sicurezza a livello macroscopico e microscopico)

Durame differenziato obbligatoriamente: durame bruno-rossastro fresco, bruno chiaro asciutto in seguito tendente ad inscurirsi; albarno sottile e bianco-giallastro

L: poroso-zonato, perciò anelli annuali distinti; vasi della zona primaverile e

grandi raggi midollari chiaramente visibili ad occhio nudo

T: struttura a venature; evidenti venature da pori

R: grandi raggi vistosi rigature molto evidenti



Durabilità e lavorazione:

- durame resistente agli attacchi fungini;
- albarno ben impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile;
- moderatamente buona essiccazione; tende a fessurarsi, ad imbarcarsi ed a cambiare colore → necessaria essiccazione lenta ed a bassa temperatura;
- incollaggio per usi strutturali problematico;
- reazione degli acidi tanninici con il ferro, in caso di contatto con il legno di quercia “fresco” di metalli a base ferro (→ macchioline blu scuro);

Impiego:

- mobili e finiture per interni, soprattutto come piallacci tranciati;

- legno per costruzioni edili, sottostrutture e costruzioni idrauliche (p. es. fondazioni su pali di legno di quercia), traversine (scambi);
- costruzioni navali, di macchine e di aeroplani;
- botti.

Frassino, *Fraxinus excelsior* L.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame chiaro o legno intermedio:

alburno e durame, di regola, non sono distinti – alburno giallo chiaro, durame dello stesso colore, esposto alla luce tende leggermente ad inscurirsi;

eventuale durame differenziato facoltativamente, in età più adulta, (“**durame bruno**”): alburno da chiaro a bruno scuro, talvolta anche di color oliva (“frassino-oliva”)

L: poroso-zonato, perciò anelli annuali distinti;

i vasi nella zona primaverile e la parenchima longitudinale visibili ad occhio nudo, i vasi nella zona tardiva ed i raggi midollari visibili solo con una lente d’ingrandimento

T: con venature; evidenti venature da pori nella zona primaverile

R: rigato evidenti rigature nella zona primaverile raggi midollari riconoscibili anche senza una lente d’ingrandimento



Durabilità e lavorazione

- durame non resistente agli attacchi fungini;
- alburno e durame chiaro moderatamente impregnabili, durame facoltativo molto difficilmente impregnabile;
- buona essiccazione;
- buon incollaggio.

Impiego:

- mobili e finiture per interni (anche elementi di forma curva);

- attrezzature sportive (un tempo per produzione di sci), manici di utensili, scale di legno;
- tempo fa: costruzione di apparecchi, macchine, veicoli, vagoni, barche ed aeroplani;

Robinia, Robinia pseudoacacia L.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame differenziato obbligatoriamente: durame da giallo-verde a giallo bruno e oro-bruno scuro tendente ad inscurirsi; albarno sottile da giallo a bianco-verdastro

L: grazie alla porosità zonata, anelli annuali distinti e vasi nella zona primaverile visibili ad occhio nudo; raggi midollari e vasi nella zona tardiva riconoscibili solo con una lente d'ingrandimento

T: con venature; evidenti venature da pori

R: anelli annuali decisamente delimitati → evidente formazione di striature, canali porosi evidenti raggi midollari visibili



Durabilità e lavorazione:

- durame da resistente a molto resistente agli attacchi fungini;
- albarno ben impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile;
- essiccazione moderatamente buona, lenta e condotta con cautela, altrimenti tende a fessurarsi ed imbarcarsi;
- lavorabilità difficile ma soddisfacente;
- incollaggio moderatamente buono;
- impiego nell'industria mineraria.

Impiego:

- industria mineraria, costruzioni idrauliche e nel suolo, mulini, macchine agricole, veicoli, costruzioni navali e ferroviarie;
- mobili da giardino, palizzate, rivestimenti esterni, giochi e mobili da giardino, pali e piloni;

- botti e botticelle.

Castagno, *Castanea sativa* Mill.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame differenziato obbligatoriamente: durame da bruno pallido a bruno scuro; albarno stretto e da quasi bianco a bianco giallastro.

L: grazie alla porosità zonata, anelli annuali distinti e vasi nella zona primaverile visibili ad occhio nudo; raggi midollari e vasi nella zona tardiva riconoscibili solo con una lente d'ingrandimento;

T: evidenti venature da pori

R: struttura rigata



Durabilità e lavorazione:

- durame resistente agli attacchi fungini;
- albarno moderatamente impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile;
- essiccazione difficile e lenta; tendenza marcata al collasso cellulare; leggera tendenza ad imbarcarsi;
- incollaggio da soddisfacente a buono;
- in presenza di elevata umidità del legno possibile corrosione dei metalli e azzurramenti del legno.

Impiego:

- legno da costruzione per finiture interne ed esterne, costruzioni idrauliche e navali;
- legno da arredamento per mobili rustici e rivestimenti (spesso come piallaccio tranciato), parquet;
- in Francia come doghe per le botti.

4.1.3 Caratteristiche fisiche del legno

LEGNO, ACQUA E UMIDITÀ

Il legno è un materiale poroso-capillare. A seconda della massa volumica del legno, la percentuale dei pori è mediamente pari a 50-60%. Il legno ha quindi una grande superficie interna. Questo sistema costituito prevalentemente da cavità, come tutti i materiali porosi, assorbe vapore acqueo dall'aria circostante e può imbevversarsi, per capillarità, di acqua o di altri liquidi (ad es. soluzioni di sostanze protettive del legno, adesivi).

L'umidità del legno (detta anche tenore di umidità o contenuto di umidità) ne influenza praticamente tutte le caratteristiche fisiche, meccaniche e tecnologiche. La stabilità dimensionale assume un ruolo rilevante e può essere garantita se, in fase di lavorazione, il legno possiede un'umidità che manterrà anche nel successivo impiego. I parassitari del legno, animali e vegetali, necessitano, per la sopravvivenza di un determinato contenuto minimo di umidità; è quindi possibile ottenere una buona protezione del legno semplicemente mantenendo sufficientemente bassa la sua umidità.

GRANDEZZE CARATTERISTICHE DELL'UMIDITÀ DEL LEGNO

Il contenuto in acqua percentuale del legno (o umidità percentuale del legno) u è il rapporto tra la massa dell'acqua contenuta nel campione di legno di cui si vuole determinare l'umidità ($m_u - m_o$) e quella dello stesso campione allo stato anidro m_o :

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad [\%]$$

dove:

u umidità percentuale del legno;

m_u massa del legno allo stato umido;

m_o massa del legno allo stato anidro.

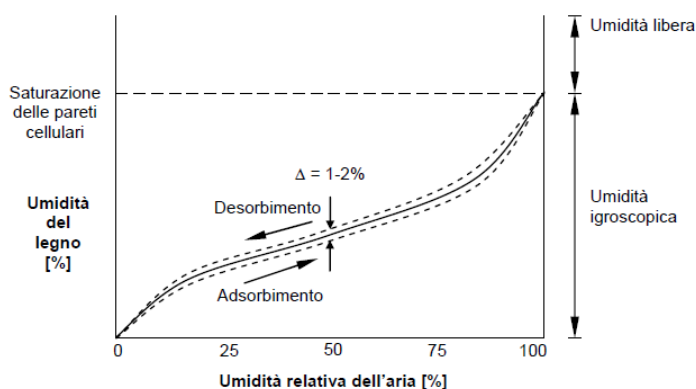
Secondo questa definizione l'umidità del legno u può superare il 100%, per esempio, l'umidità nell'alburno di legni di Conifere è $u \approx 120 \div 150\%$ o anche più.

SCAMBIO DI VAPORE ACQUEO

Essendo un materiale igroscopico, il legno stabilisce un equilibrio con l'ambiente circostante assorbendo (adsorbimento) o cedendo (desorbimento) vapore acqueo. Per le diverse situazioni climatiche, si considerano le umidità di equilibrio $u_{eq,ad}$ o $u_{eq,de}$ [%]. L'umidità di equilibrio nella situazione di adsorbimento è però diversa da quella relativa al desorbimento, ovvero vale la relazione $u_{eq,ad} \neq u_{eq,de}$. Le curve a due flessi di adsorbimento e di desorbimento del legno (curve u_{eq} a temperatura costante) mostrano un fenomeno di isteresi nello scambio di vapore acqueo.

L'umidità di saturazione (delle pareti cellulari) u_s [%] è quell'umidità del legno per la quale tutte le pareti cellulari (ossia l'intero sistema capillare all'interno di esse) sono completamente sature di acqua. Se l'umidità del legno si trova al di sopra del punto di saturazione ($u > u_s$), l'acqua si trova allo stato liquido nel lume delle cellule come cosiddetta "acqua libera" o "di imbibizione" (perché del tutto indipendente dalle pareti cellulari). Variazioni di umidità in questo intervallo influenzano pochissimo le caratteristiche fisico-meccaniche del legno. Per umidità del legno al di sotto del punto di saturazione ($u < u_s$), l'acqua viene adsorbita o desorbita solo dalle pareti cellulari come cosiddetta "acqua legata" o "di saturazione". In questo intervallo, l'acqua immagazzinata ha un'influenza decisiva sulle caratteristiche fisico-meccaniche del legno. L'umidità di saturazione dipende dalla specie legnosa e per la maggior parte di esse si trova nell'intervallo $24\% \leq u_s \leq 32\%$. In prima approssimazione si può considerare un valor medio $u_s \approx 28\%$.

L'umidità massima u_{max} (saturazione dell'acqua) del legno è quella per la quale tutte le pareti cellulari e tutti i lumi sono riempiti d'acqua e nel legno non è presente più aria.



Curve di adsorbimento e desorbimento d'acqua nel legno.

RITIRO E RIGONFIAMENTO DEL LEGNO

GRANDEZZE CARATTERISTICHE

Nel legno, l'adsorbimento o il desorbimento dell'acqua legata per un'umidità $u \leq u_s$ porta a delle variazioni di volume: in desorbimento si ha una diminuzione di volume o ritiro, in adsorbimento un aumento di volume o rigonfiamento.

Le grandezze caratteristiche per la valutazione del ritiro e del rigonfiamento del legno sono il valore del rigonfiamento α e quello del ritiro β . Il primo si riferisce allo stato anidro, il secondo a quello di rigonfiamento massimo. I due valori si differenziano quindi solo per la base di riferimento per le variazioni di lunghezza l_0 e l_w considerate. Per questo motivo risulta sempre $\alpha > \beta$. Essi possono essere convertiti l'uno nell'altro. Per la sua struttura anisotropa, il legno subisce variazioni di forma differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali tangenziale (indice t), radiale (indice r) e longitudinale (indice l). Da esse risultano i valori di ritiro e di rigonfiamento volumetrico (indice V).

Il **coefficiente di rigonfiamento lineare α** rappresenta la variazione di lunghezza del campione per un aumento di umidità da u_1 a u_2 (l_2-l_1) riferita alla lunghezza allo stato anidro ($u = 0\%$) (l_0):

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

dove:

l_0, l_1, l_2 lunghezze del campione di legno rispettivamente all'umidità u_0, u_1 e u_2 .

Un caso particolare del rigonfiamento lineare α è il **rigonfiamento lineare massimo α_{max}** risultante dal rigonfiamento del legno dallo stato anidro ($u = 0\%$) a quello fresco ($u > u_s$):

$$\alpha_{max} = \frac{l_w - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

dove:

l_w è la lunghezza del campione di legno ad un'umidità superiore a quella di saturazione ($u > u_s$).

Il **rigonfiamento volumetrico** α_v risulta dai valori del rigonfiamento lineare nelle tre direzioni fondamentali del legno:

$$\alpha_v = \frac{(100 + \alpha_t) \cdot (100 + \alpha_r) \cdot (100 + \alpha_l)}{10^4} - 100 \quad [\%]$$

in prima approssimazione: $\alpha_v \approx \alpha_t + \alpha_r + \alpha_l$ o meglio $\alpha_v \approx \alpha_t + \alpha_r$.

Il **ritiro lineare** β rappresenta la variazione di lunghezza del campione per una diminuzione di umidità da u_2 a u_1 (l_2-l_1) riferita alla lunghezza allo stato fresco ($u > u_s$) (l_w):

$$\beta = \frac{l_2 - l_1}{l_w} \cdot 100 \quad [\%]$$

Un caso particolare di ritiro lineare β è il **ritiro da essiccazione** β_N risultante dall'essiccazione del legno dallo stato fresco ($u > u_s$) a quello normale (20°C, 65% di umidità relativa dell'aria):

$$\beta_N = \frac{l_w - l_N}{l_w} \cdot 100 \quad [\%]$$

dove:

l_N lunghezza del campione di legno fresco conservato in condizioni normali (20°C, 65% di umidità relativa dell'aria).

Il **ritiro volumetrico** β_v risulta dai valori del ritiro lineare nelle tre direzioni fondamentali del legno:

$$\beta_v \approx \beta_t + \beta_r + \beta_l$$

Il **coefficiente di rigonfiamento** h è il rigonfiamento del legno per una variazione relativa di umidità dell'aria pari all'1% nell'intervallo di umidità dell'aria compreso tra $\varphi_s \approx 35\%$ e $\varphi_u \approx 85\%$, significativo per l'uso pratico del legno:

$$h = \frac{l_u - l_s}{l_0 \cdot (\varphi_u - \varphi_s)} \cdot 100 \quad [\%/ \%]$$

dove:

l_u lunghezza del campione di legno in ambiente umido (20°C ; $80\% \leq \varphi_u \leq 90\%$)

l_s lunghezza del campione di legno in ambiente secco (20°C ; $30\% \leq \varphi_s \leq 40\%$)

Il **rigonfiamento differenziale q** è il rigonfiamento del legno per una variazione di umidità dello stesso pari all'1% nell'intervallo di umidità dell'aria compreso tra $\varphi_s \approx 35\%$ e $\varphi_u \approx 85\%$, significativo per l'uso pratico del legno:

$$q = \frac{l_u - l_s}{l_0 \cdot (u_U - u_S)} \cdot 100 \quad [\%/ \%]$$

dove:

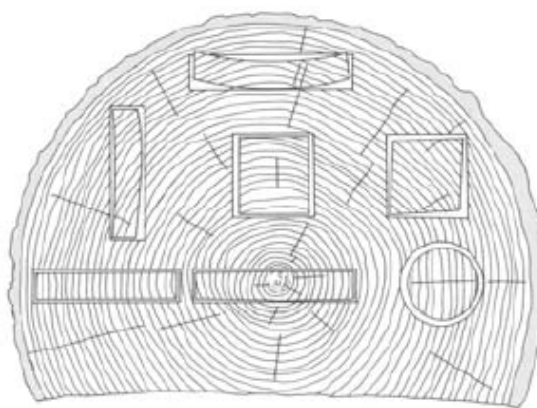
u_U umidità del legno in ambiente umido (20°C ; $80\% \leq \varphi_u \leq 90\%$)

u_S umidità del legno in ambiente secco (20°C ; $30\% \leq \varphi_s \leq 40\%$)

Anisotropia del rigonfiamento A_q

I coefficienti di ritiro e rigonfiamento sono differenti nelle tre direzioni fondamentali del legno. In prima approssimazione vale $\alpha_T \approx 1,66 \alpha_R$ e $\alpha_T \approx 23 \alpha_L$.

Nei segati, i cui bordi non sono paralleli alle direzioni anatomiche del legno, in seguito a variazioni di umidità, possono presentarsi deformazioni della sezione, imbarcamento e formazione di fessure.



Deformazioni del legno in seguito a fenomeni di ritiro nelle direzioni tangenziale e radiale.

Per quantificare le possibili deformazioni della sezione nell'uso pratico del legno si utilizza il rapporto tra il rigonfiamento differenziale in direzione tangenziale e quello in direzione radiale, indicato come anisotropia del rigonfiamento A_q :

$$A_q = \frac{q_T}{q_R}$$

Sebbene tra le specie legnose esistano notevoli differenze riguardo ai parametri di rigonfiamento, l'anisotropia del ritiro e quella del rigonfiamento sono pressoché costanti per tutte le specie.

RITIRO E RIGONFIAMENTO DELLE DIVERSE SPECIE LEGNOSE

La tabella seguente contiene i valori massimi del rigonfiamento delle più importanti specie legnose indigene con i relativi coefficienti di rigonfiamento ed i valori del rigonfiamento differenziale.

Mediamente nei legni di provenienza europea risulta:

- il valore massimo di rigonfiamento longitudinale $\alpha_{\max,L} \approx 0,4\%$;
- il valore massimo di rigonfiamento radiale $\alpha_{\max,R} \approx 4,3\%$;
- il valore massimo di rigonfiamento tangenziale $\alpha_{\max,T} \approx 8,3\%$.

Specie legnosa	Valore massimo del rigonfiamento lineare α_{\max} [%]			Coefficiente di rigonfiamento h [%/‰]		Rigonfiamento differenziale q [%/‰]	
	long	rad	tan	rad	tan	rad	tan
Abete rosso	0,2 ÷ 0,4	3,7	8,5	0,037	0,070	0,19	0,36
Abete bianco	0,2 ÷ 0,4	3,7	8,5	n. d.	n. d.	0,19	0,36
Pino	0,2 ÷ 0,4	4,2	8,3	0,035	0,068	0,19	0,36
Larice	0,1 ÷ 0,3	3,4	8,5	0,027	0,057	0,14	0,30
Douglasia	0,1 ÷ 0,3	5,0	8,0	0,025	0,046	0,15	0,27
Faggio	0,2 ÷ 0,6	6,2	13,4	0,032	0,065	0,20	0,41
Quercia	0,3 ÷ 0,6	4,6	10,9	0,033	0,063	0,18	0,34

Valori massimi del rigonfiamento, coefficiente di rigonfiamento e rigonfiamento differenziale di alcune specie legnose.

UMIDITÀ “NORMALI” DEI PRODOTTI DI LEGNO

Decisivi per la fabbricazione e lavorazione dei prodotti di legno sono le condizioni climatiche medie presenti nel successivo impiego. Il legno dovrebbe avere durante la lavorazione un'umidità pari all'umidità di equilibrio che si instaura nel materiale nel luogo di utilizzo, in dipendenza dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'aria.

Per le condizioni climatiche centroeuropee valgono, nel campo delle costruzioni, i seguenti valori orientativi:

- costruzioni prevalentemente asciutte: $\varphi \approx 60 \div 80\% \rightarrow u_{eq}$ fino al 16%
- costruzioni completamente asciutte: $\varphi \approx 40 \div 70\% \rightarrow u_{eq} \approx 8 \div 13\%$
- costruzioni riscaldate: $\varphi \approx 25 \div 70\% \rightarrow u_{eq} \approx 5 \div 10\%$

Il legno da costruzione dovrebbe, quindi, essere posto in opera, a seconda dei casi, ad un'umidità di $12 \div 18\%$. Per serramenti tale valore è pari a $12 \div 15\%$. Per mobili, porte interne e rivestimenti di pareti valgono umidità del legno di $8 \div 12\%$, in dipendenza del tipo di riscaldamento presente nei locali (condizioni di umidità dell'aria). Per parquet l'umidità del legno è pari a $8 \div 10\%$, laddove, anche in questo caso, bisogna considerare oscillazioni a seconda del tipo di riscaldamento. Prodotti a base legno per le rifiniture interne hanno un'umidità di equilibrio pari a circa $5 \div 8\%$.

DENSITÀ

GRANDEZZE CARATTERISTICHE

La densità ρ è data dal rapporto tra la massa m e il volume V :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

La **densità della sostanza legnosa** ρ_r è data dal rapporto tra la massa del legno anidro (completamente essiccato) m_0 ed il volume della sostanza legnosa (al netto dei pori di parete) $V_{sostanza\ legnosa}$:

$$\rho_r = \frac{m_0}{V_{sostanza\ legnosa}}$$

La densità della sostanza legnosa caratterizza la densità delle pareti cellulari esclusi i pori. Essa è pressoché la stessa in tutte le specie legnose (ca. 1.500 kg/mc) ed è perciò una costante del materiale legno.

Oltre alla sostanza legnosa, il legno contiene acqua ed aria. Perciò, a seconda dell'umidità del legno, si farà distinzione tra densità apparente del legno (detta comunemente anche massa volumica) e la densità anidra.

La **massa volumica** ρ_u è data dal rapporto tra la massa m_u ed il volume apparente (cioè vuoto per pieno) V_u del legno (comprensivo quindi del volume dei pori e dell'acqua in essi contenuta) ad una definita umidità u del legno. Poiché la massa volumica aumenta all'aumentare dell'umidità del legno, essa deve essere indicata, come indice, al momento della determinazione della massa volumica.

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}$$

dove:

ρ_u massa volumica all'umidità u del legno;

m_u massa del campione con umidità del legno u ;

V_u volume del campione con umidità del legno u .

La densità anidra ρ_0 è data dal rapporto tra la massa m_0 ed il volume V_0 del legno anidro ($u = 0\%$):

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

Poiché la densità anidra non è influenzata dal comportamento igroscopico, essa può essere considerata una costante del materiale per le singole specie legnose.

PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA MASSA VOLUMICA

Contrariamente alla densità della sola sostanza legnosa, la massa volumica presenta notevoli variazioni sia tra le varie specie legnose che all'interno di una specie stessa (a causa delle differenze dovute al luogo ed alle condizioni di crescita) ed anche in funzione della posizione nel tronco.

La massa volumica dipende soprattutto dai seguenti parametri.

- **Specie legnosa**

Il rapporto tra la superficie occupata dalla parete cellulare e dai pori varia notevolmente tra le singole specie legnose; la massa volumica dipende perciò dalla specie legnosa. Per motivi fisiologici, c'è un limite inferiore della massa volumica (volume occupato dalle pareti $\approx 6\%$) pari a circa 100 kg/m^3 (per la specie legnosa più "leggera" utilizzabile a livello industriale, il legno di balsa, vale $\rho_0 \approx 130 \text{ kg/m}^3$), ed uno superiore (volume occupato dalle pareti $\approx 93\%$) pari a circa $1200 \div 1400 \text{ kg/m}^3$.

	Densità anidra ρ_0 [kg/m ³]	Massa volumica ρ_{15} [kg/m ³]
Abete rosso	300 ÷ 430 ÷ 640	330 ÷ 470 ÷ 680
Abete bianco	320 ÷ 410 ÷ 710	350 ÷ 450 ÷ 750
Pino	300 ÷ 490 ÷ 860	330 ÷ 520 ÷ 890
Larice	400 ÷ 550 ÷ 820	440 ÷ 590 ÷ 850
Douglasia	320 ÷ 470 ÷ 730	350 ÷ 510 ÷ 730
Faggio	490 ÷ 680 ÷ 880	540 ÷ 720 ÷ 910
Quercia	390 ÷ 650 ÷ 930	430 ÷ 690 ÷ 960
Frassino	410 ÷ 650 ÷ 820	450 ÷ 690 ÷ 860
Robinia	540 ÷ 730 ÷ 870	580 ÷ 770 ÷ 900
Castagno	590	630

Densità anidra e massa volumica (per $u=15\%$) delle più importanti specie legnose appartenenti alle Conifere e alle Latifoglie.

- Ampiezza degli anelli di accrescimento e rapporto tra legno primaverile e tardivo

In virtù delle loro differenti funzioni e della loro struttura molto diversa risultante da esse, il legno primaverile (\rightarrow funzione conduttrice della linfa, $\rho_{0,LP} \approx 250 \div 350 \text{ kg/m}^3$) possiede una densità nettamente inferiore a quella del legno tardivo (\rightarrow funzione di sostegno, $\rho_{0,LT} \approx 850 \div 1000 \text{ kg/m}^3$).

Nelle **Conifere** si riscontra una tendenza alla diminuzione della massa volumica all'aumentare dell'ampiezza degli anelli. Il motivo di ciò risiede nell'aumento della quantità di legno primaverile connessa all'aumento dell'ampiezza degli anelli, mentre la quantità del legno tardivo in un anello di crescita rimane praticamente costante.

Nelle **Latifoglie** si fa distinzione tra legni poroso-zonati e legni poroso-diffusi. Nelle specie a legno poroso-zonato (quercia, frassino, robinia) si riscontra la tendenza all'aumento della massa volumica all'aumentare dell'ampiezza degli anelli a causa della crescente aliquota di legno tardivo (tessuti di sostegno), con la larghezza del legno primaverile che rimane praticamente costante. Nella maggioranza delle specie a legno poroso-diffuso (faggio, betulla) l'influenza è, al contrario, irregolare.

CARATTERISTICHE TERMICHE

CONDUTTIVITÀ TERMICA

Per valutare la capacità termica isolante di un elemento costruttivo risulta di particolare importanza la conduttività termica λ . Con essa si intende la quantità di calore che in

un'ora passa attraverso un cubo di 1 m di spigolo, quando tra due superfici laterali parallele esiste una differenza di temperatura, costante nel tempo, di 1°K. Si misura in W/(mK).

A causa della sua elevata percentuale di pori, il legno è un cattivo conduttore di calore. Il materiale legno è costituito da sostanza legnosa, acqua ed aria e quindi la sua conduttività termica è funzione di: $\lambda_{\text{Legno}} = f$ (massa volumica, umidità, struttura, temperatura).

Per legno con un contenuto di umidità di circa il 20%, la conduttività termica perpendicolarmente alla fibratura assume valori $\lambda_{\perp} = 0,10 \div 0,20$ W/(mK). Essa è quindi circa 15 volte più piccola che nel calcestruzzo armato e circa 10 volte in quello normale non armato.

DILATAZIONE TERMICA

La grandezza caratteristica è il coefficiente di dilatazione termica α_T . Esso rappresenta la variazione di lunghezza di un'asta lunga 1 m dovuta ad una differenza di temperatura di 1°K:

$$\alpha_T = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \quad \left[\frac{1}{K} \right]$$

dove:

Δl variazione di lunghezza;

l_0 lunghezza di partenza;

ΔT differenza di temperatura in K.

Allo stesso modo in cui riscaldando un'asta si giunge al suo allungamento, raffreddandola se ne produce l'accorciamento.

Con l'ausilio del coefficiente di dilatazione termica α_T , la variazione di lunghezza Δl_T di un'asta di lunghezza l per una variazione di temperatura ΔT è data da:

$$\Delta l_T = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot l$$

La dilatazione termica è poco rilevante in confronto ai fenomeni di ritiro e rigonfiamento del legno. Le variazioni di dimensioni dovute al ritiro o al rigonfiamento sono 10 volte maggiori di quello dovute alla dilatazione termica.

CARATTERISTICHE ELETTRICHE

RESISTENZA E CONDUCIBILITÀ ELETTRICHE

Le grandezze caratteristiche sono:

- resistenza elettrica R = resistenza che il legno oppone al passaggio di corrente elettrica;
- conducibilità elettrica G = capacità di un materiale a lasciarsi attraversare da corrente elettrica. È l'inverso della resistenza elettrica.

$$G = \frac{1}{R} \quad [\text{Siemens}]$$

La resistenza e la conducibilità elettriche del legno dipendono dai seguenti parametri.

- **Umidità**

Il legno allo stato anidro è un buon isolante. All'aumentare del contenuto di umidità, diminuisce la resistenza elettrica molto rapidamente tendendo, in condizioni di saturazione delle pareti cellulari, a raggiungere asintoticamente all'incirca il valore dell'acqua.

- **Temperatura**

All'aumentare della temperatura, la resistenza elettrica diminuisce notevolmente. Nei metodi di misurazione elettrica dell'umidità è necessario, quindi, un fattore correttivo dovuto alla temperatura.

- **Massa volumica, struttura del legno, specie legnosa**

A causa delle differenti masse volumiche e delle diverse sostanze contenute nel legno, l'appartenenza ad una determinata specie legnosa influenza fortemente la resistenza e la conducibilità elettriche del legno.

- **Direzione della fibratura**

La resistenza elettrica del legno perpendicolarmente alla fibratura è doppia di quella parallelamente ad essa.

CARATTERISTICHE DIELETTRICHE

Come grandezza caratteristica per le proprietà dielettriche si utilizza di regola la **costante dielettrica relativa** ϵ_{rel} . Essa indica di quanto aumenta la capacità di un

condensatore (costituito da due piastre piane immerse in aria ed a distanza d) interponendo un determinato dielettrico, quindi di quante volte la costante dielettrica del materiale è più grande di quella del vuoto ($\epsilon_{vuoto} = 1$):

$$\epsilon_{rel} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{vuoto}}$$

La costante dielettrica dell'acqua è pari all'incirca a 81, quella del legno anidro è $2 \div 3$.

La costante dielettrica del legno dipende dai seguenti parametri.

- Umidità

Poiché la costante dielettrica dell'acqua è molto più grande di quella del legno anidro, la costante dielettrica aumenta all'aumentare dell'umidità.

- Massa volumica, struttura del legno, specie legnosa

La costante dielettrica cresce linearmente all'aumentare della massa volumica. Nella misurazione capacitiva dell'umidità, bisogna considerare la specie legnosa e la relativa massa volumica.

- Orientamento della fibratura rispetto alle piastre del condensatore

La costante dielettrica nella direzione della fibratura è all'incirca $50 \div 60\%$ maggiore che perpendicolarmente ad essa.

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

Le caratteristiche acustiche del legno si riscontrano in diversi campi d'impiego, p. es. nelle costruzioni edili (acustica tecnica, isolamento fonico, sale concerto e simili), negli strumenti musicali e nelle prove non distruttive sui materiali. Il suono è una vibrazione meccanica prodotta da un mezzo elastico. In base alla frequenza si può fare una differenziazione tra infrasuoni (non percettibili dall'udito umano, frequenze < 16 Hz), suoni percettibili dall'udito (16 Hz \div 20 kHz) ed ultrasuoni (> 20 kHz).

VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEL SUONO

La velocità di propagazione del suono lungo la direzione della fibratura raggiunge valori di $4000 \div 6000$ m/s, perpendicolarmente ad essa di $400 \div 2000$ m/s.

FREQUENZA PROPRIA DI VIBRAZIONE

La frequenza propria di un materiale indotto a vibrare fornisce informazioni sulle sue costanti elastiche. Pertanto, la misurazione della frequenza propria viene sempre più spesso utilizzata per i controlli di qualità, secondo i quali vengono suscitate vibrazioni longitudinali, di flessione oppure di torsione, ricavando quindi dalla frequenza propria misurata le costanti elastiche.

A titolo di esempio, la determinazione della frequenza propria viene impiegata nella classificazione meccanica dei segati secondo la resistenza.

4.1.4 CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL LEGNO

DIFFERENZA TRA PROVE SUL MATERIALE (PROVINI DI LEGNO DI DIMENSIONI RIDOTTE) E PROVE SUGLI ELEMENTI STRUTTURALI (PROVINI DI DIMENSIONE STRUTTURALE)

Il legno è un materiale da costruzione “naturale” dalle grandi potenzialità. Perciò occorre tener conto della differenza tra i vari livelli di “struttura” del materiale e della loro influenza sul comportamento meccanico. La resistenza a trazione per le singole fibre di cellulosa è pari a circa 8000 N/mm², per il legno “privo di difetti” (detto anche legno “netto”) è di circa 100 N/mm² mentre per il legno in dimensione strutturale è di un ordine di grandezza più piccolo. Pertanto, in riferimento alle caratteristiche meccaniche delle fibre di cellulosa, solo una parte del potenziale di questo materiale può essere sfruttata.

Le sezioni dei provini di legno di dimensione ridotte hanno dimensioni fino a 20 mm x 20 mm. Nelle norme per le prove su campioni in dimensione strutturale, non sono stabilite dimensioni fisse degli stessi; i valori caratteristici si riferiscono, tuttavia, a larghezze o altezze di riferimento.

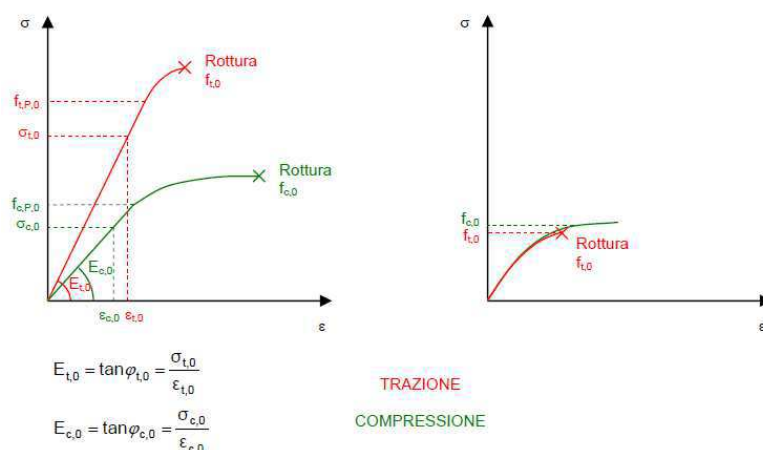
Valori nominali		Provini di legno netto	Provini in dimensione strutturale
Resistenza a flessione	[N/mm ²]	49 + 78 + 136	37
Resistenza a trazione parallelamente alla fibratura	[N/mm ²]	21 + 90 + 245	30
Resistenza a compressione parallelamente alla fibratura	[N/mm ²]	35 + 50 + 79	32

Confronto tra i tipici valori nominali dell'abete rosso, determinati su provini di legno netto ed in dimensione strutturale.

Dalla tabella precedente si può osservare chiaramente come i valori nominali del legno privo di difetti non possano rappresentare, con sicurezza ed affidabilità, il comportamento meccanico dei prodotti di legno per le costruzioni. Le cause delle differenze che si presentano nei provini in dimensione strutturale, caratterizzati da forte dispersione delle proprietà, risiedono nei cosiddetti difetti della costituzione anatomica dei tronchi (caratteristiche della crescita, p. es. i nodi) nonché nella lavorazione (p. es. la segazione del legno tondo). Le grandezze caratteristiche del legno come materiale da costruzione devono quindi essere determinate su provini in dimensione strutturale.

DIAGRAMMA COSTITUTIVO

Per rappresentare le caratteristiche meccaniche di un materiale, si fa uso del diagramma costitutivo. In esso sono visibili tutte le informazioni più importanti, legate alla resistenza ed alla rigidezza (modulo di elasticità E).



*Diagramma costitutivo del legno nella direzione della fibratura:
 sinistra: provino di legno di piccole dimensioni (privo di difetti);
 destra: provino in dimensione strutturale per le sollecitazioni di trazione (in rosso) e compressione (in verde).*

Come si può osservare nella figura precedente, nel legno di piccole dimensioni, nel campo delle sollecitazioni non elevate, esiste una dipendenza lineare tra tensioni e deformazioni sia a trazione che a compressione. Il legno si comporta in questo campo elasticamente, ossia allontanato il carico, le deformazioni da esso provocate si annullano. Di seguito è rappresentata la legge di Hook con i relativi termini.

$$\sigma = E \varepsilon$$

σ Tensione normale

E Modulo di elasticità longitudinale

ε Dilatazione lineare

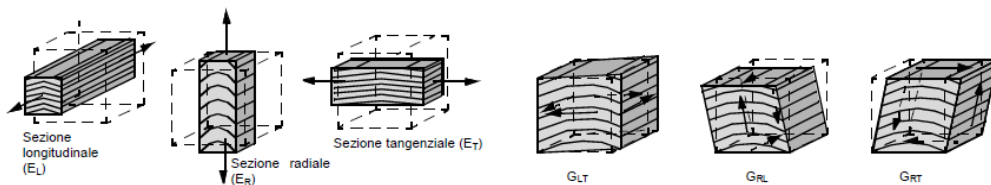
$$\tau = G \gamma$$

τ Tensione tangenziale

G Modulo di elasticità tangenziale

γ Scorrimento mutuo

Le costanti di proporzionalità sono indicate come modulo di elasticità longitudinale (modulo E o di Young) nel caso di una dilatazione lineare e modulo di elasticità tangenziale (modulo G o di taglio) in caso di uno scorrimento mutuo.



Dilatazioni lineari e scorrimenti mutui.

Dopo aver superato il limite di proporzionalità, bisogna distinguere tra un comportamento a trazione spiccatamente fragile (\rightarrow limitata deformabilità a rottura) ed uno a compressione di tipo duttile (\rightarrow le deformazioni crescono più delle tensioni). Nelle prove di trazione in direzione della fibratura su provini di legno di piccole dimensioni, eseguite come da normativa, il limite di proporzionalità $f_{t,P,0}$ e la tensione di rottura $f_{t,0}$ sono quasi coincidenti. Nelle prove di compressione in direzione della fibratura, il limite di proporzionalità si trova, di contro, decisamente più in basso rispetto alla rottura per compressione ed è all'incirca pari al 60-80% della stessa.

La resistenza a trazione e quella a compressione, per un provino di legno privo di difetti, si trovano nel rapporto di circa 2 : 1.

In virtù della sua struttura, il legno possiede caratteristiche meccaniche che assumono ordini di grandezza differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali: longitudinale (L); radiale (R); tangenziale (T).

Questa dipendenza delle grandezze caratteristiche dalla particolare direzione viene denominata “anisotropia”.

Negli impieghi strutturali, le caratteristiche meccaniche sono definite, di regola:

- **parallelamente alla fibratura:** la resistenza e la rigidezza parallelamente alla fibratura raggiungono i valori massimi → rappresenta la direzione portante principale;
- **perpendicolarmente alla fibratura:** la distinzione tra direzione radiale e tangenziale è difficilmente realizzabile ai fini del dimensionamento e non porterebbe a significativi vantaggi sia tecnici che economici nell'utilizzo pratico del legno. Per questo motivo, le caratteristiche in direzione radiale e tangenziale vengono riassunte per semplicità in “perpendicolarmente alla fibratura” (piano trasversale all'asse del tronco). Esse sono inferiori di quelle nella direzione della fibratura.

Generalmente nel legno tra le proprietà elastiche e le caratteristiche di resistenza sussiste una correlazione da molto buona (nel legno privo di difetti) a buona (nel legno in dimensione strutturale).

Le proprietà elastiche (modulo E), a differenza della resistenza, possono essere determinate in maniera non distruttiva. La correlazione tra il modulo di elasticità e la resistenza meccanica offre quindi la possibilità di “valutare” la resistenza del legno senza prove distruttive e rappresenta quindi un parametro essenziale per la classificazione del legno strutturale secondo la resistenza.

Le caratteristiche meccaniche del legno sono influenzate da una serie di parametri, quali:

- presenza di difetti nella costituzione anatomica (nodi, deviazione della fibratura, ecc.);
- direzione (longitudinale (parallela), trasversale (perpendicolare), inclinata) e tipo di sollecitazione (trazione, compressione, flessione, taglio, torsione);
- angolo tra la retta d'azione dei carichi e la direzione della fibratura;
- specie legnosa;
- massa volumica;
- umidità del legno;
- dimensioni del campione;
- velocità di applicazione dei carichi: statici o dinamici (di tipo impulsivo, alternanza);
- durata di azione dei carichi (resistenza a carichi di breve e lunga durata);
- configurazione di prova.

CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL LEGNO IN DIMENSIONE STRUTTURALE

Le grandezze caratteristiche di resistenza vengono determinate in base a prove di carico normalizzate; le tensioni sono invece calcolate secondo la teoria tecnica della trave.

