

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE V.O.

INDIRIZZO STRUTTURE

DAPT

Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale

TESI DI LAUREA

in

Organizzazione Del Cantiere

**PRODUZIONE E CANTIERIZZAZIONE DEL SISTEMA
COSTRUTTIVO A PANNELLI X-LAM**

CANDIDATO:

Palopoli Laura Francesca

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. Marco Alvisè Bragadin

CORRELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. Ario Ceccotti

Anno Accademico 2010/2011

Sessione III

Indice

Introduzione - IL LEGNO

CENNI STORICI	6
CARATTERISTICHE GENERALI DEL LEGNO	7
DERIVATI DEL LEGNO PER USO STRUTTURALE	9

Capitolo 1 - TEORIA E PROGETTO DEL SISTEMA COSTRUTTIVO A PANNELLI DI LEGNO

1.1 PREMESSA.....	11
1.2 INTRODUZIONE	13
1.3 L'USO DEL LEGNO NELL'ARCHITETTURA: DAL TRONCO AL PANNELLO	15
1.4 LA TEORIA: DAL MURO ALLA PREFABBRICAZIONE, DALLA GRIGLIA MODULARE ALLA SCOMPOSIZIONE DELLA SCATOLA QUADRIMENSIONALE.....	21
1.5 IL PROGETTO: I CINQUE PUNTI DEL SISTEMA A PANNELLO	29

Capitolo 2 - IL LEGNO LAMELLARE

2.1 PREMESSA.....	31
2.2 TECNOLOGIA E PRODUZIONE DEL LEGNO LAMELLARE.....	32
2.2.1 LE FASI DEL PROCESSO TECNOLOGICO.....	32
2.2.2 LE COLLE	38
2.3 CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE DEL LEGNO LAMELLARE	40
2.3.1 SCHEMI STATICI ADATTI ALLE STRUTTURE IN LEGNO LAMELLARE	41
2.3.2 IL LEGNO LAMELLARE E LE DEFORMAZIONI.....	41
2.3.3 PREGI, DIFETTI E SICUREZZA DEL LEGNO LAMELLARE.....	41
2.4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO E CLASSIFICAZIONE DEL LEGNO LAMELLARE	43

Capitolo 3 - I PANNELLI X-LAM (CROSS-LAM)

3.1 PREMESSA.....	46
3.2 PROCESSO PRODUTTIVO DEI PANNELLI DI LEGNO DI TIPO X-LAM	47
3.3 REQUISITI PER LA MATERIA PRIMA LEGNO: SPECIE LEGNOSA, PROVENIENZE GEOGRAFICHE, QUALITÀ.....	48
3.4 REQUISITI DI FABBRICAZIONE E PROPRIETÀ FISICO-MECCANICHE DEI PANNELLI X-LAM	50
3.5 LE PROVE STATICHE.....	51

3.6	ALTRE PROVE SPERIMENTALI: DI RESISTENZA AL SISMA E AL FUOCO.....	54
3.7	CARATTERISTICHE DELLA TECNICA COSTRUTTIVA CON PANNELLI X-LAM.....	58
3.8	CRITERI DI PROGETTAZIONE DI EDIFICI X-LAM IN ZONA SISMICA	59

Capitolo 4 - TECNOLOGIA E PROGETTO DEL SISTEMA COSTRUTTIVO IN PANNELLI X-LAM

4.1	PREMESSA.....	62
4.2	REALIZZAZIONE DI EDIFICI IN LEGNO	63
4.3	COSTRUIRE CON IL PANNELLO DI LEGNO: RICOSTRUZIONE DELL'EDIFICIO DI LE CORBUSIER A LES MATHES (1935) CON IL SISTEMA SOFIE	65
4.4	IL PROGETTO SOFIE (SISTEMA COSTRUTTIVO FIEMME).....	66
4.5	IL POTENZIALE DELLA TECNOLOGIA COSTRUTTIVA IN PANNELLI X-LAM DI CASA SOFIE.....	67

Capitolo 5 - IL SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI INERENTI LA SICUREZZA

5.1	EFFICIENZA E SICUREZZA NEI CONFRONTI DELLE AZIONI STATICHE E DINAMICHE. 69	
5.1.1	METODO DI CALCOLO	72
5.1.2	EDIFICIO SEMPLICE A TRE PIANI	73
5.1.3	AZIONI DI PROGETTO E VERIFICA DEI SOLAI E DELLE PARETI.....	76
5.1.4	VERIFICA DELLE CONNESSIONI	77
5.1.5	VARI TIPI DI VERIFICHE.....	78
5.1.6	PROVE SISMICHE EFFETTUATE SU EDIFICI IN SCALA REALE.....	79
5.1.7	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E RISULTATI DELLE PROVE.....	83
5.1.8	PROCEDURA PER DETERMINARE IL FATTORE DI FORMA	84
5.2	COMPORAMENTO AL FUOCO E SICUREZZA IN CASO DI INCENDIO.....	87
5.2.1	RISULTATI DELLA PROVA	92

Capitolo 6 - IL SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI INERENTI IL COMFORT AMBIENTALE

6.1	EFFICIENZA ENERGETICA NELLE COSTRUZIONI: LEGGI E NORME.....	93
6.1.1	LE CARATTERISTICHE TERMO-FISICHE DEGLI ELEMENTI DI INVOLUCRO	95
6.2	LE PRESTAZIONI ACUSTICHE.....	97
6.2.1	CENNI SUGLI INDICI DI VALUTAZIONE ACUSTICA.....	97
6.2.2	ISOLAMENTO ACUSTICO DELLE STRUTTURE IN LEGNO.....	98
6.3	LA VENTILAZIONE ED IL COMFORT DEGLI AMBIENTI RESIDENZIALI	104

6.4	EFFICIENZA DELLA REGOLAZIONE DELL'UMIDITÀ ALL'INTERNO DELLE STRUTTURE PORTANTI AI FINI DELLA DURABILITÀ OTTIMALE	105
6.4.1	UMIDITÀ DI PARETE DEL LEGNO	106
6.4.2	UMIDITÀ DI EQUILIBRIO.....	107
6.4.3	ISOTERMA DI EQUILIBRIO PER IL PANNELLO DI FIBRE DI LEGNO	109
6.4.4	MISURE DI UMIDITÀ DI PARETE.....	110
6.4.5	COMFORT TERMO-IGROMETRICO DELL'EDIFICIO	113

Capitolo 7 - IL SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI DI DURABILITÀ E SOSTENIBILITÀ

7.1	PREMESSA.....	114
7.2	USO DI LEGNO IN ESTERNI: ALTERAZIONE CROMATICA E PROBLEMI DI DURABILITÀ	116
7.3	FUNZIONALITÀ, ESTETICA E INTEGRITÀ DELLE SUPERFICI	118
7.4	STABILITÀ DEL COLORE ALLA LUCE	122
7.5	DURAME	123
7.6	MASSA VOLUMICA NORMALE E STABILITÀ DIMENSIONALE	124
7.7	DURABILITÀ.....	124
7.8	SOSTENIBILITÀ.....	127

Capitolo 8 - CARATTERISTICHE DEL CANTIERE DELLE COSTRUZIONI IN LEGNO: CANTIERE SECCO

8.1	PREMESSA.....	129
8.2	LE COSTRUZIONI A SECCO: EVOLUZIONE COSTRUTTIVA SOSTENIBILE	131
8.2.1	IL SISTEMA A SECCO ED IL SISTEMA A UMIDO.....	132
8.2.2	BIOEDILIZIA E SOSTENIBILITÀ DEL SISTEMA A SECCO.....	133
8.2.3	CANALI DI VENTILAZIONE, CANALIZZAZIONI PER CAVI ED IMPIANTI.....	136
8.3	ORGANIZZAZIONE DEL CANTIERE: CANTIERIZZAZIONE DELLE STRUTTURE IN LEGNO LAMELLARE	137
8.3.1	SICUREZZA NEL CANTIERE DELLE COSTRUZIONI IN LEGNO.....	142
8.3.2	PIANO OPERATIVO DI SICUREZZA	143
8.3.3	PIANO DI SICUREZZA E COORDINAMENTO	145
8.3.4	REALIZZAZIONE E ASSEMBLAGGIO DELLE CASE IN LEGNO, SICUREZZA DEI LAVORATORI: INFLUENZA SU TEMPI E COSTI	146
8.3.5	CENNI SUL CANTIERE TRADIZIONALE.....	147
8.4	I PONTEGGI.....	148
8.4.1	GLI ANCORAGGI.....	150
8.4.2	IL PROGETTO DEI PONTEGGI.....	151

8.4.3	I CRITERI DI MISURAZIONE DEI PONTEGGI	151
8.4.4	REALIZZAZIONE DEL PONTEGGIO	152
8.4.5	MONTAGGIO DEL PONTEGGIO.....	154
8.4.6	I PONTEGGI E GLI ANCORAGGI DELLE COSTRUZIONI IN LEGNO	158
8.5	PRODUZIONE E POSA IN OPERA DEI PANNELLI X-LAM	160
8.5.1	FORNITURA, TRASPORTO E DEPOSITO (STOCCAGGIO) IN CANTIERE	161
8.5.2	DEMOLIZIONE E GESTIONE RIFIUTI	162

Capitolo 9 - LA REALIZZAZIONE DEL COMPLESSO RESIDENZIALE A SERRAVALLE, COMUNE DI ALA (TN)

9.1	PREMESSA.....	164
9.2	CARATTERISTICHE DELL'OPERA.....	165
9.3	VISTE VIRTUALI DEL COMPLESSO RESIDENZIALE DI SERRAVALLE E PROSPETTI DELL'EDIFICIO C (O D).....	170
9.4	PROCESSO COSTRUTTIVO E MODALITÀ DI COLLEGAMENTO FRA I VARI COMPONENTI STRUTTURALI.....	174
9.5	MATERIALI ISOLANTI E COMPLEMENTARI ECOLOGICI.....	180
9.6	CRITERI DI VERIFICA.....	182
9.7	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	183
9.8	VISITA IN CANTIERE.....	185
9.9	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA	188
	CONCLUSIONI.....	199
	BIBLIOGRAFIA.....	205
	SITOGRAFIA	206

IL LEGNO

Cenni storici

Il legno è il più antico materiale da costruzione, la sua scoperta è antica come l'uomo, più antica della pietra e del mattone, per il fatto che è facilmente reperibile in natura, leggero e lavorabile.

In esso presente e passato si fondono, infatti il primitivo rifugio costituito da ramoscelli di legno inseriti nel terreno, piegati, intrecciati ed uniti con corde di fibre naturali è contemporaneamente una moderna struttura, un graticcio a doppia curvatura.

Nei diversi periodi storici l'uomo ha fatto uso del legno, cercando al contempo e riuscendoci di svilupparne le potenzialità e le qualità. Mentre nella capanna l'intero scheletro portante era costituito da un telaio chiaramente esposto in tutte le sue parti, nel tempio greco, che ne rappresenta l'estremizzazione, grazie alla sua costruzione più raffinata e complessa, la struttura lignea viene mascherata da lavorazioni in pietra. Quindi, nonostante negli anni, il legno venne sostituito progressivamente dalla pietra (sistema trilita), nell'architettura greca e dalla muratura (sistema ad arco), in quella romana, non fu mai abbandonato del tutto, in quanto ritenuto un complemento indispensabile nelle diverse tecnologie, come ad esempio nella costruzione di coperture o di solai, o come materiale di rivestimento o di ornamento.

Nel tempo, appare evidente come alcune metodologie costruttive abbiano compiuto passi fondamentali per lo sviluppo dell'utilizzo di questo materiale, non solo per le sue caratteristiche intrinseche (leggerezza, facilità ed adattabilità all'uso), ma anche perché "povero" e facilmente accessibile.

Inoltre, le nuove tecnologie del legno portano vantaggi immediati nei tempi e nei costi di costruzione, specialmente se si pensa al processo industriale, che negli anni del suo sviluppo portò sul mercato una nuova tendenza: la prefabbricazione.

Tutto ormai sembrava diretto verso questa direzione : case a costi bassi, prefabbricazione di elementi costruttivi prima e di cellule abitabili poi, facilità di montaggio, progettazione modulare e componibile.

Tuttavia, il legno ha continuato a subire in maniera positiva i cambiamenti e le innovazioni, passando da tecnologia-artigianale a tecnologia-meccanizzata.

Da qui tutti i suoi derivati, tipo il legno lamellare e i pannelli x-lam, i cui aspetti in parte verranno trattati nei capitoli successivi.

Caratteristiche generali del legno

Il legno è un materiale naturale di origine biologica, che si ricava dai tronchi degli alberi, utilizzato sia in forma originaria, ad esempio per paleria, sia dopo opportune lavorazioni, quali segagione, sfogliatura, che sotto forma di prodotti o derivati (legno massiccio, legno lamellare incollato, pannelli di fibra, di particelle,...).

Il legno è un materiale anisotropo, la cui struttura è costituita da elementi cellulari sottili ed allungati, disposti in modo vario, a seconda della specie, con orientamento generale (fibratura) circa parallelo all'asse del tronco. La struttura orientata conferisce una spiccata ortotropia alla maggior parte delle proprietà del legno. Inoltre, la schematizzazione del tronco ad un cilindro individua un comportamento di materiale ortotropo a simmetria cilindrica, con due direzioni principali, longitudinale e trasversale alla fibratura, che ne individuano le proprietà fondamentali.

Macroscopicamente il legno è caratterizzato dal colore, dalla venatura (anelli annuali di accrescimento), dalla tessitura (dimensione più grande degli elementi cellulari), dalla fibratura (direzione dell'asse longitudinale degli elementi cellulari), ma anche dalla presenza di “difetti”, che peggiorano le sue prestazioni in determinati impieghi strutturali. Tra questi difetti ci sono: i nodi, cioè residui di rami rimasti inglobati nel tessuto legnoso; le fessurazioni, originate dall'anisotropia fisiologica dei ritiri, da gradienti di umidità, da essiccazione mal condotta, le deformazioni, dovute oltre che a ritiri anomali, a tensioni interne, fibratura inclinata; presenza di anomalie, attacchi di funghi o di insetti.

C'è differenza, quindi, fra “legno netto”, ossia legno di provette di piccole dimensioni, appositamente ricavato senza difetti dalla massa legnosa ed elementi di legno in dimensioni di uso strutturale. In generale, il legno netto tende ad essere duttile a flessione, mentre il legno strutturale è per lo più fragile, per cui la resistenza di questo materiale dipende dalla distribuzione dei difetti all'interno del volume sollecitato e quindi la resistenza unitaria tende a calare al crescere della dimensioni dell'elemento strutturale. A causa del difetto nella zona tesa, la rottura ha luogo dalla parte delle fibre tese, prima che si possano raggiungere le dilatazioni di plasticizzazione della zona compressa.