Sollecitazione	Tensione	Resistenza	Indicazione
Trazione parallela alla fibratura	$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_n}$	$f_{t,0,d}$	Resistenza a trazione assiale
Compressione parallela alla fibratura	$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_n}$	$f_{c,0,d}$	Resistenza a compressione assiale
Flessione e taglio	$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_n}$	$f_{m,d}$	Resistenza a flessione
	$\tau_d = \frac{V_d \cdot S_n}{I_n \cdot b}$	$f_{v,d}$	Resistenza a taglio
Torsione	$\tau_{tor,d} = \frac{M_{T,d}}{W_{T,n}}$	$f_{v,d}$	Resistenza a torsione
Compressione perpendicolare alla fibratura (pressioni di contatto sugli appoggi)	$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_d}{A}$	$f_{c,90,d}$	Resistenza a compressione trasversale
Trazione perpendicolare alla fibratura (elementi di collegamento)	$\sigma_{t,90,d} = \frac{N_d}{A}$	$f_{t,90,d}$	Resistenza a trazione trasversale
Scorrimento da taglio			
- "rotolamento delle fibre"	$\tau_{r,d}$	$f_{r,k}$	Resistenza a taglio trasversale
- "scorrimento delle fibre"	$\tau_{a,d}$	$f_{v,k}$	Resistenza a taglio longitudinale

Grandezze caratteristiche di resistenza del legno in dimensione strutturale in relazione al tipo di sollecitazione.

Gli indici utilizzati nella precedente tabella sono:









0 Parallela alla fibratura

90 Perpendicolarmente alla fibratura

k Valore caratteristico (attenzione: non sempre il frattile al 5% !)

d Valore di calcolo ("Design")

Le proprietà di resistenza ed elasticità del legno in dimensione strutturale non sono tanto differenti da quelle dei provini di legno netto. Le proprietà di elasticità possono essere misurate direttamente. In questo modo si può garantire l'impiego di legno dalle proprietà elastiche definite.

		Direzione della sollecitazione	
		parallelamente alla fibratura	perpendicolarmente alla fibratura
Tipo di sollecitazione	Trazione	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamento elastico-lineare fino ad improvvisa rottura fragile (per lo più senza preavviso). - Rottura dovuta in prevalenza alla presenza di nodi (con deviazione locale della fibratura).  <p>Deviazione locale della fibratura</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Spiccata fragilità. - Resistenza influenzata soprattutto da fessurazioni, cipollatura, canali resiniferi. 
	Compressione	<ul style="list-style-type: none"> - Inizialmente comportamento elastico-lineare, con l'inizio del collasso delle fibre visco-plastico. Rottura preannunciata da "ripiegature" (sbandamento locale delle fibre di legno) → comportamento abbastanza duttile. - Nodi non direttamente causa di riduzione della resistenza, deviazioni della fibratura favoriscono la rottura.  <p>Ripiegatura</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamento duttile. - Schiacciamento e tranciamento delle fibre nelle zone di introduzione delle forze. - Sollecitazione del provino ortogonalmente alla direzione della forza: le tensioni di trazione trasversali portano al collasso. 
	Taglio	<p>Collasso di una trave soggetta a flessione di regola in zona tesa, raramente per il taglio (generalmente in zona appoggio).</p> <p>Pertanto determinazione della resistenza a taglio di una trave soggetta a flessione attraverso una specifica configurazione di carico.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comportamento elastico-lineare fino ad improvvisa rottura fragile. - Collasso in prossimità dell'asse neutro, spostamento reciproco di due parti della sezione.  <p>S10/2 B2</p>	<p>"Sollecitazione a taglio trasversale"</p> <p>→ Soprattutto per prodotti a base legno a più strati incollati ortogonalmente, a causa dei differenti valori di resistenza del legno in direzione parallela e perpendicolare alla fibratura.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inizialmente comportamento elastico-lineare, quindi comportamento plastico fino a rottura. - Tipico meccanismo di rottura: rotolamento degli strati longitudinali su quelli trasversali. 
	Flessione	<p>Resistenza a flessione (In zona tesa)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per sollecitazione di flessione, collasso, di regola, in zona tesa - Comportamento elastico-lineare fino ad improvvisa rottura fragile. - Il potenziale della zona compressa non viene completamente sfruttato in questa circostanza. - La rottura scaturisce dalla presenza di nodi (e relativa deviazione della fibratura) <p>Resistenza a flessione (In zona compressa)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Collasso in zona compressa possibile, di regola, solo con una zona tesa estremamente resistente - Inizialmente comportamento elastico-lineare, quindi visco-plastico (rottura dopo la formazione di "ripiegature" in zona compressa) → comportamento duttile  <p>Zona tesa</p>  <p>Ripiegatura</p> <p>Zona compressa</p>	

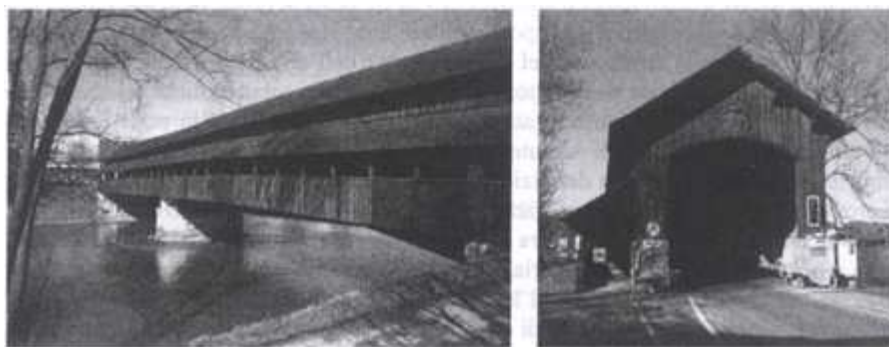
Caratteristiche meccaniche del legno in dimensione strutturale in relazione al tipo e alla direzione della sollecitazione.

4.2 Durabilità e protezione del legno

4.2.1 Introduzione

Ogni elemento facente parte di una struttura è esposto costantemente alle condizioni climatiche dell'ambiente in cui si trova, e deve quindi sopportare le azioni e gli effetti che ne derivano. Costruire con il legno impone da sempre un confronto serrato con questa problematica, per la naturale tendenza di tale materiale al degrado biologico naturale. Ai fini dello sfruttamento del legno per la produzione di oggetti e opere durature nel tempo, il degrado biologico deve essere quindi impedito o comunque ritardato almeno tanto a lungo, quanto lunga è la durata di vita richiesta al prodotto in questione.

A ogni elemento costruttivo corrisponde quindi una *richiesta di durabilità*, cioè una durata di vita dettata dalle aspettative del Committente e dell'utilizzatore della costruzione. La durabilità è determinata da molti fattori, in parte legati alle caratteristiche fisiche e biologiche dei materiali usati, in parte alle condizioni di servizio e in parte legati alle misure progettuali, protettive e di manutenzione messe in atto per impedire il degrado del materiale e delle strutture. Con la definizione generica di *misure di protezione* si intendono tutti i provvedimenti atti a mantenere, garantire o assicurare la durabilità della costruzione.



Ponte stradale costruito con criteri di durabilità (ca. 1850).

Sebbene il legno sia con certezza, tra i materiali da costruzione, quello più sensibile al degrado, è nel contempo anche il materiale che può assicurare una notevole durabilità

alla costruzione, come dimostrano i ponti di legno costruiti fino a cinque secoli fa, ancora perfettamente funzionali e in ottimo stato di conservazione. Il ponte stradale della figura precedente è stato costruito attorno al 1850 e la sua struttura principale è ancora quella originale. L'esempio dei ponti non è scelto a caso, in quanto questo tipo di costruzioni è particolarmente esposto agli agenti atmosferici e biologici.

Per ottenere risultati di questo genere occorre una corretta pianificazione ed esecuzione dell'opera ed è compito del Progettista concepirla in modo tale che possa soddisfare non soltanto alle esigenze estetiche, architettoniche, statiche, economiche e funzionali, ma anche a quelle legate alla durabilità e alla eventuale manutenzione efficiente ed efficace della costruzione stessa.

La considerazione del possibile degrado del legno è quindi un aspetto indispensabile della fase di pianificazione e progettazione di una costruzione. La descrizione del concetto di protezione del legno scelto e messo in opera può diventare una parte integrante del lavoro del Progettista, e condurre a quella che può essere definita come la *verifica della protezione del legno*. Allo stesso modo delle verifiche della resistenza strutturale e dell'attitudine al servizio, anche in questo caso si tratta semplicemente di dimostrare che le richieste nell'ambito della durabilità e in condizioni assegnate siano rispettate. Purtroppo, al momento, tale fase del progetto non viene richiesta, e risulta quindi piuttosto rara nell'applicazione pratica.

4.2.2 La durabilità del legno

Alla base della durabilità delle costruzioni in legno si trova la problematica del degrado del materiale legnoso, in conseguenza delle condizioni ambientali in cui viene inserito. Si illustra brevemente di seguito come la distruzione del legno sia causata da agenti biotici, mentre le azioni cicliche dovute alle intemperie causano un grave deterioramento del materiale.

GLI ATTACCHI BIOTICI

Lo sviluppo delle spore dei *funghi* sulle pareti cellulari, può avvenire non appena si verificano le condizioni climatiche adatte (ovvero adeguati valori di temperatura e di

umidità). La temperatura ideale per il processo vitale dei funghi varia tra i 18 e i 30 °C, mentre al di sotto dei 5 °C non vi è possibilità di sviluppo delle spore.

Da questi dati si può concludere che soltanto nella stagione invernale e in condizioni di temperatura particolarmente bassa, ci si trova al sicuro da un possibile degrado del legno per attacchi fungini. Risulta però ancora più interessante constatare che la condizione critica per lo sviluppo di questi organismi su un substrato legnoso, è la presenza di un contenuto di acqua nel legno superiore al 20%. Questa condizione si può raggiungere soltanto con un'umidità dell'aria superiore al 90%, oppure in presenza di ristagni di acqua allo stato liquido: evitando tali condizioni di servizio degli elementi strutturali, è possibile limitare l'umidità del legno sotto al 20%, eliminando praticamente tutti i rischi legati al degrado dovuto all'attacco fungino, ed assicurando alla costruzione una durabilità praticamente illimitata rispetto a questo fattore.

Per contro, negli elementi di legno completamente immersi nell'acqua, si raggiunge una umidità del materiale superiore al 70%, implicando una riduzione importante dell'attività vitale dei funghi xilofagi, in quanto viene loro a mancare il necessario apporto di ossigeno. Tali elementi si possono considerare protetti in modo efficace contro i funghi (mentre non lo sono per l'azione degli *organismi marini*, i quali sono in grado di distruggere in breve tempo quantità notevoli di legno, provocando gravissimi danni agli elementi strutturali).

Le condizioni climatiche in cui vengono normalmente utilizzati gli elementi lignei sono sempre favorevoli ad un attacco di insetti *xilofagi e/o lignicoli*, che può avvenire quindi anche nel legno stagionato ed in opera. In realtà il pericolo per le costruzioni risulta piuttosto remoto, data l'effettiva rarità degli attacchi che si registrano: questo è dovuto principalmente alla scarsità di porzioni di alborno negli elementi strutturali; alla presenza, solitamente per ragioni estetiche, di uno strato di verniciatura sulle superfici legnose; all'utilizzo, nelle costruzioni moderne, di pacchetti protettivi degli elementi strutturali principali. Inoltre, una volta che le larve si sono sviluppate, l'attacco può essere facilmente riconosciuto ad occhio nudo, consentendo di prevenire ulteriori aggravamenti dei danni provocati dall'insetto: una minima ispezione visiva regolare può quindi permettere di tenere sotto controllo il fenomeno e ridurre drasticamente la pericolosità. D'altra parte i danni più frequenti si riscontrano, non casualmente, nelle costruzioni di vecchia concezione, con parti lignee di grandi dimensioni (e quindi con

parti di alburno importanti), solitamente non trattati superficialmente, e posti in zone con clima caldo-umido come i sottotetti, quasi sempre scarsamente accessibili, o raramente visibili, da parte dell'uomo.

In definitiva l'attacco di insetti rappresenta un pericolo, per le costruzioni moderne correttamente progettate, di natura piuttosto teorica: da un lato si possono minimizzare le condizioni per un attacco da parte di insetti mediante accorgimenti costruttivi e trattamenti della superficie, dall'altro un controllo periodico può permettere, in caso di attacco, di prendere le contromisure necessarie. Un discorso a parte meritano le *termiti*, un insetto particolarmente aggressivo, in grado di distruggere rapidamente grandi porzioni di materiale: tuttavia tale insetto rappresenta un reale pericolo soltanto nelle aree caratterizzate da un clima umido e relativamente mite.

Per concludere, si può affermare che il pericolo principale di una distruzione biologica del legno proviene dai funghi xilofagi, che limitano la durabilità delle strutture lignee nella maggioranza dei casi.

La durabilità della struttura di legno è quindi sempre garantita, qualora non si verificano condizioni per cui l'umidità del legno possa salire al di sopra del 20%.

Il problema è reso più complesso dalla natura igroscopica del legno, che può consentire anche solo localmente, in presenza di acqua, le condizioni necessarie per uno sviluppo delle spore.

L'AZIONE DELLE INTEMPERIE

Analizzando un elemento strutturale di legno massiccio o di legno lamellare incollato, messo in opera in equilibrio igroscopico con l'ambiente, l'effetto delle intemperie può essere descritto in modo semplificato come un'azione ciclica ed irregolare di essiccazione e umidificazione del materiale. L'azione diretta dell'acqua piovana sulla superficie (in genere limitata a pochi millimetri di profondità) provoca un elevato gradiente di umidità e, a causa del rigonfiamento della zona superficiale, la presenza di coazioni che possono portare ad un collasso locale del materiale. Dopo la cessazione delle precipitazioni, in presenza di irraggiamento solare diretto, questa zona superficiale tende a riportarsi velocemente in equilibrio igroscopico con l'ambiente, rilasciando acqua all'esterno. Il fenomeno di essiccazione è accelerato dalla maggiore conducibilità

del legno umido e questo determina un ritiro maggiore della zona superficiale rispetto alle zone interne. Di conseguenza nella zona di superficie, già in presenza di collassi locali per compressione, si firmano facilmente delle fessurazioni, anche di piccole dimensioni, ma permanenti e irreversibili. Le fessurazioni superficiali rimangono presenti anche nel caso di ritorno di umidità del legno nelle condizioni iniziali, facilitando la penetrazione dell'acqua, con le precipitazioni successive, più in profondità nella sezione. Il fenomeno ciclico di degrado appena descritto prosegue quindi per strati sempre più profondi, aggravato da un aumento progressivo e inevitabile dell'umidità del legno, in quanto l'assorbimento di acqua è comunque più rapido rispetto all'essiccazione del materiale. Il contenuto di acqua può facilmente superare il limite del 20% all'interno della sezione, contribuendo all'instaurarsi di condizioni favorevoli allo sviluppo di funghi. A tale fenomeno sono sottoposti tutti gli elementi di grandi dimensioni, direttamente esposti alle intemperie, e la cui sezione è così grande da non permettere il ritorno dell'umidità al di sotto del valore critico di umidità del 20%: di conseguenza, in maniera particolarmente pericolosa, il materiale può degradarsi dall'interno senza presentare necessariamente sintomi esterni.

Con riferimento al problema della protezione e della durabilità rispetto alle azioni delle intemperie, è possibile definire 3 gruppi di elementi della costruzione.

- Del primo gruppo fanno parte gli *elementi della struttura portante*, in genere di dimensioni ragguardevoli, non sostituibili o di difficile sostituzione, e indispensabili per la sicurezza e la funzionalità della struttura: considerate le dimensioni della sezione può verificarsi, in caso di esposizione diretta alle intemperie, il fenomeno di marcimento del materiale a partire dagli strati più interni. Poiché per questi elementi il cedimento o il degrado determina direttamente la messa fuori servizio della costruzione, essi devono essere protetti con misure adeguate, in modo da assicurare una durata di vita sufficiente.
- Del secondo gruppo fanno parte gli *elementi sottili*, con uno spessore inferiore a 20 mm, quindi non soggetti al fenomeno sopra descritto, in quanto la loro essiccazione avviene in modo sufficientemente rapido, non appena le condizioni climatiche dell'ambiente circostante lo permettono. Il degrado biologico, in questi casi, si sviluppa in modo più o meno uniforme e visibile sulla sezione, o comunque cominciando dall'esterno. Si tratta in genere di elementi non

strutturali, ma comunque direttamente responsabili della durabilità della costruzione, in quanto formano spesso gli elementi di protezione costruttiva e assicurano quindi la durabilità degli elementi strutturali portanti del primo gruppo. Questi elementi sono, solitamente, direttamente accessibili e sostituibili, e la loro durata di vita, prevista o effettiva, non determina necessariamente anche la durata di vita della costruzione.

- Del terzo gruppo fanno parte gli *elementi di sezione ridotta* delle costruzioni, protetti secondo il principio dell'impermeabilizzazione dell'elemento, in modo che l'acqua che entra in contatto con le superficie non possa essere direttamente assorbita dal legno. Trattasi, ad esempio, degli elementi degli infissi esterni (come i telai delle finestre) e di altri elementi simili, dove, grazie alle piccole dimensioni delle sezioni, misure di protezione di tale tipo possono essere applicate con successo.

4.2.3 Le azioni del degrado

Con riferimento ai problemi legati alla durabilità e alla protezione del legno, si parla di *azione* per le cause che determinano l'apporto di acqua o di vapore acqueo all'elemento di legno, di *effetto* per descrivere l'aumento di umidità de legno, e di *rischio* in relazione alle possibilità di degrado biologico del materiale.

In questo paragrafo ci si limita alla descrizione delle azioni, ovvero di quei fenomeni che possono provocare un aumento di umidità del legno e creare quindi un rischio di degrado biologico dello stesso.

AZIONI LEGATE DIRETTAMENTE ALL'ACQUA

Il materiale legnoso tende naturalmente a porsi in equilibrio igroscopico con l'ambiente in cui si trova: ciò significa che a determinate condizioni di temperatura e di umidità relativa dell'aria, il contenuto di acqua all'interno del materiale è univocamente determinato. Per poter mantenere tale contenuto al di sotto del 20%, è necessario che l'umidità relativa dell'aria circostante non superi il 90%: si tratta di un'indicazione

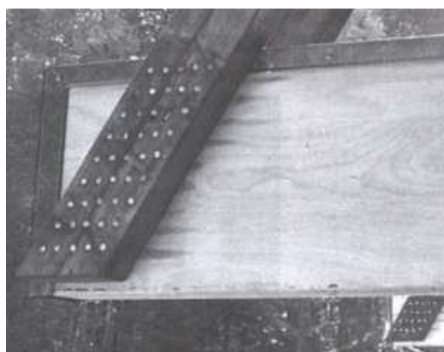
molto approssimativa, e valida soltanto per condizioni di temperatura ordinarie (18-25 °C), ma costituisce comunque un utile riferimento pratico. Inoltre questa condizione di umidità relativa dell'aria non dev'essere mantenuta a lungo, in modo da non permettere l'assorbimento di quantità sufficiente di acqua. Situazioni del genere sono naturalmente presenti in condizioni atmosferiche estreme, come per esempio durante temporali estivi, con piogge intense e temperature piuttosto elevate (che sono però di regola di breve durata). Si tratta delle condizioni climatiche tipiche di alcune zone tropicali ma si possono instaurare anche in una cantina (in questo caso ciò non dipende direttamente dalle condizioni atmosferiche, ma piuttosto dalle condizioni ambientali).

Ogni elemento di legno posto all'aperto ed in assenza di accorgimenti protettivi può essere direttamente esposto all'*azione diretta delle intemperie*, con le conseguenze già illustrate nel precedente paragrafo. Un'azione più o meno intensa può derivare da un diverso grado di esposizione dell'elemento, o del sito dove è posta la costruzione. L'azione delle intemperie può avvenire sia in maniera *indiretta*, come capita quando l'acqua piovana è trasportata fino alla superficie del legno dal vento o in altro modo. Il caso più semplice è rappresentato dagli elementi strutturali protetti tramite speciali elementi di protezione che richiedono sempre la presenza di una zona di aria tale da garantire una adeguata ventilazione.

Indipendentemente dal grado di protezione o di esposizione alle intemperie, sulle superfici orizzontali di ogni elemento l'acqua non ha nessuna possibilità di defluire e quindi ristagna, favorendo l'assorbimento da parte del legno. La superficie degli elementi di legno presenta inoltre spesso irregolarità o piccole fessure: un deflusso sicuro dell'acqua è quindi possibile soltanto in presenza di una *inclinazione adeguata della superficie*.

In modo simile al ristagno dell'acqua sulle superfici orizzontali, i dettagli costruttivi possono creare delle zone in cui l'acqua può restare intrappolata e ristagnare, creando un rischio potenziale di aumento di umidità del legno che, pur localizzato, può risultare particolarmente pericoloso, in quanto l'acqua accumulata rimane a lungo e può così essere assorbita anche molto lentamente dal legno.

Queste *sacche d'acqua* possono formarsi nelle zone di non perfetto contatto tra differenti elementi di legno o, peggio, tra elementi di legno e metallo tipicamente presenti nelle giunzioni lignee.



Superficie di contatto fra due elementi strutturali: malgrado l'inclinazione della diagonale, l'elemento orizzontale evidenzia macchie dovute all'assorbimento di acqua proveniente dalla superficie.

La capacità del legno di assorbire acqua per *fenomeni di capillarità* viene favorita nel caso di *contatto diretto* con altri materiali igroscopici o comunque contenenti acqua, come nel caso di elementi poggianti direttamente sulle fondazioni in cemento armato, oppure nel caso di contatto diretto con il terreno e la vegetazione, con un rischio particolarmente importante per il legno a causa dei microorganismi presenti. In tutti questi casi l'umidità del legno può aumentare fino oltre il valore critico, per gli attacchi biotici, del 20%.



Assorbimento di acqua causato dal contatto con un altro materiale contenente acqua; contatto con il terreno causato da distanza insufficiente o da fondazione diretta.

Nei *locali degli edifici abitati* possono instaurarsi condizioni di umidità anche molto elevata. In particolar modo nelle cucine, nei bagni e nelle lavanderie, la mancanza di una adeguata aerazione può creare condizioni di rischio per gli elementi di legno della costruzione. Le azioni legate ai *fenomeni di condensazione* possono presentarsi in diversi casi:

- all'interno di elementi di pacchetti costruttivi, quando gli strati che li compongono non rispettano alcuni parametri tecnici per una efficace diffusione

- del vapore (per esempio adeguata areazione o permeabilità del materiale) e dove in zone in cui la pressione di vapore supera la pressione di saturazione dell'aria;
- sulla superficie di elementi costruttivi in caso di condizioni climatiche particolarmente severe, che favoriscono la condensazione del vapore contenuto nell'aria; un differente aspetto del fenomeno si manifesta in caso di temperature molto basse, con la formazione sulla superficie di uno strato di ghiaccio, che si trasforma in quantità di acqua a volte anche importanti non appena la temperatura sale al di sopra di 0°C;
 - all'interno di locali non ventilati, in caso di apporto notevole di umidità (i panni stesi ad asciugare son un tipico esempio nell'ambiente domestico).

L'*accumularsi di neve* in prossimità degli elementi della struttura induce molteplici effetti tra cui l'impedimento della ventilazione delle superfici di legno da essa coperte. La temperatura particolarmente bassa della neve riduce però i rischi di attacco fungino, che non vanno comunque sottovalutati. La neve si trasforma in acqua, non appena la temperatura risale, e ciò può causare infiltrazioni di acqua in parti della costruzione che, altrimenti, potrebbero essere considerate come sufficientemente protette.

AZIONI LEGATE AD ALTRE SOSTANZE

Il legno è generalmente poco sensibile ad un buon numero di sostanze chimiche che, per altri materiali, possono invece rappresentare un rischio importante. Non si deve invece sottovalutare l'effetto di queste condizioni di esposizione sulle connessioni e sui connettori metallici. In alcuni casi particolari, la presenza di acqua nel legno in quantità sufficiente favorisce il fenomeno di corrosione dei metalli e ciò, a sua volta, favorisce il degrado del legno. Si tratta di fenomeni che possono essere facilmente evitati quando si impedisce l'instaurarsi di condizioni di umidità elevata nel legno: una valida soluzione è costituita dall'utilizzo di elementi metallici di acciaio inossidabile.

CLASSI DI RISCHIO E TIPOLOGIA DI SITUAZIONI

La definizione di classi di rischio proviene dalla normativa europea EN 335 (parti 1,2 e 3) "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno", che definisce 5 classi di rischio per gli elementi lignei, in funzione delle condizioni di umidità del legno.

- Classe di rischio 1: ambiente riparato, protetto dagli agenti atmosferici (umidità del legno sempre < 20%). Le condizioni garantiscono contro il rischio di attacco fungino, è possibile l'attacco da parte di insetti.
- Classe di rischio 2: ambiente riparato ma con elevata umidità dell'aria (umidità del legno sempre > 20%). Può essere presente l'attacco fungino, è possibile l'attacco da parte di insetti.
- Classe di rischio 3: elementi lignei anche esposti (è frequente un'umidità del legno > 20%). Il materiale è esposto all'attacco fungino, è possibile l'attacco da parte di insetti.
- Classe di rischio 4: elementi lignei esposti, anche a contatto diretto con terreno o con acqua dolce. Il materiale è permanentemente esposto all'attacco fungino, è possibile l'attacco da parte di insetti (termiti).
- Classe di rischio 5: elementi permanentemente a contatto diretto con acqua salata. È possibile l'attacco di organismi invertebrati marini, soprattutto in acque calde. Attacco da parte di insetti per le parti non immerse.

Tipo di connettore	Classe di servizio ^b		
	1	2	3
Chiodi e viti con $d \leq 4$ mm	-	Fe/Zn 12c ^a	Fe/Zn 25c ^a
Bulloni, perni, chiodi con $d > 4$ mm	-	-	Fe/Zn 25c ^a
Cambre	Fe/Zn 12c ^a	Fe/Zn 12c ^a	Acciaio inossidabile
Piastre punzonate di acciaio fino a 3 mm di spessore	Fe/Zn 12c ^a	Fe/Zn 12c ^a	Acciaio inossidabile
Piatti di acciaio da 3 a 5 mm di spessore	-	Fe/Zn 12c ^a	Fe/Zn 25c ^a
Piatti di acciaio con più di 5 mm di spessore	-	-	Fe/Zn 25c ^a

^a Se si utilizza zincatura a caldo, Fe/Zn 12c deve essere sostituito da Z275 e Fe/Zn 25c da Z350, in accordo con EN 10147.

^b Per condizioni particolarmente aggressive, occorre tenere in considerazione la possibilità di utilizzare trattamenti zincati più pesanti oppure acciaio inossidabile.

Prescrizioni minime per la protezione contro la corrosione dei connettori (secondo ISO 2081).

L'appartenenza di un elemento strutturale a una di queste classi dipende dall'effetto delle azioni sopra descritte e dalle corrispondenti condizioni di umidità del legno.

Gli elementi in classe 1 possono essere definiti come *completamente protetti*, in quanto non soggetti a nessun rischio di degrado da parte di attacchi fungini. In tale situazione

nessuna delle azioni del degrado, sopra illustrate, consente un apporto in acqua in quantità sufficiente a superare il limite del 20%. Questa situazione corrisponde, in pratica, ad elementi situati all'interno di costruzioni riscaldate (umidità del legno sempre al di sotto del 12-14%) e ad elementi situati all'interno o all'esterno di costruzioni, in condizioni climatiche esterne, ma comunque non direttamente esposti alle azioni elencate sopra.

Gli elementi in classe 2 e 3 risultano parzialmente o completamente esposti alle azioni elencate sopra, e quindi risultano soggetti al pericolo di attacco da parte di funghi xilofagi.

Si nota che la tipologia "protetto" non implica una posizione all'interno di un edificio, ma soltanto l'eliminazione di tutte le azioni o di tutti i rischi di umidità del legno troppo elevata; la tipologia "protetto" può essere comunque suddivisa in due ulteriori condizioni ("interno" ed "esterno"), al fine di determinare i parametri di calcolo e di definire le eventuali misure di protezione del legno;

4.2.4 Le misure di protezione

La verifica della durabilità impone che l'azione del degrado sia minore della resistenza al degrado stesso della costruzione e dei materiali di cui è composta. Per influenzare la durabilità si può quindi intervenire su entrambe le componenti, cioè riducendo le azioni e/o aumentando la resistenza agli attacchi biologici in genere e, in particolare, a quelli fungini. La riduzione delle azioni avviene tramite provvedimenti costruttivi, quali un'adeguata concezione della costruzione, o con l'aggiunta di appositi elementi aventi esclusiva funzione di protezione del legno. L'aumento della resistenza al degrado può avvenire tramite l'utilizzo di specie legnose più resistenti, sfruttandone quindi la resistenza naturale, o tramite il trattamento del legno, di superficie o per impregnazione.

IL LEGNO "RESISTENTE"

La resistenza naturale agli agenti biologici varia in modo importante fra le diverse specie legnose. La normativa Europea permette di classificare le diverse specie legnose

nelle classi dette “classi di resistenza” in ordine decrescente di durabilità da 1 a 5 (1: molto durabile; 2: durabile; 3: moderatamente durabile; 4: poco durabile; 5: non durabile).

Le specie legnose possono essere classificate dal punto di vista della durabilità, come indicato nella seguente tabella, questa classificazione si riferisce agli elementi di tipo segato o massiccio, privi dell'alburno (che presenta sempre una durabilità minore rispetto al durame). Inoltre si tratta di una classificazione qualitativa, non potendosi dare indicazioni più precise sulla durabilità effettiva di un elemento di legno, essendo ampiamente variabili sia le condizioni di esposizione alle azioni, sia le caratteristiche stesse di durabilità anche all'interno della specie legnosa.

Specie legnosa	Classe di resistenza	Uso nella costruzione	Aspettativa di vita * (anni)
Abete rosso, Abete bianco, Pino	4	molto frequente	da 5 a 15
Larice, Douglasia	3-4	molto frequente	da 15 a 25
Faggio, Frassino	5	raro, in fase di sviluppo	da 0 a 5
Quercia	2	carpenteria classica	da 35 a 50
Castagno	1-2	localmente frequente	oltre i 50 fino a 100
Robinia	1-2	raro	oltre i 50 fino a 100

* per elementi in opera senza alcuna protezione dalle intemperie

Classi di resistenza ed “aspettativa di vita” di alcune specie legnose.

Il legno di abete rosso appartiene, secondo la precedente tabella, alla classe di resistenza 4 (poco durabile); tale posizione non deve allarmare il progettista, in quanto è possibile compensare questo aspetto sfavorevole con una corretta progettazione della durabilità, in accordo con le indicazioni riportate nel seguito.

Occorre ricordare che la durabilità naturale del legno non ha praticamente alcuna influenza su altri fenomeni, fisici e biologici, legate all'esposizioni delle azioni descritte in precedenza. Tutte le specie legnose sono soggette, ad esempio, ad un cambiamento di colore della superficie, dovuto all'irraggiamento solare; la maggiore resistenza non impedisce l'assorbimento di acqua da parte del legno, con tutti i fenomeni di ritiro, rigonfiamento, deformazioni e fessurazioni ad esso collegati.

Si può a questo punto procedere con la distinzione tra elementi lignei strutturalmente non essenziali e quelli portanti di una costruzione.

Tra gli elementi non portanti sono compresi tutti gli elementi che non hanno dimensioni particolarmente elevate e che possono essere direttamente esposti alle azioni delle intemperie, senza che per questo presentino un'umidità costantemente elevata. Si tratta prevalentemente di elementi secondari, quali, per esempio, le balaustre o i sostegni per le installazioni, oppure degli elementi costruttivi di protezione che non necessariamente devono avere la durata di vita della struttura portante e che possono essere concepiti in modo tale da essere sostituiti periodicamente. L'uso di specie più resistenti permette in questo caso di aumentare gli intervalli fra una sostituzione e l'altra, quindi di ridurre le spese di manutenzione dell'opera. In questi casi è abbastanza normale ricorrere al legno di larice o di douglasia, che non presenta nessuna difficoltà di lavorazione supplementare rispetto all'abete rosso, ma ha una resistenza decisamente migliore. L'uso di legno di quercia si dimostra pure soluzione valida, essendo la lavorazione più impegnativa ed il costo del materiale più elevato compensati da una durabilità ancora maggiore che, in certi casi, può raggiungere la durata di vita della costruzione stessa.

Gli elementi portanti di legno di una costruzione hanno generalmente dimensioni della sezione piuttosto elevati e, quindi, se esposti direttamente alle intemperie, possono avere un contenuto d'acqua superiore al 20% per brevi periodi, o addirittura in permanenza. Per tali elementi l'utilizzo di specie legnose con resistenza più elevata può essere consigliabile e raccomandabile in alcune circostanze. Tuttavia è bene tenere presente che una costruzione, in cui gli elementi portanti sono direttamente esposti alle intemperie, è comunque destinata ad una vita limitata.

AUMENTO DELLA RESISTENZA TRAMITE TRATTAMENTI APPOSITI

La resistenza del legno può essere migliorata tramite l'applicazione di preservanti chimici, che con il loro effetto biocida riducono l'azione dei microrganismi dannosi. Tuttavia l'uso di trattamenti chimici è messa in discussione per ragioni ambientali e di nocività dei prodotti.

Si possono suddividere i possibili tipi di trattamento del legno nelle seguenti categorie principali:

- trattamenti di superficie, applicati cioè sulla superficie del legno e con un effetto di azione in profondità molto limitato;

- impregnazione del legno, cioè l'applicazione di preservanti anche all'interno della struttura del legno.

Trattamento superficiale

Per trattamento di superficie si intende l'applicazione di uno o più strati di sostanza protettiva sulla superficie del legno. Applicate ad elementi della struttura portante, queste sostanze hanno anche un effetto secondario di rendere il legno meno invitante agli insetti. Non offrono però una protezione efficace e duratura del materiale, in quanto non impediscono lo scambio d'acqua con l'ambiente circostante, e non impediscono nemmeno la formazione di fessure, che espongono il legno all'umidità e agli organismi patogeni dell'ambiente. Si tratta quindi di una protezione complementare, molto importante durante le fasi di trasporto e montaggio, quando un contatto accidentale con l'acqua può essere escluso, ma non di una misura atta ad aumentare la resistenza del materiale. L'idea di un trattamento superficiale, al fine di rendere l'elemento legno più o meno impermeabile e di impedire quindi l'aumento di umidità del legno oltre il limite critico del 20% anche in condizioni di azioni sfavorevoli, è priva di importanza pratica per gli elementi strutturali. Le variazioni di temperatura e di clima cui sono sottoposti gli elementi provocano infatti comunque una variazione delle condizioni di umidità del materiale, con conseguenti fenomeni di ritiro, rigonfiamento, fessurazione, che non possono essere impediti da alcun trattamento superficiale. Ne risulta quindi una superficie di protezione non più integra, con ulteriori conseguenze negative in quanto l'acqua penetra nel legno attraverso le fessure e fatica ad essere ceduta all'ambiente circostante a causa dello strato di protezione stesso.

Trattamento per impregnazione

Tramite il trattamento per impregnazione si introducono nel legno sostanze preservanti, che ne aumentano la resistenza biologica. Anche in questo caso si deve tener conto di differenze importanti fra le specie legnose, che possono essere più o meno facilmente impregnabili: nella seguente tabella, è sintetizzata la classificazione delle specie più comunemente usate nelle costruzioni, secondo la normativa europea. La classe di impregnabilità 1 indica una facile impregnabilità, mentre la classe 4 indica una impregnabilità molto difficile.

Specie legnosa	Impregnabilità	Uso nella costruzione
Abete rosso, Pino silvestre	3-4	molto frequente
Abete bianco	2-3	possibile senza limiti
Larice, Duglasia	4	possibile senza limiti
Faggio	1	raro, in fase di sviluppo
Frassino	2	raro
Quercia	4	carpenteria classica
Castagno	4	localmente frequente
Robinia	4	raro

Classi di impregnabilità di alcune specie legnose usate nella costruzione (EN 350).

Dalla tabella risulta evidente che le specie di conifere comunemente usate nelle costruzioni sono, al di fuori dell'abete bianco, tutt'altro che facilmente impregnabili. In genere ci si dovrà accontentare di un effetto piuttosto superficiale anche per le procedure di impregnazione più complesse.

Le sostanze usate per l'impregnazione si suddividono principalmente in preservanti veicolo acquoso e preservanti in veicolo oleoso.

Nella maggior parte dei casi, i preservanti usati per l'impregnazione sono soluzioni di sali in acqua. Essi assicurano alle parti in legno impregnate una buona protezione e sono adatti anche all'uso esterno, a causa della loro bassa dilavabilità. Si tratta di sali composti di cromo, rame, bromo, arsenico, ammoniaca, zinco e altre componenti.

I prodotti in veicolo oleoso o a base di petrolio si usano in applicazioni esterne come traversine, pali per energia e comunicazioni e installazioni portuali. Creosoto e pentaclorofenolo sono gli unici prodotti che si mostrano davvero efficaci a contatto con il suolo e gli unici in veicolo oleoso che forniscono protezione contro i funghi e insetti xilofagi, anche termiti.

L'impregnazione del legno, in entrambi i trattamenti, avviene secondo procedimenti diversi, che necessitano di impianti speciali e devono tener conto del fatto che le sostanze usate sono per lo più tossiche.

Con l'impregnazione del legno si ottiene un trattamento preventivo sicuramente efficace, che però non permette, almeno nel caso di conifere comunemente usate nella costruzione, di ottenere una durabilità illimitata degli elementi trattati.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati e implementati, in procedimenti di lavorazione industriale, i cosiddetti trattamenti termici del legno. Il principio di questi trattamenti si basa sui cambiamenti, a livello di struttura chimica, di alcune componenti della sostanza

legnosa in presenza di temperature elevate, che permette di aumentare la durabilità del materiale anche in modo notevole. Questo trattamento avviene, per esempio, in autoclavi nelle quali gli elementi di legno si trovano immersi in sostanze oleose, per una durata variabile ed a temperature diverse che, comunque, superano i 120°C.

E' indubbio che questo tipo di trattamento permetta di aumentare la resistenza biologica del legno. E' però altrettanto vero che questi trattamenti modificano anche le caratteristiche meccaniche del legno, aumentandone la fragilità e riducendone resistenza e rigidità. Le modifiche fisiche, meccaniche, biologiche e chimiche dipendono direttamente dalla temperatura raggiunta durante il trattamento.

L'uso di questo trattamento per gli elementi strutturali è al momento comunque sconsigliabile, in quanto la riduzione delle caratteristiche meccaniche è poco quantificabile sulla base delle attuali conoscenze. Più interessante la possibilità di ricorrere a questo trattamento per elementi non strutturali, evitando di ricorrere a misure protettive di tipo chimico.

In generale è bene ricordare che il solo fatto che il legno abbia subito un trattamento termico non è garanzia di durabilità particolarmente elevata; si impone, quindi, un'attenta considerazione sul trattamento da eseguire, in relazione alla specie legnosa considerata e alla relativa efficacia.

LA PROTEZIONE COSTRUTTIVA DEL LEGNO STRUTTURALE

La protezione del legno ha come scopo principale la riduzione delle azioni già sopra descritte. Inoltre i provvedimenti costruttivi di protezione devono permettere una rapida essiccazione del legno in caso di aumento accidentale della sua umidità. In caso di protezione cosiddetta completa, i provvedimenti di protezione costruttiva hanno due compiti essenziali:

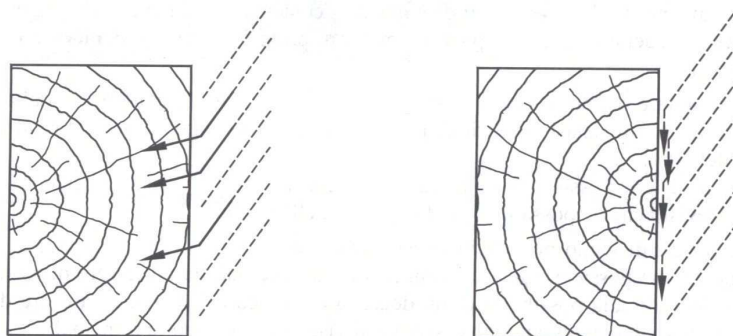
1. eliminare o ridurre tutte le azioni possibili, in modo da evitare, fin dalla fase di progetto, qualsiasi condizione per cui l'umidità del legno possa salire al di sopra del 20%;
2. permettere l'essiccazione rapida del legno in caso di evento accidentale o non previsto che ne possa favorire l'aumento dell'umidità.