Il legno è un materiale che presenta un'elevatissima variabilità di tutte le sue caratteristiche, che non dipende solo dalla specie legnosa (una quercia è più resistente a flessione di un abete), a anche dalla provenienza (un abete rosso cresciuto in Finlandia è più resistente di uno cresciuto in Italia) e dalla naturale

difettosità dell'elemento (un abete rosso pieno di nodi è meno resistente di uno senza nodi). Per questo l'ingegnere, che ha bisogno di materiali affidabili, è portato a preferire materiali dalle proprietà modestamente variabili.

Il legno è un materiale sensibile all'umidità, ossia al variare delle condizioni ambientali, essendo igroscopico, può continuare in maniera indefinita ad adsorbire e desorbire l'umidità atmosferica, tenendo ad equilibrarsi con le condizioni termoidrometriche dell'ambiente in cui si trova.

Il legno può venire degradato da agenti fisici e meteorici (fuoco, esposizione alle intemperie, ecc...) e soprattutto da agenti biologici, quali gli insetti, le cui gallerie indeboliscono la struttura o i funghi, che causano il marciume e richiedono condizioni di umidità elevata.

In certi casi il legno è naturalmente durabile, cioè contiene nelle cavità cellulari sostanze atte a preservarlo da attacchi biologici, ma in altri casi può essere preservato mediante se impregnato con apposite sostanze in grado di assicurarne la durata in opera anche per lungo tempo.

Il legno è un combustibile, di conseguenza brucia, ma le modalità secondo cui avviene la combustione fanno sì che le strutture di legno possano avere ottima resistenza all'incendio (bassa conducibilità termica, basso coefficiente di dilatazione lineare, bassa velocità di carbonizzazione). Per resistenza al fuoco si intende il tempo espresso in minuti che intercorre tra l'accensione del fuoco ed il crollo della struttura, ossia la perdita della sua capacità portante. Inoltre, una volta che l'incendio si è sviluppato, la resistenza al fuoco delle strutture di legno risulta, in genere, superiore a quella delle strutture di acciaio, dato che quest'ultimo perde rapidamente rigidità, in quanto il crollo avviene per sopraggiunta instabilità dell'equilibrio. Il legno, invece, è capace di mantenere sotto lo strato carbonizzato un valore dei moduli elastici inalterato rispetto al caso freddo. La reazione al fuoco del legno e prodotti derivati (facilità di accensione, velocità di propagazione della fiamma, emissione di gas tossici o fumi, gocciolamento, ecc...) è tale da far classificare il legno nelle migliori classi di comportamento.

Derivati del legno per uso strutturale

Tra i principali prodotti di legno o derivati dal legno, utilizzati nel settore delle strutture, ci sono: il **legno massiccio**, usato sia sotto forma di pali o di segati di vario spessore e dimensioni, sia come elementi singoli o assemblati mediante chiodatura e/o incollaggio; il **legno lamellare incollato**, ottenuto incollando a pressione tra di loro tavole di legno sia di testa, mediante giunti a dita, che di faccia, nella qualità e misure dovute e i **pannelli strutturali** :

- *pannelli compensati*, ottenuti incollando sotto pressa vari fogli di legno di opportuna misura con fibratura incrociata, in modo da ridurre l'anisotropia del legno massiccio ed ottenere una migliore stabilità dimensionale. I compensati vengono usati per pareti con funzione di irrigidimento, elementi strutturali, travi composte, gusci, ecc...;
- *pannelli di fibre o particelle*, formati col legno ridotto in frammenti o in fibre "ricostituito" mediante pressatura con l'aggiunta di idonei leganti. Di particolare interesse appare un recente tipo di pannello, detto **MDF** (Medium Density Fiberboard), che presenta resistenze meccaniche e lavorabilità analoghe a quelle del legno massiccio, elevata isotropia e ridottissima variabilità.

In generale, il legno lamellare è un tipo di legno che non nasce spontaneamente in natura, ma viene costruito dall'uomo. L'esigenza di creare questo tipo di legno nasce dal fatto che la natura non offre legnami idonei a soddisfare tutte le esigenze dell'uomo, in particolare per superare il limite dimensionale, data l'esigenza di avere legni con curvature e raggi ben precisi.

E' stata la creazione di buoni collanti che ne ha reso possibile la realizzazione. I primi esemplari si vedono in Europa già all'inizio del secolo scorso, mentre in Italia, precisamente a Bressanone, nel 1970 circa, nasce il primo stabilimento per la produzione del legno lamellare, per cui si ridusse il necessario ricorso all'importazione di questo prodotto. Nel nostro paese l'impiego del legno lamellare nell'edilizia, quale prodotto alternativo, rappresenta una storia recente.

Si tratta, dunque, di un prodotto composito. La tecnica per la sua realizzazione consiste nel dividere il tronco in "assi" (lamelle), dello spessore di 3-4 cm e dell'assemblaggio degli stessi con speciali collanti. Con questa tecnica è possibile ottenere elementi di dimensioni e forme desiderate, superando i limiti che la

natura pone, dato che non esistono alberi e quindi tronchi di illimitate forme e dimensioni.

Il legno lamellare presenta una caratteristica molto particolare, pur essendo stato costruito partendo da un materiale particolarmente combustibile, quale il legno, rappresenta un prodotto con un'altissima resistenza al fuoco, a volta addirittura superiore a quella del metallo.

Infatti, nel legno lamellare la combustione avviene lentamente, in virtù del buon isolamento termico che esso presenta.

Questa proprietà è la conseguenza della carbonizzazione del suo strato superficiale.

La maggiore o minore resistenza al fuoco è proporzionale alla velocità di carbonizzazione, fattore preventivamente misurabile.

Inoltre, la resistenza meccanica del legno lamellare risulta essere superiore a quella del legno massiccio, da cui esso trae origine, grazie all'impiego di legnami scelti, assemblati con collanti particolarmente resistenti.

TEORIA E PROGETTO DEL SISTEMA COSTRUTTIVO A PANNELLI DI LEGNO

1.1 Premessa

Il tema della composizione degli edifici che utilizzano come elemento strutturale il pannello di legno ci pone di fronte alla necessità di formulare una riflessione capace di ricondurre le questioni tecniche all'interno del progetto.

L'obiettivo, ovviamente, è quello di orientare il pensiero progettuale verso la corretta sistemazione dei singoli elementi, come avviene per la casa in muratura ed in cemento armato, per cui il percorso progettuale non è determinato dalla tecnica e dall'uso del materiale, ma dagli esiti formali, tenendo però ben chiari i principi alla base delle tecniche e dei materiali utilizzati.

L'analisi che ripercorre nel tempo le fasi dell'utilizzo del legno non ha la pretesa di una ricostruzione storica, ma sottolinea e ricorda quei passaggi che meglio ne evidenziano i cambiamenti.

Questo modo di procedere è legato all'esigenza di far subito comprendere il punto fondamentale del ragionamento, ossia che non esiste una sola maniera di progettare usando pannelli strutturali di legno, ma un preciso rapporto tra le regole del comporre e la chiarezza degli elementi che partecipano alla realizzazione dell'opera.

L'attenzione alla specificità del materiale utilizzato si basa sulla conoscenza delle potenzialità e dei limiti, oltre che sulla ricerca della più idonea spazialità, necessaria per cogliere le trasformazioni nel tempo.

L'analisi ha evidenziato una mancanza di "ricerca del limite" ed un processo compositiva che rinuncia all'architettura, ma punta alla "buona edilizia", puntando l'attenzione al solo processo costruttivo dell'elemento strutturale ed agli accorgimenti che rendono la fase più funzionale.

Lo spirito del nuovo e la continua capacità di comprendere lo sviluppo della società alimenta la ricerca spaziale, che usa i materiali come strumento per raggiungere nuovi traguardi.

La novità non è il materiale, ma la capacità di esprimere spazi e relazioni differenti, sempre ancorati nella storia in un processo di continua innovazione.

Il pensiero del progettista, dunque, è volto all'utilizzo delle conoscenze nella ricerca della definizione dello spazio e del suo significato.

La conoscenza del materiale pone l'attenzione su questioni che, in un progetto inerente all'uso di pannelli strutturali di legno, devono essere affrontate per determinare la qualità del prodotto e la coerenza compositiva spaziale.

L'individuazione di cinque punti, che corrispondono a diverse parti di un manufatto ed esprimono le relazioni con il luogo e l'articolazione degli spazi e del volume, pone la necessità di risposte per un uso corretto dell'elemento strutturale in oggetto e ricerca una progettazione tesa al limite, un limite mai definito, che mostra anche la flessibilità nella coerenza offerta da un sistema compositiva-strutturale, quale il pannello in legno.

1.2 Introduzione

Mentre una volta progettare e costruire un edificio erano opera della stessa persona, col passare del tempo questi aspetti si sono scissi, così il progettista ha lasciato sempre più spazio al suo arricchimento tecnico-scientifico e l' homo faber si è indirizzato verso la specializzazione.

Divenuto oggetto di un processo di industrializzazione, il progetto confluisce in un mare di precisazioni ed indicazioni scientifiche, fino a ridurre le disposizioni, che traducono operativamente acquisizioni tecniche e scientifiche in un linguaggio basilare. A questo si aggiunge il ruolo della normativa, vista come un vincolo ed una risorsa, che tende a semplificare i linguaggi disciplinati del progetto.

Nello stesso tempo, però, il costante riferimento a codici, parametri dati, incombe sulla progettazione e genera, talvolta, la composizione di pesanti e sovraccariche soluzioni. Tuttavia, il fine della progettazione dovrebbe essere quello di condurre il linguaggio di un'opera e del suo farsi attraverso le scelte dei procedimenti tecnico-costruttivi consoni alle opzioni adottate.

In questo senso, l'approccio dell'architetto e quindi delle tecniche deve essere posto in continuo contatto con i sistemi cui deve rapportarsi, ponendo relazioni e costruendo legami fra i vari aspetti.

La chiarezza e l'ordine logico della struttura è fondamentale per determinare una corretta sollecitazione dei carichi e per permettere la scelta dei materiali più idonei all'utilizzo. Inoltre, al sistema strutturale così definito bisogna necessariamente aggiungere la definizione dell'involucro, che deve presentare i migliori accorgimenti possibili dal punto di vista della gestione climatica dell'edificio.

Lo studio della ventilazione, l'attenzione rivolta all'interazione dell'edificio con l'ambiente circostante, l'uso consapevole dei materiali, la giusta illuminazione, la corretta esposizione e la geometria del fabbricato, devono portare ad un manufatto stabile ed in sintonia con l'ambiente, capace di regolare la sua climatizzazione per ridurre di una quota sensibile il fabbisogno energetico dell'edificio e, quindi, lo spreco di energia a combustione fossile.

Si tratta di affrontare il complesso progetto di architettura, che può anche far uso della tecnologia lignea, sapendo che definire il sistema costruttivo del pannello di legno significa porsi di fronte a differenti tematiche, quali: la definizione del pannello come intento progettuale, l'affinità compositiva tra la parete portante di legno e il sistema muro, la prefabbricazione e le caratteristiche tecniche proprie del materiale (la portata, il carico a compressione, la resistenza a flessione, ecc...).

Inoltre, bisogna considerare la sua qualità, la malleabilità costruttiva, la flessibilità produttiva e trasportare, al contempo, nel prodotto, la tecnica propria del muro.

Secoli di dialogo e di continuo colloquio, che avveniva per le prime costruzioni, che comportavano l'uso misto di materiali primari, quali il legno e la pietra, hanno posto fra le materie una relazione, che oscilla fra il limite ed l'ingegno, tra sperimentazione ed esperienza acquisita. I materiali utili per costruire la città fanno parte di questo processo storico e ci raccontano l'età, il tipo di lavorazioni, la metodologia del costruire e anche l'evoluzione della società, con i modi di vivere e di lavorare, la cultura e la conoscenza.

Tornando al legno, il suo racconto ci ha portati a svelare quasi tutte le peculiarità che lo contraddistinguono, in quanto essendo un materiale vivo, in continuo movimento, non è possibile conoscerlo completamente, ma la sua struttura ne svela l'essenza, l'età, la poesia, ma anche la materialità, data dalle stratificazioni, dalle colorazioni e proprietà differenti, in poche parole, ciò che si cerca di ottenere è il senso della composizione, che ne manifesti la specificità.

Ripercorrendo la storia si comprende come l'uomo ed il legno abbiano vissuto a stretto contatto fin dall'antichità e il fatto straordinario e sconcertante è che tutta la conoscenza su questo materiale è stata tramandata per lo più per via orale, o come si dice “di padre in figlio”.

Tutto ciò dimostra come il legno sembri appartenere alla natura umana, in quanto l'homo faber, l'artigiano, il carpentiere hanno da sempre vissuto con questo materiale, reinventandolo e riscoprendolo continuamente e come con il passare del tempo, nel momento in cui la tecnologia perde il fascino della scoperta, si torni inevitabilmente a scoprire che il legno, riprogettandosi in nuovi sistemi costruttivi, segna il passo dell'architettura, del design e dell'arte.

1.3 L'uso del legno nell'architettura: dal tronco al pannello

La storia dell'architettura cerca di dare ordine e di fissare le basi delle principali correnti che si sono evolute, conseguentemente al mutamento delle tecnologie e della vita sociale dell'uomo.

Se storicizzare significa codificare i cambiamenti e determinare il tempo fisico in cui questi accadono, allora risulterà assai difficile ed improprio fissare le basi storiche di questo sistema costruttivo.

Si può, però, ricostruire l'iter storico del legno come materiale e ripercorrere l'uso che ne è stato fatto fin dall'antichità. Gottfried Semper nel suo trattato *Die vier Elemente der Baukunst*, pubblicato nel 1852, riconosce nella capanna caraibica, vista nella Grande Esposizione del 1851, i caratteri dell'abitazione primordiale, contraddistinta da quattro elementi:

1. il basamento,
2. il focolare,
3. l'intelaiatura / tetto,
4. la leggera membrana di chiusura.

L'ingegnere Auguste Choisy nel trattato *Histoire dell'architecture* del 1899 attribuisce l'essenza dell'architettura alla semplice conseguenza logica di uno sviluppo tecnico.

Ostentare il vostro "Art Nouveau" è ignorare tutto l'insegnamento della storia.

Non fecero così i grandi stili del passato. L'architetto delle grandi epoche artistiche trovava la sua più vera ispirazione proprio nei suggerimenti della costruzione, così riconosce nell'ordine dorico il momento costruttivo fondamentale della trasformazione da struttura lignea a muratura e, successivamente, Auguste Perret tradusse nelle strutture in cemento armato il linguaggio proprio delle strutture lignee.

Si può documentare lo sviluppo storico del legno, inteso come materiale da costruzione e distinguere quegli aspetti che ne hanno maggiormente caratterizzato l'uso nel tempo, ossia la parte strutturale, il rivestimento e la finitura.