Gli elementi di legno in questo modo non saranno mai soggetti a condizioni climatiche che ne possano limitare la durata della vita, che può quindi essere descritta come illimitata riguardo alla possibilità di degrado biologico del legno. Le misure di protezione costruttiva del legno possono essere suddivise in due categorie principali:

1. gli accorgimenti costruttivi, basati sull'applicazione di alcune regole essenziali nella concezione costruttiva della costruzione e dei dettagli, in modo da rendere gli eventuali danni di minore entità possibile e in modo da ritardare il più a lungo possibile il degrado, qualora si verificassero condizioni tali da renderlo possibile (provvedimenti che riducono, ad esempio, il ristagno dell'acqua a contatto con il legno);
2. le misure di protezione costruttiva, basate sull'eliminazione delle azioni che possono portare ad un degrado biologico del legno.

GLI ACCORGIMENTI COSTRUTTIVI

Il tipo di taglio e l'orientazione degli anelli di accrescimento in un segato determinano la particolare forma che assume la sezione deformata in seguito a stagionatura.

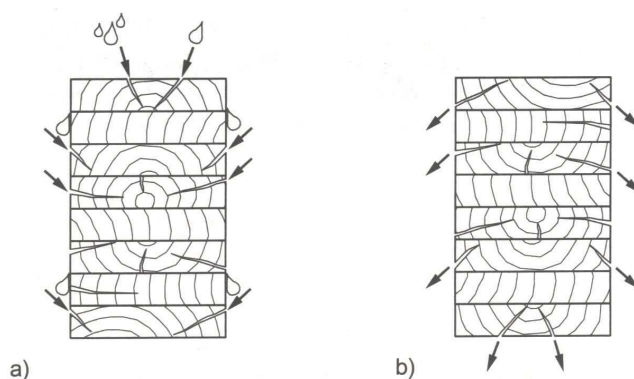


L'orientazione della superficie fessurata può favorire l'assorbimento d'acqua o ritardarlo.

Poiché il tipo di intaglio non può essere direttamente imposto o direttamente predeterminato dal progettista, in generale si può affermare che l'apertura di fessure in seguito ad essiccamento è da considerarsi come inevitabile per ogni elemento di legno massiccio. Tali fessure offrono, in presenza di acqua o di elevata umidità, un aumento del rischio di degrado. L'apertura delle fessure, nelle tavole tangenziali, avviene di

solito sulla faccia esterna del segato, cioè quella più eccentrica rispetto alla posizione originale del midollo. E' quindi possibile ridurre il rischio di penetrazione dell'acqua nella sezione, orientando verso la direzione più esposta la superficie interna (ovvero quella verso il midollo) che presenta un minor rischio di fessurazione.

Anche nel caso di sezioni di legno lamellare incollato l'orientazione delle lamelle assume un'importanza fondamentale non solo per la riduzione del rischio di penetrazione dell'acqua, ma anche per possibili inconvenienti di ordine estetico e strutturale conseguenti al ritiro del materiale. Infatti, le sezioni sono solitamente composte da lamelle con anelli orientati nello stesso modo, così da ridurre al minimo le sollecitazioni della superficie incollata dovute alla tendenza dell'imbarcamento delle lamelle in caso di variazioni dell'umidità, ad eccezione delle lamelle esterne, in cui gli anelli sono orientati in direzioni opposte per avere sempre esposte le facce interne della tavola. Tale accorgimento tuttavia non deve esimere il progettista dall'individuare dei sistemi di protezione anche delle superfici laterali della trave. Infatti anche la semplice orientazione in opera del medesimo elemento strutturale in legno lamellare incollato può favorire e sfavorire notevolmente l'assorbimento di acqua eventualmente presente sulla superficie della trave.



Effetto dell'orientazione di una trave in legno lamellare sulla possibilità di assorbimento di acqua.

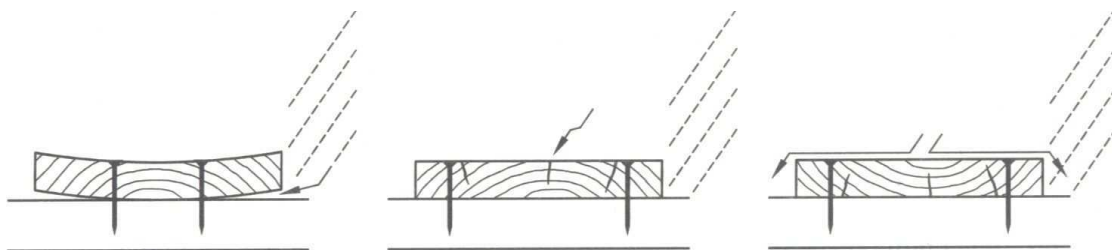
Dato che l'assorbimento dell'acqua da parte del legno avviene in modo piuttosto lento, spesso il solo fatto che l'acqua non ristagni su una superficie orizzontale permette di ridurre notevolmente il rischio di degrado. Si possono quindi individuare accorgimenti costruttivi molto semplici basati sia su un'orientazione appropriata delle tavole, sia sulla

realizzazione di inclinazioni anche leggere delle superfici orizzontali, che evitino il ristagno dell'acqua.



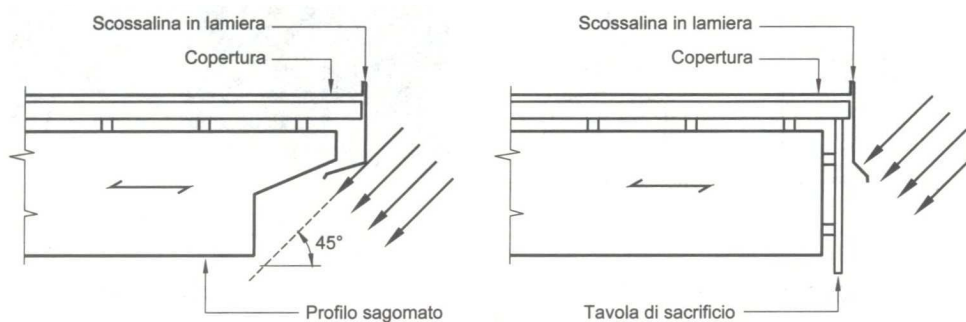
Ristagno o deflusso dell'acqua provocati dalla deformazione delle sezioni di una tavola, con problemi aggravati dalla posizione delle fessure.

L'orientazione della sezione può avere conseguenze anche più importanti nel caso in cui, oltre alle deformazioni e alle fessurazioni della tavola, vi sia un'errata disposizione dei connettori .



Modalità costruttive che possono favorire o sfavorire la penetrazione dell'acqua, o il deflusso rapido della stessa.

I fenomeni di assorbimento e di essiccazione sono più rapidi nella direzione parallela alla fibratura rispetto a quella trasversale. Per tali ragioni un rischio maggiore di apertura di fessure si registra nelle testate delle travi, che si rivelano particolarmente vulnerabili in caso di esposizione alle intemperie o ad altre sorgenti di umidità. Per evitare che un degrado prematuro inizi in questa zona e si diffonda rapidamente a tutta la trave, occorre ridurre il più possibile in tali zone il rischio di assorbimento dell'acqua. L'accorgimento più semplice è la riduzione della superficie esposta della testata della trave al minimo per esempio con una forma adeguata delle estremità della trave stessa oppure con elementi di protezione.



Riduzione del rischio di assorbimento di acqua nella zona di estremità di una trave mediante lavorazioni della testata e/o sistemi di protezione.

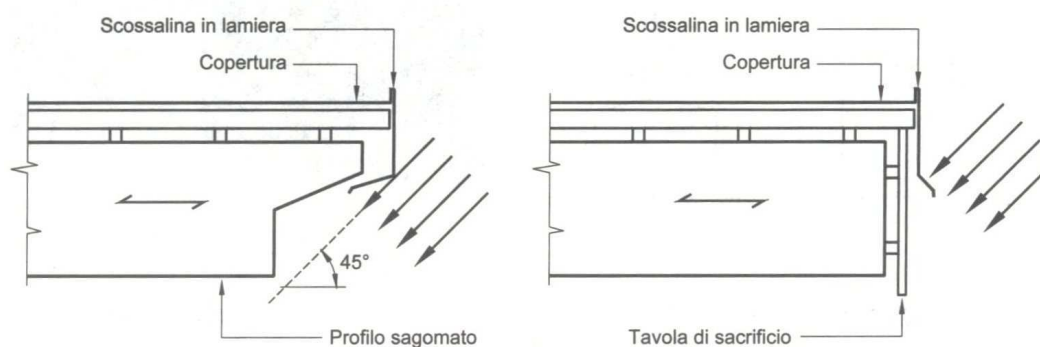
L'acqua può essere anche assorbita o trattenuta per capillarità sulle superfici delle zone di contatto, che possono così intrappolarla al loro interno. La prima regola da rispettare, al riguardo, è quella di evitare il contatto fra il legno e una parte umida. Nel caso di appoggi di travi e pilastri su muratura o su calcestruzzo, per evitare il contatto diretto fra il legno e questi ultimi, si utilizzeranno quindi elementi intermedi.

Anche nel caso di connessioni fra diversi elementi lignei è possibile ridurre il rischio di ristagno dell'acqua, per esempio introducendo appositi distanziatori.

In linea di principio, gli elementi di copertura non devono essere a contatto con l'elemento da proteggere. Tramite la superficie del legno avviene infatti lo scambio di vapore con l'ambiente circostante. In caso di superfici non ventilate a sufficienza, e quindi di condizioni climatiche locali a rischio, la probabilità di condensazione è molto elevata. L'uso di elementi di protezione formati da lamiere metalliche può peggiorare la situazione, in quanto nell'aria già molto umida dell'intercapedine fra superficie del legno e lamiera, in caso di soleggiamento diretto, si instaura anche una temperatura elevata.

L'impiego di connettori comporta, quasi sempre, la presenza di fori o intagli, che permettono la penetrazione di acqua all'interno dell'elemento. Anche in questo caso è necessario adottare oculati accorgimenti costruttivi. I connettori devono essere posizionati, di preferenza, in una zona non direttamente esposta alle intemperie, in modo che i fori e gli intagli necessari non possano favorire la penetrazione dell'acqua. Le connessioni più complesse, ad esempio con spinotti, devono essere concepite in modo che l'acqua, che si annida nei fori e negli intagli, possa sempre defluire in modo

rapido ed efficace. Gli intagli devono essere sempre possibilmente aperti verso il basso e le parti metalliche non devono impedire il deflusso dell'acqua dalle superfici di legno. I connettori provvisti di testa o di dadi, combinati con rondelle di diametro in genere piuttosto grande, sono spesso fonte di problemi. Oltre a frenare il deflusso normale dell'acqua sulle superfici verticali, impediscono anche il rigonfiamento trasversale del legno. Le tensioni di compressione che localmente ne derivano provocano facilmente una fessurazione elevata in caso di successivo essiccamento, ricreando le condizioni per la penetrazione dell'acqua. Mediante semplici intagli è possibile ovviare a questo problema, come illustrato nella seguente figura, oppure introducendo guarnizioni elastiche fra il metallo e il legno.



Problema posto dalle viti e possibile soluzione.

MISURE DI TIPO COSTRUTTIVO

Le misure di protezione costruttiva sono esplicite scelte progettuali adottate dal progettista con l'obiettivo di ridurre le azioni al fine di renderle innocue, ad esempio mantenendo l'umidità del legno al di sotto del 20%. Il superamento di questo valore è accettabile soltanto per un tempo limitato, tale da non permettere l'inizio del degrado del legno. Per ottenere una simile situazione occorre che:

1. non sia possibile nessun contatto diretto o indiretto con l'acqua, e nessun irraggiamento solare diretto, per l'elemento protetto: in questo modo le cause di rischio del degrado sono eliminate, la sola possibilità di assorbire acqua da parte del legno è data dalla presenza di umidità relativa elevata nell'ambiente;

2. la possibilità di una rapida eliminazione dell'acqua del legno sia sempre assicurata, anche in caso di evento eccezionale o imprevisto: prevedendo una ventilazione delle superfici del legno e evitando ogni tipo di dettaglio a rischio, l'essiccazione del legno troppo umido dovrebbe essere sempre possibile in tempi sufficientemente rapidi.

Non è invece possibile proteggere efficacemente in modo costruttivo gli elementi di legno che si trovano in condizioni climatiche (temperatura e umidità dell'aria) tali da comportare un'umidità di equilibrio superiore al 20%.

Le misure di protezione costruttiva del legno possono essere suddivise in tre categorie:

1. la protezione tramite altri elementi della costruzione, cioè di elementi non espressamente concepiti come elemento di protezione;
2. la protezione tramite elementi appositamente concepiti, progettati e messi in opera per adempiere alla funzione di protezione del legno;
3. la separazione della zona umida da quella asciutta.

Protezione tramite altre parti della costruzione

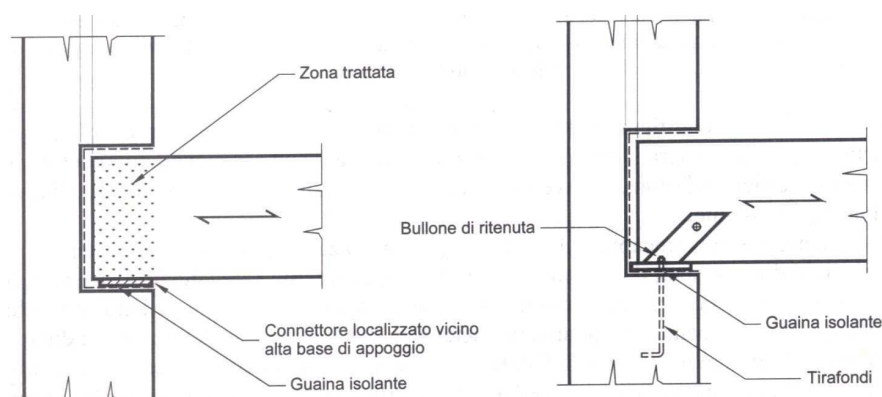
Il tetto è l'elemento di protezione classico, ma anche altri elementi della costruzione creano zone dove gli elementi di legno possono essere considerati come completamente protetti dall'azione diretta delle intemperie e da altre azioni che potrebbero causare un contatto diretto con l'acqua.

Protezione con elementi appositi

Gli elementi di protezione costruttiva sono appositamente concepiti e messi in opera per la protezione degli elementi strutturali del legno. Possono essere di materiali diversi dall'elemento che proteggono e avere durata di vita inferiore. Si tratta solitamente di tavole di altri elementi di legno direttamente esposti alle intemperie, e sono definiti come elementi di sacrificio. Devono essere concepiti e costruiti in modo da poter essere sostituiti senza grossi problemi, nell'ambito delle normali operazioni di manutenzione ordinaria, ad esempio a mezzo di lamiere metalliche, con particolare attenzione, in questo caso, alla ventilazione. E' spesso nei dettagli, nei giunti, nelle connessioni, nelle parti terminali dei singoli elementi, che si verificano le condizioni più favorevoli alle azioni sopra indicate e quindi al degrado del legno. L'estremità delle travi è un punto

particolarmente vulnerabile dal punto di vista della durabilità del legno. Si può per esempio eseguire una protezione superiore della trave mediante una lamiera di rame, lavorata in modo da evitare le infiltrazioni di acqua nell'intercapedine di ventilazione fra gli elementi di copertura e l'elemento di legno da proteggere.

In edilizia, le estremità delle travi sono spesso inserite in strutture di altro materiale (muratura, per esempio), che possono determinare la presenza di acqua in quantità e per tempi tali da mettere in pericolo il legno della trave. Nella figura riportata di seguito, sono presentati due esempi di soluzione corretta: l'estremità della trave ventilata in modo adeguato e l'assorbimento di acqua nella zona di contatto è impedito da materiale con funzione isolante.



Estremità di trave inserita in una muratura, con misure di protezione costruttiva.

Protezione tramite separazione della zona umida da quella asciutta

La separazione fisica fra la parte esposta alle intemperie di una costruzione e la parte lignea, tale da assicurare a quest'ultima il mantenimento di umidità al di sotto dei livelli critici, è una soluzione molto efficace per assicurare una protezione efficace del legno.

Questa separazione può avvenire nel caso di elementi strutturali piani, in cui la superficie sia utilizzata direttamente, e quindi una areazione risulti difficile se non impossibile. E' possibile ottenere una protezione efficace delle superfici del legno tramite scelte adeguate e con l'applicazione di strati impermeabili all'acqua. La durabilità dell'elemento di legno dipende, in queste applicazioni, dalla qualità e durabilità della membrana impermeabile, nonché della sua corretta messa in opera. Alcune parti di costruzioni, ad esempio le fondazioni, sono a contatto diretto con zone

umide che possono trasportare acqua per capillarità trasmettendola poi agli elementi di legno. La separazione fisica è in questi casi l'accorgimento più semplice.

PROTEZIONE PARZIALE DEL LEGNO

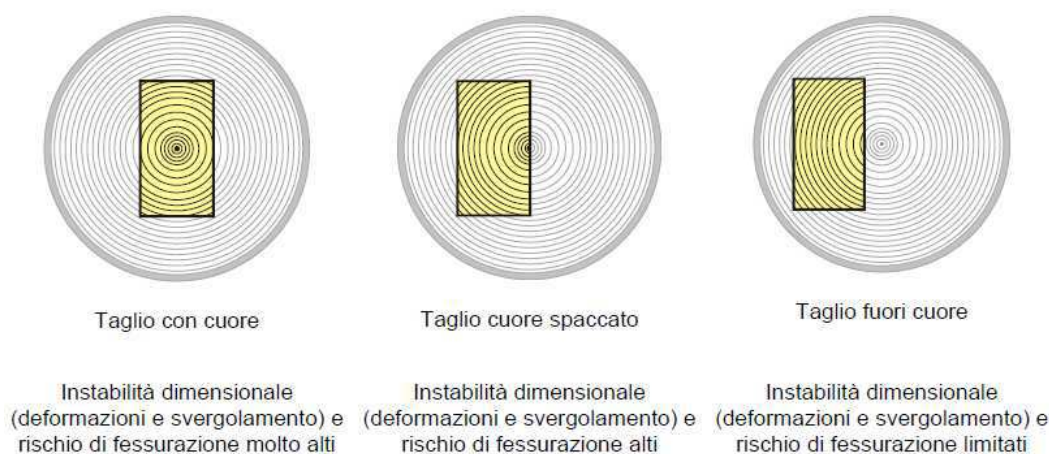
Nell'ambito della protezione costruttiva del legno si può parlare di protezione parziale in tutti i casi in cui gli elementi di protezione costruttiva non eliminano completamente le azioni definite in precedenza, cioè nei casi in cui una parte delle azioni e il rischio che ne deriva vengono accettati o quando la protezione costruttiva è applicata soltanto ad alcune parti della struttura o di un elemento strutturale.

Le misura di protezione si limitano ad eliminare le azioni più frequenti o più pericolose, accettando quindi una parte del rischio difficilmente quantificabile con precisione.

4.3 I prodotti del legno per la costruzione

4.3.1 Introduzione

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

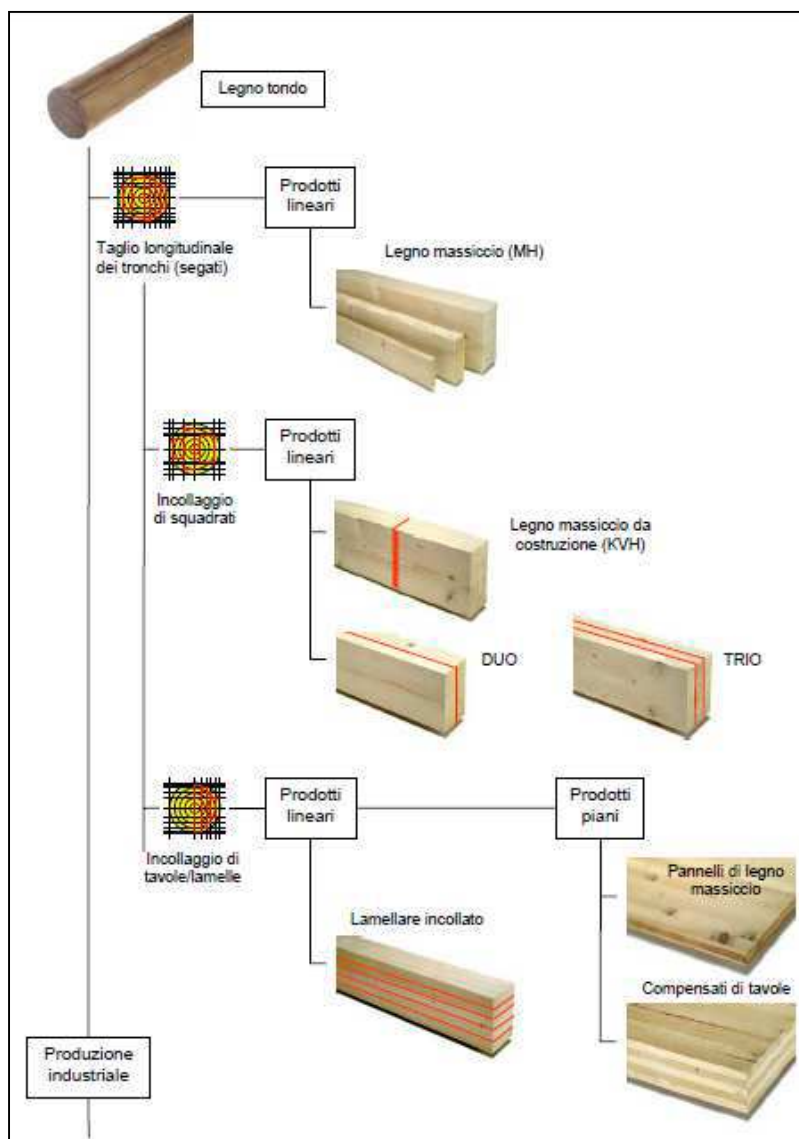


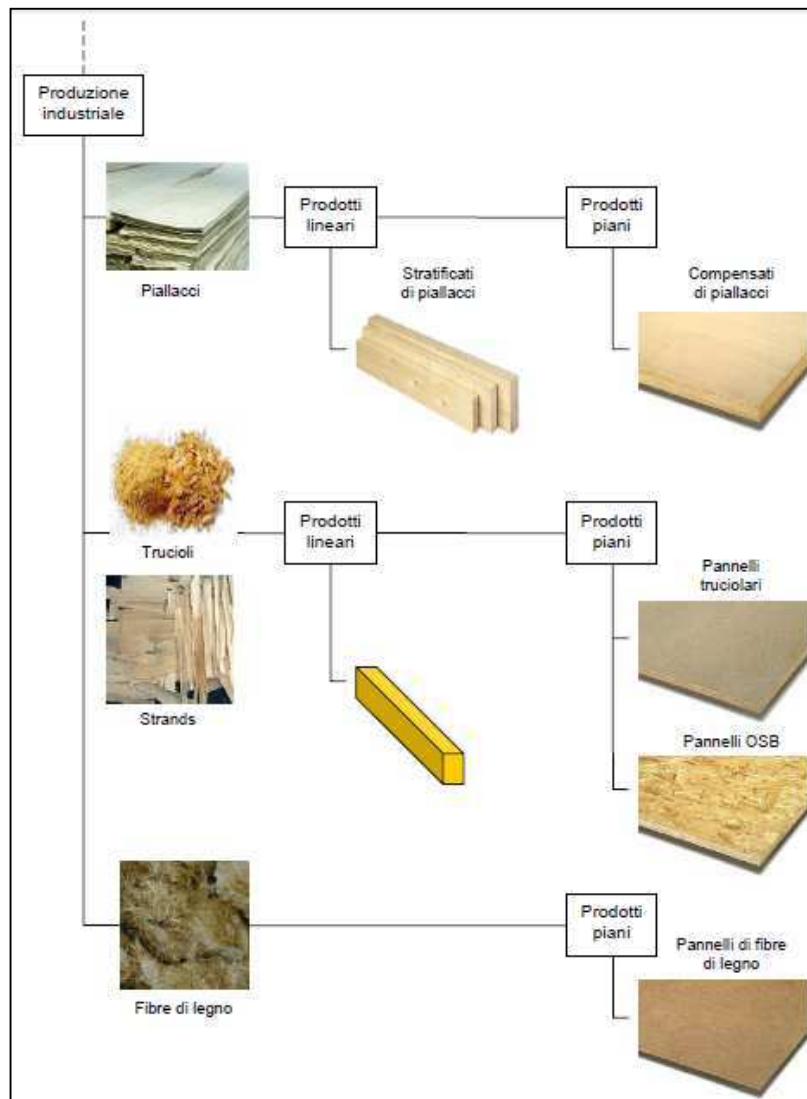
Possibili tipi di taglio.

I segati possono essere classificati secondo la resistenza ed essere usati con funzione strutturale per elementi di tipo lineare di legno massiccio. Gli evidenti limiti nelle dimensioni e nelle caratteristiche fisico-meccaniche, derivanti dal fatto che i segati provengano da un unico tronco di legno, vengono superati grazie al processo di incollaggio, attraverso il quale è possibile realizzare prodotti di tipo lineare (legno massiccio da costruzione, travi DUO/TRIO e legno lamellare incollato). I segati vengono giuntati in direzione longitudinale mediante il giunto a pettine (di cui si parlerà nel seguito), realizzando così un prodotto di maggiore lunghezza. Tramite incollatura della superficie possono essere uniti più elementi in direzione trasversale, ottenendo sezioni di dimensioni più grandi; tramite incollatura di più strati vengono prodotti gli elementi piani di legno massiccio e il compensato di tavole.

Mediante processi di lavorazione e produzione industriali, si possono realizzare prodotti a base legno con caratteristiche meccaniche definite e con minore dispersione rispetto al legno massiccio. Di essi fanno parte prodotti piani o a forma di trave ricavati da piallacci, trucioli e fibre di legno. Uno sguardo d'insieme dei prodotti di legno e a base legno è offerto dalle figure successive.

Gli elementi costruttivi di legno di forma lineare, ad esempio travi o aste, sono da sempre utilizzati nel settore edile. Un'evoluzione significativa si è avuta negli ultimi anni in seguito allo sviluppo di elementi costruttivi a base legno di forma piana, che è stato possibile mettere sul mercato grazie all'evolversi della possibilità di lavorazione e della tecnologia di incollaggio.





4.3.2 Prodotti di tipo lineare

Come si può notare dalla figura precedente, il “primo” (in relazione al processo di lavorazione) prodotto di tipo lineare è il legno tondo. Sotto questo nome si intendono legnami di Conifere o Latifoglie per i quali oltre allo scortecciamento ed all’eliminazione del cambio non sono ammesse altre trasformazioni della sezione e della superficie del legno (eventualmente rettificazione del tronco per ottenere un diametro costante). A causa del permanere della struttura naturale (non danneggiata), soprattutto delle fibre esterne, il tondo, in confronto ai segati, presenta migliori caratteristiche di

resistenza e rigidità. Oltre alle caratteristiche di resistenza, il legno tondo deve rispondere anche ad altre esigenze. Esse riguardano, soprattutto per ragioni costruttive, il mantenimento entro certi valori limite della conicità (riduzione della sezione di legno tondo in direzione assiale), della crescita a spirale dell'albero e dell'ovalità (rapporto tra diametro massimo e minimo in una sezione). I tondi vengono impiegati in edilizia prevalentemente per impalcature e ponteggi.

LEGNO MASSICCIO

La definizione legno massiccio strutturale indica i segati destinati a strutture portanti, ricavati dal legno tondo tramite taglio parallelo all'asse del tronco ed eventuale piallatura, senza superfici incollate e senza giunti a pettine.

In Europa centrale le specie legnose impiegate sono soprattutto le Conifere locali come l'abete rosso, l'abete bianco, il pino, il larice e la douglasia. Per usi particolari viene usato anche il legno delle Latifoglie indigene, soprattutto quercia, faggio, frassino, castagno e robinia.

I segati si distinguono in listelli, tavole (o lamelle), tavoloni e legname squadrato a seconda delle dimensioni e del rapporto tra altezza e spessore della sezione (in base alla Bozza ON DIN 4074-1:2004).

	Spessore d e/o altezza h	Larghezza b
Listello	$6 \text{ mm} \leq d \leq 40 \text{ mm}$	$b < 80 \text{ mm}$
Tavola	$6 \text{ mm} \leq d \leq 40^* \text{ mm}$	$b \geq 80 \text{ mm}$
Tavolone	$d > 40 \text{ mm}$	$b > 3 d$
Legname squadrato	$b \leq h \leq 3 b$	$b > 40 \text{ mm}$
* Questo valore limite non vale per le lamelle del legno lamellare incollato (secondo la Bozza ON DIN 4074-1:2004)		

Classificazione del legno massiccio in base alle dimensioni.

Le lunghezze commerciali sono comunemente di 4 m per listelli, tavole e tavoloni. In casi particolari si trovano sul mercato anche assortimenti che vanno da 3 m a 6 m.

Di regola, il legname squadrato viene fornito, in base alle richieste del cliente, ad incrementi di lunghezza di 0,5 m. La lunghezza massima dipende tuttavia dal taglio e dal trasporto e non supera, di norma, i 14 m.

Le dimensioni delle sezioni variano ad incrementi di 20 mm e, a causa del diametro del tronco, sono limitate a circa 260 mm (in casi eccezionali 320 mm).

Per quanto riguarda le caratteristiche della superficie, il legno massiccio viene impiegato principalmente allo stato grezzo. Come elemento base per il legno lamellare, per le costruzioni a vista e gli elementi profilati (per esempio i rivestimenti), si procede di regola alla piallatura.

Il legname squadrato viene utilizzato in quasi tutti i settori delle costruzioni (edilizia e ponti). In edilizia si usa legname squadrato per le travi correnti sulle fondazioni, per i pilastri e le travi portanti, per travi semplici o assemblate, e ancora per arcarecci, puntoni, travetti e gli ulteriori elementi di una struttura portante.

I tavoloni vengono utilizzati per le superfici di carico (tavolati per impalcature, balconate, solai).

Le tavole sono utilizzate universalmente. A seconda della lavorazione della superficie (grezza, piallata, fresata), esse possono essere impiegate sia come materia prima per una successiva lavorazione, sia come casseri o ancora come rivestimenti piallati o fresati. Tavole e tavoloni (lamelle) sono, inoltre, i prodotti base per la realizzazione del legno lamellare incollato. Sollecitati a flessione secondo l'asse forte della sezione, trovano impiego anche nelle travi composte inchiodate.

I listelli vengono utilizzati soprattutto come elementi di completamento e sottostruttura di pavimenti, come rivestimenti di coperture e facciate.

Dei prodotti di legno massiccio fanno parte anche le travi Uso Trieste e Fiume.

La travatura Uso Trieste deriva dal legno di abete rosso scortecciato, con squadratura continua sulle quattro facce. Questo tipo di squadratura con smusso su tutta la lunghezza, seguendo la conicità del legno, intacca solo superficialmente le fibre determinando una più elevata resistenza meccanica. La travatura Uso Trieste è adatta a lavori di carpenteria ed è utilizzata per la costruzione di tetti e coperture. Le sezioni vanno da 9 x 9 cm fino a 30 x 30 cm e le lunghezze da 3 m a 10 m.

La travatura Uso Fiume viene realizzata in tronchi di legno d'abete rosso. Piallata/asciata sui 4 lati a sezione parallela, mantiene i caratteristici bordi smussati per tutta la lunghezza. La maggior parte delle fibre legnose rimane intatta, conferendole ottime caratteristiche meccaniche e di elasticità. La travatura Uso Fiume viene utilizzata

in lavori di restauro e laddove siano richiesti risultati estetici particolari. Le sezioni vanno da 12 x 12 cm fino a 24 x 24 cm e le lunghezze da 4 m a 8 m.

PRODOTTI DI LEGNO MASSICCIO

Uno dei prodotti di legno massiccio è il legno massiccio da costruzione (KVH). Con tale denominazione si indica il legname squadrato essiccato artificialmente, piallato e classificato secondo la resistenza, ottenuto da taglio cuore spaccato o fuori cuore. Mediante il giunto a pettine è possibile ottenere elementi di maggior lunghezza. Il giunto a pettine è un giunto longitudinale tra due elementi di legno massiccio, sulle cui testate sono stati intagliati, mediante fresatura, denti aventi stesso profilo e stesso passo, che si incastrano fra di loro senza gioco e che sono uniti tramite incollaggio. L'orientamento dei denti può essere parallelo alla larghezza o all'altezza della sezione.



Giunto a pettine.

Per quanto riguarda la qualità del prodotto, è previsto un controllo eseguito dal produttore stesso e/o un controllo ad opera di un istituto esterno. Ne risulta un materiale di legno massiccio omogeneo e dalle ridotte deformazioni e fessurazioni.

Oltre al legno massiccio da costruzione (KVH) è attualmente disponibile anche un altro prodotto, ugualmente dal marchio registrato: il legno massiccio (MH); può essere collocato in una categoria che si trova tra il prodotto “legno massiccio” e il prodotto “legno massiccio da costruzione (KVH)”. Il legno massiccio da costruzione (KVH) e il legno massiccio (MH) vengono prodotti normalmente da legno di abete rosso; è possibile tuttavia utilizzare anche altre Conifere come il pino, l’abete bianco e il larice.

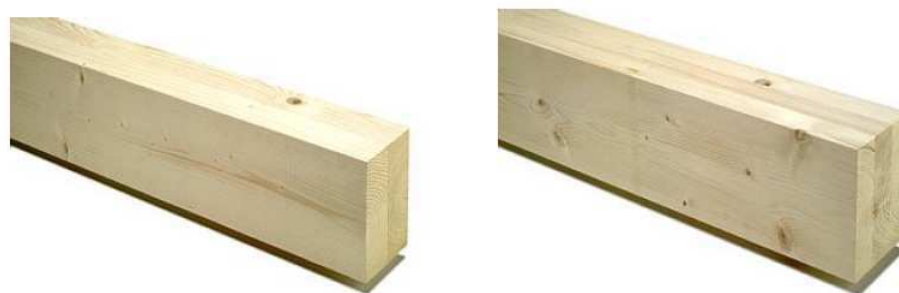
Contrariamente a quanto accade per il legno massiccio e il legno massiccio (MH), che sono disponibili in tutte le dimensioni realizzabili in base al diametro del legno tondo di partenza e che vengono forniti sulla base delle liste di ordinazione, il legno massiccio da costruzione (KVH) viene offerto in dimensioni standard.

Le lunghezze disponibili dipendono generalmente dalla sezione e raggiungono i 5 m per gli elementi senza giunti a pettine, mentre per quelli giuntati sono normali lunghezze fino a 18 m. Il legno massiccio da costruzione (KVH) e il legno massiccio (MH-Plus) sono di regola prodotti piallati e smussati.

Il legno massiccio da costruzione (KVH) può essere utilizzato per tutti gli elementi strutturali. In particolare, questo materiale è adatto, nella costruzione di edifici di legno, per pareti, solai e strutture di copertura.

TRAVI DUO/TRIO

Un altro prodotto di legno incollato sono le travi DUO/TRIO. Esse sono costituite da 2 o 3 elementi di legname squadrato o tavoloni, essiccati artificialmente, classificati secondo la resistenza e successivamente incollati sui lati lunghi; da questo procedimento risulta un legno massiccio dalle caratteristiche tecniche ben definite, di ottima qualità e con una ridotta tendenza a fessurarsi. I singoli elementi possono essere giuntati longitudinalmente tramite giunti a pettine.



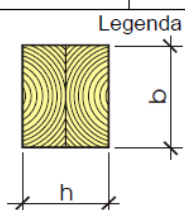
Trave DUO (sinistra) e TRIO (destra).

Le travi DUO e TRIO vengono offerte generalmente nelle cosiddette “sezioni preferenziali”, le cui dimensioni possono desumersi dalle seguenti tabelle. In linea di

principio, le dimensioni massime della sezione sono definite dalle dimensioni massime del singolo elemento di legno squadrato.

Trave DUO

Sezioni standard disponibili		Larghezza b [mm] alla superficie di incollaggio							
		100	120	140	160	180	200	220	240
Altezza h [mm] ⊥ alla superficie di incollaggio	80	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	100	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓
	120	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓
	140	-	-	✓	-	-	✓	✗	✗
	160	✓	✓	-	✓	-	✗	✗	✗

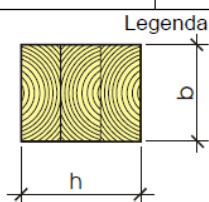


- Legenda
- sezioni non disponibili
 - ✓ sezioni preferenziali
 - ✗ sezioni attualmente non ammesse

Sezioni standard disponibili per le travi DUO.

Trave TRIO

Sezioni standard disponibili		Larghezza b [mm] alla superficie di incollaggio							
		100	120	140	160	180	200	220	240
Altezza h [mm] ⊥ alla superficie di incollaggio	180	-	-	-	-	✓	✓	✓	-
	200	-	-	-	✓	-	✓	-	✗
	240	-	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗



- Legenda
- sezioni non disponibili
 - ✓ sezioni preferenziali
 - ✗ sezioni attualmente non ammesse

Sezioni standard disponibili per le travi TRIO.

Le lunghezze disponibili dipendono dalla sezione e possono raggiungere i 18 m. Tutte le travi sono piallate e smussate.

Le travi DUO e TRIO soddisfano le principali esigenze riguardanti le strutture in elevazione, in particolar modo per le travi (a vista) dei solai, per strutture di copertura

(puntoni ed arcarecci) e per tutti i rimanenti elementi strutturali non esposti direttamente agli agenti atmosferici.

LEGNO LAMELLARE INCOLLATO

Il legno lamellare incollato è un prodotto composito costituito da lamelle solitamente di una sola specie legnosa e incollate parallelamente alla fibratura. Si vengono a formare elementi strutturali di qualsiasi dimensione e forma (anche curvi e con sezione variabile) con dimensione, sezione e caratteristiche geometriche svincolate dalla geometria iniziale del tronco. Il legno lamellare ha una maggiore resistenza del legno massiccio; infatti il controllo di qualità sulle lamelle permette di eliminare i difetti che possono compromettere la resistenza del materiale, mentre i piccoli difetti che restano nelle singole lamelle risultano casualmente ripartiti nella struttura.



Legno lamellare incollato.

Per la produzione del legno lamellare incollato si impiega principalmente il legno delle Conifere, abete rosso, abete bianco, pino e larice. È tuttavia possibile utilizzare legno di Latifoglie come il faggio, il frassino, la quercia, la robinia o il castagno.