Il legno nella "veste" strutturale viene pensato sia come telaio verticale che orizzontale (si faccia nuovamente riferimento alla capanna caraibica citata da Semper come ricovero primordiale).

Gli elementi che costituiscono il solaio e la copertura, quali travi (principali e secondarie), puntoni, saettoni, catene, listelli, identificano il telaio orizzontale, mentre la presenza di pareti, pilastri e contro-venti, identifica l'impiego del sistema costruttivo verticale.

L'uso del legno come rivestimento di chiusura esterno sottende l'intento di costituire un involucro, formando un sistema composito associato alla struttura, mentre l'utilizzo all'interno funge da completamento per pareti / contro-soffitti (situazione orizzontale) o pareti e scale (situazione verticale).

Nei diversi periodi storici l'uomo ha fatto uso del legno, cercando al contempo di svilupparne le potenzialità e le qualità.

Nella capanna, l'intero scheletro portante è costituito da un telaio chiaramente esposto in tutte le sue parti, mentre nel tempio greco, che ne rappresenta l'estremizzazione (si ipotizza, infatti, che la costruzione in legno sia diventata col tempo una costruzione più raffinata e complessa), la struttura lignea viene mascherata da lavorazioni in pietra.

Antoine Chrysostome Quatremère de Quincy nel suo Dizionario di architettura (Parigi, 1832), spiega come il passaggio dal primo ricovero, quando l'uomo viveva nella foresta, al concepimento del tempio in pietra, abbia affrontato un lungo percorso di sviluppo.

I primi uomini, dopo l'epoca della vita più o meno selvaggia o agreste, trovandosi già riuniti in società e avendo bisogno di costruzioni più estese e solide, all'inizio della civiltà di civiltà, hanno immaginato, a priori e senza un istinto determinato da un abitudine preliminare, di creare, con l'impiego di pietre tagliate, un insieme di combinazioni ragionate e armoniose tra di loro.

La costruzione in legno fu, dunque, a lungo, la costruzione abituale. Il tempio greco, successivamente, assunse a "modello" la capanna e ne tradusse le connessioni tecnologiche trascrivendole in pietra, conferendo proporzione ed armonia all'intera costruzione.

Sulla divina proporzione, di cui parlano i trattatisti a partire da Vitruvio, si fa forte il pensiero secondo cui l'armonia tra le parti derivasse dal corpo umano (Vitruvio sosteneva a questo riguardo che l'ordine dorico fosse nato dall'osservazione del corpo umano, quello ionico ad imitazione del corpo della donna).

L'evoluzione tecnica della carpenteria fu sostituita da quella dello scalpello e, successivamente, non fu più possibile prescindere dall'uso abbinato dei due materiali.

La sequenza temporale che vede l'evoluzione conoscitiva dell'arte e delle tecniche dal costruire fine a se stesso (la casa come ricovero) al costruire come forma d'arte (il tempio), dal ramo dell'albero come legname da sbazzare, alla costruzione degli elementi strutturali quali travi, colonne, puntoni , determinerà

una maggiore complessità degli edifici, resa possibile anche grazie all'utilizzo composto dei due materiali (pietra e legno).

Karl Botticher nel suo *Die Tektonik der Hellen* (*La tettonica dei Greci*, pubblicata in due volumi fra il 1844 e il 1852) diede un contributo fondamentale per capire la sottile distinzione che aveva prodotto l'uso del legno nel tempio ed il contemporaneo utilizzo della pietra, definendo come *Kernform* la forma intrinseca dei travetti in legno di un tempio greco e con il termine *Kunstform* la rappresentazione artistica degli stessi elementi, che costituiscono le estremità in pietra delle travi, espresse nei triglifi e nelle metope della trabeazione classica.

A fronte dell'architettura greca, possiamo affermare che in Italia gli Etruschi facevano uso della tecnologia del legno per la costruzione dei loro templi e ne abbiamo prova dell'uso che i Romani, al tempo di Vitruvio, facevano ancora di questa materia e nella sua applicazione al tempio da essi denominato toscano.

Negli anni, il legno venne progressivamente sostituito dalla pietra e il sistema costruttivo utilizzato, il trilito, associato al tipo di materiale (la pietra), fu fondamentale per l'architettura greca, come lo furono l'arco e la muratura per le costruzioni romane.

Il legno, comunque, non fu mai abbandonato, in quanto fu ritenuto indispensabile complemento all'uso delle diverse tecnologie, per esempio nella costruzione di coperture, solai, ecc.. .

E'importante notare come in ogni epoca l'uomo fece ricorso ad una tecnologia associata ad un nuovo sistema costruttivo, determinandone in questo modo l'evoluzione.

Nel processo costruttivo dalle origini ad oggi abbiamo visto, grazie al lavoro del carpentiere, come il legno sia stato usato in diversi modi, come struttura (telaio), come materiale di rivestimento o di ornamento.

Le ragioni fondamentali per cui questa tecnologia non ebbe una continuità di utilizzo sono essenzialmente due:

1. il legno era particolarmente sfruttato nelle regioni dove la materia prima era abbondante;
2. l'uso e la sperimentazione di nuovi sistemi costruttivi toglieva l'attenzione da questo materiale, anche se le tecniche rivelano una continua evoluzione nel suo impiego, infatti, si pensi solamente all'affinarsi delle tecniche nel campo nautico dall'antichità ad oggi.

Nel tempo appare evidente come alcune metodologie costruttive abbiano compiuto passi fondamentali per lo sviluppo dell'uso di questo materiale. Non ci è

dato conoscere con precisione il momento in cui queste furono utilizzate per la prima volta, o quale fu la successione degli eventi che portarono a tali necessità.

Possiamo, però, sostenere che l'evoluzione del legno fu continua, non solo per le caratteristiche intrinseche del materiale (leggerezza, facilità e adattabilità d'uso), ma anche in quanto materiale povero e facilmente accessibile.

Contrapponendosi agli sfarzi dei materiali di cava, destinati ai palazzi, alle terme, ai templi, il legno si presenta come quella risorsa che ha saputo adattarsi all'utilizzo di tecnologie e di materiali innovativi, evolvendosi con essi senza essere assorbito e poi dimenticato in determinati periodi storici.

Ad esempio, un particolare sistema di costruzione, denominato Fachwerkbau, usato fin dall'antichità, ma frequentemente presente nel secolo XII, consisteva in un telaio in legno, rinforzato da assi diagonali (controventi) e gli scomparti di questa “maglia spaziale” venivano riempiti con diversi materiali (cotto, impasti di argilla o canniccio). Si otteneva, così, un sistema costituito da una struttura (il telaio) e da una parete (il riempimento) ed il tutto veniva lasciato a vista, disegnando particolarissime facciate arricchite da griglie regolari, che si differenziavano per i contrasti cromatici delle campiture (caratterizzate dal tipo di materiale) e per il ritmo della forometria.

Possiamo rintracciare altri due sistemi costruttivi simili: la costruzione per infissione di pali nel terreno e il Blockbau.

La costruzione per infissione di pali nel terreno era presente nelle Stav-Kirke norvegesi, realizzate a partire dall'anno mille, durante tutto il Medioevo. Questo metodo si presentava immediato e preciso, in quanto la palizzata realizzata si sostiene in piedi senza nessun tipo di incastro.

Il Blockbau (dal tedesco “costruzione a blocchi”), particolarmente usato nelle regioni alpine, in Germania, Norvegia, Svezia, ecc.., consiste nel costruire pareti con tronchi disposti orizzontalmente uno sull'altro, giuntati tra loro agli angoli mediante particolari incastri; alcuni di questi possono essere fatti a “coda di rondine” su tronchi regolarizzati, oppure per immorsatura su tronchi sgrossati.

Questi sistemi tecnologici restituiscono la continuità storica dell'utilizzo del legno come materiale da costruzione, anche se la tecnologia lignea deve subire ancora un altro impasse, a causa dell'impiego del ferro e poi della ghisa, con la scoperta del cemento armato.

Le nuove tecnologie portarono vantaggi immediati nei tempi e nei costi di costruzione, specialmente se pensiamo al processo industriale, che sviluppatosi in quegli anni, portò sul mercato una nuova possibilità: la prefabbricazione.

Tutto ormai sembrava diretto verso questa direzione: case a costi bassi, prefabbricazione di elementi costruttivi prima e di cellule abitabili poi, facilità di montaggio, progettazione modulare e componibile.

In questo periodo, segnato prevalentemente da due correnti di pensiero, quali il Taylorismo ed il Fordismo, prese avvio un nuovo modo di offrire prodotti di qualità a basso costo ed in tempi veloci.

Iniziava, così, un'epoca in cui la "macchina" avrebbe influenzato non solo il mondo del lavoro, ma la stessa società e i suoi valori, l'architettura e l'arte, il tempo dell'uomo e lo spazio della città.

Tuttavia, la tecnologia del legno riesce sempre a subire in maniera positiva i cambiamenti e le innovazioni, passando da tecnologia-artigianale a tecnologia-meccanizzata.

In particolare, negli Stati Uniti, grazie all'introduzione della ferrovia e all'enorme quantità di materia prima disponibile, si assiste ad un'evoluzione del sistema costruttivo a telaio, ovvero del pannello intelaiato, usato ancora oggi, sia negli Stati Uniti e che nel nord Europa, in quanto la presenza di legname è tale da poterne sostenere le necessità.

Questo sistema si differenzia secondo due tecniche costruttive in:

1. **Ballon framing**, cioè la produzione di pannelli prefabbricati modulari formati da montanti continui e da travetti a sezione ridotta, irrigiditi da tamponature, in cui la connessione tra gli elementi avviene per chiodatura;
2. **Platform**, ovvero la produzione di pannelli prefabbricati, con i montanti interrotti ad ogni piano.

Con l'avvento dell'industrializzazione la tecnologia del legno si apre a nuove soluzioni e vede nel riutilizzo dei suoi stessi scarti la possibilità di realizzare nuovi materiali, ma anche di produrre energia attraverso la combustione di biomasse in alternativa al petrolio.

Lo sviluppo della tecnologia del pannello ha portato, una forte innovazione nella produzione di nuovi prodotti come l'OSB, il compensato e il legno stratificato, i pannelli ad uso isolante, come la fibra di legno e l'MDF, prodotti impiegati sia nel campo dell'arredamento che nel campo dell'architettura.

L'uso del legno in forma di pannello o di telaio ci fa comprendere quali siano le caratteristiche tecnico-meccaniche-formali proprie di questo materiale, che rivela potenzialità tali da fornire una molteplicità di modi per interpretarlo e progettarlo.

Facendo attenzione al sistema costruttivo che vede il legno come protagonista, ossia al pannello strutturale, si nota come l'impiego di questo materiale nella veste di parete sia straordinario, in quanto prima non ci si è mai trovati nella condizione di poter paragonare una parete di legno ad una muratura ed ora si può affermare con certezza che il telaio ha ceduto il passo ad un vero e proprio pannello portante.

La tecnologia di questa inesauribile risorsa è approdata agli inizi di questo nuovo millennio a nuove straordinarie mete, portandosi dietro un bagaglio preziosissimo di informazioni, che permettono di esplorare e proiettare nel futuro il più antico materiale del mondo, degnamente rappresentato dal legno.

Ancora oggi come allora l'uomo ha in mano un pezzo di legno vivo, da lavorare, da sbizzare, da tagliare, da scolpire, con cui costruire una città futura, ma sempre guardando al passato.

1.4 La teoria: dal muro alla prefabbricazione, dalla griglia modulare alla scomposizione della scatola quadrimensionale

Agli inizi del XX secolo si verificò un fatto straordinario: industria ed architettura collaboravano per un fine comune, la ricostruzione della città; proprio negli anni in cui presero forza i movimenti del Taylorismo e del Fordismo, basati sulla produzione industriale e sul concetto di quantità e qualità a basso costo e stesso periodo in cui alcuni esponenti del Movimento Moderno si avvicinano a questo tema innovativo per la produzione di soluzioni modulari.

Uno di questi è sicuramente Jean Prouvé che, sin dagli anni venti, considerava l'edificio come un insieme di elementi e componenti, atti a fare dello spazio un meccanismo funzionale; la forma era insita nella costruzione e nel modo di espressione.

Il noto architetto svizzero Le Corbusier (1887-1965) collaborò in alcuni progetti con Prouvé, mostrando particolare interesse al tema della produzione in serie. D'altra parte, il padre del Modulor, non poteva che esserne attratto e applicò alle teorie compositive della sua architettura la logica tempistica della macchina e dei suoi processi.

Nel 1915 con la Maison Dom-ino concepisce un sistema strutturale standardizzato, assolutamente indipendente dalle funzioni della pianta dell'abitazione e nasce così il prototipo su cui sperimentare il rapporto fra struttura ed involucro, destinato a diventare l'icona del Movimento Moderno.

La Maison Dom-ino è una struttura in cemento armato che assicura totale indipendenza e la riproducibilità delle componenti; è una semplificazione concettuale e al contempo un manifesto.

Ma i progetti su cui interessa porre particolare attenzione sono la Maison Citrohan (1920), l'Immeuble Villa (1925) e il progetto per il quartiere Fruges a Pessac.

La Maison Citrohan che rappresenta una delle prime idee di architettura purista di Le Corbusier, è costituita essenzialmente da un parallelepipedo compatto, chiuso nei lati lunghi da due muri continui e con una sezione a scalare all'interno che culmina con il tetto piano (solarium) in copertura. Il dialogo con il paesaggio circostante è definito dalle grandi aperture sui lati corti.

La scala costituisce il collegamento fra i vari livelli, diventando una promenade architecturale, che mette in relazione diretta lo spazio abitato con la città-giardino.

Le Corbusier sviluppa nell'architettura, secondo lo stesso principio, l'interpretazione dello spazio interno ed esterno, simile agli edifici seicenteschi di

Francesco Borromini. Ma questa interpretazione dello spazio totale e di elementi di spazio poteva realizzare un ulteriore progresso soltanto in un'epoca in cui tanto l'arte che la scienza percepissero lo spazio quale entità multilaterale e relativa.

Successivamente, questo primo progetto avrà una prosecuzione in altri studi fino al modello esposto al Salon d'Automne del 1922, dove l'edificio si solleva dal terreno, rimanendo sospeso su pilotis, che costituiscono il basamento liberando il piano terra. Il volume puro rimane evidente, così come la logica compositiva-strutturale dei muri portanti.

Contemporaneamente alla presentazione della Maison Citrohan, Le Corbusier porta al salone del 1922 il progetto per un Immeuble Villa, inserita all'interno di un progetto per una città di 3 milioni di abitanti.

Lo studio venne approfondito per circa 3 anni fino al 1925, rivelando l'importanza di un nuovo campo di interesse dell'architetto: dalla cellula abitativa standard, da produrre industrialmente, l'attenzione stava ora volgendo verso il tema dell'abitazione collettiva, ottenuta grazie all'aggregazione di una tipologia-base. Questo progetto raggruppava all'interno dello stesso edificio gli spazi collettivi, quali: sale comuni, sale giochi per bambini, luoghi per feste, cucina centralizzata, ecc...; si trattava dell'anticipazione dell'Unité d'habitation.

La composizione affronta i temi dell'aggregazione di più cellule sovrapposte, rese funzionali dai servizi comuni, fino a formare un "blocco urbano definito"; per fare questo sfruttò le tematiche utilizzate nella Maison Citrohan (soggiorno su due piani, funzionalità nella distribuzione dei locali, chiarezza strutturale).

Un accento sulla qualità del progetto è dato dal modo in cui viene concepito il volume puro, che in questo caso si presenta con un impianto più articolato, costruendo un ritmo di pieni e di vuoti, che definiscono il prospetto fronte strada.

Il grande terrazzo perde il suo valore privato per diventare uno spazio urbano a tutti gli effetti. La distribuzione avviene attraverso il ballatoio, elemento che ripercorre idealmente dal punto di vista architettonico il chiostro della Certosa di Ema, da lui visitata nel 1907 e nel 1911, che considerava esempio di armonia fra vita individuale e vita collettiva, e che, da un punto di vista prettamente urbano, anticipa la "rue corridor" utilizzata nell'Unité d'habitation.

Appare evidente un rinnovamento continuo, sia nella composizione che nel pensare lo spazio in modo critico, mai concluso.

Successivamente questi studi vennero concretizzati a Pessac, dove Le Corbusier progettò un insediamento residenziale per Henry Frugès nel 1924, in cui si affrontò il problema della pianta e se ne trovò la standardizzazione. Muri,

solai e tetti furono improntati alla massima solidità e funzionalità e montati secondo il sistema tayloristico con macchine.

Le Corbusier continuò incessantemente a voler applicare la dottrina del taylorismo all'edilizia, per ridurre costi e tempi e per avere "economia domestica e costruzione economica".

Il modello proposto riprende ancora una volta i primi progetti per la Maison Citrohane e l'Immeuble Villa; infatti, appaiono sempre evidenti alcuni elementi, quali il volume puro e le grandi aperture, la scala esterna e il tetto-giardino.

Il modulo compositivo è di 5 x 5 m, con mezzi moduli di 2,5 x 2,5 m, che permette di utilizzare una trave di 5 m di lunghezza per tutto l'intervento.

La standardizzazione è evidente in particolare nell'aggregazione delle unità pensate come cellule, ma a far riflettere è la qualità del progetto, mai fine a se stesso, mai tormentato dalla produzione in serie, al passo con i tempi della società e dell'innovazione. La composizione dei volumi appare armonica, con la natura, con l'uomo e con la città.

Nel frattempo, in America, l'opera di un altro grande architetto, F.L.Wright (1867-1959), aveva raggiunto importanti risultati.

Dopo aver lavorato nello studio di Sullivan, Wright intraprese la propria attività professionale progettando alcune tra le più importanti e rivoluzionarie architetture: il Larking Building (1903-1904 Buffalo, N.Y.), la Robie House (1906-1909 Chicago, Illinois), l'Unite Temple (1905-1908 Oak, Park, Illinois).

Wright fondò i principi della sua architettura su tre basi: la tradizione americana, la sua tendenza all'organico e la sua capacità di reperire un linguaggio artistico per il suo tempo.

Si possono evidenziare alcune costanti riconducibili alla progettazione wrightiana, quali il focolare posizionato al centro dello spazio e la pianta a croce, dove i volumi componendosi ed intersecandosi danno origine ad un unico ambiente. Il tetto aggettante e l'arretramento della struttura costituivano spinte prospettiche, in cui l'irrazionalità dei corpi appariva sospesa e sottolineata da marcapiani e cornicioni. L'unità dell'opera veniva rafforzata dall'ornamento che si protraeva dalle superfici vetrate fino alla struttura, dalle pareti verticali al soffitto; gli sfondamenti verso l'alto e le compressioni verso il basso, causati dall'incastro dei volumi, accentuavano la chiarezza compositiva.

Nei capolavori di questo periodo, dalla casa Robie a Chicago alla Gilmore House di Madison, non vi è più traccia di elementi scatolari, ossia, della dialettica di setti in laterizi o intonacati, pareti vitree, aggetti, tetti sporgenti, così si certifica la fine del muro concepito come chiusura dello spazio interno e l'avvento di un

dialogo tra cavità e mondo urbano o naturale, cioè di un continuo, in cui le pareti assumono la funzione non di interrompere, ma di schermare.

La struttura con le superfici vetrate e con i montanti, talvolta strutturali, talvolta scatole murarie, rivela la sequenza temporale e spaziale delle geometrie.

Il tema della continuità appare forte nel Larking Building, dove Wright chiude entro definiti spazi diverse funzioni: la corte centrale, su cui si affacciano i ballatoi, il vuoto delle torri angolari, dove sono inserite le scale ed infine le cavità murarie, che contenevano gli impianti dell'aria condizionata.

Il muro torna ad essere imponente, monumentale, così come appare importante il vuoto fortemente urbano della grande corte centrale. Qui lo spazio è introverso e Wright cerca la verticale con lo sfondamento della copertura, che rompe la staticità e diventa un grande lucernaio.

Questi primi progetti colgono in parte la profonda ricerca spaziale di Wright, che toccherà il suo momento massimo con i capolavori come la Kaufmann House, ma anche con le Usonian House.

Le pareti della casa dovevano partire dal terreno, su un piano di cemento o un basamento di pietra, che appariva come una bassa piattaforma sotto l'edificio, e arrivare sino al livello di davanzale delle finestre del primo piano, per far sì che le stanze sovrastanti fossero ricomprese in una finestra continua sotto le ampie ali aggettanti di un tetto dalla dolce pendenza. Ciò caratterizzò le pareti basse come involucri di chiusura e le pareti del primo piano come involucri trasparenti. Così si realizza una vera recinzione dello spazio interno.

Questi saranno i temi che, nel 1910 a Berlino, in una grande mostra, grazie alle due pubblicazioni di Wasmuth (1910-1911) dedicate all'opera di Wright, scuoteranno artisti ed architetti del Movimento Moderno.

Tornando in Europa, parallelamente agli studi di Le Corbusier sull'alloggio tipo e sulla prefabbricazione, Walter Gropius, fondando la scuola di architettura e di arti applicate, costituì a Weimar la Bauhaus schule, destinata a divenire "camera di decantazione delle avanguardie europee e simbolo ideologico dell'unità del movimento moderno".

In un primo momento W.Gropius voleva indirizzare questa scuola alla fusione fra arti applicate ed artigianato; un esempio è la casa Sommerfeld, progettata con Adolf Meyer, in cui "la poetica del legno è chiamata ad esaltare l'artigianalità del manufatto con intuizioni wrightiane e orientali a un tempo", ma questo non avvenne, soprattutto a causa degli insegnamenti a carattere estetico di Itten, che erano più consoni a liberare l'individuo, per avvicinarlo alla scoperta di se stesso, che a coniugare l'arte alla tecnica.

Il terzo periodo della Bauhaus fu più intenso ed importante; la scuola si trasferì a Dessau e, sotto le direzioni di Walter Gropius, Hannes Meyer e poi Mies Van de Rohe abbandonò completamente l'insegnamento basato sull'evoluzione catartica dell'individuo, per riscoprire un "estetica tecnologica" influenzata da Lazlo Moholy-Nagy e motivata da un nuovo slogan "Arte ed Industria: una nuova unità".

Contemporaneamente, nel panorama culturale europeo prende forza il movimento De Stijl, fondato da Van Doesburg nel 1917, che diffuse un cambiamento radicale nel campo delle Arti applicate.

I principi che si diffusero sono evidenti in alcuni progetti, tra i quali la *Maison particuler*, la *Maison d'artiste* e *Casa Shroeder* di G. Rietveld (Utrecht, 1924), dove tutto è in rotazione, i piani orizzontali (solai) e verticali (pareti), privi di gravità, vivono una spazialità dinamica che oltrepassa la "purezza costruttiva" della tradizione, della struttura a vista, rendendo ibrido l'utilizzo di un materiale rispetto ad un altro; ciò che conta è lo spazio, la sua costruzione, la sua dinamica.

Secondo Rietveld, la realtà che l'architettura può creare è lo spazio ed è tale fine che valgono le nuove possibilità costruttive ed i loro materiali, che assumono senso soltanto se vengono applicati per definire e delimitare chiaramente gli spazi assegnati. Il materiale fine a se stesso non è importante, ma legno, acciaio, cemento armato e vetro sono il mezzo per raggiungere il sommo fine, che è lo spazio.

L'architettura anticubica di Van Doesburg e di Rietveld smonta l'angolo senza interrompere il contenuto dello spazio; l'occhio è costretto ad inseguire le linee ed i piani, che sono soggetti alla forza centrifuga interna, ed a riordinarli idealmente in una forma mentis.

Come nei progetti presentati a Parigi nel 1923 e soprattutto come evidente nella *Maison particuler* e nella *Maison d'artiste*, il pilone centrale, strutturale, funge da perno e da questo si diramano i volumi sospesi, fino a subire un'ulteriore scomposizione che scompaginerà ogni giunzione, gerarchia e simmetria, al fine di porre in una drammatica solitudine il piano, sia questo solaio o parete.

Alla dinamica del movimento De Stijl, guardò sicuramente Mies Van de Rohe, che fu redattore e finanziatore della rivista "G"(Gelstantung, "forza creativa").

Dalle riflessioni sull'opera degli esponenti del neoplasticismo e dai temi wrightiani, Mies Van de Rohe (1886-1969) affronta nel 1922-1923 il progetto per due case in campagna, una in mattoni e l'altra in cemento armato.

Nella casa in mattoni, i piani sembrano influenzati dalla dinamicità delle piante di Wright, ma ciò che più interessa è che il muro ha perso il suo valore di

elemento di confine e questo, inserito in un griglia geometrica scandita dalla stereometria del mattone, apre lo spazio interno a profonde prospettive sempre diverse; l'altezza dei volumi è definita e bloccata dalla soletta piana di copertura. Tutto è scomposto e labirintico, ma a differenza del movimento De Stijl le pareti verticali tendono ad un tutt'uno con il piano orizzontale.

Nella casa in cemento armato questo aspetto è ancora più evidente: esiste, infatti, una continuità planare tra i muri perimetrali ed il tetto piano, che sembra sospeso sulle lunghe aperture a nastro. Il padiglione di Barcellona del 1929 e la casa modello per un celibe, esposta a Berlino nel 1931, segnano una continuità sul ruolo del muro all'interno dello spazio.

Nei due progetti "ciò che divide" diviene organizzatore dello spazio; non ha funzione portante e soccombe alla maglia strutturale dei pilastri cruciformi che scandiscono implacabilmente la metrica. Lo spazio è stato liberato completamente e acquista ora, grazie ai preziosissimi materiali, l'aulico sguardo introspettivo.

Per Mies, d'ora in poi, l'assioma fondamentale è la ricerca del vuoto assoluto, ovvero lo svuotamento del volume, la scarnificazione della struttura e la continuità dell'involucro, su cui si proiettano figure, immagini statiche ed in movimento, riflesse nei due mondi intangibilmente separati: in e out.

Dalla Farnsworth House (1945-1950 Fox River Valley, Illinois) alla Fifty Foot by Fifty Foot (1950-1951), dalla Crown Hall (1950-1956 IIT, Chicago) alla Galleria Nazionale d'Arte di Berlino (1962-1968), è essenziale e paradigmatico il motto miesiano del Less is more.

Nella Farnsworth House il volume è definito perché sospeso, la struttura è esterna per liberare completamente la pianta, il muro viene eliminato, la scansione dello spazio interno è generata dal volume dei servizi, che, posizionato centralmente, permette di poter percorrere tutto il perimetro della casa senza trovare interruzioni.

L'angolo è svuotato dalla struttura che, rientrando, conferisce al volume l'idea della sospensione, senza interrompere lo sguardo verso l'esterno; rimane, così, l'involucro, l'unico elemento a definire la vita domestica da quella en plain air.

Nella Crown Hall la sospensione del volume è data dall'accorgimento tecnico del solaio di copertura che, appeso, materializza il vuoto racchiuso dall'involucro vetrato, mentre l'impianto è stereometrico e suddiviso in tre parti: due spazi liberi, laterali, sono separati da una simmetrica disposizione dei servizi; all'esterno il volume è ritmato dalla tettonica e dalla geometria dei montanti del serramento.

Con la Galleria d'Arte di Berlino le tematiche miesiane sono portate all'estrema solennità. L'edificio appare come un'arca enigmatica che chiude in sé il vuoto

assoluto e la distribuzione dei volumi interni mantiene una simmetria costante, delineata dai blocchi destinati ai servizi e agli impianti di collegamento del basamento, dove è collocato il museo con lo scrigno vetrato dell'ingresso.

Il volume è racchiuso da un dall'involucro vitreo, che separa l'interno dall'esterno ed è protetto dalla copertura, che come nella Fifty by Fifty è sorretta da quattro pilastri.

Il percorso è concluso, l'architettura ha raggiunto lo spazio ideale, ma nello stesso periodo, Louis Kahn (1901-1972) riprende la questione della tettonica come generatrice di una nuova architettura, dove il muro e la colonna, la luce e la centralità sono gli elementi essenziali per giungere a questo scopo.

Nello Yale art Gallery (New Haven, Connecticut 1951-1953) utilizza il telaio in cemento armato come sistema costruttivo e sfrutta il solaio come cavedio per il passaggio degli impianti, integrando così architettura, struttura e tecnologia in un unico elemento.

Nell'architettura domestica Kahn propone in successione le basi per affrontare la grande scala: il pilastro, la luce, il muro.

Il pilastro, costruisce la matrice spaziale nella Adler House (1954-1955), tanto da determinare un modello replicante che, attraverso simmetrie e slittamenti, compone l'articolazione dell'abitazione.

Con il Jewish Community Center (1954-1959) il modello della Adler House ritorna ad essere "tipo" da iterare; l'altezza delle campate determina la funzione e lo skyline del complesso, mentre il pilastro diventa spazio e raccoglie i servizi, permettendo la massima integrazione tra architettura ed impianti.

Secondo il concetto spaziale di Kahn, le colonne, essendo volumi, delimitano gli spazi della luce, così i vuoti diventano stanze e la colonna diventa l'elemento portatore di luce, mentre la casa Fleisher (1959) traduce il modello compositivo precedente in scatola muraria.

La composizione è determinata dalla suddivisione attorno ad un nucleo centrale di cellule/stanze illuminate da decisi tagli e precise interruzioni del muro.