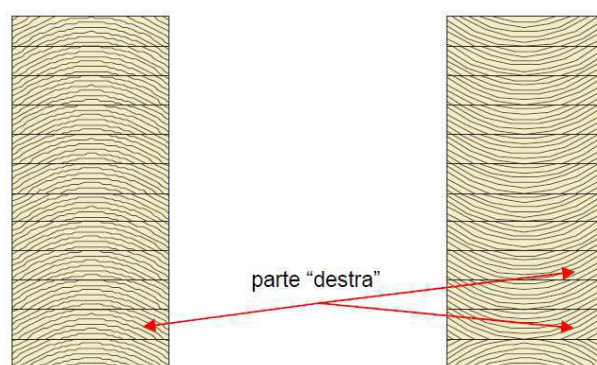
Le caratteristiche fisico-meccaniche del legno lamellare sono determinate principalmente dalla qualità delle lamelle, dalla corretta realizzazione del giunto a pettine e dalla posizione delle lamelle all'interno dell'elemento finito.

Oltre che dalle proprietà delle lamelle classificate, e tra queste soprattutto quelle relative al comportamento a trazione, la resistenza degli elementi strutturali di legno lamellare incollato è influenzata anche dal giunto di testa delle lamelle, il giunto a pettine di cui si

è già parlato nel paragrafo dedicato al legno massiccio da costruzione (KVH). Soltanto grazie al giunto a pettine è possibile la produzione di una “lamella continua” e quindi del legno lamellare incollato. A seconda della classe di resistenza del legno lamellare, il giunto a pettine deve raggiungere valori ben determinati della resistenza a flessione e a trazione. Le potenzialità di questa giunzione dipendono prevalentemente dalle caratteristiche geometriche dei denti e dalla qualità della produzione, che a sua volta dipende dagli impianti di produzione. La lamella continua così realizzata presenta, in base alla specie legnosa utilizzata e al tipo d’impiego previsto, uno spessore massimo finale di 45 mm.

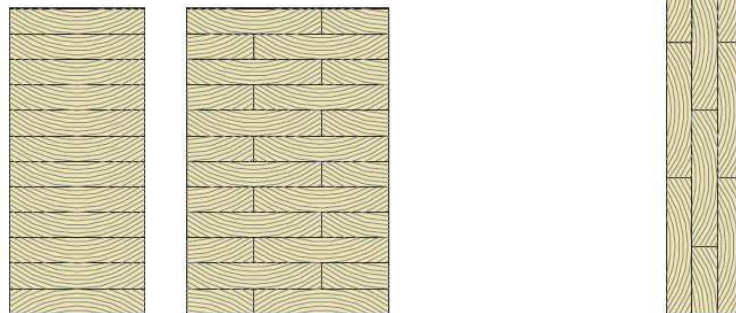
Per gli elementi strutturali di legno lamellare di tipo lineare prodotti da legname di Conifere, lo spessore finale delle lamelle è di regola compreso fra 32 mm e 40 mm. La larghezza finale delle lamelle aventi uno spessore $d = 40$ mm, in base alla classe di servizio, risulta al massimo pari a $b = 250$ mm (per la classe 3) oppure $b = 300$ mm (per la classe 1).

Per quanto concerne la posizione delle lamelle all’interno del pacchetto finito, si deve tener conto del fatto che la parte “destra” della tavola (quella più vicina al midollo) deve trovarsi sempre dallo stesso lato. Nel legno lamellare della classe di servizio 3, entrambe le lamelle esterne devono avere la parte “destra” rivolta verso l’esterno.



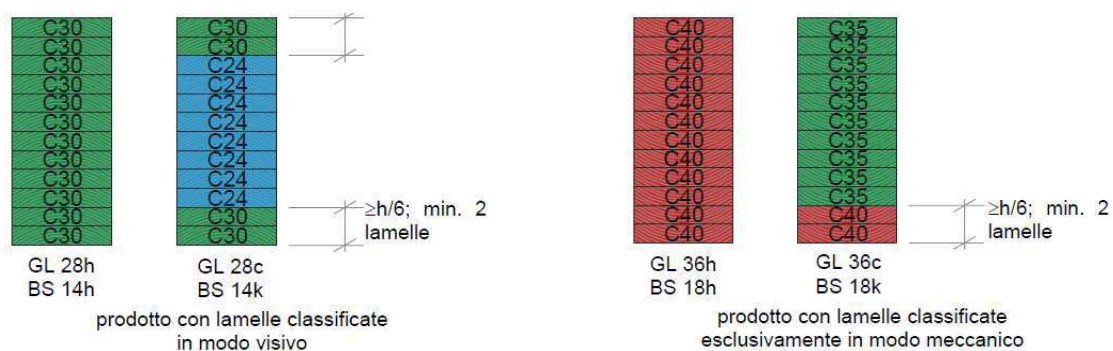
Posizione delle lamelle normale (sinistra) e per la classe di servizio 3 (destra).

Nella produzione di legno lamellare incollato si distingue il legno lamellare incollato laminato in orizzontale o in verticale.



Legno lamellare incollato laminato in orizzontale (sinistra) e in verticale (destra).

Nell'ambito del legno lamellare incollato laminato orizzontalmente la norma UNI EN 1194:2000 distingue tra sezioni omogenee (indicate aggiungendo h, ad esempio GL 24h) e sezioni combinate (indicate aggiungendo c, ad esempio GL 24c), avendo indicato con GL il legno lamellare e con il numero che segue la resistenza a trazione. Le prime sono costituite da lamelle della stessa categoria di classificazione (classe di resistenza delle lamelle) e della stessa specie legnosa (o combinazione di specie legnose). Le sezioni combinate prevedono invece lamelle interne ed esterne appartenenti a diverse categorie (classi di resistenza delle lamelle) e specie legnose. La seguente figura rappresenta due sezioni di lamellare rispettivamente omogeneo e combinato.



Sezioni omogenee e sezioni combinate.

I prodotti standard di tipo lineare, solitamente utilizzati in edilizia per pareti, coperture e solai, hanno, in linea di massima, sezioni di larghezza che va da un minimo di 60 mm fino ad un massimo di 260 mm (ad incrementi di 20 mm) e di altezza che va da 100 mm fino a 1300 mm (sempre ad incrementi di 20 mm). La lunghezza massima del prodotto industriale legno lamellare incollato, come merce standard, è di circa 18 m. Nel caso in

cui il legno lamellare venga impiegato come prodotto speciale in costruzioni edili, sono disponibili anche altre dimensioni.

4.3.3 Prodotti di tipo piano

I prodotti a base legno di forma piana attualmente in commercio possono essere classificati, in base al materiale di partenza (tavola, piallaccio, truciolo e fibra), in elementi portanti, non portanti e isolanti. Particolare importanza assumono gli elementi costruttivi piani di tipo compensato (compensati ottenuti con tavole, piallacci e trucioli), caratterizzati dalla capacità più o meno elevata di trasmettere carichi nelle due direzioni principali del loro piano. Essi possono lavorare sia come piastre (per carichi agenti perpendicolarmente al piano del pannello) che come lastre (per carichi agenti nel piano del pannello).

I pregi di questi prodotti in confronto al legno massiccio sono: dimensioni relativamente grandi e variabili in dipendenza del prodotto specifico; possibilità di realizzare elementi piani di grandi dimensioni con una buona stabilità dimensionale; minore dispersione delle proprietà meccaniche a seguito dei processi industriali di lavorazione che permettono la produzione di materiale omogeneo nelle sue caratteristiche fisiche e meccaniche.

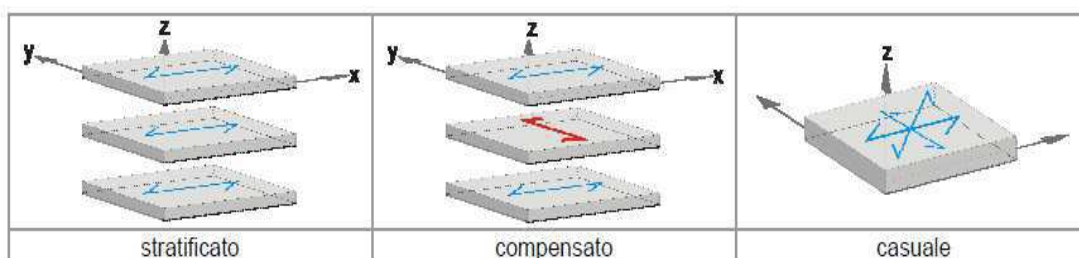
La classificazione dei prodotti piani a base legno può essere fatta in base a diversi criteri e non può essere soggetta a regole universali. In quest'ottica, la classificazione per questa tesi è basata su due criteri principali che hanno una notevole rilevanza per il comportamento dei diversi prodotti: il grado di scomposizione del materiale di base e l'orientamento o le modalità di disposizione del materiale stesso all'interno dell'elemento finito.

Per grado di scomposizione si intende la grandezza (granulometria) del materiale di base destinato alla produzione. Per i prodotti a base legno, a seconda delle dimensioni, si distingue tra fibre di legno (o fasci di fibre), trucioli, piallacci e tavole (lamelle). Quanto maggiore è il grado di scomposizione, tanto maggiore sarà l'effetto di omogeneizzazione all'interno dell'elemento a base legno. In base a queste

considerazioni è logico aspettarsi la maggiore omogeneità nei pannelli composti da fibre di legno. Ciò significa che in questi elementi costruttivi la dispersione dei parametri caratteristici del materiale, ad esempio i valori di resistenza e rigidità, è inferiore rispetto al materiale da costruzione legno massiccio, caratterizzato da elevata disomogeneità e anisotropia. D'altro canto, più aumenta il grado di scomposizione, più la fibra è soggetta a danni, con una conseguente perdita di resistenza del materiale ottenuto e quindi dell'elemento costruttivo con esso realizzato. Pertanto la produzione di prodotti a base legno richiede sempre un compromesso tra questi due aspetti.

La struttura dei prodotti stratificati e compensati è simmetrica rispetto al piano medio al fine di evitare deformazioni indesiderate (ad esempio l'imbarcamento). Il legame tra i singoli strati viene realizzato mediante incollaggio con sostanze adesive specifiche.

Per quanto riguarda l'orientamento del materiale legno, si possono distinguere due tipi di elementi, stratificati e compensati, qui di seguito raffigurati.



Possibile orientamento degli strati all'interno di un prodotto di tipo piano.

Negli elementi stratificati piani, i singoli elementi che costituiscono l'elemento piano sono disposti con la direzione della fibratura parallela l'uno all'altro. In questo modo si ottiene una resistenza simile al legno massiccio, mantenendo tuttavia buone proprietà di ritiro e rigonfiamento e valori bassi di resistenza a trazione e a flessione trasversale perpendicolarmente alla fibra. In molti casi questi elementi vengono sottoposti a successiva lavorazione per ottenere elementi lineari, poiché la maggior omogeneità del prodotto ricomposto assicura resistenze caratteristiche superiori rispetto al legno massiccio per la più limitata dispersione dei parametri caratteristici del materiale (ad es. legno a trucioli lunghi TimberStrand).

Negli elementi piani di tipo compensati, una parte degli strati (di norma circa la metà degli strati) è orientata in direzione perpendicolare alla fibra degli strati esterni. È però

possibile anche l'orientamento casuale della direzione della fibratura dei componenti dei singoli strati. In virtù del collegamento fra i vari elementi, le deformazioni di ritiro e rigonfiamento nel piano del pannello perpendicolarmente alla direzione della fibra vengono impediti dagli elementi la cui fibra è orientata nella medesima direzione. In questo caso si subisce una perdita di resistenza e rigidità nella direzione principale (che in genere corrisponde all'orientamento degli strati esterni e/o alla direzione principale di sollecitazione), ma d'altro canto si ottiene un elemento piano di forma notevolmente più stabile. In questo modo è possibile costruire elementi di chiusura che da un lato consentono di realizzare pareti, solai e coperture, rispettando nel contempo le vigenti norme di fisica tecnica (soprattutto la permeabilità all'aria e al vento), e dall'altro sono in grado di sostenere carichi in direzione sia parallela al piano (esercitando così una funzione di irrigidimento) che perpendicolare ad esso (vento per le pareti, carichi verticali per solai e coperture).

Il grado di scomposizione prevede, come descritto precedentemente, la suddivisione dei materiali di base in tavola, piallaccio, truciolo e fibra. L'orientamento introduce l'ulteriore classificazione in "compensati" e "stratificati". Da queste due classificazioni derivano le denominazioni dei singoli prodotti, ricavate dalla combinazione delle diverse categorie (ad esempio "tavole + orientamento compensato = legno compensato di tavole" o "piallacci + orientamento stratificato = legno stratificato di piallacci"). La denominazione è così indicativa sia della struttura che del comportamento dell'elemento a base di legno.

Gli elementi stratificati presentano un'elevata resistenza in direzione della fibratura, mentre la resistenza e la rigidità trasversalmente alla fibratura sono ridotte. Gli elementi compensati, al contrario, possono essere realizzati con una sezione trasversale specificamente studiata per diversi ambiti applicativi, in modo da ottenere valori di resistenza identici in entrambe le direzioni.

PANNELLI COMPOSTI DA FIBRE DI LEGNO

Il materiale di base fibra di legno viene ottenuto mediante un processo di sfibratura della materia prima legno, normalmente dopo che il legno grezzo è stato sottoposto a

una prima riduzione in minuzzolo. In questo modo si ottiene una completa disgregazione della struttura naturale del legno, che viene ridotto in fasci di fibre.



Fasi produttive delle fibre di legno.

Il legame delle fibre all'interno del pannello viene ottenuto mediante l'intreccio delle fibre stesse e l'azione adesiva delle sostanze proprie del legno. Inoltre è possibile aggiungere altre sostanze adesive alla miscela.

In base al processo di produzione, i pannelli di fibra di legno vengono suddivisi in "pannelli per via umida" e "pannelli per via secca". Secondo la norma DIN EN 316:12.1999, la distinzione è determinata dalla percentuale di umidità nella fibra nel processo di fabbricazione del pannello:

1. per via umida: umidità fibra > 20%;
2. per via secca: umidità fibra ≤ 20%.

All'interno di ciascuna categoria, i pannelli vengono poi classificati in base alla loro massa volumica.

Processo produttivo	Massa volumica [kg/m ³]	Descrizione	Abbreviazione
per via umida	$\rho \geq 900$	Pannelli duri	HB
	$400 \leq \rho < 900$	Pannelli medio-duri	MB
	$400 \leq \rho < 560$	Pannelli medio-duri a bassa densità	MBL
	$560 \leq \rho < 900$	Pannelli medio-duri ad alta densità	MBH
	$230 \leq \rho < 400$	Pannelli porosi	SB
per via secca	$\rho \geq 450$	Pannelli prodotti per via secca	MDF
	$\rho \geq 800$	Il nome originario dei pannelli prodotti per via secca è "pannelli di fibra a media densità MDF". Questa denominazione si applica a pannelli con ρ compreso tra 650 kg/m ³ e 800 kg/m ³ mentre per gli altri si utilizzano gli acronimi riportati in tabella	HDF
	$\rho \leq 650$		MDF leggero
	$\rho \leq 550$		MDF ultraleggero

Classificazione e denominazione dei pannelli di fibra di legno secondo DIN EN 316:1999.

PANNELLI DI FIBRA DI LEGNO POROSI

Per la produzione di pannelli di fibra di legno porosi il legno, ridotto in fibra nello sfibratore, viene steso su un percorso di essiccazione ed eventualmente miscelato con additivi. Infine viene eseguita una precompattazione, mentre l'essiccazione al grado desiderato viene realizzata in ciclo in un essiccatoio a rulli.



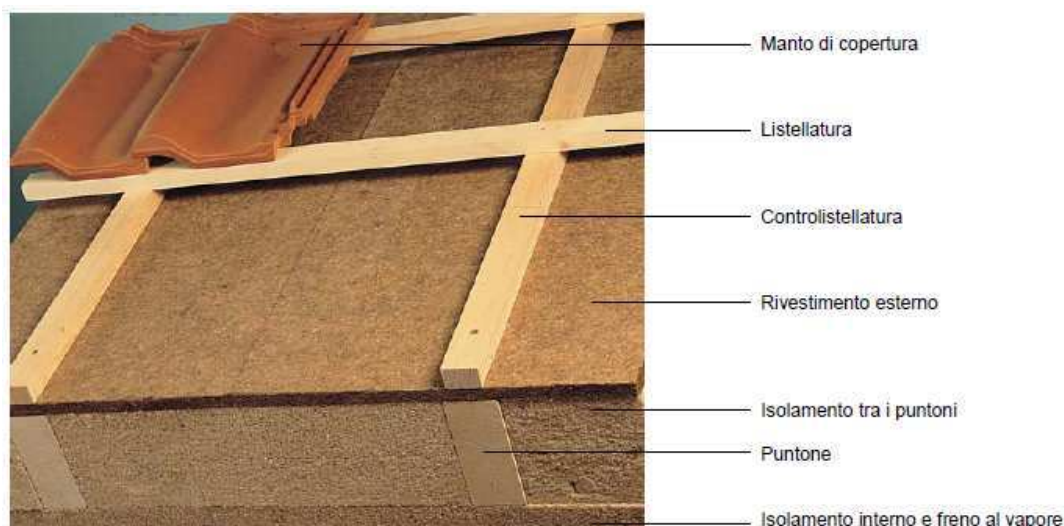
Pannello di fibra di legno poroso.

Le principali applicazioni dei pannelli di fibra porosi come pannelli isolanti sono descritte nella norma DIN 68755:2000. La norma distingue fra pannelli isolanti di fibra di legno (WF-P; prodotti piani con o senza rivestimento), materassi isolanti di fibra di legno (WF-M; prodotti in rotoli con o senza rivestimento) e materassi lamellari di fibra di legno (WF-L; prodotto in strisce tagliato prevalentemente in senso verticale alla direzione della fibra e fissato su un supporto flessibile; una volta srotolate, le lamelle formano uno strato isolante continuo omogeneo).

L'impiego principale dei pannelli di fibra di legno porosi è nell'ambito dell'isolamento termico e acustico. Grazie alla loro elevata resistenza all'umidità, i pannelli di fibra di legno bituminosi possono essere utilizzati per il rivestimento/tamponamento esterno (di norma senza compiti statici) su elementi costruttivi esterni che oltre all'isolamento termico svolgono anche un'azione di barriera al vento e/o impermeabilizzazione del sottotetto. Bisogna tuttavia considerare che, a causa dei rigonfiamenti provocati dall'esposizione agli agenti atmosferici, la sezione dell'intercapedine d'aria di una facciata esposta e/o di un tetto si riduce, e tale fenomeno deve essere tenuto in opportuna considerazione.

I pannelli di fibre di legno bituminosi, proprio per la presenza di bitume, risultano essere non suscettibili all'umidità, non tendono a presentare marciume e sono resistenti

agli attacchi biotici. Per queste caratteristiche, essi possono essere impiegati come isolanti termo-acustici anche in zone ad elevata umidità.



Struttura di una copertura con isolamento tra gli elementi dell'orditura; pannelli di fibra di legno porosi come isolante, pannelli di fibra di legno medio - duri al lattice come rivestimento esterno.

PANNELLI DI FIBRA DI LEGNO DURI E MEDIO – DURI

La produzione dei pannelli di fibra di legno duri e medio - duri si differenzia da quella dei pannelli di fibra porosi per il fatto che il materasso di fibre viene pressato ad alta temperatura.



Pannello di fibra di legno duro (sinistra) e medio – duro (destra).

I pannelli MDF traspiranti (dalla dicitura inglese Medium Density Fiberboard) rappresentano l'evoluzione dei tradizionali pannelli MDF incollati con resine a base di formaldeide. Tale evoluzione si è resa necessaria, dalla metà degli anni '90, per la crescente richiesta di un materiale che permettesse la costruzione di pareti traspiranti. La massa volumica di questi pannelli è compresa, a seconda della ditta produttrice, tra

540 kg/m³ e 650 kg/m³. Gli spessori sono compresi tra i 12 mm ed i 20 mm. I pannelli MDF traspiranti si distinguono da quelli tradizionali per la maggiore presenza di paraffina, una distribuzione delle fibre diversa durante la produzione ed un processo di pressatura modificato, il quale rende possibile una minore massa volumica.

I pannelli di fibra di legno duri e medio - duri possono essere utilizzati per rivestimenti e/o tamponature con funzione portante (strutturale). Attualmente, però, il loro impiego è limitato. Le limitazioni al loro impiego sono stabilite nella norma DIN 1052:2004. In generale, i pannelli di fibra di legno non possono essere utilizzati in solai e coperture come elementi con comportamento a lastra.

PANNELLI DI FIBRA DI LEGNO A MEDIA DENSITA'

La produzione di pannelli di fibra di legno a media densità avviene per via secca. Le fibre di legno miscelate con colla ed essiccate vengono compattate prevalentemente in presse continue.



Pannello di fibra di legno a media densità (MDF).

A livello europeo, i requisiti per i pannelli di fibra a media densità sono definiti nella EN 622-1-5:1997. I pannelli di fibra a media densità MDF non sono trattati in alcuna norma come materiale da costruzione per elementi portanti e pertanto non devono svolgere alcuna funzione “strutturale”, tranne nel caso in cui esista una specifica autorizzazione.

I pannelli MDF sono impiegati come rivestimenti irrigidenti e per la realizzazione di elementi di parete e solaio per le strutture intelaiate (costruzioni leggere).

PANNELLI COMPOSTI DA TRUCIOLI

I pannelli truciolari sono elementi di forma piana a base legno, ottenuti mediante la pressatura a caldo di particelle di legno (trucioli di legno, trucioli da pialla, trucioli di segatura, wafer, strand) e/o altre particelle con contenuto di lignocellulosa (cascami di lino, cascami di canapa, bagassa), miscelate a colla.

La classificazione dei pannelli truciolari può avvenire in base a differenti criteri:

1. in base alla struttura del pannello:
 - 1.1. monostrato;
 - 1.2. multistrato (può essere composto da diverse particelle orientate o non orientate all'interno dei diversi strati);
 - 1.3. a separazione progressiva simmetrica;
 - 1.4. pannelli estrusi con tubi;
2. in base alle dimensioni e alla forma delle particelle:
 - 2.1. pannelli di trucioli sminuzzati (pannelli truciolari);
 - 2.2. pannelli di trucioli grossi e ampi (Waferboard);
 - 2.3. pannelli di trucioli lunghi, stretti e orientati (OSB);
 - 2.4. pannelli di altri materiali (p. es. cascami di lino);
3. in base all'impiego:
 - 3.1. pannelli per uso generico;
 - 3.2. pannelli per arredo d'interni in ambienti asciutti;
 - 3.3. pannelli per strutture portanti e di irrigidimento in edilizia in ambienti asciutti o umidi;
 - 3.4. pannelli per impieghi speciali (es. carichi elevati, resistenza al fuoco, isolamento acustico).

I pannelli piani pressati incollati con resine sintetiche (spesso definiti come pannelli truciolari) e i pannelli OSB sono di gran lunga i materiali più importanti per l'industria edilizia nella regione mitteleuropea.

Tanto l'OSB quanto i pannelli truciolari presentano, rispetto al legno massiccio, valori nettamente inferiori in termini di fattori k_{mod} e nettamente superiori in termini di fattori k_{def} . Questo aspetto permette, in sede di calcolo degli elementi, di considerare in modo opportuno la ridotta resistenza nonché l'elevato scorrimento in presenza di carichi di

lunga durata. Inoltre, valori più elevati di umidità dell'aria possono alterare sensibilmente le caratteristiche meccaniche, di questo si tiene conto suddividendo i pannelli in diverse classi di utilizzo.



Pannello OSB.

PANNELLI PIANI PRESSATI INCOLLATI CON RESINE SINTETICHE

Come materia prima per la produzione di trucioli per pannelli piani pressati vengono utilizzati legno massiccio (principalmente legno di scarso valore, piccolo e fragile), trucioli (di segatura, di pialla, ecc.) e, in misura sempre maggiore, legno riciclato (o vecchio). In una prima fase vengono sminuzzati i pezzi più voluminosi. Il materiale grezzo così ricavato viene ulteriormente sminuzzato, suddiviso in frazioni granulometriche e miscelato in maniera omogenea per la preparazione degli strati interni ed esterni. L'intero processo di riduzione avviene in modo totalmente meccanico, senza sottoporre i trucioli ad alcun trattamento chimico. Successivamente i trucioli vengono essiccati, vagliati e incollati con un agente legante (ca. 10% in peso). Un'altra variante è rappresentata dai pannelli piani pressati con leganti inorganici come cemento e gesso. La fase successiva prevede la formazione dei trucioli incollati in superfici piane, con orientamento dei trucioli prevalentemente in direzione parallela alla superficie stessa. In seguito questo cosiddetto "materasso di trucioli" viene addensato (pressato) con procedimento ciclico in presse multivano oppure con procedimento continuo in presse continue. Le ultime fasi di lavorazione sono il raffreddamento, la rifilatura, la levigatura, la classificazione e il taglio.



Pannello piano pressato incollato con resine sintetiche (sinistra) e pannello di trucioli a striatura (destra).

L'orientamento e la stratificazione dei trucioli di dimensioni relativamente piccole avvengono, come accennato in precedenza, prevalentemente in direzione parallela alla superficie del pannello, la cui sezione può essere ottenuta variando la dimensione dei trucioli e/o la distribuzione della densità, multistrato o a separazione progressiva simmetrica. In pratica, lo strato interno è costituito prevalentemente da trucioli più grossi, gli strati esterni e quindi le superfici da trucioli più fini.

La geometria del truciolo (grado di snellezza), l'orientamento dei trucioli e la loro stratificazione influenzano considerevolmente (assieme alla colla e ad altri parametri di produzione quali il tipo di trucioli, la pressione e il tempo di pressatura) il profilo di massa volumica e con esso le caratteristiche del pannello piano pressato.

Il pannello può avere le seguenti dimensioni: spessore da 8 mm a 50 mm (max. 80 mm) ad incrementi da 1 mm a 2 mm; formato 1250 x 2500 fino a 5000, 1850 x 4100, 2050 x 2750/5300 mm; lunghezza fino a 14 m.

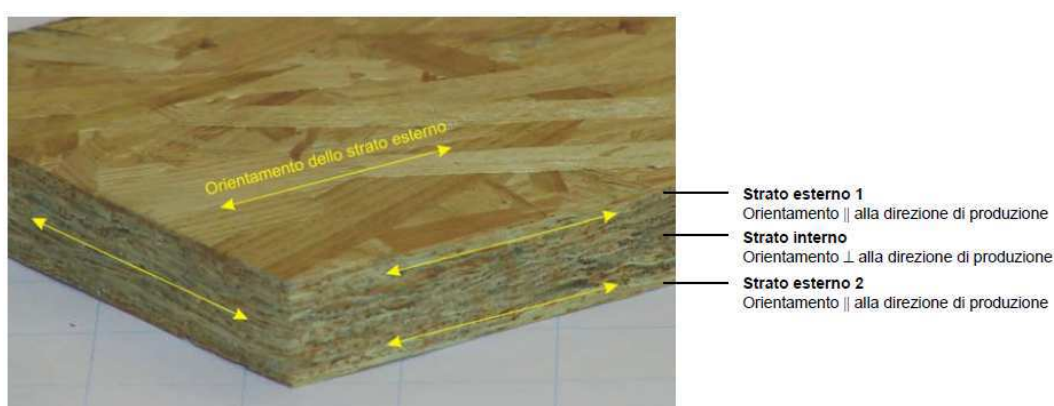
In virtù dell'elevata porosità della struttura, i pannelli piani pressati soggetti ad umidità diretta (acqua) possono subire forti e spesso irreversibili rigonfiamenti sullo spessore.

L'impiego principale dei pannelli piani pressati in edilizia è costituito dal rivestimento di costruzioni leggere (sistemi intelaiati). I pannelli piani pressati svolgono da un lato una funzione di irrigidimento nella trasmissione di carichi orizzontali comportandosi come lastre, dall'altro una funzione di distribuzione del carico nella trasmissione, su nervature discrete, di carichi distribuiti perpendicolari al piano del pannello stesso. È inoltre possibile (ma sconsigliabile in virtù della limitata rigidità dei pannelli piani rispetto alle nervature dei materiali normalmente utilizzati, cioè legno massiccio, legno massiccio da costruzione e travi DUO) che il pannello piano pressato contribuisca alla

trasmissione dei carichi verticali costituendo con la nervatura una sezione composta. Inoltre i pannelli piani pressati sono impiegati nelle costruzioni di legno come anima di sezioni a I.

PANNELLI OSB

Per pannello OSB (Oriented Strand Board) si intende un pannello di legno a tre strati a struttura simmetrica composto da strand (i cosiddetti trucioli piatti).



Orientamento degli strati in un pannello OSB.

Gli strand dell'OSB hanno una lunghezza compresa tra 60 mm e 150 mm, una larghezza tra 10 mm e 35 mm e uno spessore tra 0,4 mm e 0,6 mm (max. 1,0 mm), con orientamento della fibra in direzioni longitudinale. I trucioli degli strati esterni sono orientati parallelamente alla direzione di produzione e presentano in genere la migliore qualità in termini di geometria e precisione di orientamento. I trucioli dello strato interno vengono invece orientati a caso (random) o perpendicolarmente alla direzione di produzione. Lo strato interno dell'OSB presenta una massa volumica inferiore, poiché di norma è caratterizzato da una maggiore percentuale di materiale fine e da una maggiore variabilità nella geometria degli strand. In genere vengono utilizzate colle diverse per gli strati esterni e per lo strato interno, soprattutto per ragioni tecniche di produzione ed economicità. I pannelli possono avere dimensioni fino a 2,8 m di larghezza e a 11,5 m di lunghezza, con spessore compreso tra 8 mm e 40 mm. Essi vengono ridotti a pannelli di dimensioni minori orientati al mercato.

La produzione di OSB in Europa viene realizzata prevalentemente con tondeame fragile o industriale a basso costo (in Europa esclusivamente legno di conifera), che viene sfruttato al 100%. Il tondeame viene sminuzzato e gli strand vengono quindi essiccati, spalmati di colla, formati in strati e pressati per ottenere i pannelli OSB.

Le seguenti figure mostrano alcune fasi di un ciclo produttivo continuo per la produzione di pannelli OSB.



Scortecciamento



Truciolatura



Distribuzione die trucioli delo strato centrale



Formatura



Pannello „ininterrotto“ sui rulli della pressa



Raffreddamento

Alcune fasi di un ciclo produttivo continuo per la produzione di pannelli OSB.

In virtù della struttura dell'OSB, i valori di resistenza e di rigidità nella direzione di produzione (orientamento dello strato esterno) sono sensibilmente superiori rispetto alla direzione trasversale (rapporto longitudinale - trasversale circa 2:1). I parametri caratteristici a taglio sono grossomodo uguali nelle due direzioni portanti. Le proprietà meccaniche e fisiche dell'OSB si riferiscono, in genere, ad un determinato intervallo di spessori. Tendenzialmente, ad esempio, la resistenza e la rigidità a flessione diminuiscono all'aumentare dello spessore del pannello.

Grazie alla struttura a tre strati disposti perpendicolarmente l'uno all'altro si ottiene un grado più elevato di stabilità della forma nel piano del pannello connesso con una maggiore resistenza e rigidità a taglio in caso di sollecitazione a lastra del pannello stesso. In tal modo si riducono drasticamente (o si eliminano) possibili rigonfiamenti e fenomeni di ritiro dovuti a variazioni di umidità.

Come per i pannelli piani pressati, anche per i pannelli OSB bisogna considerare, in caso di esposizione diretta all'umidità (acqua), rigonfiamenti sullo spessore. In caso di contatto diretto con l'acqua sono particolarmente a rischio le superfici laterali dei pannelli che presentano un'elevata capacità di assorbimento: una volta rigonfiati, i bordi del pannello non tornano più alla forma originaria anche dopo essersi asciugati (deformazioni irreversibili).

Sia ai pannelli OSB che a quelli di fibre di legno e truciolari incollati con resine sintetiche sono assegnati valori dei coefficienti k_{mod} e k_{def} rispettivamente nettamente inferiori e superiori in confronto al legno massiccio. In questo modo, nel dimensionamento, si tiene conto da una parte della limitata resistenza ai carichi di lunga durata e dall'altra delle marcate deformazioni viscoso elastiche dovute ai carichi permanenti e quasi permanenti. In particolare, in presenza di umidità elevate dell'aria e del legno, si deve tener conto del calo delle grandezze caratteristiche meccaniche.

La norma di prodotto europea EN 300:1997 "Pannelli di trucioli lunghi, stretti e orientati (OSB) – Definizione, classificazione e requisiti" distingue quattro tipi di pannelli:

1. OSB/1: Pannelli per impieghi generici e per arredo d'interni destinati ad ambienti asciutti (cioè non adatti per impieghi strutturali);
2. OSB/2: Pannelli per impieghi strutturali in ambienti asciutti;
3. OSB/3: Pannelli per impieghi strutturali in ambienti umidi;

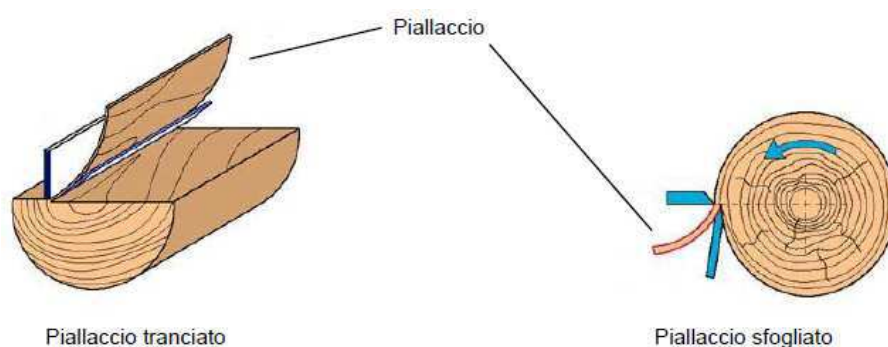
4. OSB/4: Pannelli ad elevata portata per impieghi strutturali in ambienti umidi.

L'applicazione principale dei pannelli OSB nell'edilizia residenziale di legno (in Europa) è rappresentata dal rivestimento di costruzioni leggere (sistemi intelaiati). In questo ambito i pannelli vengono utilizzati principalmente per la resistenza ai carichi orizzontali dovuti a vento, sisma, ecc., ma anche per garantire la distribuzione di carichi concentrati e superficiali distribuiti (per esempio su nervature oppure nella costruzione di pavimenti). L'OSB trova inoltre applicazione nell'industria dell'imballaggio e dei mobili, così come ad esempio nei casseri per calcestruzzo.

In virtù del favorevole rapporto fra prezzo e prestazioni, l'impiego di questi pannelli è molto diffuso.

PANNELLI COMPOSTI DA PIALLACCI

Il prodotto di base "piallaccio" è realizzato con modalità produttive diverse in base alla specie legnosa, alla destinazione d'uso ed alla conseguente qualità richiesta. A seconda della tecnica di produzione si distingue in tranciato e sfogliato ed è ottenuto partendo direttamente dal tondame intero o sezionato che, se necessario, viene trattato preventivamente a vapore.



Classificazione dei piallacci in base al processo di produzione.

Dopo la prima lavorazione il piallaccio ottenuto viene essiccato, levigato, sottoposto ad un'ulteriore selezione e tagliato in formato.

I materiali a base legno prodotti con piallacci e destinati all'edilizia sono costituiti quasi esclusivamente da quelli sfogliati. La sfogliatura è il metodo più razionale per ricavare i piallacci: fornisce la maggiore quantità e necessita del minore dispendio di tempo.

La lunghezza massima dei blocchi da sfogliatura è di circa 2,5 m. Lo spessore dei singoli piallacci dipende principalmente dalla specie legnosa e dalla qualità del legno, ma viene determinato anche in base alle proprietà e caratteristiche richieste per il prodotto finale. Di norma varia da 1,5 mm a 4,5 mm. Gli spessori più sottili presentano un'alta sensibilità al problema della fibratura inclinata, circostanza che può essere compensata adeguatamente utilizzando sezioni di tronco quanto più possibile cilindriche, cioè con una bassa conicità.

Con il piallaccio vengono realizzati diversi materiali a base legno le cui proprietà dipendono principalmente dall'orientamento della fibratura nei diversi strati. Attualmente si distingue tra compensato, dove le fibre di due strati adiacenti sono orientate perpendicolarmente l'una all'altra, e stratificato, dove l'orientamento della fibra è parallelo per tutti gli strati. Oggi vengono prodotti anche compensati con strati di spessore differente ottenuti con piallacci di uguale spessore pressati a formare pannelli composti da due o più piallacci con fibratura parallela.

A questo proposito ci si può riferire alla definizione di “pannello stratificato con strati alternati” contenuta nella norma provvisoria prEN 14374:2002, dove è inoltre evidente come questi strati alternati (cioè piallacci con fibre orientate perpendicolarmente ai piallacci esterni) “bloccano” i piallacci esterni e gli altri strati ad essi paralleli, soprattutto in termini di ritiro e di rigonfiamento perpendicolarmente alla fibra. Un altro vantaggio offerto dagli strati alternati in termini di proprietà meccaniche è dato dalla maggiore resistenza alle sollecitazioni esercitate in direzione non parallela alla fibratura dei piallacci esterni. In questo caso le tensioni trasversali e tangenziali vengono assorbite come tensioni normali (nella direzione della fibra), con un conseguente aumento delle prestazioni rispetto ai singoli piallacci.

Grazie all'elevata resistenza e rigidità, gli elementi di legno realizzati con il prodotto di base piallaccio sono idonei alla costruzione di solette nervate e sezioni a cassone anche mediante l'accoppiamento strutturale con elementi lineari di legno massiccio, di legno massiccio da costruzione, di legno bi o trilamellare (DUO/TRIO) e di legno lamellare.

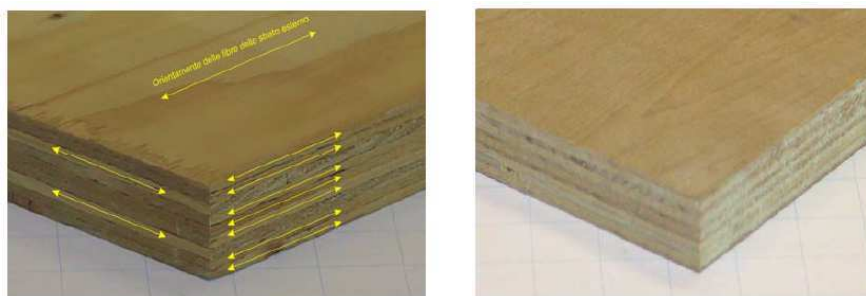
La resistenza all'umidità è determinata sia dalla durezza del legno che dal tipo di adesivo.



Pannello di piallaccio stratificato (sinistra) e pannello compensato (destra).

COMPENSATO

La struttura standard del compensato è caratterizzata dall'impiego di piallacci dello stesso spessore e della stessa specie legnosa, con le fibre disposte alternativamente in modo ortogonale. Il numero di strati è dispari per mantenere una struttura simmetrica, essenziale per la stabilità della forma. Nel caso di pannelli multistrato si può parlare di un materiale ortogonale - isotropo, nel quale possono essere rilevati valori meccanici identici sia parallelamente che perpendicolarmente alla direzione della fibratura degli strati esterni. I compensati con strati di diverso spessore, descritti in precedenza, sono invece caratterizzati, come i compensati standard, da un numero ridotto di strati, da un'anisotropia che di norma determina valori dei parametri caratteristici differenti lungo i due assi principali del pannello.



Orientamento dei singoli strati del piallaccio compensato (sinistra) e pannello di faggio (destra).