Queste cellule-tipo saranno tradotte in monumentali piloni nell'Alfred Newton Richards Medical Research (1957-1965).

La composizione rispetta le premesse: i locali serviti e serventi sono evidenti, i volumi appaiono leggeri e gravi allo stesso tempo, tutto è straordinariamente radicato a terra.

Le colonne diventano vuoti da riempire con il sistema distributivo delle scale o con gli impianti e alla verticalità, conferita dalla massa muraria opaca, corrisponde

l'aggregazione per cellule sovrapposte, che segnano con una doppia orizzontale i vari livelli.

Nel progetto per la First Unitarian Church and School (1959-1967) il muro attraversa la sua fase intermedia; se nella Fleisher House questo appariva come unità-tipo-stanza, ora diventa espressione della propria massa.

La sistemazione interna prevede l'assemblea posta al centro con i locali di servizio collocati ai bordi; l'idea del recinto murario è evidente e ben studiato e, se il muro, nell'affermazione albertiana, aprendosi ha dato vita alle colonne, è vero che, così facendo, ha fatto passare la luce.

Nella First Unitarian Church luce e ombra misurano lo spessore del muro, che rientra piegandosi, disegnando sui prospetti un drammatico ritmo di chiaroscuri.

Nei progetti successivi, Kahn ritorna costantemente alle questioni già affrontate, elevando alla dimensione del monumento gli spazi.

Le grandi aperture, i volumi periferici, la centralità, la luce, il muro, l'involucro, e la colonna sono espressione di due indefinibili enigmi: il tempo e lo spazio.

Mediante le tematiche affrontate nella ricostruzione storica sull'uso del legno in architettura, grazie anche alle potenzialità di questo materiale, si rileva quanto il mestiere dell'architetto resti fortemente legato sia al momento della ricerca compositiva sia a quello della sperimentazione tecnologica, note le importanti problematiche che i più autorevoli architetti del secolo scorso hanno suscitato e dibattuto, trattando in modi differenti il tema dello spazio, della città e del rapporto dell'uomo con questa.

Le teorie che sono nate grazie a loro, ci permettono di riflettere ancora oggi, sul ruolo che la progettazione deve assumere nei confronti della società e su come l'Architettura si rinnovi continuamente, offrendo nuovi spazi e scenari per migliorare la difficile convivenza tra l'uomo e la natura.

1.5 Il progetto: i cinque punti del sistema a pannello

1. IL BASAMENTO (primo punto):

Il primo pensiero progettuale deve definire la relazione che avrà il nuovo edificio con il luogo.

La progettazione del basamento, in cemento armato o in altro materiale, si colloca in questa fase in relazione con la morfologia del territorio, determinando la tipologia insediativi e risolvendo tre momenti essenziali del costruire: la fondazione (struttura), il distacco tra il pannello di legno ed il terreno (elemento di filtro) ed il piano libero su cui comporre.

2. IL VOLUME (secondo punto):

La questione del volume risponde alla necessità di stabilire i rapporti tra funzione e forma, tra interno ed esterno, in continuo dialogo tra il luogo e lo spazio abitato.

Si sviluppa dalla composizione dei piani (pannello di legno), che assumono la funzione di “muri” e definiscono lo spazio attraverso figure elementari, complesse o modulari.

La costruzione del volume traduce in rapporti armonici lo spazio abitato nelle tre dimensioni, costruendo così nuovi scenari urbani.

3. LA COPERTURA (terzo punto):

La storia ci restituisce una casistica notevole di ciò che rappresenta la copertura, dai tempi greci al Pantheon, dalle complesse coperture all’aggregato medievale, fino tetto giardino corbusierano.

In relazione a questo, all’interno della progettazione e all’uso del pannello di legno per le coperture, si possono sintetizzare tre momenti importanti: come elemento di continuità con l’esterno (inserimento di aperture zenitali), come solarium, tetto giardino o terrazzo, oppure come elemento da cui l’intera composizione è generata, ad esempio edifici con importanti coperture.

4. LO SBALZO-ROTAZIONE (quarto punto):

Le qualità tecnologiche-strutturali di questi tipo di pannello permettono di far uso di temi progettuali, che solitamente sono più consoni ad altri materiali, come ad esempio il cemento armato o l'acciaio.

Il progetto dei tre punti precedenti, ossia basamento+volume+copertura, determina una prima cellula abitativa.

Le qualità strutturali del pannello di legno, essendo questo un elemento unico, non composto da più elementi distinti, come il muro tradizionale, permettono sia di applicare rotazioni che slittamenti all'interno dell'iter progettuale, ricomponendo in infinite variazioni, per sottrazione o addizione, lo spazio abitativo.

5. IL PILASTRO (quinto punto):

L'evoluzione del pilastro rappresenta un filone importante della storia dell'architettura, considerando la continua ricerca compositiva, ma anche l'innovazione tecnologica.

La fusione tra il volume come composizione di piani, la necessità di liberare la pianta per avere più flessibilità e la componente strutturale, coglie nel pilastro l'elemento costruttivo risolutore.

Si può, dunque, pensare il pilastro come un volume e di conseguenza il volume come un pilastro, dove il pilastro cessa di essere un elemento puntuale, mentre il volume si arricchisce del valore strutturale.

II LEGNO LAMELLARE

2.1 Premessa

Il legno lamellare è un modo nuovo di usare un materiale antico quanto la storia abitativa dell'uomo.

L'impiego del legno lamellare, come materiale ed elemento strutturale, trova sempre più spazio e credito nel settore costruttivo, offrendo possibilità alternative e concorrenziali, soprattutto nel settore di strutture a grandi luci e dimensioni, condizionate dai limiti imposti dal trasporto e in quello della ristrutturazione, in quanto la maggior parte delle costruzioni nei centri storici ha l'orditura dei solai e dei tetti realizzata in legno.

La novità tecnologica di questo materiale è di essere ottenuto mediante l'incollaggio di assi (lamelle) di legno di limitata larghezza e lunghezza, in modo da formare elementi strutturali ad ampia flessibilità compositiva e formale, caratterizzati anche da una certa validità estetica, come ad esempio gli archi a sezione variabile.

Ulteriori vantaggi derivano dalla possibilità di una prefabbricazione, che consente di ottenere un materiale con caratteristiche di omogeneità ed uniformità di resistenza superiore alla corrispondente essenza legnosa, nonché un migliore sfruttamento della materia prima (il legno) con minore scarto di materiale, che diventa sempre più raro e costoso sul mercato mondiale.

Pertanto, lo stesso processo produttivo del lamellare offre indicazioni importanti per il suo impiego. La possibilità di curvare il lamellare con raggi di curvatura intorno ai cinque metri per normale lavorazione, che si può spingere anche sotto i due metri usando microlamelle, era impensabile con il legno tradizionale.

Tale possibilità consente non solo di aumentare le tipologie strutturali, ma soprattutto di adattare gli elementi strutturali a prefissate esigenze, come la riduzione degli spazi da riscaldare (piscine con coperture curvilinee), o come nel caso del tennis, di seguire con l'intradosso della copertura la linea d'ingombro regolamentare per il gioco.

Non trascurabile è la motivazione ecologica (bioedilizie) legata al così detto "impatto ambientale". La ricerca di materiali che non siano inquinanti e possano rigenerarsi ripropone tale materiale ed i suoi derivati in una posizione di primaria attenzione.

Una oculata programmazione di taglio e di piantumazione degli alberi, non solo non arreca alcun danno ambientale, ma può continuamente fornire del legno da impiegare nell'edilizia. Si pensi, inoltre, ai problemi legati alla demolizione e smaltimento di strutture in c.a..

Dal disuso delle strutture in legno, oltre al più semplice smantellamento, si può recuperare almeno l'energia combustibile.

2.2 Tecnologia e produzione del legno lamellare

Il legno lamellare è indubbiamente ancora legno e di questo mantiene tutti i pregi, ma è anche un prodotto nuovo, un prodotto industriale, che attraverso il procedimento tecnologico supera i difetti propri del legno massello.

Il processo di produzione del legno lamellare incollato è l'insieme delle operazioni eseguite in appositi stabilimenti, che consistono essenzialmente nella riduzione del tronco in assi e nella loro ricomposizione, tramite incollaggio, fino a dare origine a elementi di forma e dimensione prestabilita.

2.2.1 Le fasi del processo tecnologico

1) Scelta del legname :

Le caratteristiche tecniche del prodotto finito dipendono dal materiale di base. Per ottenere risultati attendibili, occorre partire da una materia prima avente caratteristiche il più omogenee e uniformi possibile.

Qualsiasi tipo di legname può essere potenzialmente utilizzato per tale tecnologia, anche se scelte tecnico-economiche indirizzano, di fatto, l'industria produttrice, all'uso di legnami facilmente reperibili, incollabili e meno costosi, compatibilmente ai requisiti richiesti.

In Europa si utilizza quasi esclusivamente l'abete rosso, per lavorazioni speciali e talvolta il pino silvestre, il larice o il rovere.

Le essenze legnose vengono suddivise, per il legno lamellare, in due categorie o classi, che ne individuano la qualità e le caratteristiche fisico-meccaniche, le quali condizionano i valori delle corrispondenti tensioni massime ammissibili.

Classi o categorie (DIN 1052):

- | | |
|-----------------|--|
| I
Categoria | <ul style="list-style-type: none">• legno scelto senza putredine o danni di insetti;• inclinazione max della direzione delle fibre rispetto alla direzione della tavola non superiore al 10%;• nodi sani, non raggruppati, con diametro max pari a 30 mm;• peso specifico max di 500 Kg/mc (20% di umidità);• spessore medio annuo di crescita del tronco max di 3 mm. |
| II
Categoria | <ul style="list-style-type: none">• legno scelto con criteri meno rigidi, ma senza putredine o danni di insetti;• tolleranze maggiori di diametro dei nodi (fino a 40 mm);• inclinazione di fibre fino al 12%;• pesi specifici maggiori a 400 Kg/mc (20% di umidità);• spessore medio annuo di crescita minore di 4 mm. |

2) Dimensioni del materiale :

La normativa DIN, non fissa la lunghezza minima delle assi, ma ne limita lo spessore e la sezione trasversale, precisamente:

a) l'area della sezione trasversale massima non deve superare i 60 cm^2 , per legni di conifera e i 50 cm^2 , per legni di latifolia;

b) la massima larghezza consentita è pari a 25 cm per la singola lamella con uno spessore non superiore a 30 mm, ma può essere aumentato fino a 40 mm in elementi costruttivi diritti, i quali non siano esposti a variazioni climatiche rilevanti.

Nella pratica costruttiva le lamelle hanno uno spessore finito intorno ai 33 mm e una larghezza pari a quella della sezione trasversale dell'elemento strutturale, variabile fra 10 e 22 cm, con variazioni modulari di 2 cm e lunghezza delle lamelle di 400-500 cm.

Nelle travi curve, per limitare le tensioni di curvatura, che possono nascere in direzione sia parallela che normale alle fibre, il raggio di curvatura degli elementi strutturali in lamellare deve essere pari almeno a 200 volte lo spessore delle singole lamelle.

3) Essiccazione :

L'essiccazione è l'operazione tesa a ottenere quel grado di umidità del legno compatibile col tipo di colla e, soprattutto, confacente alla destinazione delle strutture. Generalmente, deve essere compresa fra il 7% e il 16%. Fra due lamelle successive la differenza di umidità non deve superare il 4%.

Gli impianti per la produzione del lamellare dispongono di essiccatoi. Il legname è messo nelle celle di essiccazione e portato al grado di umidità necessario alla lavorazione ed alla resistenza richiesta.

Dopo l'essiccazione, poiché il tasso di umidità non è regolare all'interno di una stessa lamella, essendo più basso in periferia che al centro, le lamelle vengono lasciate riposare per due, tre giorni all'interno dello stabilimento, prima di essere portate alla linea di lavorazione.

4) Controllo della qualità delle tavole :

Prima della giuntatura le tavole subiscono un controllo dell'umidità e della difettosità, più o meno automatizzato a seconda dell'azienda, il quale porta all'eliminazione dei difetti più gravi e delle eventuali sacche di umidità.

La verifica dell'umidità (fig.1) avviene sulle lamelle prima della loro intestazione per mezzo di test selezionatore tipo passa-non passa.

Se l'umidità rilevata nelle lamelle è compresa fra i limiti prefissati, un segnale verde consente il proseguimento delle operazioni, altrimenti il segnale rosso lo arresta fino alla rimozione del pezzo fuori controllo.

Le condizioni ambientali, invece, sono costantemente registrate su apposite carte, che segnalano eventuali anomalie, evidenziando i valori che superano i limiti inferiori e superiori delle bande di controllo.

Queste verifiche interessano tutto il reparto dove si svolgono le lavorazioni, che si succedono a cascata, dal deposito delle lamelle, alla loro intestazione, piattatura, incollaggio, sovrapposizione e pressaggio.

Contemporaneamente al controllo dell'umidità delle lamelle, viene effettuato quello visivo degli eventuali difetti del legno (fig.2), come per esempio l'eccessivo numero di nodi, imbarcamenti, inclinazione delle fibre, cipollature, ecc...e vengono tagliate le estremità delle assi, eliminando screpolature e fessurazioni di testa. Questa fase deve essere affidata a maestranze qualificate e responsabili.

Fig. 1



Fig. 2



5) Giuntura di testa :

Per realizzare elementi strutturali di lunghezza maggiore della singola tavola o asse sono necessari giunzioni di testa. Di solito le giunzioni trasversali correnti fra le varie lamelle vengono effettuate con giunti detti a pettine o a dita (fig.3), opportunamente sfalsate al fine di non indebolire una stessa sezione trasversale o una zona dell'elemento strutturale.

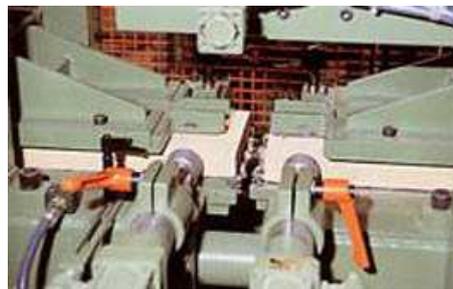
Questo tipo di giunto è considerato il più vantaggioso, in quanto consente di ottenere un'ampia superficie di incollaggio e una volta realizzata l'unione è auto-serrante, inoltre, rispetto ad altri tipi di giunzioni, quale ad esempio il bisello, detto anche a becco di flauto, ha bassi sfridi.

Successivamente alla fresatura si ha l'incollaggio di testa delle tavole (fig.4), effettuato da apposite macchine, che applicano forze di compressione variabili in relazione alla lunghezza dei denti dei giunti.

Fig. 3



Fig. 4



6) Piallatura e calibratura delle tavole :

Le tavole, così composte, vengono piallate, in modo da offrire superfici piane, in vista dell'incollaggio delle facce delle tavole, per la successiva formazione della trave.