Le dimensioni abituali di 2,5 m dei compensati e del legno stratificato non rappresentano una misura significativa per il settore edilizio per cui, nel caso di produzione di elementi di dimensioni più grandi per usi costruttivi, è necessario

realizzare una giunzione per il prolungamento dei piallacci all'interno di uno stesso strato. Questa giunzione può avvenire sotto forma di giunto piatto (senza continuità del piallaccio), tramite sovrapposizione o tramite giunto incollato longitudinale del piallaccio. Il tipo di connessione longitudinale dei singoli piallacci assume una rilevanza importante ai fini delle caratteristiche meccaniche del prodotto a base di piallacci. Le caratteristiche meccaniche migliori si ottengono con piallacci tagliati obliquamente in modo da formare un giunto a becco di flauto.



Allungamento dei singoli piallacci mediante giunto a becco di flauto (sinistra) o mediante sovrapposizione (destra).

Con strati di piallacci sottili e in numero sufficientemente elevato è possibile eseguire giunzioni “piatte”, ma nel caso di strati spessi, e soprattutto con un numero di strati ridotto, la giunzione di testa piatta comporta una notevole riduzione delle prestazioni. In tal caso la giunzione deve essere realizzata con un taglio obliquo che, anche se limitato ai soli strati esterni, produce un incremento delle prestazioni per i valori di flessione. Con la giunzione obliqua di tutti gli strati vengono sfruttate in modo ottimale le prestazioni del prodotto di base piallaccio.

In virtù delle fessure longitudinali che si formano durante la produzione dei singoli piallacci, assume una notevole importanza la cosiddetta “resistenza al taglio trasversale”. Essa ammonta approssimativamente al 50% della resistenza al taglio longitudinale ed è riconducibile al distacco e alla rotazione delle strisce di piallaccio conseguente alla formazione di fessure nel piallaccio stesso in presenza di sollecitazioni di taglio perpendicolari alla fibratura.

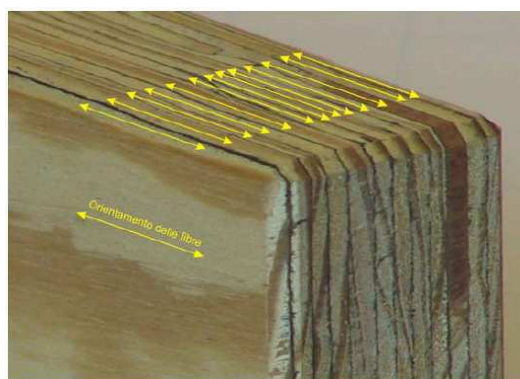
In Germania, la normativa vigente distingue tra compensato per l'edilizia secondo la norma DIN 68705-3:1981 e compensato di faggio per l'edilizia secondo la norma DIN 68705-5:1980.

La norma prevede l'impiego del compensato per l'edilizia (contraddistinto dalla sigla BFU) per elementi strutturali e di irrigidimento.

A causa dei costi relativamente elevati, i pannelli di compensato per edilizia trovano impiego limitato nel settore edile. Tra le applicazioni più ricorrenti, una delle principali è il rivestimento di costruzioni leggere (sistemi intelaiati) soprattutto nelle zone soggette a carichi elevati o dove il rivestimento deve essere lasciato a vista per ragioni estetiche. Un'altra utilizzazione è il rinforzo dei collegamenti, in particolare in presenza di sollecitazioni di compressione perpendicolari alla fibra (riduzione della pressione superficiale). Un'ulteriore applicazione si ha nella realizzazione delle anime di aste composte/assemblate (prevalentemente con sezione a I).

LEGNO STRATIFICATO

Il legno stratificato è un materiale composto da diversi strati incollati con la fibratura parallela. La suddivisione del tronco, fortemente disomogeneo e anisotropo, in piallacci che vengono classificati e nuovamente ricomposti in un nuovo prodotto, genera un effetto di omogeneizzazione che determina una minore dispersione dei valori di resistenza e, di conseguenza, valori caratteristici (frattile al 5%) più elevati.



Orientamento dei singoli strati del piallaccio stratificato.

In base alle proprietà meccaniche e fisiche questo prodotto si differenzia poco dai prodotti lineari quali massello o lamellare caratterizzati da una resistenza prettamente monodimensionale. Solo la resistenza alla diffusione del vapore in direzione perpendicolare al piano del pannello è superiore rispetto ai prodotti in legno massello.

Per questo motivo il legno stratificato può essere classificato nel gruppo dei prodotti lineari (portanti), con i quali condivide anche gli impieghi principali.

I legni stratificati vengono utilizzati principalmente come elementi costruttivi monodimensionali, anche in combinazione con altri materiali (ad es. travi a I con ali in legno stratificato ed anima in legno compensato).

In virtù della struttura piana e delle buone proprietà di resistenza nella direzione di lavorazione, il legno stratificato è ideale per sezioni scatolari e solette nervate. Tuttavia bisogna prestare la giusta attenzione alle deformazioni da rigonfiamento e ritiro perpendicolarmente all'asse dell'elemento costruttivo, soprattutto perpendicolarmente al piano dell'elemento, poiché i relativi valori caratteristici trasversalmente alla fibra sono molti simili a quelli del legno massello.

PANNELLI COMPOSTI DA TAVOLE

Il prodotto di base tavola viene ricavato prevalentemente mediante segagione direttamente dalla materia prima tronco. Prima della lavorazione successiva, le tavole vengono classificate in base alla resistenza, prevalentemente con classificazione visiva.

I prodotti compensati composti da tavole sono i pannelli di legno massiccio multistrato ed i pannelli di legno compensato di tavole. La struttura di questi pannelli è in linea di principio la stessa: singoli strati composti ciascuno da tavole dello stesso spessore vengono incollati uno sull'altro, generalmente sotto un angolo di 90°. Si ottiene così un elemento di forma piana compensato. Il numero di strati è dispari, in modo tale da avere una struttura simmetrica che garantisca la stabilità nella forma del prodotto.



Pannelli di legno massiccio a tre strati (sinistra) e pannello di legno compensato di tavole a cinque strati (destra).

PANNELLI DI LEGNO MASSICCIO MULTISTRATO

I pannelli di legno massiccio sono definiti come pannelli composti da diversi elementi di legno, tavole o lamelle, di uguale spessore. Questi pannelli possono essere suddivisi in “pannelli di legno massiccio monostrato”, cioè pannelli di legno massiccio composti da diversi elementi di legno incollati fra loro a formare un unico strato, e “pannelli di legno massiccio multistrato”, cioè pannelli di legno massiccio composti da diversi elementi di legno disposti in due strati esterni con fibre orientate nella stessa direzione e almeno uno strato interno con fibre orientate perpendicolarmente (a 90°) alla fibra degli strati esterni.



Pannelli di legno massiccio monostrato (sinistra) e a tre strati (destra).

Di seguito tratteremo esclusivamente i pannelli di legno massiccio multistrato, poiché sono quelli prevalentemente usati nel settore edilizio.

I pannelli di legno massiccio multistrato vengono prodotti con legno di Conifere e Latifoglie. In edilizia si utilizzano prevalentemente legni di Conifere quali abete rosso, abete bianco, pino, larice e douglasia.

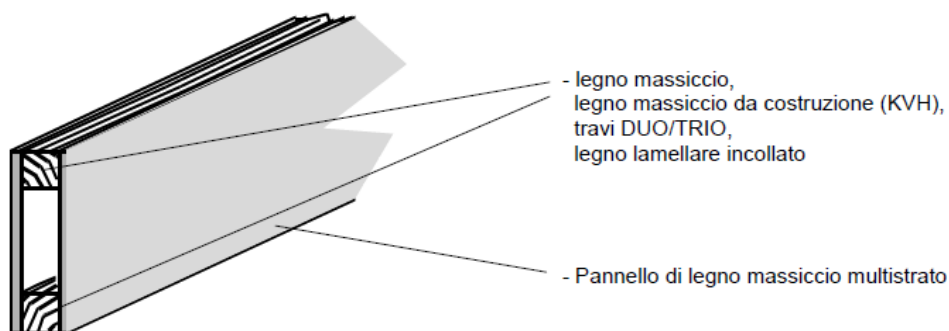
Di norma i pannelli vengono fabbricati con lamelle continue, incollando sia i diversi strati uno sull'altro, sia le singole lamelle di uno stesso strato fra di loro, di costa e/o di testa. I pannelli così composti vengono infine pressati a caldo.

I pannelli di legno massiccio multistrato vengono fabbricati prevalentemente in lunghezze fino a 5,0 m (anche 6,0 m), in quanto le singole lamelle non vengono giuntate di testa, e larghezze fino a 2,0 m (anche 2,5 m). Gli spessori di pannello più comunemente utilizzati variano da 15 mm a 35 mm, ma si possono raggiungere anche spessori di 75 mm. Tutti i tipi di pannelli devono avere una struttura simmetrica. Lo spessore minimo dello strato esterno è di 3,5 mm, mentre nei pannelli per impieghi costruttivi raggiunge i 5,0 mm.

Contrariamente ai pannelli multistrato ottenuti da legno di Conifere, per i pannelli di legno di Latifoglie non è consentito utilizzare contemporaneamente diverse specie legnose.

I pannelli di legno massiccio multistrato vengono utilizzati soprattutto per elementi a vista con funzione portante e di irrigidimento (tamponature a vista per l'assorbimento dei carichi orizzontali, tetti a capriata semplice a vista, solai con trave inflessa a vista), in quanto il loro prezzo è sensibilmente superiore ai materiali a base di legno alternativi. Grazie alle loro caratteristiche di resistenza e rigidità simili a quelle dei segati, i pannelli di legno massiccio possono essere impiegati con funzione portante in collegamento con i prodotti di tipo lineare dei sistemi intelaiati.

I valori di resistenza e rigidità simili al legno massiccio permettono di realizzare sezioni composite con prestazioni elevate sotto forma di solette nervate e strutture a cassone. In questo caso si creano elementi composti formati da pannelli multistrato e prodotti di legno massiccio.

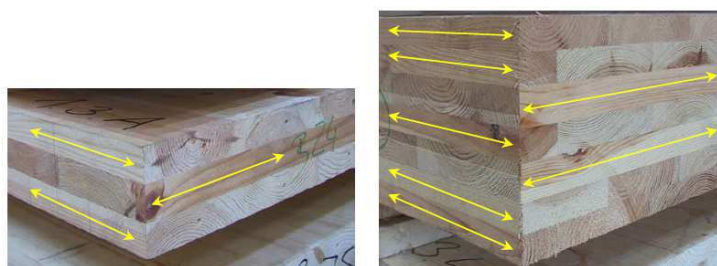


Sezione a cassone.

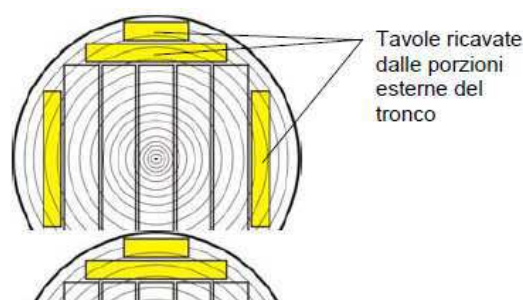
I valori per il dimensionamento e per le verifiche della sicurezza strutturale presenti nelle singole omologazioni devono essere applicati con la dovuta cautela. Se si confrontano infatti le tensioni ammissibili dei diversi produttori, si può osservare un ampio spettro di variabilità, dal quale si deduce che i produttori stessi impiegano per i loro prodotti legno delle più differenti categorie di classificazione, un aspetto del quale non si trova traccia nell'omologazione. Per maggiori chiarimenti è opportuno richiedere informazioni direttamente alle ditte produttrici.

LEGNO COMPENSATO DI TAVOLE

Il materiale di base per la produzione di legno compensato di tavole (BSP) è costituito da tavole allo stato grezzo, ricavate prevalentemente dalle porzioni esterne del tronco. Questo prodotto, considerato nel mondo delle segherie come segato di basso valore in virtù dello scarso valore aggiunto, possiede tuttavia di solito le migliori proprietà in termini di resistenza e rigidezza.



Pannelli di legno compensato di tavole a tre e setti strati.



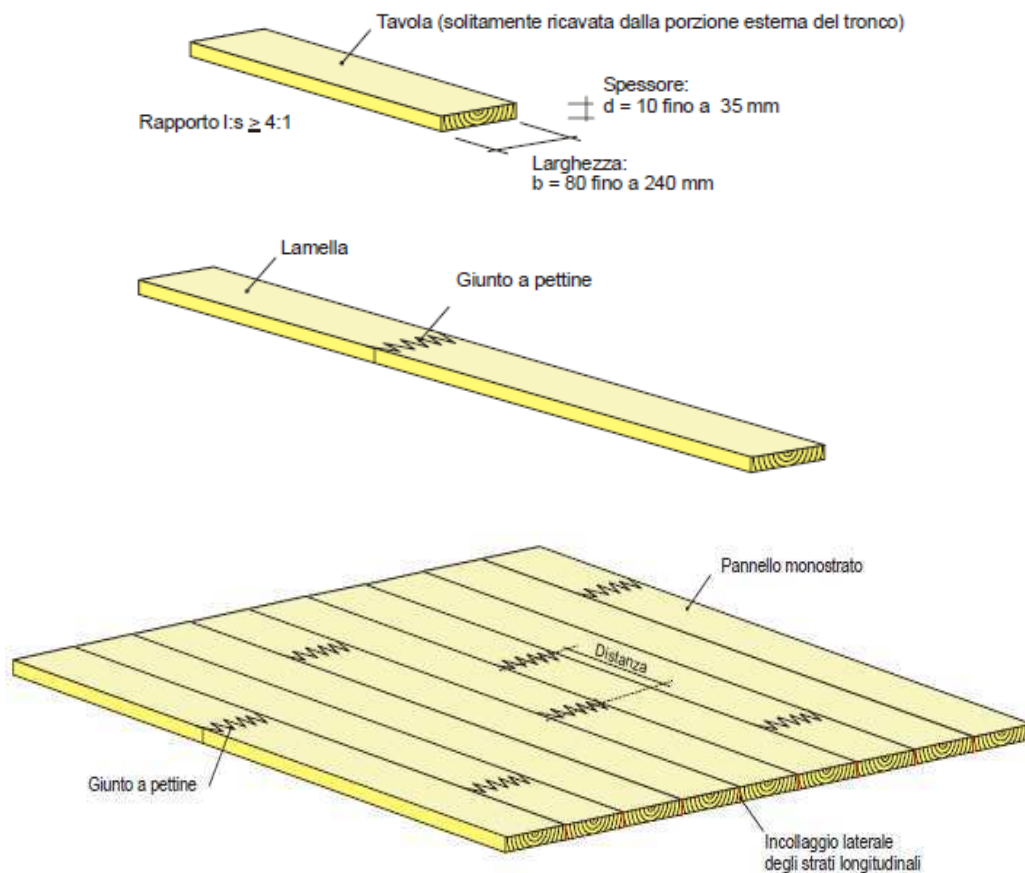
Posizione delle singole tavole all'interno del tronco.

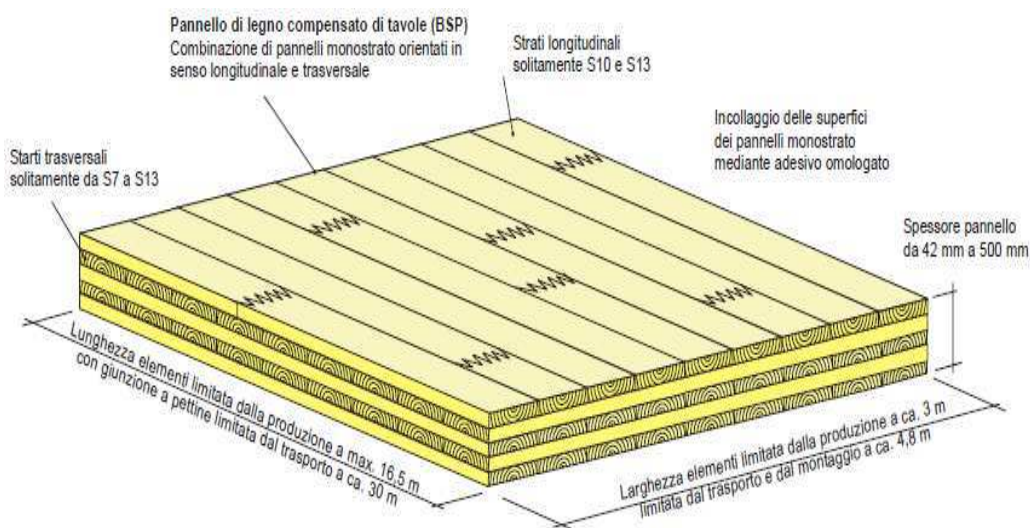
La larghezza delle singole tavole dei pannelli di legno compensato di tavole è compresa normalmente tra 80 mm e 240 mm, lo spessore invece tra 10 mm e 35 mm. Il rapporto tra larghezza e spessore deve essere definito in base alla relazione $l:s \geq 4:1$. Attualmente, per la produzione di pannelli di legno compensato di tavole, si utilizzano le Conifere quali abete rosso, pino, larice e abete bianco.

Le grandezze caratteristiche delle singole tavole, importanti per la determinazione delle caratteristiche del prodotto finito, sono la resistenza a trazione, il modulo E a trazione nonché, in parte, la massa volumica. I singoli strati di un elemento di legno compensato di tavole particolarmente sollecitato dovrebbero essere di qualità adeguata e giuntati a pettine. È comunque preferibile che tutte le lamelle siano giuntate a pettine.

Le lamelle, piallate su quattro lati, possono presentare un andamento dei bordi parallelo, profilato o conico.

Con le lamelle prodotte in questo modo vengono realizzati pannelli monostrato, nei quali, in caso di particolari esigenze riguardo all'ermeticità nei confronti del vento, all'isolamento acustico, all'aspetto, le giunture delle singole lamelle possono essere eseguite mediante incollaggio laterale delle lamelle stesse. In questo modo è possibile ottenere una qualità elevata del compensato di tavole anche dal punto di vista estetico. La struttura tipica di un pannello di legno compensato di tavole è costituita da strati di tavole o pannelli monostrato sovrapposti, orientati alternativamente a 90°. È pensabile anche un orientamento degli strati di tavole per esempio sotto un angolo di 45°. Il collegamento rigido dei singoli pannelli monostrato si realizza mediante incollaggio omogeneo dell'intera superficie e con l'utilizzo di un idoneo sistema di applicazione dell'adesivo.





Struttura di un pannello di legno compensato di tavole a cinque strati, a partire dal materiale di base tavola.

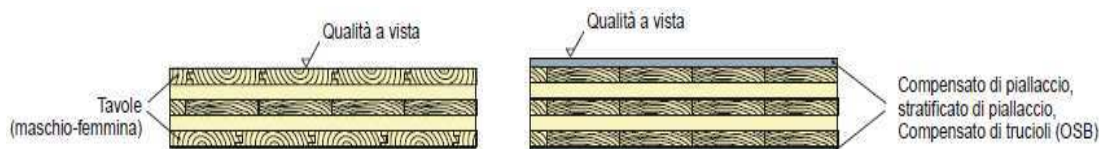
Dimensioni e forma degli elementi di legno compensato di tavole sono determinate dalle restrizioni imposte dalla produzione, dal trasporto e dal montaggio. Attualmente possono essere fabbricati elementi piatti e semplicemente incurvati fino a 16,5 m di lunghezza (con possibilità di raggiungere i 30,0 m) e 4,5 m di larghezza, giuntando le singole lamelle di testa mediante giunti a pettine. Gli spessori sono compresi normalmente tra i 60 mm e i 400 mm, ma possono raggiungere eccezionalmente anche i 500 mm.

Combinazioni diverse di strati longitudinali e trasversali di un elemento di compensato di tavole consentono di ottenere diverse strutture di pannello multistrato, che possono essere ottimizzate rispetto ai requisiti statico-costruttivi e di resistenza al fuoco. Ai fini di una buona distribuzione trasversale, i pannelli possono essere prodotti, ad esempio, con valori di resistenza a flessione uniformati in senso longitudinale e trasversale.

Con strutture a 3 (5) strati si possono produrre pannelli che raggiungono uno spessore di 100 (170) mm circa. Con strutture a 9 strati sono possibili spessori che superano i 300 mm. Per l'impalcato di ponti possono anche essere realizzati pannelli di spessori considerevolmente maggiori.

I requisiti per la produzione dei singoli prodotti di legno compensato di tavole e le direttive per l'impiego degli elementi come componenti portanti e di irrigidimento per costruzioni di legno sono regolamentati dalle omologazioni dei singoli prodotti.

Gli strati esterni in qualità a vista collaboranti alla funzione statica dovrebbero essere incollati, per motivi di simmetria della sezione, su entrambe le facce esterne del pannello di legno compensato di tavole. Questi strati esterni possono essere realizzati con pannelli monostrato a maschio-femmina, compensati di piallacci a 3, 5 o più strati, nonché stratificati di piallacci e compensati truciolari come l'OSB.



Esecuzione degli strati esterni in qualità a vista.

Gli strati esterni staticamente non collaboranti, in base alle esigenze di natura estetica, di resistenza al fuoco e di isolamento acustico, possono essere applicati, mediante incollaggio o bullonatura, sia ad una che ad entrambe le facce del pannello di legno compensato di tavole. Tali strati possono essere realizzati per esempio con pannelli di fibre o di cartongesso.

In virtù delle loro dimensioni, in modo particolare degli spessori, i pannelli di legno compensato di tavole possono essere impiegati per le costruzioni di tipo massiccio. La larghezza di questi pannelli consente, infatti, di realizzare elementi di altezza pari a quella di un piano di edificio e lo spessore garantisce la trasmissione dei carichi verticali e orizzontali sia nel piano del pannello che perpendicolarmente ad esso.

Gli elementi piani portanti di compensato di tavole possono avere una funzione statica di lastra, di piastra o di entrambe contemporaneamente. La struttura della sezione trasversale del compensato di tavole (pannelli monostrato disposti di solito alternativamente ad angolo retto l'uno rispetto all'altro), permette di realizzare con un unico pannello un'adeguata capacità portante longitudinale e trasversale. Inoltre questi pannelli rendono possibile l'assorbimento di carichi concentrati.

Con questi pannelli non sono solo realizzabili pareti esterne ed interne di grandi dimensioni così come elementi per coperture e solai, ma anche scale e balconi e ancora elementi portanti di tipo lineare come travi e pilastri.

Lo spessore di un elemento in compensato di tavole a 5 strati normalmente impiegato per un edificio multipiano (max. 3 piani) è di circa 95 mm (valore orientativo). Lo

spessore minimo di elementi portanti massicci per pareti dipende inoltre dal tipo di prodotto e dalle relative grandezze caratteristiche, tuttavia generalmente non dovrebbe essere mai inferiore a 75 mm. Con pannelli di compensato di tavole a 5 strati di spessore compreso tra 125 mm e 160 mm, a seconda della struttura del pannello e del solaio come anche dell'entità delle sollecitazioni, si possono coprire luci di 4,0-5,0 m, in modo economico.

Per luci maggiori ed elementi parete di altezza maggiore privi di sostegni intermedi sono indicati pannelli nervati con travi incollate di lamellare o sezioni a cassone con montanti di lamellare.

I pannelli di legno compensato di tavole possono essere impiegati anche come impalcato di ponti sotto forma di lastra o collegati a travi di lamellare incollato a formare una soletta nervata.

5 Materiali utilizzati

In questo capitolo si descrivono i materiali utilizzati per la realizzazione della struttura dell'edificio e del modulo.

5.1 Strutture in acciaio

5.1.1 Pilastri e travi

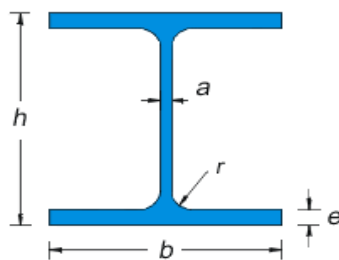
Per i pilastri si è utilizzato il profilo HEB 240; per le travi si è utilizzato invece un profilo HEB 200. La scelta di tali profili deriva da un dimensionamento che viene riportato al capitolo successivo.

Si riportano di seguito le caratteristiche dell'acciaio utilizzato:

- Acciaio:	S355J2W+N (ex 510D)
- Resistenza caratteristica a rottura:	$490 \text{ MPa} \leq f_t \leq 630 \text{ MPa}$
- Resistenza caratteristica a snervamento:	$f_{y,k} \geq 355 \text{ MPa}$
- Coefficiente di sicurezza allo SLU (elastico):	$\gamma_m = 1,05$
- Resistenza a snervamento di progetto:	$f_{y,d} \leq 338,1 \text{ MPa}$
- Massa volumica caratteristica:	$\rho_k = 7850 \text{ kg/m}^3$

Le caratteristiche geometriche dei profili sono riassunte nelle seguenti tabelle:

Travi HEB ad ali larghe parallele - serie normale UNI 5397-78



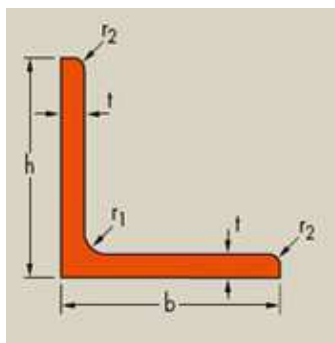
PROFILO HEB 240 - PILASTRO		
b	240	mm
h	240	mm
a	10	mm
e	17	mm
r	21	mm
peso	83,2	kg/m
area	106	cm ²
Jx	11260	cm ⁴
Jy	3923	cm ⁴
Wx	938,3	cm ³
Wy	326,9	cm ³
ix	10,31	cm
iy	6,08	cm
L pilastro	3	m
E	206000	MPa

PROFILO HEB 200 - TRAVE		
b	200	mm
h	200	mm
a	9	mm
e	15	mm
r	18	mm
peso	61,3	kg/m
area	78,08	cm ²
Jx	5696	cm ⁴
Jy	2003	cm ⁴
Wx	569,6	cm ³
Wy	200,3	cm ³
ix	8,54	cm
iy	5,07	cm
L trave	4	m
E	206000	MPa

5.1.2 Profilo Z e profilo L

Entrambi i profili hanno caratteristiche dell'acciaio uguali a quelle riportate al paragrafo precedente.

Il profilo ad L 100 x 6 utilizzato per il sostegno superiore dei tamponamenti ha le seguenti caratteristiche:



PROFILO L 100 X 6		
b	100	mm
h	100	mm
t	6	mm
r1	12	mm
r2	6	mm
peso	9,26	kg/m
area	11,2	cm ²
Jx	111	cm ⁴
Jy	111	cm ⁴
Wx	15,1	cm ³
Wy	15,1	cm ³
ix	3,07	cm
iy	3,07	cm
L	0,1	m
E	206000	MPa

Il profilo Z è invece ottenuto mediante saldatura di tre piatti di spessore 8 mm, in modo da ottenere un profilo di altezza 200 mm e larghezza 108 mm. Con tali dimensioni è possibile garantire al solaio un appoggio di 100 mm e impedire il contatto di questo

profilo con il sottostante profilo Z, che in caso contrario verrebbe caricato, e di conseguenza lo sarebbe anche il tamponamento.

5.1.3 Angolari e piastre

Sono stati utilizzati per le unioni trave-pilastro e pilastro-pilastro, le cui verifiche vengono riportate al capitolo successivo, e anche per le piastre 100 x 8 forate e saldate allo Z per sostenere i tamponamenti alla base.

Le caratteristiche dell'acciaio utilizzato sono uguali a quelle riportate al § 5.1.1.

5.1.4 Spinotti e viti da legno

SPINOTTI

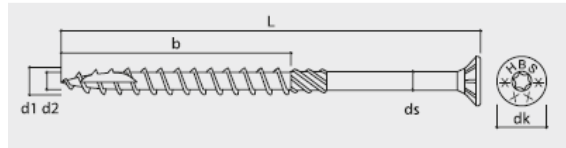
Gli spinotti (o perni) sono elementi cilindrici con superficie completamente liscia, talvolta dotati di una leggera rastremazione ad un estremo per permettere un inserimento più agevole all'interno dei fori predisposti nel legno e nell'acciaio. La foratura del legno deve essere effettuata con diametro uguale a quello degli spinotti, i quali devono essere inseriti a forza all'interno delle pareti lignee da congiungere. Il foro nella piastra di acciaio deve avere diametro pari a quello dello spinotto aumentato di 1 millimetro, e non deve essere effettuato contemporaneamente alla foratura degli elementi in legno, anche per evitare che i trucioli metallici prodotti possano allargare il foro nel legno. Questi tipi di unione dovrebbero essere messi in opera subito dopo l'esecuzione dei fori per evitare che le naturali variazioni dimensionali che subiscono gli elementi di legno per l'igroscopicità del materiale causino la perdita dell'allineamento tra i fori nella piastra di acciaio e quelli nel legno. Gli spinotti si utilizzano in unioni soggette a sforzi di taglio.

Si sono utilizzati spinotti, per connettere il modulo alla trave HEB200, di diametro 16 mm e altezza 30 mm, saldati al profilo a Z in stabilimento con sezione di gola $a = 9\text{mm}$. Ne sono stati disposti due ogni 50 cm sull'ala superiore della trave.

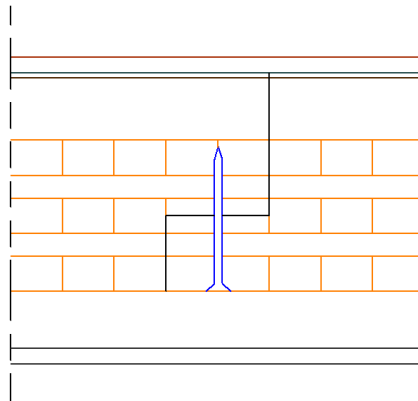
VITI

Nell'assemblaggio del modulo si sono utilizzati vari tipi di viti, tutte di diametro inferiore ai 10 mm e del tipo autofilettanti, la loro messa in opera non necessita quindi dell'esecuzione del preforo.

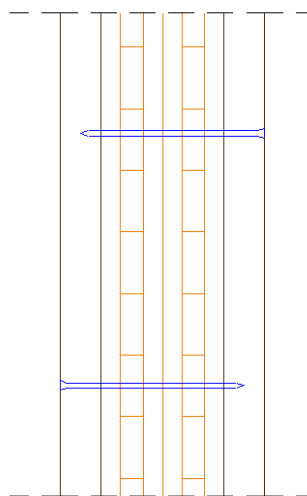
Si sono utilizzate le seguenti viti (misure in mm):



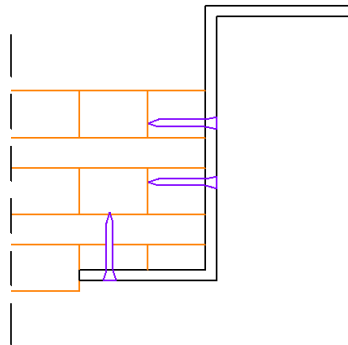
- Vite per legno $d=8$, $h=140$, passo 200 per connessione solaio-solaio;



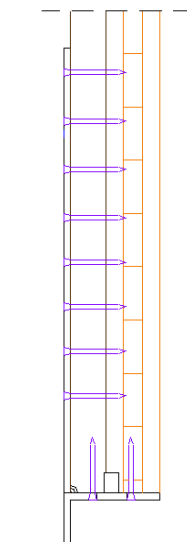
- Vite per legno $d=6$, $h=180$, per connessione tamponamento-tamponamento, disposte con maglia 500 x 500.



- Vite per piastre: d=5, h=50, passo 500 per connessione solaio-profilo Z;



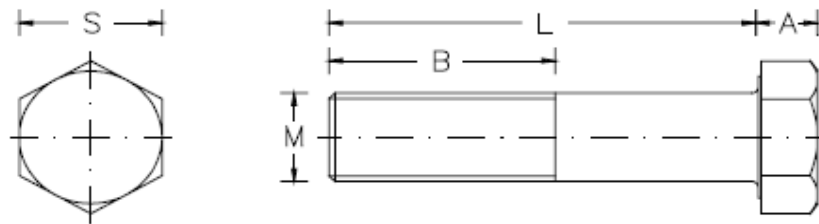
- Vite per piastre: d=5, h=70, utilizzate sulle piastre verticali a sostegno del tamponamento e per connettere Z e tamponamento;



5.1.5 Bulloni

Si sono utilizzati bulloni M12 alta resistenza per connettere pilastri e travi. Le caratteristiche di tali elementi sono di seguito riassunte:

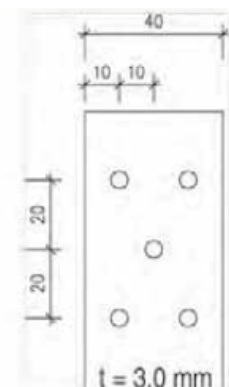
- Classe 10.9 alta resistenza secondo UNI 3740 e 20898 parte I e II
- Resistenza caratteristica a rottura: $f_{tk} \geq 1000 \text{ MPa}$
- Resistenza caratteristica allo snervamento: $f_{yk} \geq 900 \text{ MPa}$
- Viti in acciaio secondo UNI 5712: 10.9



Bulloni.

5.1.6 Nastro forato di controvento

Il nastro utilizzato ha larghezza di 40 mm e spessore pari a 3 mm ed è collegato alle ali inferiori delle travi con due chiodi sparati di diametro 4,5 mm e altezza 25 mm (in grado di passare lo spessore delle ali delle travi), e al solaio in legno tramite chiodi ogni 20 cm. La funzione di questo elemento è quella di formare, assieme al solaio, il cosiddetto piano rigido.



GH - Windrispenband					
Abmessung	Gewicht kg	Artikel Nr.	EAN 4019346	VE Stk	Preis €/Stk.
B x L x T [mm]					
40 x 50.000 x 3,0	40,500	453	140017	1	335,00

Nastro forato.

5.2 Strutture in calcestruzzo

5.2.1 Calcestruzzo per platea di fondazione

La platea di fondazione si realizza in calcestruzzo C25/30, le cui caratteristiche sono di seguito riassunte:

- Resistenza cubica caratteristica:	$R_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Resistenza cilindrica caratteristica:	$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$
- Resistenza cilindrica media:	$f_{cm} = 33 \text{ MPa}$
- Resistenza a trazione media:	$f_{ctm} = 2,56 \text{ MPa}$
- Resistenza a flessione media:	$f_{ctfm} = 3,07 \text{ MPa}$
- Modulo elastico:	$E_{cm} = 30472 \text{ MPa}$
- Modulo elastico fessurato:	$E_c = 15236 \text{ MPa}$
- Verifica agli SLU:	$\gamma_c = 1,5$
- Resistenza cilindrica di progetto:	$f_{cd} = 14,2 \text{ MPa}$
- Resistenza a trazione di progetto:	$f_{ctd} = 1,7 \text{ MPa}$
- Deformazione ultima di progetto:	$\varepsilon_{cu} = - 3,5 \text{ ‰}$
- Verifica agli SLE:	$\gamma_c = 1$
- Combinazione rara:	$f_{cd}=0,6 f_{ck}=15 \text{ MPa}$
- Combinazione quasi-permanente:	$f_{cd} = 0,45 f_{ck} = 11,25 \text{ MPa}$
- Combinazione frequente:	$w < 0,3 \text{ mm}$

5.2.2 Acciaio per c.a. in barre ad aderenza migliorata (B450C)

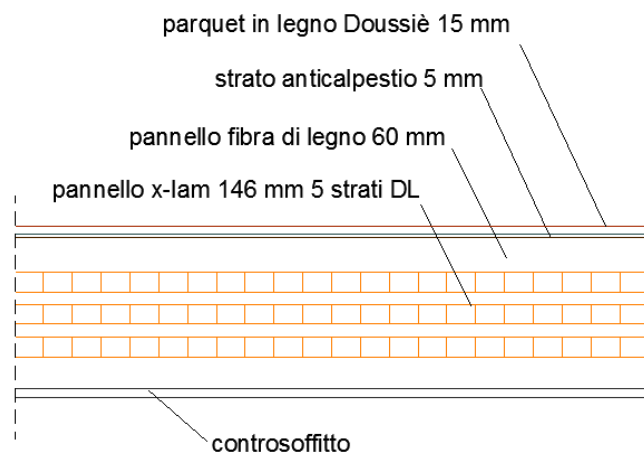
Le caratteristiche delle barre d'armatura utilizzate per realizzare le reti per la fondazione hanno le seguenti caratteristiche:

- Resistenza caratteristica a rottura	$f_{tk} = 540 \text{ MPa}$
- Resistenza caratteristica allo snervamento	$f_{yk} = 450 \text{ MPa}$
- Modulo elastico:	$E_s = 210000 \text{ MPa}$
- Verifica agli SLU:	$\gamma_s = 1,15$

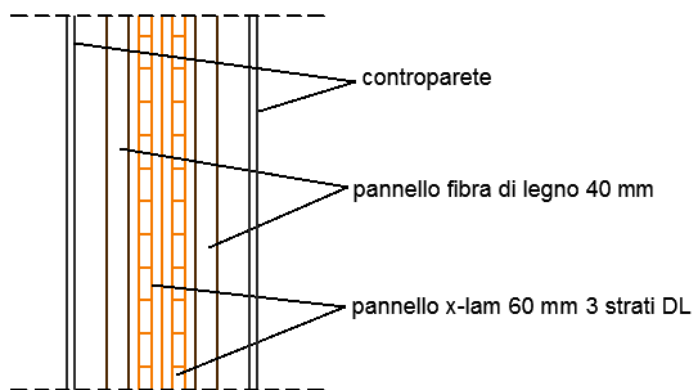
- Resistenza allo snervamento di progetto: $f_{yd} = 391,3 \text{ MPa}$
- Deformazione ultima di progetto: $\epsilon_{yu} = 10 \text{ ‰}$
- Verifica agli SLE: $\gamma_s = 1$
- Resistenza allo snervamento di progetto: $f_{yd} = 450 \text{ MPa}$

5.3 Solaio e tamponamenti

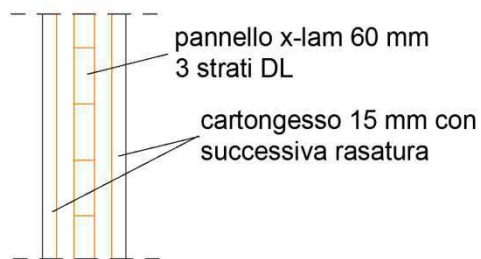
Tali elementi sono stati realizzati con le seguenti stratigrafie:



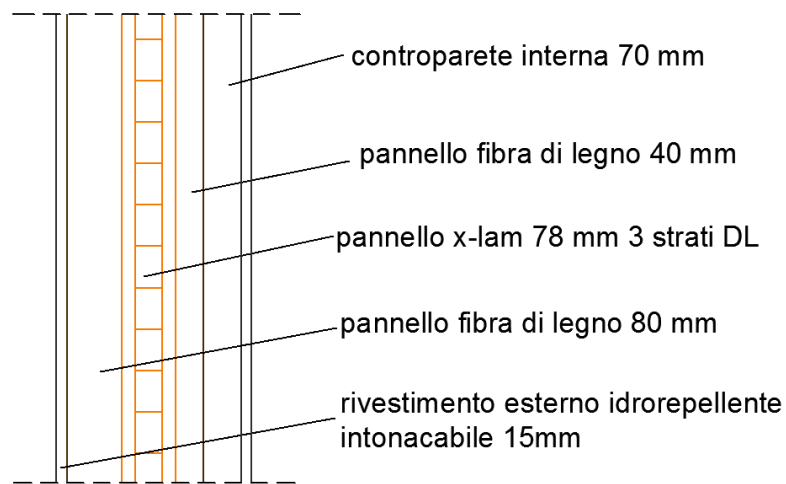
Stratigrafia del solaio.



Stratigrafia del tamponamento divisorio tra due appartamenti, realizzato tramite accostamento di due porzioni separate.



Stratigrafia di un tamponamento interno agli appartamenti.

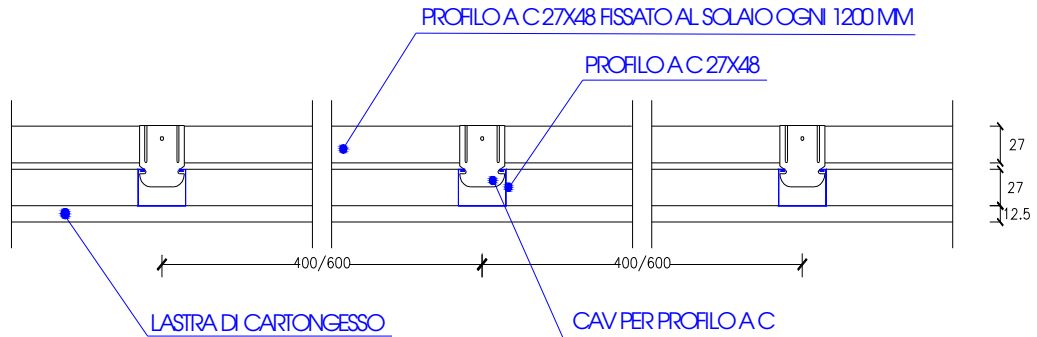


Stratigrafia tamponamento esterno.

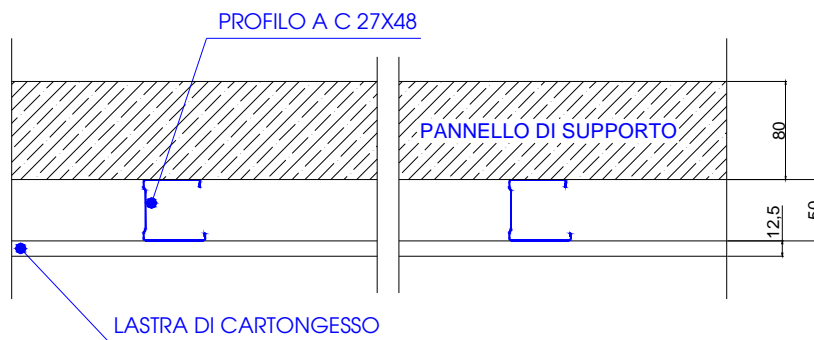
5.3.1 Controsoffitti e contropareti

Si sono inseriti sui soffitti e su molte delle pareti interne per mascherare la presenza degli impianti; in entrambi i casi si sono utilizzati pannelli in cartongesso di spessore 12,5 mm, sostenuti tramite profili a C chiodati alla parete o al solaio. Si riportano di seguito delle immagini relative a questi elementi.

SEZIONE CONTROSOFFITTO



SEZIONE CONTROPARETE



5.3.2 Pannelli di fibra di legno

Questo materiale è stato ampiamente descritto nel capitolo 4; si riportano le caratteristiche di tali pannelli utilizzati per l'isolamento termico e acustico di pavimento e pareti:

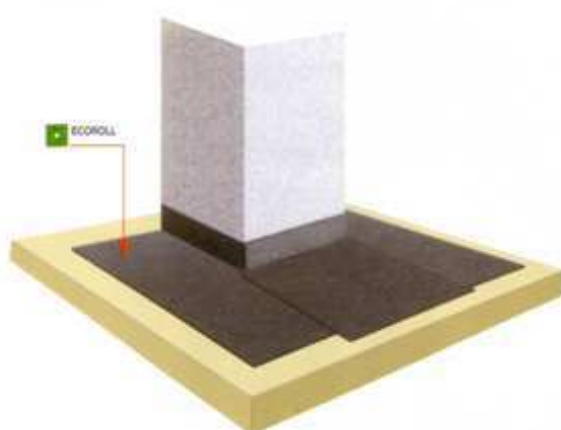


Si è utilizzato questo pannello di densità 260 kg/m^3 in vari spessori, ed è caratterizzato da resistenza alla compressione superiore a 100 kPa .

5.3.3 Tappeto rigido anticalpestio

Il tappeto rigido anticalpestio viene disposto sopra al pannello XLAM. Sottoforma di rotolo, serve per l'isolamento aereo e strutturale dai rumori da calpestio, realizzato mediante l'agglomerazione di microgranuli di gomma vulcanizzata ad alta densità, con elevatissima elasticità e flessibilità, alta resistenza alla lacerazione, allo strappo e al passaggio.

Ha uno spessore di 5 mm e viene applicato sotto i pavimenti in legno come nel caso in esame.



Le caratteristiche di tale materiale sono:

- Stabilità termica: da -30°C a $+80^\circ\text{C}$

- Densità: 750/800 kg/mc
- Resistenza alla trazione: DIN 53455 >0,4
- Conduttività termica: DIN 52612 0,14 W/mK
- Reazione al fuoco: DIN 4102 Part.1 B2
- Permeabilità al vapore: permeabile
- Miglioramento dell'isolamento al calpestio: Lnw: 48,5 dB; ΔL: 24,5 dB

5.3.4 Pannelli XLAM

I pannelli a strati incrociati di legno massiccio sono già stati descritti nel capitolo 4. Si riportano in questo paragrafo alcuni approfondimenti essendo il materiale che è stato utilizzato nel progetto del modulo abitativo oggetto di questa tesi.

Si tratta di un materiale recente nato alla fine degli anni '90 in Austria e Germania.

I pannelli di legno massiccio a strati incrociati XLAM sono pannelli di grandi dimensioni, formati da più strati di tavole, sovrapposti e incollati uno sull'altro in modo che la fibratura di ogni singolo strato sia ruotata nel piano del pannello di 90° rispetto agli strati adiacenti. Il numero di strati e il loro spessore può variare in relazione al tipo di pannello e al produttore dello stesso. Il numero minimo di strati per ottenere un pannello XLAM è di 3; va sottolineato che per ottenere un comportamento fisico e meccanico efficace sotto tutti i punti di vista e corrispondente alla definizione di elemento multistrato, il numero minimo di strati dovrebbe essere pari a 5. Il pannello formato da 3 strati presenta nel proprio piano un direzione particolarmente debole dal punto di vista delle caratteristiche strutturali e meccaniche; il pannello a 3 strati è e resta un pannello XLAM a tutti gli effetti.

I pannelli XLAM sono prodotti con legno di conifera, come la maggior parte degli elementi di legno per uso strutturale realizzati secondo le tecnologie più moderne. La produzione normale di pannelli XLAM è quindi realizzata con legno di abete (in prevalenza abete rosso); è possibile la produzione anche con il legno del larice e della douglasia.

Il pannello XLAM non è un materiale o un prodotto definito da una specifica normativa di prodotto o da una regolamentazione del materiale. Sarà cura del singolo produttore di dotarsi di certificazione di tale materiale.

LO STRATO DI TAVOLE

I singoli strati di tavole sono composti da tavole di spessore variabile, di regola tra 15 e 30 mm. La larghezza delle singole tavole è pure variabile e si situa di regola tra gli 80 e 240 mm.

Le tavole usate per la produzione di pannelli XLAM devono rispettare i medesimi criteri delle tavole per la produzione di legno lamellare incollato. Si tratta cioè di materiale classificato secondo la resistenza e appartenente ad una ben precisa classe di resistenza.

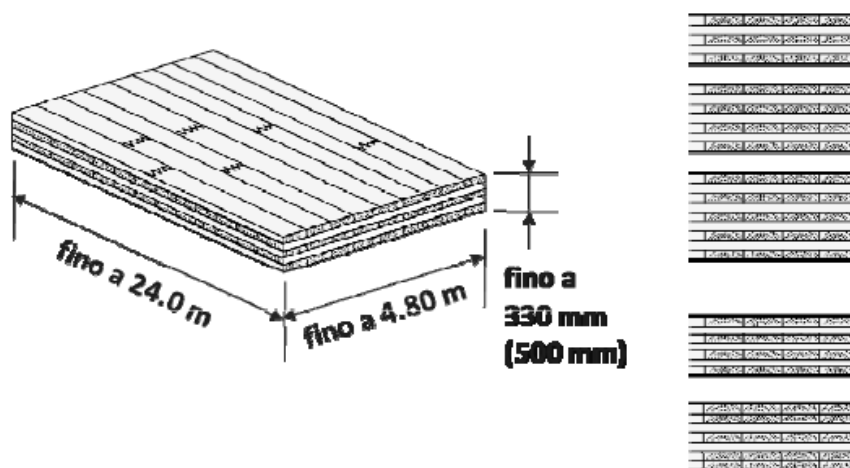
La produzione delle tavole avviene sulla base delle seguenti fasi di lavorazione:

- taglio delle tavole (o lamelle);
- essiccazione;
- classificazione in classi di resistenza;
- giunti longitudinali delle lamelle: le singole lamelle che formano il singolo strato di tavole sono continue per tutta la lunghezza del pannello, in modo da garantire la continuità strutturale dello strato per tutta la lunghezza del pannello; la giunzione longitudinale delle tavole è a pettine e incollata (stessa tecnologia di produzione del legno lamellare incollato);
- giunti trasversali delle tavole: il collegamento trasversale tra le singole tavole può essere realizzato in modi diversi. In alcuni casi le tavole sono incollate l'una all'altra anche nella direzione trasversale, in altri casi esse sono accostate in modo da creare una superficie omogenea senza che il giunto tra una tavola e l'altra sia visibile, in altri casi ancora la superficie di contatto tra le tavole non è particolarmente curata e può restare un'intercapedine visibile tra le due tavole.

DIMENSIONI E FORMATI DELL'XLAM

Non esistendo una definizione generica del prodotto, ogni produttore ha sviluppato e definito la propria offerta in merito alla disponibilità di dimensioni e composizione del proprio "prodotto XLAM".

In modo generale si può affermare che i pannelli XLAM sono disponibili in dimensioni che possono raggiungere i 24 m in una direzione, i 4.8 m nell'altra, e uno spessore di 0.5 m. Entro questi limiti, le dimensioni massime della produzione del singolo pannello variano in modo notevole. In modo altrettanto notevole variano le dimensioni dello spessore dei singoli strati e della composizione del pannello: in alcuni casi si producono pannelli con strati doppi, in modo da ottenere una prevalenza delle caratteristiche meccaniche in una delle due direzioni del piano del pannello.



Dimensioni massime ed esempi della composizione della stratigrafia dei pannelli XLAM.

CARATTERISTICHE FISICHE

L'XLAM è a tutti gli effetti un elemento di legno massiccio, dove la struttura del legno non ha subito alcuna modifica dal punto di vista fisico, chimico e biologico. Facendo quindi le dovute riserve riguardo agli adesivi usati per l'incollatura, si può affermare che si tratta di legno massiccio al suo stato naturale, in modo assolutamente simile al legno lamellare incollato.

I pannelli XLAM sono ammessi all'uso nelle classi di servizio 1 e 2: il loro uso è quindi limitato alle situazioni che non ne compromettono la durabilità, o in condizioni da escludere ogni fenomeno di degrado biologico. Si ricorda che la classe di servizio 1 corrisponde agli ambienti interni e riscaldati, mentre la classe di servizio 2 corrisponde agli ambienti esterni, ma escludendo sia il contatto diretto con l'acqua che l'esposizione diretta alle intemperie. Le variazioni attendibili delle dimensioni di un pannello XLAM,

nel suo piano, sono quindi teoricamente al massimo dello 0,1%, cioè di meno di 1 mm per metro lineare.

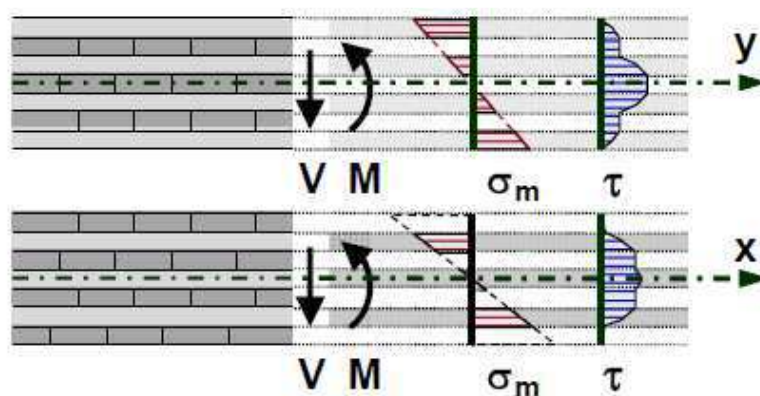
Si può quindi affermare che i pannelli XLAM presentano una stabilità dimensionale praticamente completa e totale per quanto concerne le dimensioni nel loro piano.

Sul lato dello spessore del pannello, invece, il materiale assume la direzione perpendicolare alla fibratura in tutti gli strati, per questa ragione le variazioni di umidità del legno si traducono in variazioni dello spessore del pannello. In questo caso, le dimensioni assolute dello spessore del pannello essendo comunque limitate, e le condizioni climatiche variando solo fra la classe di servizio 1 e la classe di servizio 2, le conseguenze del ritiro e del rigonfiamento possono essere definite come non problematiche.

SOLETTE DI LEGNO MASSICCIO XLAM

La maggior parte delle solette XLAM possono essere considerate come elementi strutturali inflessi lineari, in quanto gli effetti strutturali della lastra si manifestano solo in prossimità degli angoli o, comunque, in zone ridotte.

Il sistema strutturale della soletta può essere analizzato sulla base del modello della trave inflessa.



Distribuzione delle tensioni di flessione e di taglio sulla sezione.

Gli strati orientati trasversalmente rispetto alla direzione considerata assumono comunque una funzione essenziale, garantendo il collegamento rigido tra i diversi strati di cui si compone il pannello.

PARETI DI LEGNO MASSICCIO XLAM

Nel caso del modulo in esame la parete non è caricata da carichi verticali in alcun modo, ciò è garantito dalla presenza di determinati spazi tra parete di tamponamento e le altre strutture ad essa collegate.

Lo spessore è determinato quindi da esigenze di rigidità dovute all'azione dei carichi orizzontali e dalle esigenze legate all'isolamento fonico, alla presenza di una massa sufficiente nella costruzione e alla necessità di offrire, comunque, anche localmente o in presenza di aperture anche di piccola dimensione, una sufficiente rigidità e resistenza dell'elemento strutturale.

In questo caso quindi la parete viene calcolata come elemento inflesso da carichi perpendicolari al proprio piano, per cui di preferenza gli strati esterni del pannello saranno orientati nella direzione verticale.

SCELTE PROGETTUALI

I pannelli utilizzati per la realizzazione del modulo abitativo sono stati scelti da un catalogo di pannelli XLAM. Si riportano di seguito alcuni stralci dei cataloghi utilizzati.

Pannelli DQ (strati superficiali orientati rispetto all'asse trasversale del pannello):

		Spessori dei singoli strati				
mm	strati	1	2	3	4	5
57	3 s	19	19	19		
72	3 s	19	34	19		
94	3 s	30	34	30		
95	5 s	19	19	19	19	19
128	5 s	30	19	30	19	30
158	5 s	30	34	30	34	30

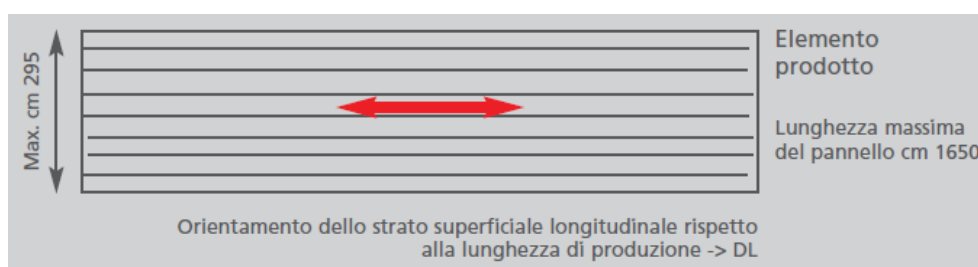
Pannelli DL (strati di copertura in direzione della lunghezza dei pannelli):

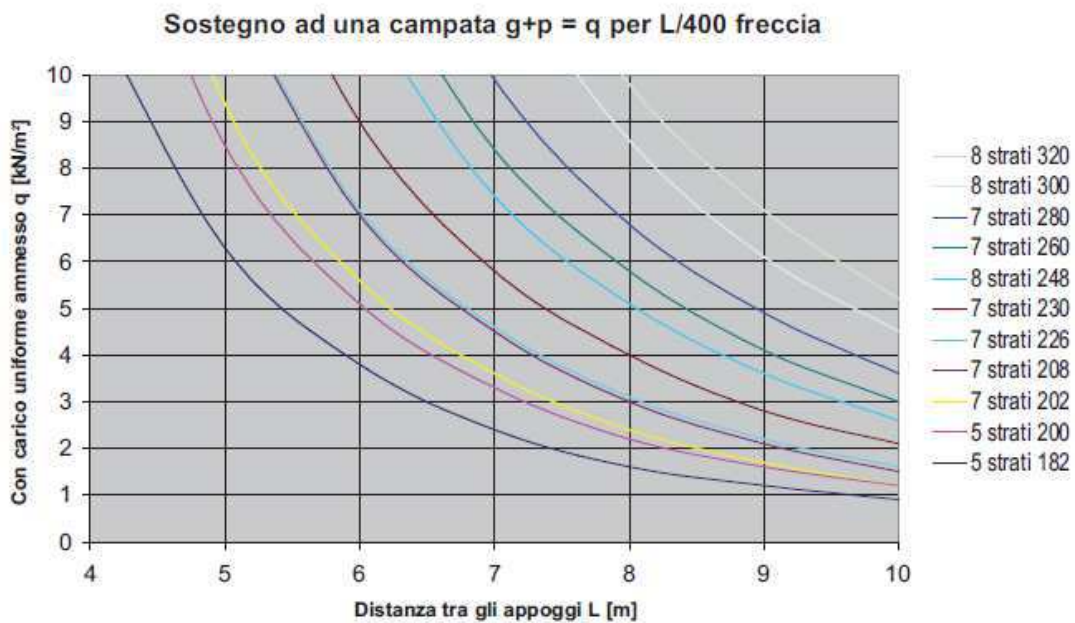
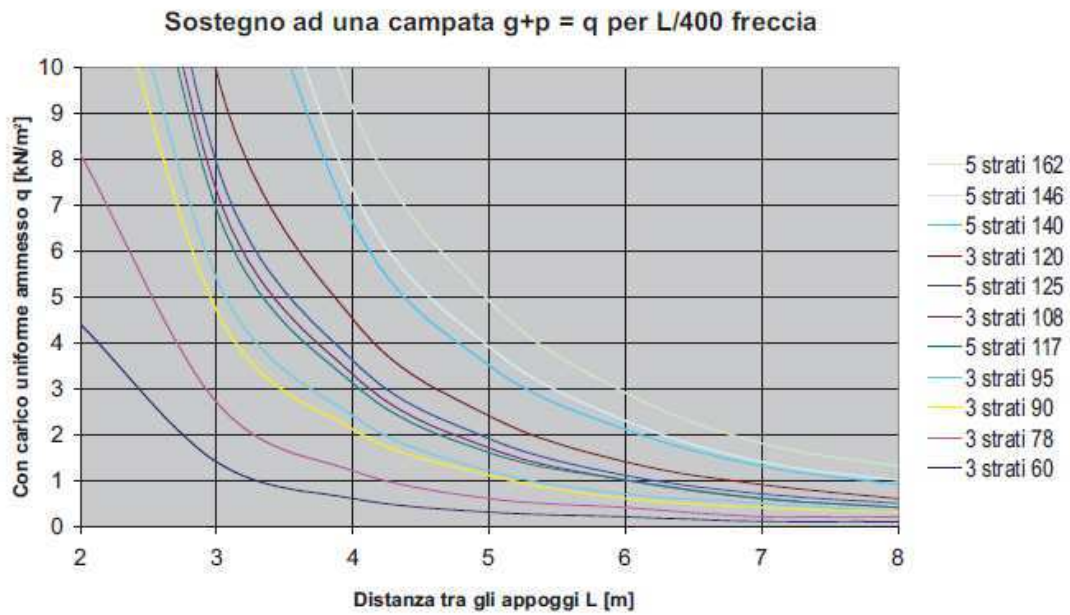
		Spessori dei singoli strati						
mm	strati	1	2	3	4	5	6	7
60	3 s	19	22	19				
78	3 s	19	40	19				

90	3	s	34	22	34				
95	3	s	34	27	34				
108	3	s	34	40	34				
120	3	s	40	40	40				
117	5	s	19	30	19	30	19		
125	5	s	19	34	19	34	19		
140	5	s	34	19	34	19	34		
146	5	s	34	22	34	22	34		
162	5	s	34	30	34	30	34		
182	5	s	34	40	34	40	34		
200	5	s	40	40	40	40	40		
208	7*	ss	68	19	34	19	68		
230	7*	ss	68	30	34	30	68		
248	8*	ss	68	22	68	22	68		
202	7	s	34	22	34	22	34	22	34
226	7	s	34	30	34	30	34	30	34

Per la realizzazione di solai e pareti portanti si sono utilizzati pannelli DL di spessore 60, 78 e 146 mm a tre o cinque strati, le cui caratteristiche geometriche sono consultabili dalle tabelle precedenti.

Per il predimensionamento del solaio si sono utilizzati grafici di misurazione che vengono di seguito riportati:





In caso di deformazioni ammesse più elevate, il valore in tabella può essere calcolato secondo la seguente equazione: $q_{L/300} = q_{L/400} \frac{400}{300}$.

I pannelli a 3 strati con tavole laterali dello spessore di 34 mm corrispondono ad un valore REI 30, con carichi normali dell'edilizia soprassuolo.

I pannelli a 5 e 7 strati corrispondono ad un valore REI 60, in presenza di carichi normali dell'edilizia soprassuolo.

Per il solaio si è scelto un pannello XLAM di 146 mm di spessore; si è utilizzato il primo grafico tra i due riportati sopra, e si sono considerati appoggi distanti 4m e un carico totale di circa 7 kN/mq.

Si riportano di seguito le caratteristiche degli specifici pannelli XLAM usati come pareti o come solai:

SOLLECITAZIONE COME PANNELLO			
Modulo E – parallelo alle fibre		12000 N/mm ²	parallelo alle fibre per gli strati in direzione di carico
Modulo E – verticale alle fibre		370 N/mm ²	
Modulo G degli strati trasversali		50 N/mm ²	per deformazione di scorrimento come cuscinetto
Curvatura	ammessa σ_B	10 N/mm ²	
Trazione	ammessa σ_Z	8.5 N/mm ²	
Trazione	ammessa σ_Z , normale	0.05 N/mm ²	evitare la trazione trasversale costruttiva
Pressione	ammessa $\sigma_{D II}$	10 N/mm ²	parallela alle fibre per gli strati in direzione di carico
Pressione	ammessa σ_D normale	2.5 N/mm ²	verticale alle fibre
Pressione	ammessa σ_D normale	3 N/mm ²	verticale alle fibre – piccole ammaccature trascurabili
Spinta	ammessa τ_q	0.6 N/mm ²	sollecitazione da forza trasversale



SOLLECITAZIONE COME DISCO			
Modulo E – parallelo alle fibre		12000 N/mm ²	parallelo alle fibre per gli strati in direzione di carico
Modulo E – verticale alle fibre		370 N/mm ²	
Modulo G degli strati in direzione di carico		250 N/mm ²	per deformazione da spinta
Curvatura	ammessa σ_B	10 N/mm ²	
Trazione	ammessa σ_Z	8.5 N/mm ²	
Pressione	ammessa $\sigma_{D II}$	10 N/mm ²	parallela alle fibre per gli strati in direzione di carico
Pressione	ammessa $\sigma_{D II}$, locale	14 N/mm ²	locale per punti di inizio carico
Pressione	ammessa σ_D normale	2.5 N/mm ²	verticale alle fibre
Pressione	ammessa σ_D normale	3 N/mm ²	verticale alle fibre – piccole ammaccature trascurabili
Cesoiamento	ammessa τ_a	2.0 N/mm ²	per gli strati riferiti alla direzione di carico
Spinta (inf Q)	ammessa τ_q	2.2 N/mm ²	per gli strati riferiti alla direzione di carico



6 Dimensionamento e verifiche

6.1 Combinazioni di carico

In riferimento all' analisi di carico, che verrà effettuata, sono stati considerati i seguenti casi di carico elementari, impiegati poi nelle combinazioni di verifica ai vari Stati Limite:

- G_1 : carichi permanenti strutturali
- G_2 : carichi permanenti non strutturali
- Q : variabili
- S : azioni derivanti da terremoto

I casi di carico elementari sono stati poi combinati secondo i coefficienti dei vari stati limite presenti nella Normativa NTC 2008.

Le combinazioni di carico sono stabilite, in modo da garantire la sicurezza, secondo quanto prescritto dal D.M. 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni).

In accordo al § 2.5.3 del D.M. 14/01/08 “Combinazioni delle azioni”, ai fini delle verifiche degli stati limite si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni (con il simbolo “+” si intende “combinato con”):

Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \times G_1 + \gamma_{G2} \times G_2 + \gamma_P \times G_P + \gamma_{Q1} \times Q_{k1} + \gamma_{Q2} \times \psi_{02} \times Q_{k2} + \gamma_{Q3} \times \psi_{03} \times Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \times Q_{k2} + \psi_{03} \times Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \psi_{23} \times Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \psi_{23} \times Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (§ 3.2 D.M. 14/01/08):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$

Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto Ad (§ 3.6 D.M. 14/01/08):

$$G_1 + G_2 + P + Ad + \psi_{21} \times Q_{21} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

Nelle combinazioni per SLE, si intende che vengono omessi i carichi Q_{kj} che danno un contributo favorevole ai fini delle verifiche e, se del caso, i carichi G_2 .

Altre combinazioni sono da considerare in funzione di specifici aspetti (per esempio fatica, ecc.).

La Tab. 2.6.I D.M. 14/01/08 fornisce i valori dei coefficienti parziali delle azioni da assumere nell'analisi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli stati limite ultimi.

Tabella 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

		Coefficiente γ_F	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali ⁽¹⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	favorevoli	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

I valori dei coefficienti ψ_{0j} , ψ_{1j} , ψ_{2j} per le diverse categorie di azioni sono riportati nella Tab. 2.5.I D.M. 14/01/08, riportata di seguito.

2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

6.2 Analisi dei carichi

6.2.1 Carichi permanenti e accidentali

Si presenta di seguito l'analisi dei carichi necessaria alla determinazione delle sollecitazioni da utilizzare in fase di verifica.

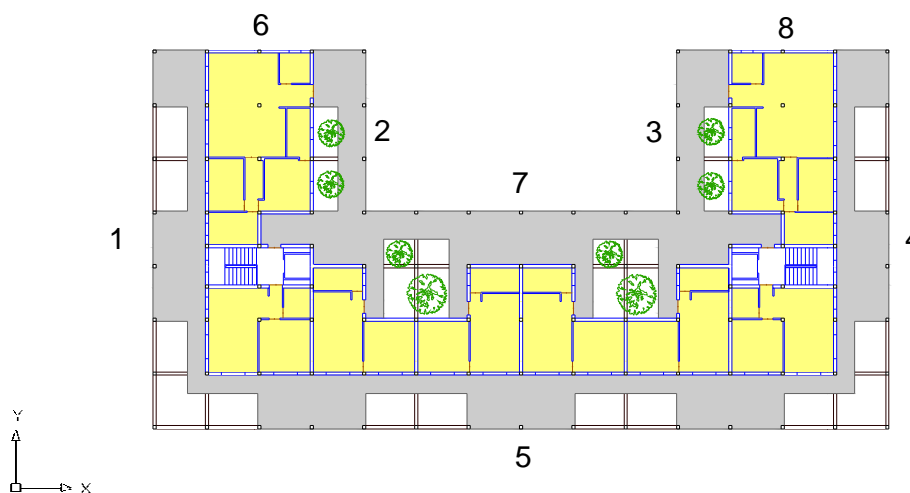
ANALISI DEI CARICHI		
G1:		
PP pilastro	0,8162	kN/m
PP trave	0,6014	kN/m
G2:		
cartongesso (14,5 kg/m ²); s=15 mm	0,1422	kN/mq
nastro forato controvento (78,5 kN/m ³)	0,00942	kN/m

PP profilo omega	0,4867	kN/m
PP solaio		
pavimento (800kg/m ³); s=15 mm	0,1177	kN/mq
strato anticalpestio (800 kg/m ³); s=5 mm	0,0392	kN/mq
fibra di legno (260 kg/m ³); s=60 mm	0,1530	kN/mq
pannello x-lam (500kg/m ³); s=146 mm	0,7161	kN/mq
Totale	1,0261	kN/mq
PP tamponamenti interni (200 mm)		
pannello x-lam (500kg/m ³); s=120 mm	0,5886	kN/mq
fibra di legno (260 kg/m ³); s=80 mm	0,2040	kN/mq
Totale	0,7926	kN/mq
PP tamponamenti interni (90 mm)		
pannello x-lam (500kg/m ³); s=60 mm	0,5886	kN/mq
PP tamponamenti esterni		
pannello x-lam (500kg/m ³); s=80 mm	0,3924	kN/mq
fibra di legno (260 kg/m ³); s=120 mm	0,3061	kN/mq
Totale	0,6985	kN/mq
Q:		
PP accidentali (edifici residenziali)	2	kN/mq
PP accidentali (scale, parti comuni)	4	kN/mq
Neve:		
μ_1	0,8	
qsk (zona II; as<200m)	1	kN/mq
Ce	1	
Ct	1	
qs	0,8	kN/mq
Vento:		
vb = vb0 (zona 1; as<a0)	25	m/s
qb	390,625	N/mq

ce (cl. rugosità D; categ. esposiz. 2; $z > z_{min}$)	2,47	
cd	1	
cpe pareti (pressione)	0,8	
cpe pareti (depressione)	-0,4	
cpe tetto piano	-0,4	
p pareti (pressione)	771,66	N/mq
p pareti (depressione)	-385,83	N/mq
p tetto	-385,83	N/mq

Il carico da neve (0,8 kN/mq) non è stato considerato nelle combinazioni di carico in quanto ritenuto non concomitante con il carico accidentale tipico di terrazze suscettibili di affollamento (4 kN/mq) e perché meno gravoso rispetto a quest'ultimo.

Per il vento, invece, si sono considerate tre diverse combinazioni, che differiscono in base alla direzione del vento; le pareti sono state numerate nel seguente modo:



Per le pareti non direttamente investite dal vento (pressione o depressione) si è considerata una riduzione della pressione del 25%; i tre casi considerati sono i seguenti:

CASO 1: VENTO IN +X	
Pareti	p [N/m ²]
1	771,66

2	-385,83
3	578,74
4	-289,37

CASO 2: VENTO IN +Y	
Pareti	p [N/m ²]
5	771,66
6	-385,83
7	-385,83
8	-385,83

CASO 3: VENTO IN -Y	
Pareti	p [N/m ²]
5	-385,83
6	771,66
7	771,66
8	771,66

Non si è considerato il caso del vento in direzione $-X$ perché l'edificio è simmetrico rispetto all'asse y , sarebbe quindi del tutto analogo al caso del vento in direzione X .

Il carico da vento sulle varie pareti è stato poi ripartito tra i vari piani considerando per i primi tre un'altezza di 3 m, per l'ultimo altezza di 1,5 m.

6.2.2 Azione sismica

VITA NOMINALE

La vita nominale dell'opera strutturale V_N , intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata, è assunta per la struttura in oggetto $V_N \geq 50$ anni (Tab. 2.4.I - NTC 2008).

CLASSE D'USO

Le strutture, in presenza di azioni sismiche, sono suddivise secondo il § 2.4.2 delle NTC 2008 in classi d'uso. Per la struttura in oggetto è stata assunta la classe d'uso II, ovvero: *Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.*

PERIODO DI RIFERIMENTO

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione con la seguente espressione:

$$V_R = V_N C_U$$

Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito al variare della classe d'uso e si può ricavare dalla tabella 2.4.II delle NTC2008; per la struttura in oggetto vale 1.

Il periodo di riferimento è quindi pari a $V_R = 50$ anni.

STATI LIMITE

Le Norme Tecniche prevedono i seguenti stati limite riguardo all'azione sismica:

Tabella 3.2.I – Probabilità di superamento P_{V_R} al variare dello stato limite considerato

Stati Limite		P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Nel caso in esame la struttura è progettata considerando lo stato limite ultimo SLV, e lo stato limite di esercizio SLD.

DEFINIZIONE DEGLI SPETTRI DI RISPOSTA

Nel caso in esame si è fatto riferimento ad un foglio di calcolo excel creato appositamente dal ministero delle infrastrutture, nel quale, inserendo il luogo di costruzione dell'opera (si è considerato il Lido di Jesolo), i dati elencati nei paragrafi precedenti e le caratteristiche del terreno, si ottengono in output gli spettri di risposta:

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE
12,6368

LATITUDINE
45,5356

Ricerca per comune

REGIONE
Veneto

PROVINCIA
Venezia

COMUNE
Jesolo

Elaborazioni grafiche

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento



Controllo sul reticolo
 Sito esterno al reticolo
 Interpolazione su 3 nodi
 Interpolazione corretta

Interpolazione
 superficie rigata

La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) - V_N info

Coefficiente d'uso della costruzione - c_U info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) - V_R info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) - T_R info

Stati limite di esercizio - SLE	SLO - $P_{VR} = 81\%$	30
	SLD - $P_{VR} = 63\%$	50
Stati limite ultimi - SLU	SLV - $P_{VR} = 10\%$	475
	SLC - $P_{VR} = 5\%$	975

Elaborazioni

Grafici parametri azione

Grafici spettri di risposta

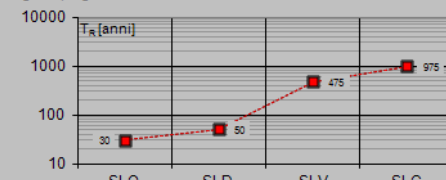
Tabella parametri azione

LEGENDA GRAFICO

---□--- Strategia per costruzioni ordinarie

---■--- Strategia scelta

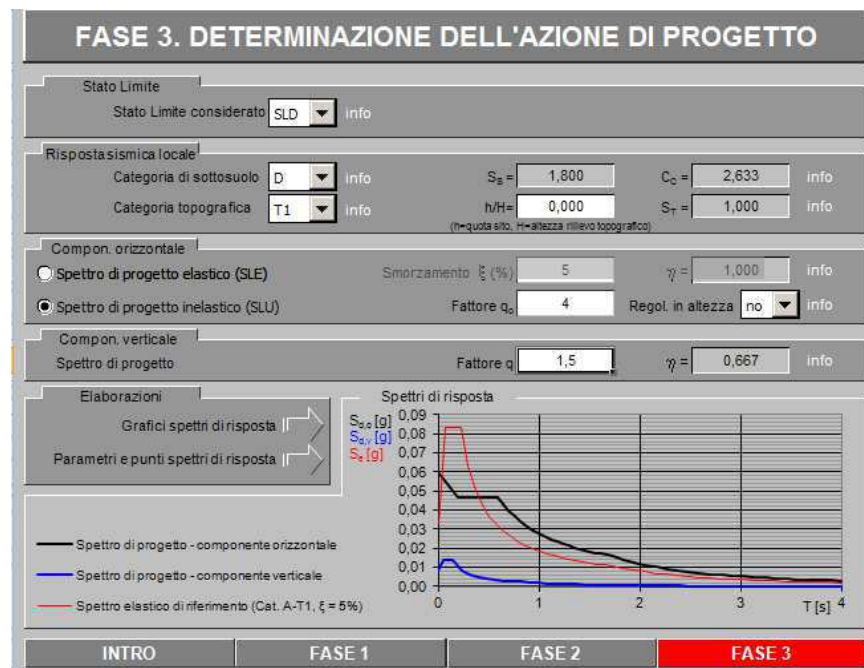
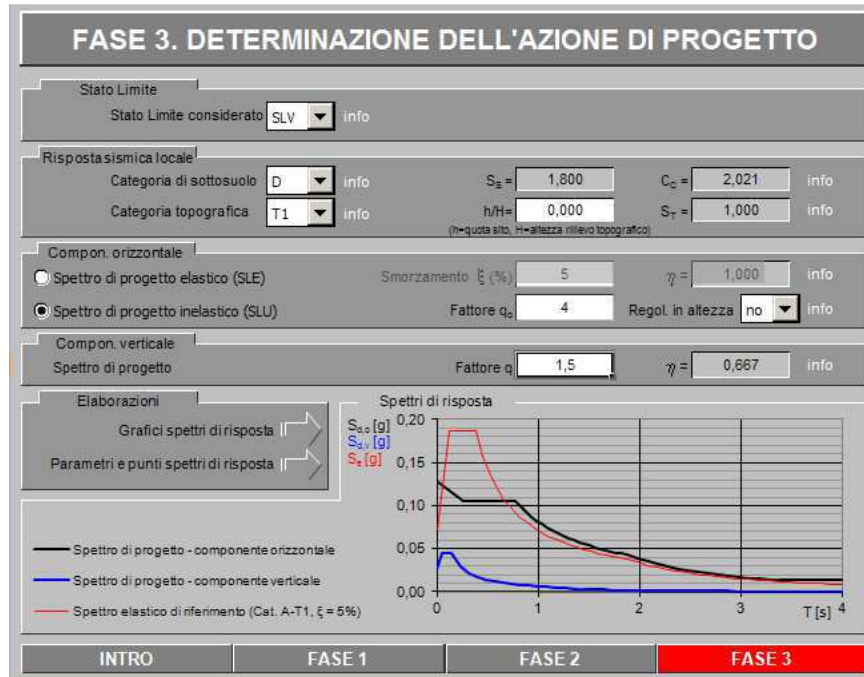
Strategia di progettazione



INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Si è considerato un fattore di struttura $q_0 = 4$ in accordo con quanto riportato al §7.5.2 delle NTC2008, e a favore di sicurezza si è considerata la struttura *non regolare in altezza*. Per quanto riguarda il tipo di terreno si è considerato:

- categoria di sottosuolo: D;
- categoria topografica: T1.



Si è assunto un valore del rapporto h/H tra la quota del sito e l'altezza del rilievo topografico pari a zero in quanto la struttura in esame sorge su un terreno pianeggiante.

Come indicato nel paragrafo §7.2.1 “Criteri generali di progettazione”, la componente verticale dell'azione sismica non viene considerata poiché il sito in cui ricade la costruzione è in zona sismica 4.

Si sono condotte analisi modali con spettro di risposta (analisi lineare dinamica), sia per la verifica SLV, sia per la verifica SLD.

Il principio base dell'analisi modale è la possibilità di disaccoppiare la risposta dinamica di una struttura a molti gradi di libertà nella risposta di ciascun modo che contribuisce alla risposta globale. Si studia la risposta di ciascun modo separatamente e si combinano quindi i diversi contributi per definire la risposta globale delle strutture.