Questo tipo di operazione, unitamente alla calibratura, attraverso la quale si ottengono tavole di spessore costante, evita l'instaurarsi di tensioni, che possono dare luogo alla formazione di cretti durante la pressatura.

Inoltre, la piallatura consente di ottenere superfici lisce, requisito molto importante in fase di incollaggio.

7) Incollaggio delle lamelle :

Le colle e le operazioni di incollaggio costituiscono una fra le operazioni più importanti e delicate dal punto di vista operativo e tecnologico.

Gli incollanti devono instaurare legami intermolecolari fra la colla stessa e le sostanze che costituiscono il legno, cioè le fibre di cellulosa e lignina, in modo da garantire, nel piano di incollaggio, lo stesso legame della corrispondente essenza legnosa.

Le resistenze fisico-meccaniche del collante devono essere almeno uguali a quelle del legno, in modo che i piani di incollaggio non siano piani preferenziali di rottura.

L'applicazione della colla sulle lamelle avviene automaticamente e il sistema attualmente più utilizzato è quello della cosiddetta "incollatrice a fili" (fig.5), che consente di ottenere la realizzazione di un piano di incollaggio con distribuzione abbastanza uniforme della colla.

Fig. 5



8) Pressatura :

Per realizzare l'incollaggio fra le lamelle bisogna sottoporre l'elemento strutturale a una pressione il più possibile uniforme; tale operazione viene effettuata in apposite presse (fig.6).

Le presse sono costituite da una struttura fissa, sulla quale si fa agire un meccanismo di pressatura costituito normalmente da martinetti idraulici o pneumatici.

L'operazione di posizionamento delle lamelle e di chiusura della pressa deve essere fatta il più rapidamente possibile, per evitare che la colla cominci a indurire e per la chiusura delle presse si procede dal centro verso le estremità.

Le travi così realizzate rimangono in pressa per un periodo di 12 ore o più, a seconda del tipo di colla, della temperatura e della forma della trave.

La temperatura ambiente non deve, comunque, essere mai inferiore a 18° C e in caso di travi curve, si utilizza un'altra pressa, dotata di guide mobili, che vengono posizionate secondo una sagoma precedentemente disegnata sul suolo.

Dalla descrizione delle fasi di produzione, fin qui condotta, si intuisce l'importanza del condizionamento dei locali di produzione.

Il legname non deve variare il proprio contenuto idrometrico durante la produzione delle travi poiché il processo chimico, alla base della polimerizzazione delle colle, è fortemente influenzato dalle condizioni termoigrometriche dell'ambiente in cui esso avviene.

Fig. 6



Fig. 7



9) Piallatura delle travi :

Rimosse dalla pressa, le travi sono lasciate 1-2 giorni a riposo all'interno dello stabilimento e poi fatte passare dentro una pialla fissa di forte capacità, in modo da dare all'elemento lo spessore finito e rendere uniformi e lisce le superfici laterali (fig.7).

10) Finitura e impregnazione :

Nel reparto finitura (fig.8) la trave viene intestata realizzando le sagomature di progetto, i fori ed i tagli necessari per l'assemblaggio di elementi metallici.

L'ultima operazione in ordine di tempo consiste nell'applicazione di prodotti impregnanti tramite semplice spennellatura, sostanze cioè con funzione di preservare il legno da insetti, funghi, umidità e con un pigmento che conferisca alle travi il colore voluto.

Tale operazione dovrebbe rientrare, in seguito, tra le operazioni di manutenzione ordinaria.

Fig. 8



2.2.2 Le colle

Le colle più comunemente usate nella pratica costruttiva sono a base di urea-formolo, di resorcina-formaldeide e melammina-urea-formaldeide, le cui caratteristiche sono elencate nello schema seguente:

<p style="text-align: center;"><u>Colle a base di urea-formolo</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • colle di colore bianco; • tenuta mediocre, specie se sottoposte a elevate temperature, ossia in presenza di notevoli escursioni termiche; • costo abbastanza vantaggioso; • sconsigliabili per esterni ed elementi strutturali esposti agli agenti atmosferici;
<p style="text-align: center;"><u>Colle a base di resorcina-formaldeide</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • colle di colore rosso-bruno; • tra le più usate, perché più resistenti all'aggressione degli agenti atmosferici, specialmente in climi caldo-umidi; • sono le più onerose per costi fra le colle del legno; • consentono ottime prestazioni in ambienti difficili; • mantengono le proprie caratteristiche nel tempo;
<p style="text-align: center;"><u>Colle a base di melammina-urea-formaldeide</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • colle di colore bianco; • molto utilizzate; • offrono caratteristiche meccaniche assimilabili a quelle delle colle resorciniche; • la normativa attuale non consente il loro utilizzo per strutture portanti all'aperto.

La resorcina è la colla più adatta e diffusa, in quanto insensibile all'umidità dopo l'incollaggio e neutra rispetto agli agenti chimici.

Presenta un'ottima resistenza al fuoco, ma ha un costo più elevato e necessita di una piallatura delle lamelle più accurata.

Le colle all'urea-formolo, invece, si dimostrano più adatte ai manufatti destinati all'interno, in quanto mal sopportano le escursioni climatiche e le intemperie, inoltre temono le alte temperature.

2.3 Caratteristiche fisico-meccaniche del legno lamellare

La formatura di travi lamellari avviene in ambiente con le caratteristiche di umidità e temperatura controllate e ognuna delle fasi è sottoposta a severi controlli. Ciò permette di ottenere un prodotto finito omogeneo, caratterizzato da prestazioni meccaniche con limitate dispersioni, che consente l'adozione di bassi coefficienti di sicurezza e quindi il totale sfruttamento della resistenza del lamellare.

Per quanto riguarda le dimensioni limite degli elementi strutturali, esse sono determinate solo dall'ingombro di trasporto (lunghezza massima 42 metri, altezza massima 3,80 metri), mentre l'altezza della sezione non può superare i 2 metri per ragioni di piallatura.

La limitazione dello spessore della sezione (fra i 10 ed i 18 cm) è dovuta alla precauzione di evitare tensioni interne che tavole maggiori di 20 cm potrebbero innescare.

Riguardo alle caratteristiche proprie del lamellare, è importante parlare della sua leggerezza (peso specifico $\gamma = 550 \text{ kg/mc}$, circa 1/5 del calcestruzzo).

Considerando le elevate prestazioni meccaniche, la sua leggerezza è molto importante per le ricadute positive che si hanno sul dimensionamento delle strutture in elevazione e di fondazione e per i risparmi sulle spese di trasporto e messa in opera.

La concezione della struttura in lamellare deve essere di tipo spaziale e pertanto controventata nei tre piani ortogonali.

L'attenzione ai controventi è imposta non solo dal limitato peso proprio, ma dalla sezione degli elementi con un lato piccolo (base da 10 a 20 cm) rispetto ad uno generalmente alto (fino a 200 cm). Tale situazione induce fenomeni di instabilità (carichi di punta e svergolamenti) da controllare attentamente, perché il legno è caratterizzato da modesti moduli elastici (E, G).

Il lamellare è per sua natura un materiale "unidirezionale" (difatti il legno è un materiale anisotropo), nel senso che lavora bene se sollecitato in senso parallelo alle fibre e male in senso perpendicolare ad esse, pertanto poco si adatta alle realizzazioni di strutture che si sviluppano liberamente nello spazio.

2.3.1 Schemi statici adatti alle strutture in legno lamellare

Per il lamellare sono consigliabili tipologie strutturali semplici, che riducono e a volte addirittura eliminano la necessità di protesi metalliche, cosa che offre notevoli vantaggi sia nei confronti del fuoco che del sisma.

Le protesi metalliche, quando sono necessarie, rappresentano potenziali punti di debolezza e devono essere oggetto di verifica attenta ed anche se dimensionare una trave è un calcolo relativamente facile, controllarne un nodo è sicuramente una cosa più complicata.

2.3.2 Il legno lamellare e le deformazioni

Per effetto dei carichi accidentali, la deformazione (freccia) delle travi di grande luce (30-40 metri) è dell'ordine della decina di centimetri, per cui, per evitare cedimenti differenziati, non bisogna bloccare con ritti e baraccature di tamponamento le travi di bordo, perché devono essere libere di deformarsi come le altre.

2.3.3 Pregi, difetti e sicurezza del legno lamellare

Un interessante pregio del lamellare è l'alta capacità di resistere agli agenti aggressivi esistenti in certi ambienti. Se si vuole sfruttare questa sua caratteristica ovviamente non si deve intervenire con tipologie che necessitano di collegamenti in ferro o di altri materiali facilmente aggredibili.

Le strutture in legno lamellare sono molto duttili, ovvero hanno la capacità di subire grandi deformazioni senza rompersi e sono perciò in grado di assorbire molta energia. Questa proprietà rende il materiale, anche per la sua limitata massa volumica, estremamente adatto per le costruzioni in zona sismica.

Per quanto riguarda la sicurezza contro gli incendi, più che scientifico, lo scoglio è di tipo psicologico: da sempre, nella mente dell'uomo, l'idea del legno è associata a quella del fuoco, mentre tutte le strutture, qualunque sia il materiale con cui esse sono state costruite, sono vulnerabili.

Proprio per questo motivo è stato introdotto il concetto di resistenza al fuoco, cioè il tempo necessario ad una struttura per perdere le sue capacità portanti sotto l'azione delle fiamme.

Vale ribadire che pur essendo il legno un materiale combustibile è altrettanto vero che ad incendio divampato il legno offre comportamenti di resistenza al

fuoco e di deformazione almeno pari, se non migliori, di altri materiali con pesi in gioco, in caso di cedimenti strutturali (crolli), di gran lunga inferiori a quelli delle strutture tradizionali. Ciò è dovuto al fatto che l'iniziale carbonizzazione della superficie legnosa crea una pellicola protettiva che rallenta il processo di ulteriore carbonizzazione interno.

Il legno è pertanto un cattivo conduttore di calore, che penetra e si diffonde all'interno della massa legnosa con velocità di propagazione molto ridotta, per cui ad un aumento molto lento della temperatura corrisponde una variazione quasi trascurabile della resistenza meccanica delle fibre della sezione non carbonizzata.

Dunque, verificare una struttura in legno lamellare significa determinare la velocità di carbonizzazione, a cui corrisponde una sezione ridotta che deve soddisfare la resistenza al fuoco imposta dalla destinazione d'uso della struttura.

Qualche parola va spesa anche riguardo alla sicurezza delle strutture in legno nei confronti del degrado: tutti i materiali, anche se in misura differente, subiscono l'aggressione del tempo. Anche materiali come il cemento armato, ritenuti un tempo indistruttibili, danno oggi segni di invecchiamento.

Le principali carenze del legno, e quindi del lamellare, sono la combustibilità, l'instabilità dimensionale in presenza di variazioni di umidità e la deperibilità biologica.

Sulla combustibilità, sulla progressione e sulla resistenza al fuoco, abbiamo visto che il legno ha un buon comportamento. Anche i problemi di instabilità dimensionale risultano superati proprio dalla tecnologia del lamellare.

E' comunque possibile, quando situazioni particolari lo impongano, sottoporre preventivamente gli elementi lamellari a trattamenti sia ignifughi che idrorepellenti.

Rimane allora il problema della deperibilità biologica, cioè il degrado dovuto a tarli e muffe: i trattamenti più comuni sono quelli praticati sul lamellare in fase di fabbricazione.

La tecnologia del trattamento del legno a scopo conservativo si basa soprattutto sull'impregnazione con sostanze chimiche, la cui efficacia è in relazione alla profondità dell'elemento considerato. Anche il progettista, però, può contribuire alla lunga conservazione delle strutture, adottando particolari accorgimenti, evitando, per esempio, di lasciare esposte alle intemperie le testate delle travi, in quanto l'azione dei raggi ultravioletti e delle precipitazioni mettono a dura prova anche i legni meglio trattati e qualora fosse necessario lasciare il legno esposto agli agenti atmosferici ed alle variazioni climatiche bisogna prevederne la manutenzione.

2.4 Normativa di riferimento e classificazione del legno lamellare

Nel nostro paese la progettazione e la realizzazione di opere di ingegneria civile sono regolate da un corpus legislativo costituito da leggi e decreti la cui applicazione è obbligatoria.

Scopo comune a tutte le norme tecniche è garantire che le costruzioni posseggano i livelli di sicurezza minimi scelti dal legislatore. A tal fine ogni progetto comprendente strutture in c.a., c.a.p., o metalliche deve essere depositato, a cura del costruttore, in un archivio esistente presso l'Ufficio del Genio Civile, competente per territorio.

Tale obbligo, però, non riguarda le strutture in legno lamellare, in quanto in Europa la situazione ha una connotazione molto diversa, determinata dalla presenza di specifiche norme nazionali. Tra quelle internazionalmente più conosciute ci sono : le norme tedesche (DIN 1052), quelle francesi (REGLES C.B. 71), quelle svizzere (SLA 164), quelle inglesi (BSI 5268/1988) e quelle austriache (ONORM).

Nel quadro dell'armonizzazione europea, e nell'ambito dell'attuazione della Direttiva CEE 89/106/EEC, relativa ai prodotti dell'industria, è stato preparato, a cura del CEN (Comitato Europeo di Normazione), l'Eurocodice 5 sulle strutture in legno, suddiviso in tre parti :

- Regole generali e regole per gli edifici;
- Regole generali, progettazione strutturale contro l'incendio;
- Ponti.

L'Eurocodice è una formulazione di normativa da applicarsi ai paesi europei aderenti alla CEE, che coinvolge tecnici, produttori, ditte operanti nel settore, al fine di giungere a una codificazione unica, anche a difesa della qualità e della produzione del legno lamellare, nonché della qualificazione del personale che deve essere specializzato.

Gli Eurocodici saranno pubblicati dal CEN come norme EN e come tali rimpiazzeranno le corrispondenti norme nazionali eventualmente esistenti.

In Italia, la traduzione dell'Eurocodice 5 nelle sue tre parti è stata effettuata a cura dell'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) come Norma Europea Sperimentale (ENV). L'UNI è il corrispondente del CEN in Italia.

Tuttavia il relativo NAD (Documenti di Applicazione Nazionale), avente la funzione di interfacciare il codice europeo con la norma italiana, non è mai stato pubblicato, per il semplice fatto che non c'era nessuna norma italiana, promulgata

dall'Autorità pubblica nazionale (Ministero dei Lavori) da interfacciare e per porre fine a tale mancanza, nel luglio del 1999, si è insediata presso il Ministero dei Lavori Pubblici la commissione incaricata della redazione delle Norme Tecniche Italiane per la progettazione, esecuzione e collaudo delle Costruzioni di Legno (N.I.CO.LE.).

L'Eurocodice 5 resta a tutt'oggi una norma sperimentale sulle costruzioni in legno, che comunque, volendo, potrebbe essere utilizzata già da ora, in maniera spontanea.