La risposta alle diverse componenti dell'azione sismica ed alla variabilità spaziale del moto si ottiene combinando gli effetti sulla struttura come prescritto al §7.3.5 – NTC2008:

Case	Spectral Case Name	SpectralTable	Factor: X	Factor: Y
1	1Ex+0,3Ey	sisma (q0=4) SLV	$1,0 \times 10^0$	$3,0 \times 10^{-1}$
2	1Ex-0,3Ey	sisma (q0=4) SLV	$1,0 \times 10^0$	$-3,0 \times 10^{-1}$
3	-1Ex+0,3Ey	sisma (q0=4) SLV	$-1,0 \times 10^0$	$3,0 \times 10^{-1}$
4	-1Ex-0,3Ey	sisma (q0=4) SLV	$-1,0 \times 10^0$	$-3,0 \times 10^{-1}$
5	0,3Ex+1Ey	sisma (q0=4) SLV	$3,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^0$
6	-0,3Ex+1Ey	sisma (q0=4) SLV	$-3,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^0$
7	0,3Ex-1Ey	sisma (q0=4) SLV	$3,0 \times 10^{-1}$	$-1,0 \times 10^0$
8	-0,3Ex-1Ey	sisma (q0=4) SLV	$-3,0 \times 10^{-1}$	$-1,0 \times 10^0$

La precisione della soluzione del problema dipende dal numero di modi di vibrare coinvolti nella soluzione stessa; a tal proposito si devono considerare tutti i modi con massa partecipante significativa. Il suddetto criterio si considera soddisfatto se la somma delle masse modali efficaci (maggiori dell'5%), per tutti i modi considerati nell'analisi spettrale, ammonta almeno all'85% della massa partecipante totale.

6.3 Dimensionamento del solaio XLAM

INTRODUZIONE

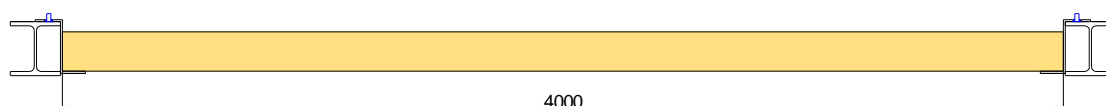
Il calcolo strutturale dell'XLAM rappresenta una forma nuova del progetto delle strutture di legno per diverse ragioni. Prima fra tutte quella dell'uso strutturale di elementi piani di grandi dimensioni, che fino a pochi anni fa era completamente sconosciuto nella costruzione di legno, in quanto, fatta eccezione per i pannelli sottili, non esistevano elementi di questo tipo. Inoltre si tratta di un materiale completamente nuovo, per il quale al momento non esistono ancora normative di prodotto specifiche e che non è oggetto di trattazione specifica in nessuno dei testi di normativa attualmente e comunemente in uso da parte di strutturisti e addetti ai lavori. Ciò non significa però che non esista una base normativa su cui lavorare con questo prodotto; è anzi vero esattamente il contrario: le basi normative disponibili al momento permettono senza dubbio di considerare l'XLAM a tutti gli effetti facente parte delle conoscenze tecniche in esse contenute. Non si tratta di una coincidenza, in quanto le normative sulle strutture di legno disponibili al giorno d'oggi sono tutte state pubblicate negli ultimissimi anni e fra gli addetti ai lavori (cioè i produttori che molto hanno investito in questo materiale, ma anche gli specialisti scientifici del ramo) l'evoluzione in corso era già ben nota. La mancanza di una normativa che definisca il prodotto è un ostacolo facilmente superabile, in quanto ciò è previsto nelle regole che definiscono l'omologazione e la possibilità di applicazione di materiali e prodotti con funzione strutturale che non siano definiti tramite normativa apposita. Molti componenti della costruzione, non solo nel caso del legno, sono definiti in questo modo, come per esempio diversi mezzi di collegamento o connettori di uso quotidiano praticamente in tutta Europa. Si tratta quindi di un ostacolo piuttosto ridotto per la grande industria, che lo ha prontamente superato, seguendo la procedura dell'omologazione diretta dei singoli prodotti.

L'XLAM è oggetto del § 11.7.6 dell'NTC2008 “Altri prodotti derivati dal legno per uso strutturale”, che rimanda alle procedure di qualificazione del § 11.7.10.

GEOMETRIA DEL PANNELLO E SCHEMA STATICO

Le solette oggetto di studio sono costituite da pannelli XLAM a 5 strati (34/22/34/22/34 mm) e spessore complessivo di 146 mm. Essendo le solette prevalentemente sollecitate a flessione, i pannelli sono messi in opera con gli strati esterni e lo strato centrale disposti in direzione dell'orditura e con i restanti due strati disposti ortogonalmente ad essi.

Il modello statico adottato presuppone che il pannello si comporti come una trave di larghezza unitaria pari ad 1 m, disposta in semplice appoggio (appoggi distanti 4 m) e composta da 5 strati con connessione rigida. Lo schema statico considerato è qui di seguito rappresentato (le lunghezze sono espresse in mm).



Dalla precedente analisi dei carichi si nota che i carichi che agiscono sul solaio sono:

- Carichi permanenti: $G=1,03+0,14+0,01 = 1,2 \text{ kN/mq}$;
- Carichi d'esercizio: $Q=4 \text{ kN/mq}$ (si considera il più gravoso tra le due tipologie).

Per poter definire le resistenze di calcolo e le rigidità del pannello, si assume che esso sia composto da tavole/lamelle appartenenti alla categoria di classificazione C24.

RESISTENZE DI CALCOLO

La determinazione dei valori di calcolo delle resistenze si basa sul modello sviluppato dall'Università Tecnica di Graz in combinazione, laddove non diversamente indicato, con i valori caratteristici definiti nel documento DT 206:2007 per il legno lamellare incollato della classe di resistenza (nel caso in esame GL24h) che si otterrebbe utilizzando lo stesso materiale di base (tavole/lamelle) del pannello considerato. Il coefficiente parziale di sicurezza per le proprietà dei materiali, nei confronti del legno lamellare, è stato ridotto rispetto alle normative italiana ($\gamma_M = 1,45$) ed internazionali per

via di un ancor maggiore processo di “omogeneizzazione” nelle varie fasi della produzione. Per elementi XLAM appartenenti alla classe di servizio 1 (elementi all’interno degli edifici in ambienti condizionati), come le solette dell’edificio in questione, e soggetti a carichi variabili appartenenti alla classe di *media* durata valgono quindi i seguenti coefficienti:

$$\gamma_M = 1,25$$

$$k_{mod} = 0,8$$

Resistenza di calcolo a flessione:

$$f_{m,XLAM,d} = k_h \cdot \frac{k_{mod} \cdot f_{m,g,k}}{\gamma_M} = 1,1 \cdot \frac{0,8 \cdot 24}{1,25} = 16,9 \text{ MPa}$$

Resistenza di calcolo a compressione perpendicolare alla fibratura:

$$f_{c,90,XLAM,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,g,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 2,7}{1,25} = 1,73 \text{ MPa}$$

Resistenza di calcolo a taglio:

$$f_{v,XLAM,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,XLAM,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 2,7}{1,25} = 1,728 \text{ MPa}$$

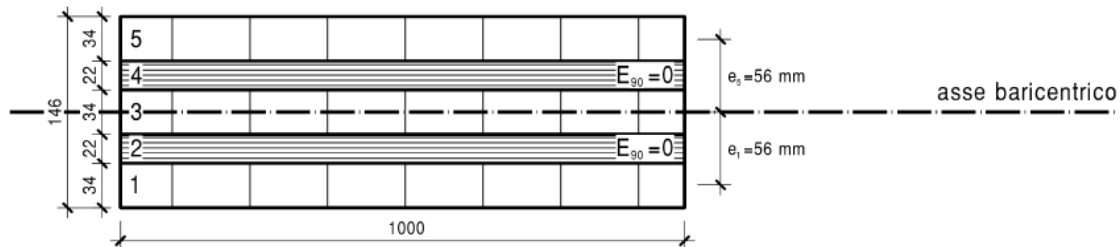
Resistenza di calcolo a taglio trasversale (“rolling shear”):

$$f_{r,XLAM,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{r,XLAM,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 1,25}{1,25} = 0,8 \text{ MPa}$$

RIGIDEZZE

Il calcolo delle rigidezze flessionale e a taglio, necessario, in generale, per la determinazione non solo delle deformazioni ma anche delle caratteristiche della sollecitazione (sistemi iperstatici), si basa sul modello di trave composta con connessione rigida, deformabile a taglio (trave di Timoshenko). Il fattore di taglio κ è calcolato per la sezione considerata. I moduli elastico E e di taglio G sono considerati nel loro valor medio conformemente a quanto definito nel documento tecnico DT

206:2007 per il legno lamellare incollato appartenente alla classe di resistenza GL24h. Il modulo elastico perpendicolare alle fibre $E_{90,mean}$ è da considerarsi nullo a favore di sicurezza.



$$E_{0,g,mean} = 11600 \text{ MPa}$$

$$E_{90,g,mean} = 0 \text{ MPa} , \text{ anche se in realtà assume un valore pari a } 390 \text{ MPa}$$

$$G_{k,mean} = 720 \text{ MPa}$$

Rigidezza flessionale del pannello:

$$\begin{aligned} k_{XLAM} &= \sum_i (I_i \cdot E_i) + \sum_i (A_i \cdot E_i \cdot e_i^2) = \\ &= 3 \cdot 1000 \cdot \frac{34^3}{12} \cdot 11600 + 2 \cdot 1000 \cdot 34 \cdot 56^2 \cdot 11600 = 2,588 \cdot 10^{12} \text{ MPa} \end{aligned}$$

Rigidezza a taglio del pannello:

$$\begin{aligned} S_{XLAM} &= [\sum_i (G_i \cdot A_i)] \cdot \kappa = \\ &= (3 \cdot 34 \cdot 1000 \cdot 720 + 2 \cdot 22 \cdot 1000 \cdot 72) \cdot 0,256 = 1,961 \cdot 10^7 \text{ N} \end{aligned}$$

COMBINAZIONI DI CARICO

Le combinazioni di carico che massimizzano le sollecitazioni di momento, taglio e reazione all'appoggio sono:

- Combinazione SLU: $q_{tot,SLU} = 1,3 \cdot 1,2 + 1,5 \cdot 4 = 7,56 \text{ kN/m}$
- Combinazione SLE: $q_{tot,SLE} = 1,2 + 4 = 5,2 \text{ kN/m}$

Considerando lo schema di trave in semplice appoggio si ottiene il massimo momento flettente in mezzera e pari a $M_{max} = \frac{1}{8}ql^2$, e il massimo taglio agli appoggi e pari a $T_{max} = \frac{1}{2}ql$.

VERIFICHE AGLI SLU

$$M_{max,SLU} = 15,12 \text{ kNm}$$

$$T_{max,SLU} = R_{max,SLU} = 15,12 \text{ kN}$$

Tensioni di calcolo:

- Tensione normale massima al bordo esterno:

$$\sigma_{d,max} = \frac{M_d}{k_{XLAM}} \cdot \left(e_1 + \frac{t_1}{5} \right) \cdot E_1 = \frac{15,12 \cdot 10^6}{2,588 \cdot 10^{12}} \cdot \frac{146}{2} \cdot 11600 = 4,95 \text{ MPa}$$

- Tensione tangenziale massima in corrispondenza dell'asse baricentrico:

$$\begin{aligned} \tau_{d,max} &= \frac{V_d \cdot \Sigma(S_m \cdot E_m)}{k_{XLAM} \cdot b} = \\ &= \frac{15,12 \cdot 10^3}{2,588 \cdot 10^{12} \cdot 1000} \cdot (34 \cdot 1000 \cdot 56 \cdot 11600 + 17 \cdot 1000 \cdot 8,5 \cdot 11600) = \\ &= 0,140 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Tensione tangenziale in corrispondenza degli strati trasversali 2 e 4:

$$\tau_{r,d,max} = \frac{V_d \cdot \Sigma(S_m \cdot E_m)}{k_{XLAM} \cdot b} = \frac{15,12 \cdot 10^3}{2,588 \cdot 10^{12} \cdot 1000} \cdot (34 \cdot 1000 \cdot 56 \cdot 11600) = 0,130 \text{ MPa}$$

- Tensione normale massima di compressione perpendicolare alla fibratura:

$$\sigma_{90,d,max} = \frac{R_d}{A_{90}} = \frac{15,12 \cdot 10^3}{100 \cdot 1000} = 0,151 \text{ MPa} \text{ , dove } A_{90} \text{ rappresenta la sezione di appoggio (ala inferiore del profilo a Z)}$$

Verifiche:

$$\frac{\sigma_{d,max}}{f_{m,XLAM,d}} = \frac{4,95}{16,9} = 0,29 < 1$$

$$\frac{\tau_{d,max}}{f_{v,XLAM,d}} = \frac{0,140}{1,728} = 0,08 < 1$$

$$\frac{\tau_{r,d,max}}{f_{r,XLAM,d}} = \frac{0,130}{0,8} = 0,16 < 1$$

$$\frac{\sigma_{90,d,max}}{k_{90} \cdot f_{c,90,XLAM,d}} = \frac{0,151}{1,75 \cdot 1,73} = 0,05 < 1$$

Le verifiche SLU risultano tutte ampiamente soddisfatte.

VERIFICHE AGLI SLE

Il coefficiente k_{def} è da considerarsi pari a 0,8.

Deformazione istantanea in campata dovuta ai soli carichi permanenti:

$$u_g = u_{1,in} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,2 \cdot 4000^2}{2,588 \cdot 10^{12}} = 1,55 \text{ mm}$$

Deformazione istantanea in campata dovuta ai carichi d'esercizio:

$$u_p = u_{21,in} = 5,15 \text{ mm}$$

In base alle NTC 2008, la deformazione finale risulta:

$$\begin{aligned} u_{fin} &= u_{1,in} \cdot (1 + k_{def}) + u_{21,in} \cdot (1 + \psi_{21} \cdot k_{def}) = \\ &= 1,55 \cdot (1 + 0,8) + 5,15 \cdot (1 + 0,3 \cdot 0,8) = 9,18 \text{ mm} \end{aligned}$$

Verifiche

$$u_{21,in} = 5,15 < \frac{l}{300} = 13,3 \text{ mm}$$

$$u_{21,fin} = u_{21,in} \cdot (1 + \psi_{21} \cdot k_{def}) = 6,39 < \frac{l}{200} = 20 \text{ mm}$$

$$u_{fin} = 9,18 < \frac{l}{250} = 16 \text{ mm}$$

Anche le verifiche SLE risultano tutte ampiamente soddisfatte.

Si ritiene pertanto la scelta del pannello XLAM di spessore 146 mm adeguata.

VERIFICA A SOLLEVAMENTO DEL TETTO:

Si è verificato a sollevamento l'ultimo solaio della struttura in esame, dopo aver calcolato la depressione su di esso dovuta al vento.

VERIFICA SOLLEVAMENTO DEL TETTO		
p vento	-385,8	N/m ²
pp solaio	1026,1	N/m ²
p vento (SLU $\gamma=1,5$)	-578,7	N/m ²
pp solaio (SLU $\gamma=1,3$)	1334,0	N/m ²
p vento SLU < pp solaio SLU		
verificato		

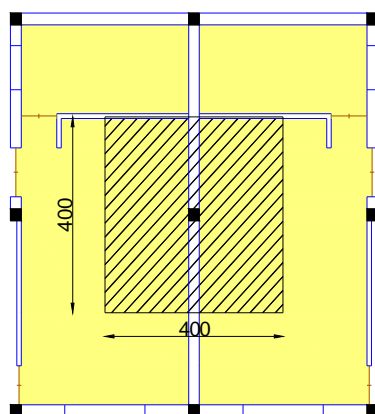
6.4 Predimensionamento di travi e pilastri

Prima di realizzare il modello FEM dell'edificio per determinare le sollecitazioni agenti su ciascun elemento strutturale, si esegue un predimensionamento del pilastro e della trave più sollecitati.

6.4.1 Pilastro

Dall'analisi dei carichi si ottiene lo sforzo normale sul pilastro più sollecitato, ovvero un pilastro centrale alla base dell'edificio.

Si considera come area di influenza per il pilastro 16 mq, dal momento che l'interasse dei pilastri è di 4 m in entrambe le direzioni principali dell'edificio.



Sforzo normale		
G1 - peso proprio pilastro	2,4	kN
G2 - pesi portati	220,8	kN
Q - variabili	160,0	kN
Combinazione SLU		
γ G1	1,3	
γ G2	1,5	
γ Q	1,5	
N SLU	574,3	kN

Si determina ora la classe del profilo HEB 240, secondo quanto riportato al §4.2.3.1 dell'NTC2008:

CLASSE DEL PROFILO HEB 240: PILASTRO		
Acciaio S355		
f_{yk}	355	MPa

ftk	490	MPa
γ_m	1,05	
ANIMA		
c	164,00	mm
tw = a	10,00	mm
ε	0,81	
c/(tw ε)	20,25	< 33
classe 1		
ALI		
c	94,00	mm
tf = e	17,00	mm
ε	0,81	
c/(tw ε)	6,83	< 9
classe 1		
PROFILO DI CLASSE 1		

Verifica a compressione semplice (§4.2.4.1.2 - NTC2008):

VERIFICA A COMPRESSIONE SEMPLICE		
N Rd	3583,81	kN
N SLU	574,34	kN

Verifica di stabilità delle membrature compresse (§4.2.4.1.3.1 – NTC2008):

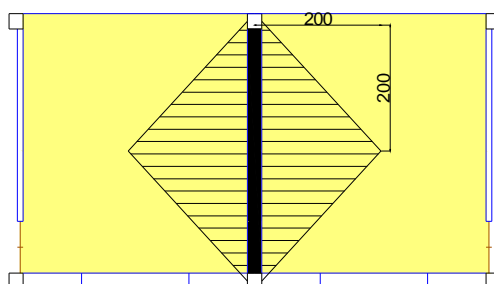
STABILITA' DELLE MEMBRATURE COMPRESSE		
l0 (schema cerniera-cerniera)	3000	mm
Ncr	8862,2	kN
λ soprassegnato	0,6516	
α	0,49	curva c
φ	0,8230	

χ	0,7544	< 1
Nb,Rd	2703,6	kN
N SLU	574,3	kN

Entrambe le verifiche risultano ampiamente soddisfatte, tuttavia si ritiene opportuno non ridurre il profilo utilizzato, poiché la verifica di deformabilità potrebbe risultare più gravosa.

6.4.2 Trave

Dall'analisi dei carichi si ottiene il carico sulla trave; si considera come area di influenza per la trave 8 mq, ottenuta nel modo indicato nella seguente immagine.



Sforzo normale		
G1 - peso proprio trave	2,405	kN
G2 - pesi portati	24,326	kN
Q - variabili	16	kN
Combinazione SLU		
γ G1	1,3	
γ G2	1,5	
γ Q	1,5	
N SLU	63,62	kN
q SLU	15,90	kN/m

Verifica a flessione retta (§4.2.4.1.2 – NTC2008):

VERIFICA A FLESSIONE RETTA		
Mc,Rd	67,72	kNm
M SLU	31,81	kNm

La verifica risulta soddisfatta; si ritiene quindi opportuno l'utilizzo del profilo HEB200 per la trave.

6.5 Modello FEM

Dopo aver verificato preliminarmente l'opportunità di utilizzare i profili di trave e pilastro sopra descritti, si realizza un modello FEM per determinare in maniera più precisa le sollecitazioni su travi e pilastri, e per determinare anche gli spostamenti dell'edificio per effetto del vento e del sisma.

Si sono modellati travi e pilastri con elementi beam, mentre le bandelle di controvento con elementi truss, e sono tutti caratterizzati dalle loro sezioni effettive; la platea è stata modellata con elementi plate (si è considerato uno spessore di 50 cm); il terreno, studiato con il metodo di Winkler, è stato modellato con un letto di molle elastiche di rigidezza pari a 10 N/cm^3 (tale valore è tipico della sabbia satura sciolta).



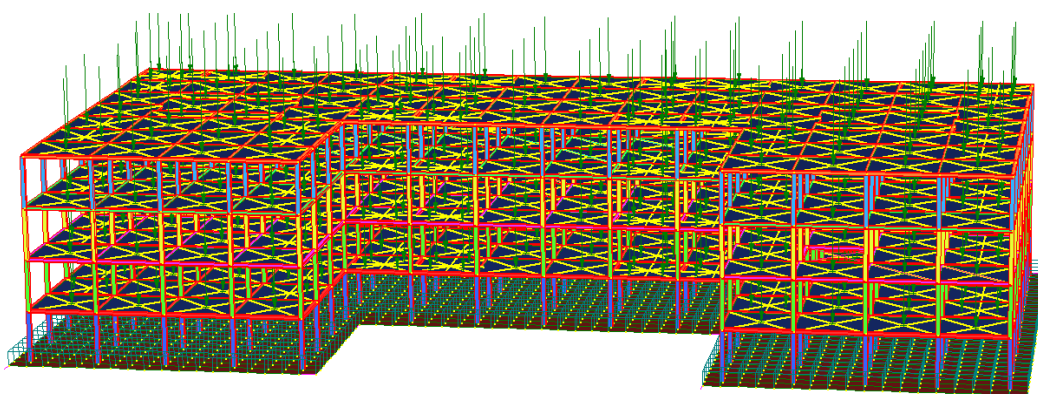
Modello FEM.

MODELLO PER VERIFICHE SLU - SLE:

I carichi distribuiti sui solai (permanenti e accidentali), il peso dei divisori interni e dei profili a Z sono stati applicati mediante load patch, ovvero elementi plate senza alcuna rigidità strutturale né conducibilità termica, che svolgono unicamente la funzione di distribuire i propri carichi di superficie sugli elementi beam limitrofi. Il peso dei muri perimetrali e divisori tra appartamenti sono stati applicati come masse distribuite sulle travi sopra cui si trovano; il peso di tali elementi è considerato dal solutore inserendo l'accelerazione di gravità su tale load case.

I pesi propri di travi e pilastri sono applicati attribuendo ai singoli elementi la propria densità e accelerazione di gravità $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Il carico da vento è stato applicato a ciascun piano sulle travi di estremità esposte.



Modello FEM con load patch e carichi applicati.

Per valutare la deformabilità del telaio per effetto dei carichi orizzontali (vento) si è utilizzata la combinazione agli SLE rara, poiché è la più gravosa tra le tre contemplate dalla Normativa Italiana; si riportano di seguito le combinazioni considerate:

CASES	1	2	3
	rara (Q1= vento X)	rara (Q1= vento -Y)	rara (Q1= vento +Y)
1: solaio+cartongesso+tramezzi	$1,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$
2: variabili 2 kN/m^2	$7,000000 \times 10^{-1}$	$7,000000 \times 10^{-1}$	$7,000000 \times 10^{-1}$
3: variabili 4 kN/m^2	$7,000000 \times 10^{-1}$	$7,000000 \times 10^{-1}$	$7,000000 \times 10^{-1}$
4: peso proprio travi e pilastri	$1,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$
5: muri tamponamento 20 cm + cartongesso	$1,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$
6: bandelle+profilo zeta	$1,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$
7: vento +/- X	$1,000000 \times 10^0$	$0,000000 \times 10^0$	$0,000000 \times 10^0$
8: vento +Y	$0,000000 \times 10^0$	$0,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$
9: vento -Y	$0,000000 \times 10^0$	$1,000000 \times 10^0$	$0,000000 \times 10^0$

Per le verifiche agli SLU si sono considerati due tipi di combinazione: in una si è massimizzato il carico accidentale (2 kN/mq; 4kN/mq), nell'altra si è massimizzato il carico da vento, dal momento che solo una azione accidentale agli SLU può essere considerata dominante, e quindi le altre devono essere combinate con l'opportuno coefficiente ψ .

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva delle combinazioni utilizzate:

CASES	4	5	6	7	8	9
	slu 1 (accidentali); vento x	slu 2 (accidentali); vento -y	slu 3 (accidentali); vento +y	slu 4 (vento x)	slu 5 (vento y)	slu 6 (vento -y)
1: solaio+cartongesso+tramezzi	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰
2: variabili 2 kN/m ²	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,050000x10 ⁰	1,050000x10 ⁰	1,050000x10 ⁰	1,050000x10 ⁰
3: variabili 4 kN/m ²	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,050000x10 ⁰	1,050000x10 ⁰	1,050000x10 ⁰	1,050000x10 ⁰
4: peso proprio travi e pilastri	1,300000x10 ⁰	1,300000x10 ⁰	1,300000x10 ⁰	1,300000x10 ⁰	1,300000x10 ⁰	1,300000x10 ⁰
5: muri tamponamento 20 cm + cartongesso	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰
6: bandelle+profilo zeta	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰
7: vento +/- X	9,000000x10 ⁻¹	0,000000x10 ⁰	0,000000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	0,000000x10 ⁰	0,000000x10 ⁰
8: vento +Y	0,000000x10 ⁰	0,000000x10 ⁰	9,000000x10 ⁻¹	0,000000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰	0,000000x10 ⁰
9: vento -Y	0,000000x10 ⁰	9,000000x10 ⁻¹	0,000000x10 ⁰	0,000000x10 ⁰	0,000000x10 ⁰	1,500000x10 ⁰

Dopo aver lanciato l'analisi statica lineare si sono eseguiti gli inviluppi delle tre combinazioni rare, per determinare i massimi spostamenti e sollecitazioni SLE, e delle sei combinazioni SLU, per determinare le relative sollecitazioni più gravose.

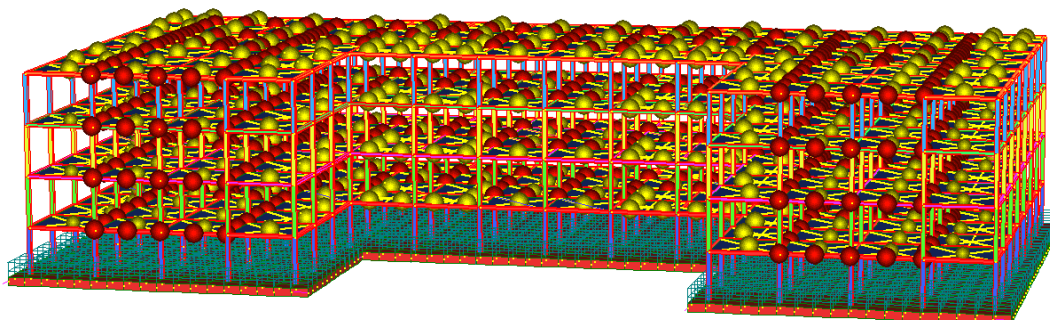
Si sono poi eseguite le verifiche.

MODELLO PER VERIFICHE SLD - SLV:

Per tali verifiche si è utilizzato lo stesso modello adottato per le verifiche SLU ed SLE precedentemente descritto, con l'unica differenza che i carichi permanenti e accidentali, combinati secondo la combinazione sismica, sono stati applicati sotto forma di masse distribuite sui load patch (solai, tramezzi 10 cm, carichi accidentali) e sulle travi (tamponamenti 20 cm perimetrali e divisori tra appartamenti); per gli elementi modellati (travi, pilastri, bandelle) si è semplicemente inserita la densità e la forza di gravità.

COMBINAZIONE SISMICA: calcolo delle masse			
piano 1,2,3	terrazze private	terrazze pubbliche	appartamenti
carico solaio (t/mmq)	2,05068E-07	3,88555E-07	2,56037E-07
tamponamenti 20 (t/mm)	0,0003294		

piano 4	
carico solaio (t/mm ²)	3,88555E-07



Modello FEM con masse distribuite su load patch e travi.

Si sono creati due modelli: in uno si è inserito lo spettro di risposta relativo allo SLV, nell'altro si è inserito lo spettro di risposta relativo allo SLD. Si sono poi lanciate le rispettive analisi modali e si sono ricavati i rispettivi spostamenti e sollecitazioni, che sono poi stati sommati a quelli relativi all'analisi statica lineare con applicati i carichi combinati secondo i coefficienti della combinazione sismica, riassunti nella seguente tabella:

	sismica
1: solaio+cartongesso+tramezzi	1,000000 x 10 ⁰
2: variabili 2 kN/m ²	3,000000 x 10 ⁻¹
3: variabili 4 kN/m ²	6,000000 x 10 ⁻¹
4: peso proprio travi e pilastri	1,000000 x 10 ⁰
5: muri tamponamento 20 cm + cartongesso	1,000000 x 10 ⁰
6: bandelle+profilo zeta	1,000000 x 10 ⁰
7: vento +/- X	0,000000 x 10 ⁰
8: vento +Y	0,000000 x 10 ⁰
9: vento -Y	0,000000 x 10 ⁰

Si sono infine condotte le verifiche relative a ciascuno dei due Stati Limite considerati.

6.6 Verifiche

6.6.1 Verifica SLU dei pilastri

Vengono verificati i pilastri che presentano di volta in volta le maggiori sollecitazioni.

Verifica a compressione semplice (§4.2.4.1.2 – NTC2008):

VERIFICA A COMPRESSIONE SEMPLICE		
N c,Rd	3583,81	kN
N Ed, max	775,00	kN
Verificato		

Verifica di stabilità delle membrature compresse (§4.2.4.1.3.1 – NTC2008):

STABILITA' DELLE MEMBRATURE COMPRESSE		
l ₀	3000	mm
N _{cr}	8862,2	kN
λ soprassegnato	0,6516	
α	0,49	
φ	0,8230	
χ	0,7544	
N _{b,Rd}	2703,57	kN
N SLU	775,00	kN

Verifica della snellezza limite (§4.2.4.1.3.1 – NTC2008):

LIMITAZIONE DELLA SNELLEZZA		
l ₀ (cerniera-cerniera)	3000	mm
i _y	60,8	mm
λ	49,34	< 200

Verifica a taglio (§4.2.4.1.2 – NTC2008):

TAGLIO		
Piano dell'anima		
Av	3324	mm ²
fyk	355	MPa
γM0	1,05	
Vc,Rd	648,84	kN
VSd	20,8	kN
Piano delle ali		
Av	8960	mm ²
fyk	355	MPa
γM0	1,05	
Vc,Rd	1748,99	kN
VSd	12,6	kN

Verifica a pressoflessione biassiale (§4.2.4.1.2 – NTC2008):

PRESSOFLESSIONE BIASSIALE		
Nc,Rd	3583,81	kN
N Ed	775,00	kN
n	0,22	
a	0,23	
Wel,y	326900	mm ³
Wel,z	938300	mm ³
Mel,Rd,y	110,52	kN m
MN,y,Rd	97,89	kN m
Mel,Rd,z	317,23	kN m
MN,z,Rd	317,23	kN m
Max MSd,z		
MEd,y	4,5	kN m
MEd,z	31,3	kN m

0,08		< 1
Verificato		
Max MSd,y		
MEd,y	33,8	kN m
MEd,z	2,2	kN m
0,12		< 1
Verificato		

Le verifiche SLU dei pilastri più sollecitati risultano soddisfatte.

6.6.2 Verifica SLU delle travi

Vengono verificate le travi che presentano di volta in volta le sollecitazioni maggiori.

Verifica a flessione deviata:

FLESSIONE DEVIATA		
α	1	
β	5	
f_{yk}	355	MPa
γM_0	1,05	
MRd,el,x	192,58	kN m
MRd,el,y	67,72	kN m
Max MEd, x		
MEd, x	5,9	kN m
MEd, y	10,4	kN m
0,03		< 1
Verificato		
Max MEd, y		
MEd, x	1,4	kN m

MEd, y	46	kN m
	0,15	< 1
Verificato		

Verifica a taglio:

TAGLIO		
Piano dell'anima		
Av	2483	mm ²
fyk	355	MPa
γM0	1,05	
Vc,Rd	484,68	kN
VSd	71,7	kN
Verificato		
Piano delle ali		
Av	6602	mm ²
fyk	355	MPa
γM0	1,05	
Vc,Rd	1288,71	kN
VSd	7,7	kN
Verificato		

Le verifiche delle travi risultano tutte ampiamente soddisfatte.

6.6.3 Verifiche SLE

Spostamenti verticali delle travi (§4.2.4.2.1 – NTC2008):

Per calcolare le deformazioni in mezzera si è utilizzata la formula dello schema statico della trave in semplice appoggio:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ}$$

Il valore totale dello spostamento ortogonale all'asse dell'elemento (Fig. 4.2.1) è definito come

$$\delta_{\text{tot}} = \delta_1 + \delta_2 \quad (4.2.55)$$

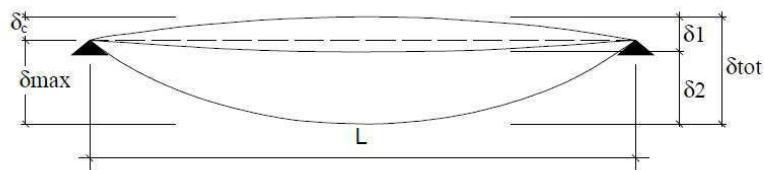


Figura 4.2.1 - Definizione degli spostamenti verticali per le verifiche in esercizio

essendo:

δ_c la monta iniziale della trave,

δ_1 lo spostamento elastico dovuto ai carichi permanenti,

δ_2 lo spostamento elastico dovuto ai carichi variabili,

δ_{max} lo spostamento nello stato finale, depurato della monta iniziale = $\delta_{\text{tot}} - \delta_c$.

Tabella 4.2.X Limiti di deformabilità per gli elementi di impalcato delle costruzioni ordinarie

Elementi strutturali	Limiti superiori per gli spostamenti verticali	
	$\frac{\delta_{\text{max}}}{L}$	$\frac{\delta_2}{L}$
Coperture in generale	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{250}$
Coperture praticabili	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{300}$
Solai in generale	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{300}$
Solai o coperture che reggono intonaco o altro materiale di finitura fragile o tramezzi non flessibili	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{350}$
Solai che supportano colonne	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$
Nei casi in cui lo spostamento può compromettere l'aspetto dell'edificio	$\frac{1}{250}$	

In caso di specifiche esigenze tecniche e/o funzionali tali limiti devono essere opportunamente ridotti.

SPOSTAMENTI VERTICALI		
g	2,9586	N/mm
q	4	N/mm
L	4000	mm
δ_1 (g)	0,84	mm

$\delta_2 (q)$	1,14	mm
$\delta_2 \text{ lim } (L/300)$	13,33	mm
δ_{tot}	1,98	mm
$\delta_{\text{lim, tot}} (L/250)$	16	mm
Verificato		

Spostamenti laterali dei pilastri (§4.2.4.2.1 – NTC2008):

Lo spostamento massimo e lo spostamento interpiano dell'edificio sono stati determinati tramite il modello FEM dall'involuppo delle tre combinazioni rare.

Tabella 4.2.XI Limiti di deformabilità per costruzioni ordinarie soggette ad azioni orizzontali

Tipologia dell'edificio	Limiti superiori per gli spostamenti orizzontali	
	$\frac{\delta}{h}$	$\frac{\Delta}{H}$
Edifici industriali monopiano senza carroponte	$\frac{1}{150}$	/
Altri edifici monopiano	$\frac{1}{300}$	/
Edifici multipiano	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{500}$

In caso di specifiche esigenze tecniche e/o funzionali tali limiti devono essere opportunamente ridotti.

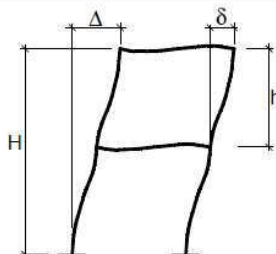


Figura 4.2.2 - Definizione degli spostamenti orizzontali per le verifiche in esercizio

SPOSTAMENTI LATERALI		
δ_{max}	2,7	mm
Δ_{max}	8	mm
h	3000	mm
H	12000	mm
δ_{max}/h	0,0009	
1/300	0,0033	
Δ_{max}/H	0,0007	
1/500	0,0020	
Verificato		

6.6.4 Verifiche SLD

Verifiche degli elementi strutturali in termini di contenimento del danno agli elementi non strutturali (§7.3.7.2 – NTC2008):

Per le costruzioni ricadenti in classe d'uso I e II la Normativa Italiana prescrive di verificare che l'azione sismica di progetto non produca agli elementi costruttivi senza funzione strutturale danni tali da rendere la costruzione temporaneamente inagibile.

Nel caso di abitazioni civili, qualora la temporanea inagibilità sia dovuta a spostamenti eccessivi interpiano, questa condizione si può ritenere soddisfatta quando gli spostamenti interpiano ottenuti dall'analisi in presenza dell'azione sismica di progetto relativa allo SLD siano inferiori ai limiti indicati nel seguito:

- a) per tamponamenti collegati rigidamente alla struttura che interferiscono con la deformabilità della stessa
- $$d_i < 0,005 h \quad (7.3.16)$$
- b) per tamponamenti progettati in modo da non subire danni a seguito di spostamenti di interpiano d_p , per effetto della loro deformabilità intrinseca ovvero dei collegamenti alla struttura:
- $$d_i \leq d_p \leq 0,01 h \quad (7.3.17)$$
- c) per costruzioni con struttura portante in muratura ordinaria
- $$d_i < 0,003 h \quad (7.3.18)$$
- d) per costruzioni con struttura portante in muratura armata
- $$d_i < 0,004 h \quad (7.3.19)$$

dove:

d_i è lo spostamento interpiano, ovvero la differenza tra gli spostamenti al solaio superiore ed inferiore, calcolati secondo i §§ 7.3.3 o 7.3.4,

h è l'altezza del piano.

SPOSTAMENTI LATERALI		
$\delta_{max, x}$	1,3	mm
$\delta_{max, y}$	0,9	mm
h	3000	mm
$\delta_{lim} = 1\% h$	30	mm
Verificato		

La verifica risulta soddisfatta.

Il massimo spostamento interpiano si ha con le combinazioni SLE; questo significa che per la struttura in esame, il vento (non presente nella combinazione SLD in quanto non compatibile con l'azione sismica) produce sulla struttura spostamenti orizzontali maggiori di quanto non provochi il sisma.

Il massimo spostamento interpiano risulta pari a 2,7 mm, sarà quindi necessario garantire tale distanza tra i tamponamenti e i pilastri dell'edificio, per evitare che il contatto tra i due produca sollecitazioni significative su tali pannelli, progettati per le sole azioni orizzontali.

6.6.5 Verifiche SLV

La struttura è progettata in classe di duttilità B. Al fine di conseguire un comportamento duttile, il telaio dev'essere progettato in modo che le cerniere plastiche si formino nelle travi piuttosto che nelle colonne. Questo requisito non è richiesto per le sezioni delle colonne alla base e alla sommità del telaio multipiano.

Per le verifiche, si sono utilizzate le sollecitazioni sismiche derivanti dalla combinazione sismica prevista dalla Normativa Italiana e riportata al § 6.2.2 di questa tesi.

VERIFICA DELLE TRAVI (§7.5.4.1 – NTC2008):

Nelle sezioni in cui è attesa la formazione delle cerniere plastiche devono essere verificate le seguenti relazioni:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,15$$

$$\frac{V_{Ed,G} + V_{Ed,M}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5$$

dove:

M_{Ed} ; N_{Ed} ; V_{Ed} sono i valori di progetto del momento flettente, della sollecitazione assiale e del taglio;

$M_{pl,Rd}$; $N_{pl,Rd}$; $V_{pl,Rd}$ sono i valori delle resistenze plastiche di progetto, flessionale assiale e tagliante determinate secondo criteri di cui al §4.2.4.1.2 – NTC2008;

$V_{Ed,G}$; $V_{Ed,M}$ sono rispettivamente la sollecitazione di taglio di progetto dovuta alle azioni non sismiche e la forza di taglio dovuta all'applicazione dei momenti plastici equivalenti $M_{pl,Rd}$ nelle sezioni in cui è attesa la formazione delle cerniere plastiche;

Si riportano di seguito le verifiche:

FLESSIONE		
fyk	355	MPa
γM0	1,05	
MRd,el,x	192,58	kN m
MRd,el,y	67,72	kN m
MRd,pl,x	211,84	kN m
MRd,pl,y	74,49	kN m
MEd, x	26,09	kN m
0,12		< 1
MEd, y	2,59	kN m
0,03		< 1
Verificato		

COMPRESSIONE		
Ned	20,65	kN
NPl,Rd	2639,85	kN
0,008		< 0,15
Verificato		

TAGLIO		
VEd,G	1,8	kN
VEd,M	52,96	kN
Vpl, Rd	484,68	kN
0,11		< 0,5
Verificato		

Le verifiche sulla trave risultano tutte e tre ampiamente soddisfatte.