In assenza di una specifica normativa italiana e in attesa della stesura definitiva delle norme EN, le ditte produttrici italiane fanno prevalentemente riferimento alle tedesche DIN 1052, che più volte il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha dichiarato ammissibile, essendo normativa europea di comprovata affidabilità.

Le principali ditte italiane sono in possesso, inoltre, del certificato di incollaggio "Tipo A", rilasciato dall'Istituto per la Ricerca e Prova dei Materiali nel settore edile "Otto-Graf" dell'Università di Stoccarda, che abilita l'unità produttiva a realizzare strutture portanti in legno lamellare incollato di qualunque tipo e dimensione, riconoscendo l'elevato livello tecnologico degli impianti utilizzati e la specializzazione del personale addetto.

Per la conservazione del Certificato, l'azienda non solo si impegna a produrre secondo le norme DIN 1052, ma si sottopone periodicamente ad ispezioni e controlli dei reparti produttivi e conserva per cinque anni campioni e registri degli elementi prodotti a disposizione degli ispettori tedeschi.

In definitiva, ai fini di una riconosciuta classificazione del legno lamellare, secondo l'Eurocodice 5 la sigla BS indica il legno lamellare in genere, mentre la sigla BSH il legno lamellare di conifera, che è quello maggiormente utilizzato.

Attualmente esistono quattro classi di legno lamellare : BS 11, BS 14, BS 16, BS 18, sigle in cui il numero BS progressivo indica una classe di legname migliore.

Con l'introduzione dell'EC5, il progettista strutturale ha così a disposizione 4 categorie di legno lamellare, classificato in base ad un sistema di classi di resistenza, analogamente a quello che già avviene per la classificazione del calcestruzzo. Proprio per recepire questo nuovo sistema, in Germania sono state aggiornate le norme DIN 1052 (ottobre 1996), in cui si definiscono le quattro categorie di legno lamellare, dove le prime due corrispondono all'attuale lamellare, rispettivamente di seconda e prima classe.

Alla base di tutto sta un più attento assortimento in qualità della materia prima costituente le lamelle.

Questo assortimento di fatto non può avvenire più solamente a “vista” da parte di personale, che pur altamente qualificato, non riesce tuttavia a penetrare l’intimo della struttura delle singole tavole, ma mediante ausilio di apposite macchine in grado di determinare, con sistemi non distruttivi, in modo sufficientemente esatto, il modulo di elasticità, il peso specifico e di conseguenza le caratteristiche di resistenza strutturale di ciascuna tavola.

I PANNELLI X-LAM (CROSS-LAM)

3.1 Premessa

I **pannelli x-lam** (**Cross Laminated Timber**) sono dei compensati multistrati, composti interamente in legno. Grazie all'incollaggio degli strati longitudinali con quelli trasversali è possibile ridurre al minimo il “movimento” del legno, in modo da ottenere un materiale da costruzione all'altezza delle esigenze moderne.

L' x-lam è, dunque, un prodotto finito e compatto in legno, che frena il calore e al tempo stesso sopporta dei carichi, inoltre garantisce una protezione antincendio ed un buon isolamento acustico, il cui processo d'asciugatura veloce contribuisce in modo positivo al benessere delle persone.

Composto per un 99,4 % da legno e per un 0,6 % da colla, è un materiale monolitico, insomma, un pezzo di legno. Per tale ragione, le fasi di progettazione e di costruzione sono semplici e tutti i dettagli si possono risolvere facilmente.

Di fatto molti progettisti considerano tale aspetto come uno dei principali vantaggi del sistema costruttivo. Dunque, niente più costruzioni a più strati, niente più fogli ne dettagli complicati. Con la stessa semplicità con cui si progetta qualcosa, lo si costruisce, inoltre le soluzioni prefabbricate, il metodo di costruzione a secco e i tempi di montaggio ridotti rappresentano un notevole vantaggio.

Le strutture in x-lam soddisfano i requisiti delle norme in materia di costruzioni passive e a basso consumo d'energia con spessori strutturali ridotti, consentendo così un volume maggiore dei locali.

Un maggiore utilizzo del legno come materiale da costruzione durevole, con le sue proprietà di risparmio d'energia e di neutralità in termini di CO₂, rappresenta un contributo attivo alla protezione del clima.

3.2 Processo produttivo dei pannelli di legno di tipo x-lam

I pannelli x-lam sono formati essenzialmente da “pacchi” di tavole di legno di abete rosso, proveniente da foreste certificate per la gestione sostenibile, spesse mediamente 2 cm, affiancate e sovrapposte a strati incrociati, incollati e pressati.

Gli elementi unitari, che assemblati compongono i pannelli x-lam, sono, dunque, le tavole, sulle quali deve essere esercitato un attentissimo controllo di qualità, da parte di una macchina, il cui supervisore è un tecnico specializzato. Questa macchina individua con estrema precisione i difetti di ogni singola tavola (nodi, fessure, ecc...), quantificandoli e definendo il livello di qualità, in base al quale le tavole vengono classificate secondo la resistenza meccanica.

Le tavole difettose non vengono necessariamente scartate per intero, specie se i difetti sono limitati a ristrette zone della lunghezza, ma si scartano soltanto le porzioni inutilizzabili, salvando le altre per unirle, tramite giunti a pettine, in modo da formare le lamelle. Queste, in seguito, vengono affiancate le une alle altre, in modo da costituire uno strato monodirezionale, sopra il quale viene incollato analogamente un altro strato, in direzione trasversale rispetto a quella dello strato precedente.

Le caratteristiche, dal cui controllo di qualità non si può prescindere, sono la certificazione delle lamelle, che devono essere omologate per l'uso strutturale, con differenziazione per l'uso di servizio o altro, a seconda dell'umidità che si considera e la garanzia della colla strutturale, melamminica termoindurente, contenente una piccola quantità di formaldeide, o poliuretanic.

Le dimensioni massime raggiungibili per un pannello singolo sono 16 m di lunghezza e 3-4 m di altezza, anche se per la facilità del successivo trasporto vengono preferiti quelli meno lunghi.

Infine, avviene la pressatura degli strati, che per tutto il tempo di presa della colla vengono mantenuti sotto pressione, con piani di acciaio ad elevata temperatura, in una pressa funzionante per mezzo di una pompa a depressione.

Nonostante vi siano altre tecniche di produzione, come ad esempio quella a chiodatura delle tavole, soltanto i pannelli a strati incollati sono davvero sicuri e certificati. I pannelli chiodati sono più spessi e meno rigidi di quelli incollati.

I documenti di riferimento sono la certificazione CUAP, una procedura riconosciuta a livello europeo e l'ETA (Benestare Tecnico Europeo), che un fabbricante ottiene sul proprio prodotto e che riporta in tabelle tutti i dati tecnici dello stesso.

I pannelli ultimati vengono prelevati dalle imprese di costruzione per essere impiegati in cantiere, dopo essere stati completati con fori di porte e finestre in un apposito centro di taglio, il quale si avvale di macchine a controllo numerico.

Dunque, le fasi della produzione dei pannelli x-lam si possono essenzialmente riassumere nelle seguenti :

1. taglio;
2. classificazione delle tavole;
3. giunti a pettine e formazione delle lamelle;
4. formazione degli strati sovrapposti, reciprocamente ruotati di 90°, incollati e pressati.

3.3 Requisiti per la materia prima legno: specie legnosa, provenienze geografiche, qualità

Il Disciplinare di progettazione, costruzione, collaudo e manutenzione, che è l'atto adottato dal Consorzio Sofie Veritas (il cui discorso verrà approfondito dal capitolo 4 in poi), prevede che il materiale di provenienza per la fabbricazione dei pannelli a base di legno di tipo x-lam devono essere tavole di legno essiccate e piallate, conformi ai seguenti requisiti, in ordine decrescente di rigore:

Specie legnosa:

- a) 100% Abete Rosso;
- b) in volume, non meno del _% delle tavole di Abete Rosso e non più del _% delle tavole di Abete Bianco;
- c) legno di Conifere, purché di un'unica specie per l'edificio oggetto della richiesta di certificazione;
- d) tavole miste di Conifere, purché di un'unica specie per ciascun singolo pannello destinato all'edificio oggetto della richiesta di certificazione;
- e) tavole miste di Abete Rosso, Abete Bianco e Pino Silvestre, anche all'interno di un singolo pannello;
- f) tavole miste di legno di Conifere, senza limitazioni.

Provenienza geografica:

- a) legno tondo, proveniente al 100% da foreste certificate PEFC o FSC, che crescono nel territorio della Provincia Autonoma di Trento e aderenti al Consorzio;
- b) in volume, non meno del _% del legno tondo, proveniente da foreste certificate PEFC o FSC, che crescono nel territorio della Provincia Autonoma di Trento e non più del _%, proveniente da foreste certificate PEFC o FSC, che crescono al di fuori del territorio della Provincia Autonoma di Trento, purché trasformato al 100% in aziende ricadenti nel territorio della Provincia Autonoma di Trento e aderenti al Consorzio;
- c) come al punto b), trasformato ovunque sia, purché le tavole essiccate e piallate siano commercializzate al 100% da aziende ricadenti nel territorio della Provincia Autonoma di Trento e aderenti al Consorzio;
- d) senza limitazioni, purché il legno tondo provenga da foreste certificate PEFC o FSC e venga trasformato e/o commercializzato per almeno il _% in volume da aziende ricadenti nel territorio della Provincia Autonoma di Trento e aderenti al Consorzio;
- e) senza limitazioni, purché il legno tondo provenga da foreste certificate PEFC o FSC e venga trasformato e/o commercializzato per almeno il _% in volume da aziende ricadenti nel territorio della Provincia Autonoma di Trento, anche se non aderenti al Consorzio;
- f) senza limitazioni, purché il legno tondo provenga da foreste certificate PEFC o FSC.

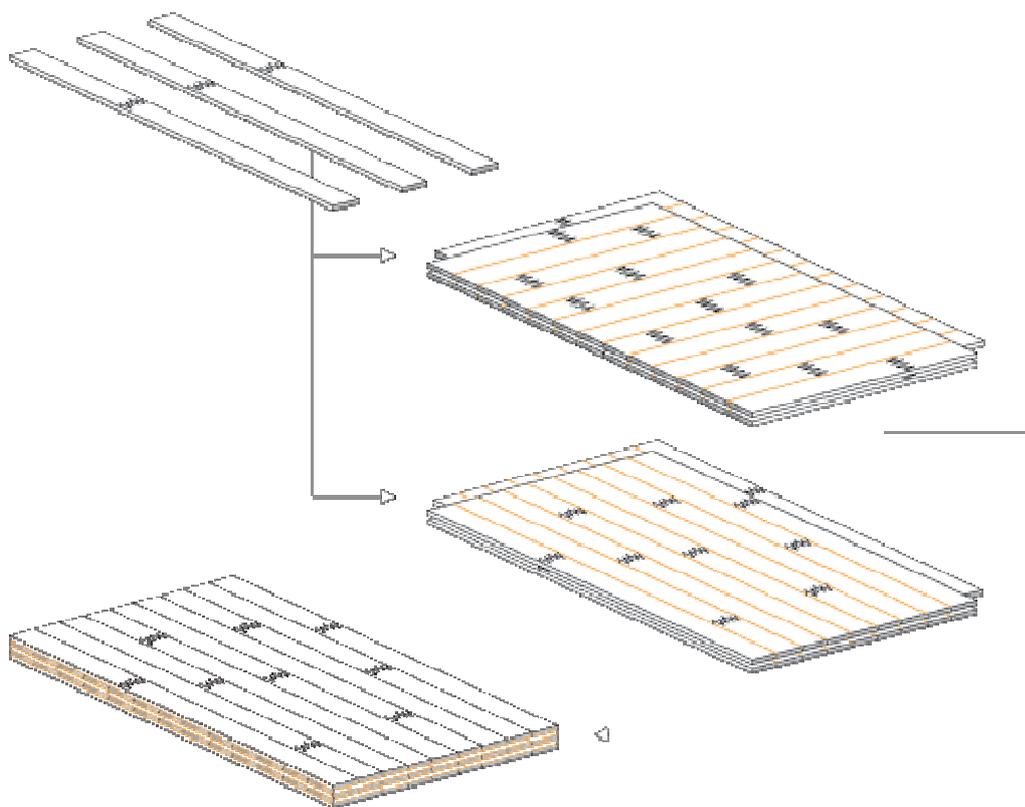
La certificazione PEFC o FSC assicura la tracciabilità del materiale legnoso fino alla sua origine e si ritiene sufficiente a documentare il legame fra il materiale ed il territorio geografico di provenienza.

3.4 Requisiti di fabbricazione e proprietà fisico-meccaniche dei pannelli x-lam

I pannelli a base di legno di tipo x-lam, realizzati incollando fra loro, a pressione, strati sovrapposti di lamelle di legno, sono elementi di parete, di solaio e/o di copertura e come tali possono svolgere tutte e tre le funzioni.

Ciascuna lamella è formata dalla giunzione a dita, testa contro testa, di tavole di legno strutturale, individualmente classificate e selezionate secondo la resistenza meccanica. La direzione delle lamelle di uno strato del pannello è perpendicolare a quella delle lamelle degli strati adiacenti. Questa disposizione incrociata delle lamelle conferisce una notevole stabilità dimensionale e di forma al pannello, nonché buone caratteristiche meccaniche in tutte le direzioni.

Il tipo di incollaggio, l'esecuzione a regola d'arte dei giunti a dita e della pressatura del pannello, oltre all'uso esclusivo di tavole classificate secondo la resistenza meccanica, rappresentano le principali condizioni indispensabili affinché il pannello x-lam possa essere impiegato nelle costruzioni.



Disposizione alternata degli strati per la realizzazione di un pannello x-lam

3.5 Le prove statiche

Il pregio principale di un pannello x-lam è la stabilità, ossia, sottoposto a sollecitazioni meccaniche, il materiale manifesta minimi spostamenti, grazie alla disposizione incrociata delle lamelle, che varia di 90° da uno strato all'altro e così la perdita di stabilità del legno disposto in un senso viene compensata da quella del legno disposto nell'altro senso, in quanto le tavole si stabilizzano reciprocamente.

Sollecitazioni oltre un certo limite possono comunque deformare i pannelli e a causa del diverso comportamento del legno nelle due direzioni delle lamelle si possono riscontrare deformazioni ad “ala di gabbiano” o di “rototaglio”, cioè taglio per rotolamento.

Il criterio per il dimensionamento degli elementi strutturali x-lam si basa sull'individuazione del limite di deformabilità.