VERIFICA DELLE COLONNE (§7.5.4.2 – NTC2008):

Le colonne devono essere verificate in compressione considerando la più sfavorevole combinazione di sollecitazioni assiali e flessionali.

Le sollecitazioni di progetto sono determinate come:

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1\gamma_{Rd}\Omega N_{Ed,E}$$

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1,1\gamma_{Rd}\Omega M_{Ed,E}$$

$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + 1,1\gamma_{Rd}\Omega V_{Ed,E}$$

dove:

$N_{Ed,G}$; $M_{Ed,G}$; $V_{Ed,G}$ sono le sollecitazioni di compressione, flessione e taglio dovute alle azioni non sismiche;

$N_{Ed,E}$; $M_{Ed,E}$; $V_{Ed,E}$ sono le sollecitazioni dovute alle azioni sismiche;

γ_{Rd} il fattore di sovra resistenza;

Ω il minimo valore tra gli $\Omega_i = M_{pl,Rd,i}/M_{Ed,i}$ di tutte le travi in cui si attende la formazione di cerniere plastiche, essendo $M_{Ed,i}$ il momento flettente di progetto della i -esima trave in condizioni sismiche e $M_{pl,Rd,i}$ il corrispondente momento plastico.

Nelle colonne in cui si attende la formazione di cerniere plastiche, le sollecitazioni devono essere calcolate nell'ipotesi che nelle cerniere plastiche il momento flettente sia pari a $M_{pl,Rd}$.

Il taglio di progetto deve rispettare la seguente limitazione:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5$$

I pannelli nodali dei collegamenti trave-colonna devono essere progettati in modo tale da escludere la loro plasticizzazione e in stabilizzazione a taglio. Tale requisito si può ritenere soddisfatto quando:

$$\frac{V_{vp,Ed}}{\min(V_{vp,Rd}, V_{vb,Rd})} < 1$$

Essendo $V_{vp,Ed}$, $V_{vp,Rd}$, $V_{vb,Rd}$ rispettivamente la forza di progetto e la resistenza a taglio per plasticizzazione e la resistenza a taglio per instabilità del pannello, queste ultime valutate come in §4.2.4.1.2 e §4.2.4.1.3.

Si riportano di seguito tali verifiche:

COMPRESSIONE		
NEd,G	425,6	kN
γR_d	1,1	
Ω	0,03	
NEd,E	16,4	kN
NEd	426,29	kN
NSLU	775,00	kN
Elemento già verificato per SLU : NSLU > NEd		

FLESSIONE BIASSIALE		
MEd,G,1	19,7	kN
γR_d	1,1	
Ω	0,03	
MEd,E,1	9,8	kN
MEd,1	20,11	kN
MSLU, 1	33,80	kN
MEd,G,2	0,5	kN

γ_{Rd}	1,1	
Ω	0,03	
MEd,E,2	3,3	kN
MEd,2	0,64	kN
MSLU, 2	31,30	kN
Elemento già verificato per SLU : MSLU > MEd		

TAGLIO		
VEd,G,1	7,1	kN
γ_{Rd}	1,1	
Ω	0,03	
VEd,E,1	1,7	kN
VEd,1	7,17	kN
VSLU, 1	12,60	kN
VEd,G,2	10,2	kN
γ_{Rd}	1,1	
Ω	0,03	
VEd,E,2	6,2	kN
VEd,2	10,46	kN
VSLU, 2	20,80	kN
VEd,1	7,17	kN
Vpl,Rd,1	1748,99	
0,0041		< 0,5
VEd,2	10,46	kN
Vpl,Rd,2	648,84	
0,0161		< 0,5

Tutte le sollecitazioni sui pilastri risultano superiori allo SLU che non allo SLV; perciò si ritengono le verifiche soddisfatte in quanto lo sono allo SLU.

Si può quindi concludere che per la struttura in esame l'azione del vento (l'unica che allo SLU produce sollecitazioni nel piano perpendicolare all'asse del pilastro) è più

gravosa rispetto al sisma; ciò era prevedibile dal momento che struttura è stata progettata in zona 4 e vista la ridotta massa dell'edificio grazie ai materiali che si sono utilizzati.

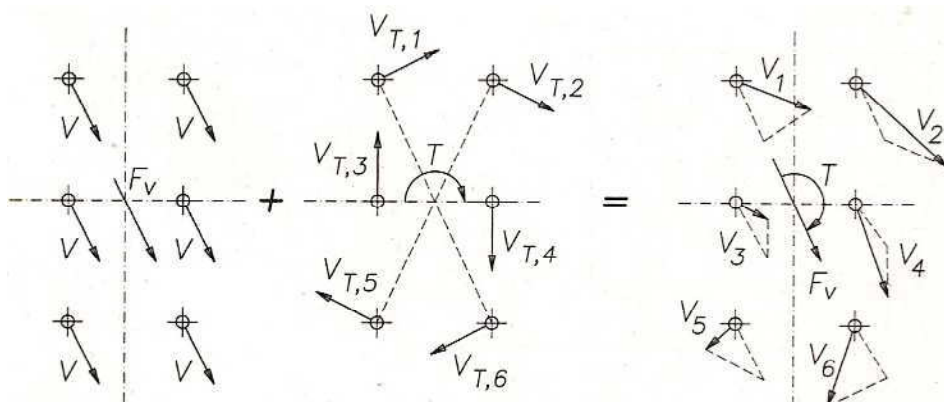
6.6.6 Verifica del collegamento pilastro-pilastro

La verifica di tali collegamenti viene effettuata facendo riferimento alle indicazioni del paragrafo 4.2.8.1.1 - NTC 2008.

Si utilizzano bulloni M12 di classe 10.9 e coprighiunti doppi di spessore pari a 10 mm sia sulle flange che sull'anima.

Si analizzano ora le sollecitazioni che agiscono sulle varie bullonature:

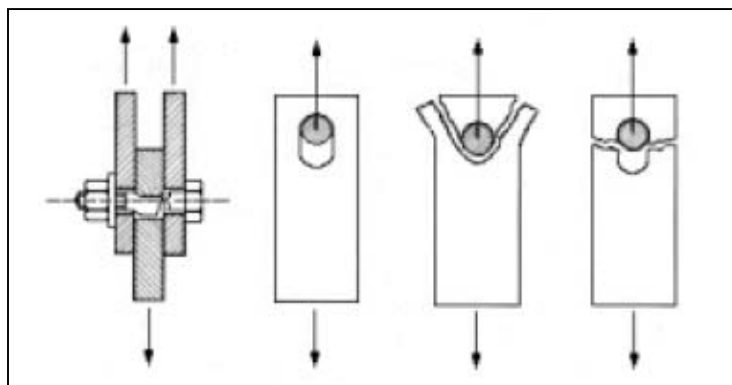
- Le giunzioni delle anime sono calcolate a completo ripristino della capacità portante flettente e per l'azione tagliante effettivamente agente. A tale giunzione è infatti affidato tutto il taglio agente nella sezione, con il relativo momento flettente che nasce dall'eccentricità della sollecitazione rispetto al baricentro delle bullonature; questo momento viene poi ripartito come azione tagliante sui singoli bulloni a seconda della distanza geometrica del bullone stesso dal baricentro della bullonatura. All'anima è affidata poi una quota parte, proporzionale alla propria inerzia, della sollecitazione flettente scomposta in azioni taglianti sui singoli bulloni secondo la distanza di ognuno dal baricentro delle bullonature. La coppia flettente che nasce dall'eccentricità della sollecitazione rispetto al baricentro delle bullonature è scomposta in azioni taglianti sui bulloni secondo la propria distanza geometrica dal baricentro della bullonatura.



- Le giunzioni delle piattabande sono progettate a completo ripristino di resistenza e sono verificate affidando loro la quota parte restante di momento flettente non affidata all'anima.

Le modalità con cui un'unione bullonata può raggiungere la crisi sono:

- taglio del bullone,
- rifollamento della lamiera,
- trazione della lamiera,
- taglio della lamiera.



Vediamo ora nel dettaglio le indicazioni fornite dalla normativa in merito a ciascuna delle sopracitate modalità di crisi:

- taglio del bullone: la resistenza a taglio del bullone $F_{v,Rd}$ per ogni piano di taglio che interessa il gambo viene assunta pari a:

$$F_{v,Rd} = 0,6f_{tb}A_{res}/\gamma_{M2}, \text{ per bulloni di classe 4.6, 5.6 e 8.8;}$$

$$F_{v,Rd} = 0,5f_{tb}A_{res}/\gamma_{M2}, \text{ per bulloni di classe 6.8 e 10.9.}$$

dove γ_{M2} è un coefficiente pari a 1,25 e f_{tb} è la resistenza a rottura del bullone definita alla tabella 11.3. XII.b:

Caratteristiche di resistenza dei bulloni			
tipo di bullone	classe	fyb (Mpa)	ftb (Mpa)
normale	4,6	240	400
	5,6	300	500
	6,6	480	600
alta resistenza	8,8	649	800
	10,9	900	1000

- rifollamento della lamiera: la resistenza a rifollamento della lamiera viene assunta pari a:

$$F_{b,Rd} = \frac{k\alpha f_{tk} dt}{\gamma_{M2}}$$

dove:

d è il diametro nominale del gambo del bullone,

t è lo spessore della piastra collegata,

f_{tk} è la resistenza a rottura del materiale della piastra collegata,

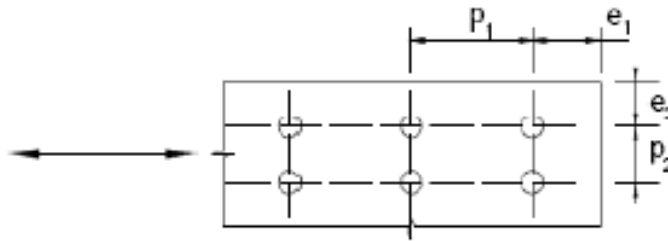
$\alpha = \min \{e_1/(3d_0); f_{tb}/f_t; 1\}$ per bulloni di bordo nella direzione del carico applicato,

$\alpha = \min \{p_1/(3d_0) - 0,25; f_{tb}/f_t; 1\}$ per bulloni interni nella direzione del carico applicato,

$k = \min \{2,8e_2/d_0 - 1,7; 2,5\}$ per bulloni di bordo nella direzione perpendicolare al carico applicato,

$k = \min \{1,4p_2/d_0 - 1,7; 2,5\}$ per bulloni interni nella direzione perpendicolare al carico applicato,

essendo e_1 , e_2 , p_1 e p_2 indicati nella seguente figura, e d_0 il diametro nominale del foro di alloggiamento del bullone.



- trazione della lamiera: la resistenza a trazione della lamiera è pari a al minore dei valori ottenuti dalle seguenti espressioni:

- membratura compressa: $N_{c,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$; $N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$

- membratura tesa: $N_{pl,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$; $N_{t,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_{tk}}{\gamma_{M2}}$

dove γ_{M0} è un coefficiente pari a 1,05; γ_{M2} è un coefficiente pari a 1,25; f_{yk} è la resistenza a snervamento dell'acciaio e f_{tk} quella a rottura definite alla tabella 11.3. IX:

Tabella 11.3.IX – Laminati a caldo con profili a sezione aperta

Norme e qualità degli acciai	Spessore nominale dell'elemento			
	$t \leq 40$ mm		40 mm $< t \leq 80$ mm	
	f_{yk} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]
UNI EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	420	550
UNI EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
UNI EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
UNI EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490

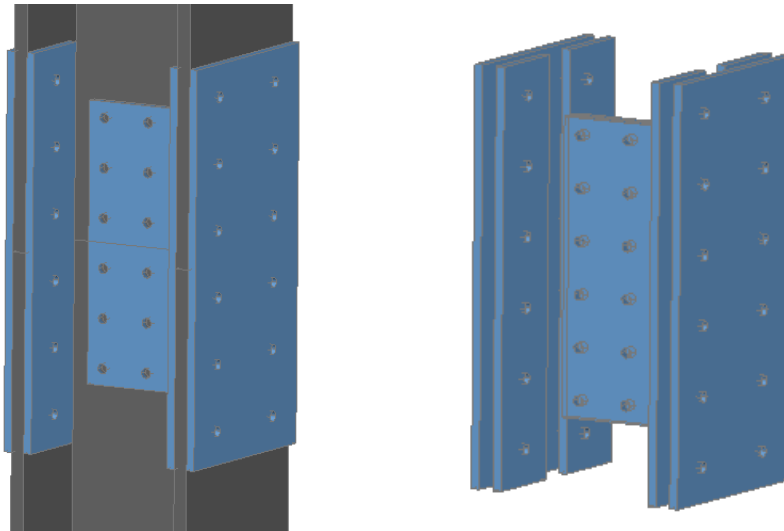
- taglio della lamiera: si devono rispettare i rapporti dimensionali indicati dalla tabella 4.2.XIII di seguito riportata:

Tabella 4.2.XIII Posizione dei fori per unioni bullonate e chiodate.

Distanze e interassi (Fig. 4.2.3)	Minimo	Massimo		
		Unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni non esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni di elementi in acciaio resistente alla corrosione (EN10025-5)
e_1	$1,2 d_0$	$4t+40\text{mm}$	-	$\max(8t; 125\text{mm})$
e_2	$1,2 d_0$	$4t+40\text{mm}$	-	$\max(8t; 125\text{mm})$
p_1	$2,2 d_0$	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 175\text{mm})$
$p_{1,0}$	-	$\min(14t; 200\text{mm})$	-	-
$p_{1,i}$	-	$\min(28t; 400\text{mm})$	-	-
p_2	$2,4 d_0$	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 200\text{mm})$	$\min(14t; 175\text{mm})$

L'instabilità locale del piatto posto tra i bulloni/chiodi non deve essere considerata se $(p_1/t) < [9(235/f_y)^{0.5}]$: in caso contrario si assumerà una lunghezza di libera inflessione pari a $0.6 p_1$.
 t è lo spessore minimo degli elementi esterni collegati.

Si riportano di seguito i risultati delle verifiche condotte sulla bullonatura più sollecitata da momento flettente e taglio nelle combinazioni SLU.



Dettaglio del collegamento pilastro-pilastro.

SOLLECITAZIONI CONSIDERATE NELLA VERIFICA		
Msd	37200000,00	Nmm
Tsd	20100,00	N

PROFILO METALLICO HEB 240		
altezza	h (mm)	240
spessore ala superiore	ts (mm)	17
larghezza ala superiore	bs (mm)	240
spessore anima	tw (mm)	10
altezza anima	hw (mm)	206
spessore ala inferiore	ti (mm)	17
larghezza ala inferiore	bi (mm)	240
area ala superiore	As (mm ²)	4080
area anima	Aw (mm ²)	2060
area ala inferiore	Ai (mm ²)	4080
area totale	Atot (mm ²)	10220
momento statico ala superiore	Ss (mm ³)	944520
momento statico anima	Sw (mm ³)	247200
momento statico ala inferiore	Si (mm ³)	34680
momento statico totale	Stot (mm ³)	1226400
baricentro trave	yg (mm)	120
momento inerzia trave x	Jx (mm ⁴)	7481366,67
momento inerzia torsionale	Jw (mm ⁴)	854746,667
modulo elastico	E (MPa)	206000
momento inerzia trave y	Jy (mm ⁴)	39185166,7
Janima	Jw (mm ⁴)	7284846,67
Jala inf	Ji (mm ⁴)	50821840
Jala sup	Js (mm ⁴)	50821840

AREA NETTA PIASTRA	
anima (mm ²)	1195
piattabanda superiore (mm ²)	2130
piattabanda inferiore (mm ²)	2130
spessore piatto (mm)	10

PROGETTO E VERIFICA DELLA BULLONATURA D'ANIMA		
n° coprigiunti	n°c =	2

distanza flangia coprigiunto	b (mm) =	23
altezza coprigiunti	hc (mm) =	160
distanza primo ultimo foro verticale	(n°bf-1)*pv (mm) =	120
distanza bullone fine coprigiunto verticale	e1 (mm) =	20
semi larghezza coprigiunto orizzontale	lc/2 (mm) =	180
distanza bullone fine coprigiunto orizzontale	e2 (mm) =	20
spessore coprigiunti	tc (mm) =	10
diametro bulloni	d (mm) =	12
Diametro foro alloggiamento bullone	d0 (mm) =	13,5
classe di resistenza bulloni	classe =	10,9
tensione di rottura bulloni	ftb(Mpa) =	1000
area resistente bullone	Ad (mm ²) =	113,10
n° file bulloni	n°fb =	3
n° bulloni per fila	n°bf =	3
n° bulloni totale	n°b =	9
distanza orizzontale bulloni	p1 (mm) =	60
distanza verticale bulloni	p2 (mm) =	60
coord x baricentro bulloni	x (mm) =	60
coord y baricentro bulloni	y (mm)=	60
sommatoria x ²	Σx ² (mm ²) =	2,16000E+04
sommatoria y ²	Σy ² (mm ²) =	2,16000E+04
beta	β (rad) =	0,79
distanza bullone + esterno	r max (mm) =	84,85
momento anima x	Max (Nmm) =	3,78308E+07
taglio anima y	Tay (N) =	2,01000E+04
forza obliqua dovuta al momento x	Smax,Mx (N) =	7,43068E+04
componente orizzontale del momento x	Smax,Mx,orizz (N) =	5,25428E+04
componente verticale del momento x	Smax,Mx,vert (N) =	5,25428E+04
Taglio singolo bullone,verticale	T b,v (N) =	2,23333E+03
Forza orizzontale	Fo (N) =	5,25428E+04
Forza verticale	Fv (N) =	5,47762E+04
risultante sul bullone più sollecitato	Fv,Ed(N) =	7,59024E+04
verifica a taglio del bullone più sollecitato	Fv,Rd(N) =	9,05E+04
coefficienti per il calcolo della resistenza a rifollamento della lamiera	α=	0,49
	k=	2,45
verifica a rifollamento coprigiunti/anima	Fb,Rd(N) =	1,18E+05
verifica a taglio piastra	e1 min (mm) =	16,2

e1max (mm) =	80
e2 min (mm) =	16,2
e2 max (mm) =	80
p1min (mm) =	29,7
p1max (mm) =	140
p2min (mm) =	32,4
p2max (mm) =	140

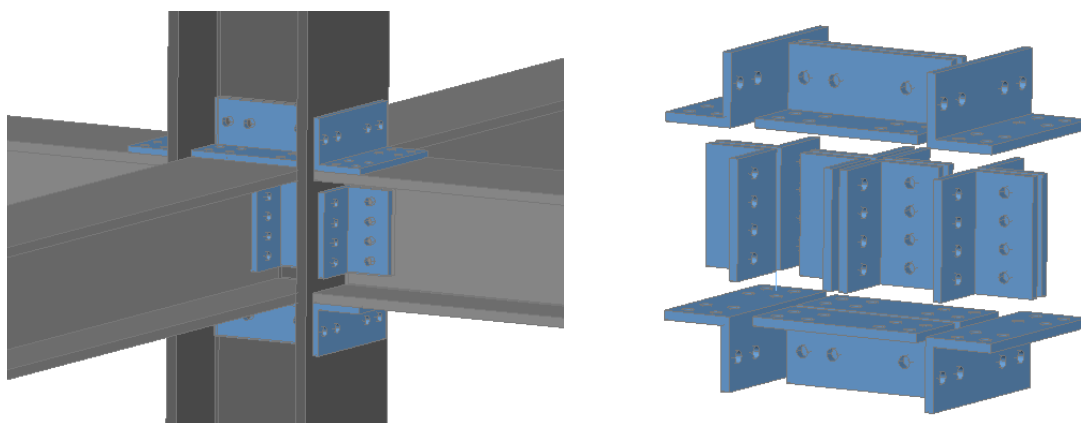
PROGETTO E VERIFICA DELLA BULLONATURA DELL'ALA		
n° coprighiunti	n°c =	2
spessore coprighiunti	tc (mm) =	10
diametro bulloni	d (mm) =	12
diametro foro alloggiamento bullone	d0 (mm) =	13,5
classe di resistenza bulloni	classe =	10,9
resistenza a taglio bulloni (Mpa)	ft,b (Mpa) =	1000
area resistente bullone (mm ²)	Ad (mm ²) =	113,10
n° bulloni per fila	n°bf =	2
n°file di bulloni	n°fb =	3
n° bulloni totale su metà flangia	n°b =	6
distanza orizzontale bulloni	p1 (mm) =	80
distanza verticale bulloni	p2 (mm) =	130
distanza verticale a cavallo dell'anima	b (mm) =	130
distanza verticale tra bullone centrale ed anima	z (mm) =	60
altezza coprighiunto = larghezza flangia	lf (mm) =	240
distanza verticale tra fine flangia e ultimo bullone	e2 (mm) =	55
distanza orizzontale tra fine coprighiunto e ultimo bullone	e1 (mm) =	40
semi larghezza coprighiunto orizzontale	lc/2 (mm) =	240
momento residuo agente sulle flange	Mf (Nmm) =	9,77E+05
Forza da momento agente sulla singola flangia	FMf (N) =	4,38E+03
forza orizzontale totale sul singolo bullone	R (N) =	7,30E+02
verifica a taglio del bullone più sollecitato	Fv_Rd(N) =	9,05E+04
coefficienti per il calcolo della resistenza a rifollamento della lamiera	α=	0,99
	k=	2,50
verifica a rifollamento coprighiunti/ali	Fb,Rd(N) =	1,21E+05
verifica a taglio piastra	e1min (mm) =	16,2

e_{max} (mm) =	80
$e2_{min}$ (mm) =	16,2
$e2_{max}$ (mm) =	80
$p1_{min}$ (mm) =	29,7
$p1_{max}$ (mm) =	140
$p2_{min}$ (mm) =	32,4
$p2_{max}$ (mm) =	140

Le verifiche del collegamento pilastro-pilastro risultano verificate.

6.6.7 Verifica del collegamento trave-pilastro

Si esegue la verifica del collegamento più sollecitato allo SLU secondo la procedura descritta al precedente paragrafo.



Dettaglio del collegamento trave-pilastro.

Si utilizzano bulloni M12 e si dispongono squadrette d'anima di dimensioni 70mm x 70mm, spessore 10 mm e altezza 130 mm; tali dimensioni consentono di soddisfare le verifiche dimensionali:

Distanze e interassi	Minimo	Massimo	Realizzato
e1 [mm]	16,2	-	20
e2 [mm]	16,2	-	35
p1 [mm]	29,7	140	30
p2 [mm]	32,4	140	-

Per le squadrette in corrispondenza delle ali si dispongono L di dimensioni 80mm x 80mm, spessore 10 mm e altezza 200 mm (uguale a quella della trave); tali dimensioni consentono di soddisfare le verifiche dimensionali:

Distanze e interassi	Minimo	Massimo	Realizzato
e1 [mm]	16,2	-	18
e2 [mm]	16,2	-	19
p1 [mm]	29,7	140	34
p2 [mm]	32,4	140	37

SEZIONE DI ATTACCO TRA ANGOLARI E ANIMA/ALI DELLA TRAVE:

Le sollecitazioni massime agenti sono:

SOLLECITAZIONI		
VSd	68,6	kN
MSd	46000	kN mm
MSd, tot	48401	kN mm

Il momento totale è ottenuto sommando al momento agente nella sezione di attacco anche il momento di trasporto dovuto alla distanza del bordo della squadretta rispetto al baricentro dei bulloni.

Nelle verifiche si considera che il taglio sia portato dalla bullonatura d'anima, il momento dalla bullonatura delle ali.

VERIFICA A TAGLIO SUI BULLONI		
n bulloni anima	4	-
V _{v,s}	8,58	kN
n bulloni ala	8	-
V _{M, max}	30,25	kN
Resistenza a taglio dei bulloni (10.9)		
f _{tb}	1000	MPa
γ _{M2}	1,25	
A _{res}	143,14	mm ²
F _{v,Rd}	57,26	kN
Verificato		

VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELL'ANGOLARE D'ANIMA		
k - bulloni di bordo	2,5	-
α - bulloni di bordo	0,494	-
f _{tk}	510	MPa
d	12	mm
t	10	mm
γ _{M2}	1,25	-
F _{b,Rd}	60,4	kN
Verificato: V _{v,s} = 8,58 kN < F _{b,Rd} = 60,4 kN		

VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELL'ANGOLARE D'ALA		
k - bulloni di bordo	2,241	-
α - bulloni di bordo	0,444	-
f _{tk}	510	MPa
d	13,5	mm
t	10	mm
γ _{M2}	1,25	-
F _{b,Rd}	54,9	kN
Verificato: V _{M,max} = 30,25 kN < F _{b,Rd} = 54,9 kN		

VERIFICA A RIFOLLAMENTO SULL'ANIMA		
k - bulloni di bordo	2,5	-
α - bulloni di bordo	0,494	-
ftk	510	MPa
d	13,5	mm
t	9	mm
$\gamma M2$	1,25	-
Fb,Rd	61,2	kN
Fv,Sd	17,15	kN
Verificato: $Fv,Sd = 17,15 \text{ kN} < Fb,Rd=61,2 \text{ kN}$		

VERIFICA A RIFOLLAMENTO SULL'ALA		
k - bulloni di bordo	2,241	-
α - bulloni di bordo	0,444	-
ftk	510	MPa
d	13,5	mm
t	12	mm
$\gamma M2$	1,25	-
Fb,Rd	65,8	kN
Fv,Sd	30,25	kN
Verificato: $Fv,Sd = 30,25 \text{ kN} < Fb,Rd=65,8 \text{ kN}$		

SEZIONE DI ATTACCO TRA ANGOLATI E ALA DELLA COLONNA:

VERIFICA A TAGLIO E TRAZIONE SUI BULLONI		
Ft, Rd	103,06	kN
Ft, Sd	60,50	kN
Verificato: $Ft, Sd = 103,06 \text{ kN} < Ft, Rd = 60,5 \text{ kN}$		

Le verifiche risultano tutte soddisfatte.

6.6.8 Verifica delle bandelle di controvento

Per la verifica del nastro forato chiodato alle ali inferiori delle travi e al solaio, si è realizzato un modello FEM in cui tali elementi, aventi sezione 40 mm x 3 mm, sono stati modellati con elementi non lineari *cutoff bar* in grado di lavorare solo a trazione, l'analisi che si è condotta è perciò un'analisi non lineare.

Il dimensionamento viene effettuato considerando le forze dovute all'azione del vento. Tale carico deve essere amplificato con un coefficiente SLU pari a 1,5 come previsto dalle NT 2008.

Si è quindi condotta la verifica degli elementi più sollecitati, secondo quanto riportato ai paragrafi 4.2.4.1.2-3 - NTC 2008.

VERIFICA DEL DIAGONALE TESO

L'azione assiale di calcolo N_{Ed} deve rispettare la seguente condizione:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

Dove la resistenza di calcolo a trazione $N_{t,Rd}$ di membrature di sezioni indebolite da fori per collegamenti bullonati o chiodati deve essere assunta pari al minore tra i valori seguenti:

- la resistenza plastica della sezione lorda A:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

- la resistenza a rottura della sezione netta A_{net} in corrispondenza dei fori per i collegamenti:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_{tk}}{\gamma_{M2}}$$

Nel caso in esame si sono utilizzate 2 chiodi di diametro 4,5mm ogni 20 cm; per determinare l'area netta si deduce quindi l'area di due fori (d=5mm).

VERIFICA DEL DIAGONALE TESO		
Nsd	6,2	kN
Sezione rettangolare 40 x 3 mm		
A lorda	120	mm ²
f _{yk}	355	MPa
γ _{M0}	1,05	
N _{pl,Rd}	40,57	kN
A netta	90	mm ²
f _{tk}	510	MPa
γ _{M2}	1,25	
N _{pl,Rd}	33,05	kN
N _{t,Rd}	33,05	kN
N _{Ed}	6,2	kN
Verificato		

VERIFICA DELLE TRAVI COMPRESSE

La forza di compressione di calcolo deve rispettare la seguente condizione:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

Dove la resistenza di calcolo a compressione della sezione $N_{c,Rd}$ vale:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad \text{per le sezioni di classe 1, 2, 3,}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad \text{per le sezioni di classe 4.}$$

Non è necessario dedurre l'area dei fori per i collegamenti bullonati o chiodati, purchè in tutti i fori siano presenti gli elementi di collegamento e non siano presenti fori sovradimensionati o asolati.

Si deve eseguire anche la verifica di instabilità dell'elemento compresso, secondo il metodo già descritto in precedenza.

VERIFICA TRAVE COMPRESSA		
Nsd	17,9	kN
Classe del profilo HEB 200		
Anima		
c	134	mm
t	9	mm
ε	0,81	
c/(t ε)	18,38	
Classe 1 (< 33)		
Ali		
c	77,5	mm
t	15	mm
ε	0,81	
c/(t ε)	6,38	
Classe 1 (< 9)		
HEB 200: profilo di classe 1		
VERIFICA A COMPRESSIONE		
A	7808	mm ²
f _{yk}	355	MPa
γ M ₀	1,05	
f _{yd}	338,10	MPa
N _{c,Rd}	2639,85	kN
VERIFICA DI INSTABILITA'		
N _{cr}	2550367,15	N
l ₀	4000	mm
i	50,7	mm
λ	78,90	
λ soprass	1,0425	
α	0,49	
φ	1,2498	
χ	0,5157	
γ M ₁	1,1	
N _{b, Rd}	1299,42	kN

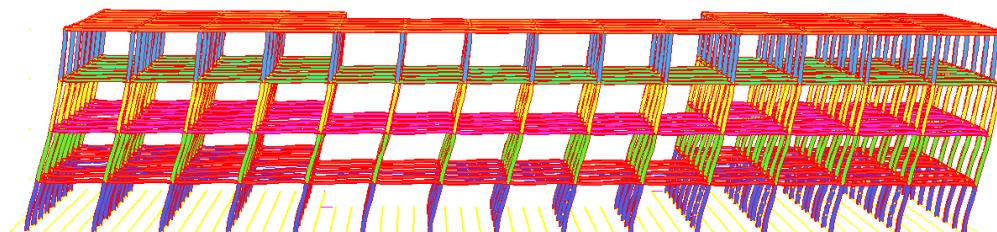
Verificato

Le verifiche risultano soddisfatte.

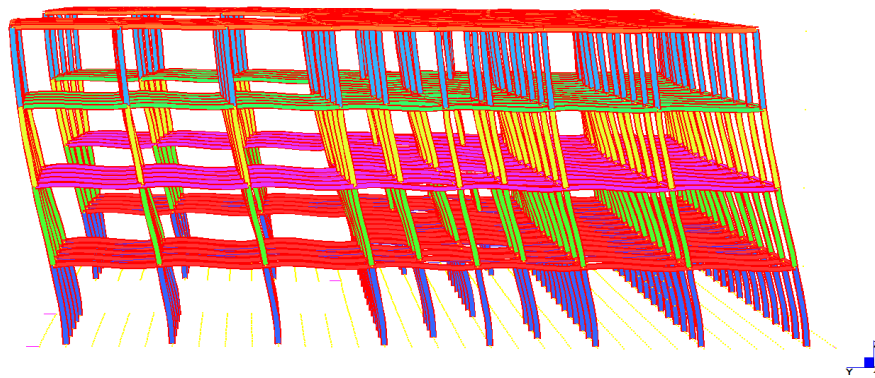
Il contributo di tali elementi, pur avendo una sezione esigua, risulta determinante. La conferma di ciò si ha osservando i naturali modi di vibrare della struttura: i primi due modi movimentano infatti più dell'80% della massa dell'edificio e sono traslazionali lungo le due direzioni principali x ed y rispettivamente. Questo è indice di regolarità e buon funzionamento della struttura. Tale risultato non è altrettanto positivo in assenza di tali elementi; si ottiene infatti un numero superiore di modi di vibrare significativi con un maggior frazionamento della massa tra i vari modi considerati.

MODE PARTICIPATION					
Mode	Frequency (Hz)	Modal Mass (Engineering)	PF-X (%)	PF-Y (%)	PF-Z (%)
1	2.207E+00	2.840E+02	84.243	0.001	0.000
2	2.810E+00	1.925E+02	0.001	79.474	0.000
3	2.877E+00	1.391E+02	0.002	0.451	0.000
4	3.368E+00	1.097E+02	0.024	0.000	0.000
5	3.379E+00	6.689E+01	0.000	2.052	0.000
6	4.249E+00	7.499E+01	0.000	0.195	0.000
7	5.568E+00	1.383E+02	0.003	0.000	0.000
8	6.551E+00	2.215E+02	8.236	0.000	0.000
9	7.073E+00	1.334E+02	0.954	0.000	0.000
10	7.097E+00	1.487E+02	0.002	0.009	0.000
TOTAL MASS PARTICIPATION FACTORS			93.462	82.182	0.000

Nell'analisi spettrale si sono considerati i modi di vibrare che movimentano più del 5% della massa, essi sono 3: il primo, il secondo e l'ottavo.



Primo modo di vibrare, traslazionale lungo x.



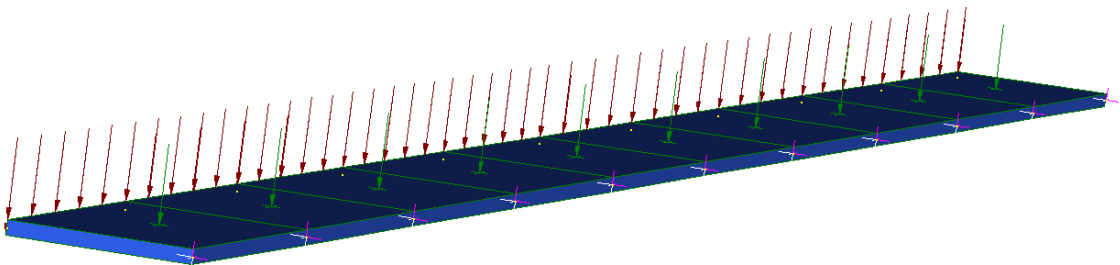
Secondo modo di vibrare, traslazionale lungo y.

6.6.9 Verifica del profilo Z

Il profilo a Z, appoggiato alla trave, sostiene il solaio e quindi i carichi su di esso applicati. L'ala inferiore di tale elemento viene verificata a taglio e flessione.

Per la verifica di questo elemento (100 mm x 8 mm; lunghezza 2 m) si è realizzato un modello FEM in cui l'ala inferiore è modellata tramite elementi plate, caricati dal peso proprio e dal peso di metà solaio, la parte cioè che insiste sull'ala inferiore di un profilo di lunghezza 2 m.

Gli elementi plate sono modellati come incastrati da un lato; ciò corrisponde alla saldatura dell'ala all'anima del profilo Z.



Modello FEM ala profilo Z.

Il peso proprio dell'ala, amplificato del coefficiente SLU 1.3, è stato applicato come carico distribuito sull'elemento stesso; il peso del solaio e il carico di 4 kN/mq relativi

ad un'area di 2 m x 2 m sono stati applicati al bordo del profilo, dopo essere stati incrementati del coefficiente SLU 1.5.

Tramite questo modello si sono determinate le sollecitazioni SLU di taglio e momento con cui verificare la sezione di attacco dell'ala all'anima.

VERIFICA A FLESSIONE RETTA:

VERIFICA A FLESSIONE RETTA		
b	1000	mm
h	8	mm
A	8000	mm ²
J	42666,67	mm ⁴
yg	4	mm
Wel, min	10666,67	mm ³
fyk	355	MPa
γM_0	1,05	
Mc,Rd	3,6063	kNm
MSd	1,6000	kNm
Verificato		

VERIFICA A TAGLIO:

VERIFICA A TAGLIO		
τ_{Sd}	2	MPa
τ_{Rd}	195,20	MPa
Verificato		

L'elemento risulta verificato, si ritiene quindi opportuno lo spessore di 8 mm scelto per il profilo Z.

6.6.10 Dimensionamento della platea di fondazione

Per il dimensionamento della platea di fondazione si utilizza una nota formula nell'ambito del predimensionamento:

$$spessore = \frac{1}{12} L_{max, trave}$$

Dove per $L_{max, trave}$ si intende la massima lunghezza delle travi utilizzate.

Nel caso in esame si sono utilizzate travi lunghe tutte 4 m. Lo spessore derivante dalla formula è quindi pari a 35 cm, si decide tuttavia di realizzare una platea di spessore 50 cm, e sporgente 1 m dal bordo dell'edificio.

L'armatura flessionale disposta, consiste in due reti di barre $\phi 12$ con maglia 20 cm x 20 cm. Si considera un copriferro di 6 cm e tra le due maglie si dispongono cavallotti distanziatori.

Al di sotto dei pilastri si dispongono armature aggiuntive per prevenire il fenomeno di punzonamento di tali elementi sulla platea. Supponendo una diffusione dello sforzo normale a 45° all'interno della platea, si calcola l'armatura necessaria considerando il massimo sforzo normale determinato allo SLU del pilastro più sollecitato:

$$A_s = \frac{\sqrt{2} N_{soll}}{2 f_{yd}} = \frac{\sqrt{2} 775000}{2 \cdot 391} = 1402 \text{ mm}^2$$

Si dispongono quindi $8\phi 16 = 1609 \text{ mm}^2$ in entrambe le direzioni sotto a tutti i pilastri.

Normativa

La redazione degli elaborati della struttura in questione è stata fatta tenendo conto della vigente Normativa. Si menzionano nel seguito le leggi e le norme che sono state seguite:

D.M. 14/01/2008, “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui 14/09/2005”.

CNR - UNI 10011/97: Costruzioni di acciaio. Istruzioni per il calcolo, l’esecuzione, il collaudo e la manutenzione.

EC 3 - Progettazione delle strutture in acciaio. Parte 1.1: Regole generali e Regole per gli edifici.

EC 5 – Progettazione delle strutture di legno.

CNR - DT 206/2007: Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione e il Controllo delle Strutture in Legno.

Bibliografia

Piazza M., Tomasi R., Modena R. (2009), *Strutture in legno*, Hoepli Editore.

Volz, *Atlante del legno*, Utet.

Uzielli, *Il manuale del legno strutturale*, Mancosu Editore.

De Angelis, *Progettazione e calcolo delle strutture in legno lamellare*, Dei.

Signorato, *Strutture in legno*, Ribis.

Lavisci, *La progettazione delle strutture in legno. Eurocodice 5 e Norme Tecniche per le Costruzioni*.

F.M. Mazzolani, R. Landolfo, G. Della Corte, B. Faggiano, *Edifici con struttura in acciaio*, IUSS Press.

N. Scibilia, *Progetto di strutture in acciaio*, Dario Flaccovio Editore.

G. Ballio, C. Bernuzzi, *Progettare costruzioni in acciaio*, Hoepli Editore.

Sitografia

www.haus.rubner.com

www.promolegno.com

www.ivalsa.cnr.it

www.illea.it

www.baisotti.it

www.legnonaturale.com

www.pagano.it

www.wolfhaus.it

www.lacasadilegno.it

www.hausidea.it

www.eurodoma.com

www.holzer.it

www.e-costruire.com

www.realtalegno.com

www.totalwood.eu

www.stratex.it

www.klh.it

www.kakonstrukt.it

www.protelegno.com

www.dataholz.com