Le prove statiche a cui si sottopone il campione, diversamente dai test sismici, sono molto lente e ciascuna dura un intervallo di tempo di circa 5 minuti, inoltre il pannello resiste di più alle sollecitazioni dinamiche, come l'urto ed il sisma, che a quelle statiche, quali:

- la prova di resistenza a flessione;
- la prova a deformazione nel piano;
- la prova a flessione e taglio;
- la prova a trazione.

1) Prova di resistenza a flessione:

Questa prova viene effettuata disponendo un provino di x-lam orizzontalmente, in modo da simulare la condizione di solaio, osservando il comportamento in mezzera, dove viene misurato l'abbassamento, causato dalle sollecitazioni, a mezzo di una macchina con due carichi concentrati ad interasse di 515 mm.

Il provino è ricavato da un pannello spesso 85 mm e largo 350 mm. Fra gli appoggi la luce è di 187 mm, che in base alla norma UNI EN 408 deve misurare 18 volte lo spessore, mentre l'interasse fra i carichi 3 volte maggiore.

La velocità di applicazione del carico influisce molto sul comportamento elastico del materiale, ovvero sulla durata della prova, che si conclude nel momento in cui avviene la rottura fragile, in un intervallo di tempo di 300 secondi.

Per i risultati della prova è determinante la qualità dei pannelli e affinché questa sia eccellente, oltre che l'unica accettabile, occorre vigilare su ogni fase del

processo produttivo, dalla selezione delle tavole, che non devono presentare fratture troppo grosse, né nodi vicino alle estremità, ma singolarmente testate e certificate, alla qualità della colla, rigorosamente strutturale.

Inoltre, è buona norma, per la sicurezza di un edificio in x-lam, che il costruttore si preoccupi di poter dimostrare che ogni singolo elemento in cantiere è testato e certificato da un Istituto di Ricerca.

La prova normalmente viene ripetuta dalle 100 alle 1000 volte ed anche più, a parità di condizioni, tra le quali la geometria, la temperatura, l'umidità, ecc..., secondo la base statistica che le norme della progettazione in x-lam seguono.

Poiché il legno, al contrario del calcestruzzo armato, non presenta una variabilità gaussiana, per i criteri di sicurezza, nella progettazione vanno considerati valori di riferimento inferiori a quelli medi, i quali, invece, rimangono utili solo ai fini della documentazione.

Nel corso delle ripetizioni della prova si è osservato il comportamento del provino in mezzeria, registrando, al raggiungimento di uno sforzo di 8 KN, la rottura in prossimità del giunto a dita fra due tavole, a causa del distacco della prima lamella dalle altre.

Tale giunto deve essere fatto a regola d'arte, con un piccolo spazio destinato ad ospitare la colla, in mancanza del quale altrimenti questa non potrebbe agire, a rischio di diminuire la resistenza dell'intero del pannello.

L'incollaggio fra gli strati sovrapposti deve essere perfetto, quasi invisibile, realizzato solo con colle strutturali, poliuretatiche o melamminiche .

Mentre in un provino, con uno sforzo di 25 KN, si è osservata la rottura a partire da un nodo grosso presente in una tavola, in un altro, invece, i due carichi concentrati hanno provocato la rottura , ad uno sforzo di 30,53 KN, semplicemente in prossimità di un nodo.

Poiché il momento flettente agisce soprattutto sugli strati disposti longitudinalmente, se su questi sono presenti nodi, specie se morti o fessurati, costituiscono punti di crisi.

2) Prova a deformazione nel piano:

Questa prova si attua su un portale, ossia su un pannello x-lam di 2,95 m di lato, con un foro delle dimensioni di una porta, tale da rendere più evidenti gli spostamenti del materiale sotto sforzo.

Il pannello, disposto come un parete verticale e vincolato su tutta la lunghezza tramite una barra che lo trattiene sul profilo superiore, esercitando un carico

uniformemente distribuito, diretto verticalmente nel piano del portale, è sottoposto a sollecitazioni cicliche orizzontali, a mezzo di un pistone che agisce lateralmente.

Il fissaggio del pannello è affidato a degli holdown a 12 chiodi, nei pressi delle estremità, oltre che a delle squadrette, collocate nelle restanti posizioni intermedie rispetto. Così mentre gli holdown hanno il compito di rispondere alle azioni di sollevamento, le squadrette si oppongono alle forze di scorrimento. Inoltre, le viti, come le colle, devono essere di tipo omologato.

Il ripetersi ciclico della sollecitazione fa notare un progressivo spostamento del portale nel proprio piano: si sollevano le estremità dalla parte del carico laterale, senza che il pannello si deformi vistosamente.

Dopo alcuni cicli, al raggiungimento di uno sforzo di 100 KN, il bullone cede e l'holdown si solleva, per cui l'effetto più evidente è proprio il distacco di questo ultimo dal lato della sollecitazione.

Questa prova, dunque, dimostra l'indeformabilità del pannello x-lam nel piano, in quanto si mantiene di forma rettangolare.

3) Prova a flessione e taglio:

Questa prova viene effettuata su un provino disposto orizzontalmente su due appoggi, distanziati l'uno dall'altro di 900 mm e permette di rilevare contemporaneamente la resistenza a flessione e quella allo sforzo di taglio, esercitato su tutta la lunghezza dell'elemento.

Caricando un provino in un punto nel mezzo, si registra la rottura al raggiungimento di una sollecitazione di 40 KN. Caricandone un altro in posizione decentrata rispetto alla mezzera, quando lo sforzo raggiunge i 65 KN per la flessione e i 74 KN per il taglio, si registra il cedimento.

Ciò che si è osservato sul campione di materiale, al termine della prova, è che, in seguito ad una simile sollecitazione, le sezioni non rimangono piane, il che potrebbe essere imputabile alla natura della colla, ma questa ipotesi non si può stabilire con certezza, in quanto questo tipo di prova non è in grado di verificare specificatamente la bontà dell'incollaggio.

4) Prova a trazione:

Questa prova avviene con il posizionamento di un provino disposto verticalmente nella macchina, la quale esercita lo sforzo di trazione per verificare la resistenza dei collegamenti metallici, avvenuti tramite viti (punto forte del sistema Sofie), simulando la condizione di connessione fra un parete ed un solaio.

La vite, infissa nel provino spesso 85 mm a mezzo di un preforo, ad una profondità pari alla larghezza di una tavola, durante le prove a cui si è assistito, era in parte filettata ed in parte liscia.

Si è osservato il comportamento del materiale sia nel caso dell'infissione della vite di testa, cioè parallelamente alla direzione delle tavole di facciata, sia di fianco, ossia perpendicolarmente alla direzione delle stesse.

Nel primo caso, poiché la prova è stata svolta in modo semidinamico, ossia con una velocità eccessiva, si è registrato il cedimento di tenuta al raggiungimento di uno sforzo di soli 4,7 KN, ma la ripetizione della prova, ad una nuova infissione della vite nello stesso provino, ad una certa distanza dal punto danneggiato, superiore a 2-3 volte il diametro della vite stessa e ad una profondità leggermente maggiore, ha fatto registrare il collasso al raggiungimento di uno sforzo di 9 KN.

Poiché in base alle norme DIN e all'Eurocodice non è permesso costruire tramite giunzioni di testa, questa prova, ripetuta su un pannello non più integro, ha dimostrato la riparabilità di una struttura in x-lam danneggiata, eventualmente anche a causa di un sisma, in quanto i danni restano localizzati in prossimità delle connessioni, mentre il resto del pannello rimane intatto e strutturalmente funzionale.

Un'altra prova, su un diverso provino, ugualmente orientato, ha fatto registrare la stabilizzazione della resistenza a trazione in prossimità di un valore di 13 KN.

Ripetendo l'esperimento su un provino diversamente orientato, con l'infissione della vite di fianco, ossia perpendicolarmente alla direzione delle tavole di facciata, la stabilizzazione si è ottenuta al raggiungimento di uno sforzo di trazione di 10 KN.

Va sottolineato che le viti in commercio per la connessione dei pannelli x-lam sono di vari tipi e possono presentare anche una filettatura doppia, poiché il rapporto tra lunghezza del filettato e del liscio dipende dallo spessore dei pannelli che devono collegare.

A tal proposito vi sono specifiche istruzioni di fissaggio che vanno eseguite con estrema precisione e la documentazione tecnica è fornita dal Consorzio SOFIE VERITAS.

3.6 Altre prove sperimentali: di resistenza al sisma e al fuoco

Durante le prove condotte in Giappone si sono sottoposte delle costruzioni con strutture in x-lam a prove di resistenza al sisma e al fuoco.

Tali prove hanno coinvolto globalmente la costruzione in x-lam, formata da pannelli prefabbricati, di già certificate caratteristiche, di dimensioni 2,96 m di altezza e 2,5 m di larghezza.

Inoltre, nella prova al fuoco è stato testato il comportamento delle pareti a stratigrafia completa di isolante, impianti e finiture. Il sistema costruttivo prevede che i pannelli vengano issati e collegati in opera tra loro con angolari metallici, chiodi a rilievi tronco-conici e viti autoforanti, in grado di garantire la tenuta e l'elasticità della struttura.

Le connessioni complanari dei pannelli, destinati a formare le pareti verticali, sono realizzate sagomando le estremità dei pannelli adiacenti, in modo che un terzo dello spessore, in corrispondenza del giunto, venga occupato da un pannello in LVL (legno micro-lamellare con lamelle spesse 2 mm), fissato al cross-lam con viti passanti.

Le connessioni complanari dei pannelli di solaio, invece, sono realizzate con sagomatura a mezzolegno e viti passanti, un tipo di connessione che trasmette solo gli sforzi di taglio e non il momento.

Ai fini della stabilità un accorgimento importante è lo sfalsamento dei giunti complanari di solaio rispetto a quelli delle pareti verticali, mentre la connessione di queste ultime e i solai sono operate principalmente a mezzo degli holdown, fissati con un numero ben definito di viti, di adeguato diametro.

Mentre gli holdown vengono collocati presso le estremità delle pareti e in prossimità delle aperture delle porte, le squadrette, ovvero piastre antiscivolo, occupano posizioni intermedie. Inoltre, va precisato che, nel caso di solai interpiano, gli holdown vanno posti sia a pavimento che a soffitto con bulloni passanti.

Per quanto riguarda il cross-lam c'è da dire che la relativa leggerezza del materiale rende minori le sollecitazioni indotte dal sisma ed i particolari giunti riescono a dissipare grandi quantità di energia dinamica, senza che l'edificio crolli.

Nel luglio del 2006, per la prima volta al mondo, sono state condotte prove di resistenza al sisma su edifici x-lam, coordinate dal Cnr-Ivalsa, in collaborazione con la Provincia di Trento e con le aziende del settore legno in Trentino ed effettuate nei laboratori del Nied (National Institute for Earth Science and Disaster Prevention), il più importante istituto di ricerca sismica al mondo, dove è stata costruita una palazzina con pannelli strutturali di tipo x-lam in legno di abete rosso della Val di Fiemme, alta tre piani e collegata su piattaforma vibrante, di 15

m x 15 m, che ha permesso di simulare tre tipi di ondate sismiche, diverse per tipologia ed intensità.

La casa è stata sottoposta a tre simulazioni sismiche, che hanno riproposto il terremoto avvenuto nel 1995 a Kobe, in Giappone, che ha raggiunto la magnitudo 7,2 della scala Richter, quello verificatosi nel 1940 ad El Centro, nella California meridionale, di magnitudo 6,7 ed il terremoto di Nocera Umbra del 1998, di magnitudo 5,8.

Il secondo tipo di terremoto è stato amplificato al 160% della sua intensità reale, inoltre le aperture al piano terra della casa, ossia porte e finestre, sono state gradualmente ampliate in modo tale da creare una struttura meno resistente, infine sottoposta alla simulazione del terremoto di Kobe.

L'esito della prova è stato più che soddisfacente, in quanto la struttura ha risposto in modo elastico, restando pressoché inalterata dopo la simulazione di ben 15 terremoti distruttivi.

Nuove prove sismiche si sono tenute nell'ottobre del 2007 sulla piattaforma vibrante di Miki, vicino Kobe, uno dei due più importanti laboratori del mondo.

Questa volta si è testato un edificio di ben 7 piani, alto 24 metri, sempre realizzato in pannelli x-lam di legno trentino, di cui si voleva dimostrare l'elasticità dal punto di vista strutturale e si è osservato che il legno si deforma adeguandosi al sisma, ma poi ritorna al suo posto.

I pannelli utilizzati erano di diversi spessori, per un volume totale di legno di 250 mc. Alcune pareti interne erano ugualmente portanti, mentre altre fungevano solo da tramezzi.

Le unioni fra pareti erano state realizzate, come previsto, tramite viti autofilettanti, il cui numero e diametro erano stati accuratamente calcolati in precedenza.

Anche i solai sono stati fabbricati con pannelli x-lam (spessore di 142 mm), uniti alle pareti con viti autofilettanti e angolari in acciaio. Ciascun solaio è stato appesantito da masse aggiuntive, che da un lato simulavano gli strati di materiale sciolto, normalmente presenti nelle costruzioni reali, per assicurare un buon isolamento acustico e dall'altro rappresentano il 30% del carico di esercizio, come previsto dai Codici Europeo ed Italiano per le combinazioni di carico sismiche

Per quanto riguarda le fondazioni, mentre di norma sono realizzate in calcestruzzo, per effettuare la prova sperimentale in laboratorio e dunque essere smontate alla fine, sono state utilizzate travi di acciaio.

Il programma di prove prevedeva l'applicazione in successione di 2 accelerogrammi sismici, di magnitudo 6,8 e 7,2 sulla scala Richter, con intensità entrambi al 100%.

Entrambe le prove sono state eseguite dando alla tavola vibrante i movimenti tridimensionali dei sismi.

L'esito della prova è stato eccellente, poiché la struttura ha resistito benissimo alle sollecitazioni fino alla fine.

Dunque l'altezza dell'edificio in x-lam è stata condizionata dall'ambiente in cui è stata condotta la prova, ma a Londra, bisogna ricordare, che con lo stesso materiale, realizzato con pannelli forniti dall'azienda tedesca KLH, si è costruito un edificio ancora più alto, di ben nove piani, anche se in una zona non sismica.

Per quanto riguarda le prove di resistenza al fuoco, invece, i test giapponesi hanno confermato gli esiti eccellenti delle prove preliminari effettuate presso il Laboratorio di Comportamento al Fuoco dell'Ivalsa.

La simulazione di incendio, effettuata nel marzo del 2008, al BRI (Building Research Institute) di Tsukuba, ha dimostrato che un edificio realizzato con il sistema x-lam e completo dei materiali costruttivi di rivestimento tradizionali può resistere ad un incendio della durata di un'ora, conservando le proprietà meccaniche e lasciando inalterata la struttura portante, senza causare serio pericolo agli occupanti.

L'edificio è stato sottoposto ad un carico di incendio doppio rispetto a quello normalmente presente in una camera d'albergo.

In una stanza posta al primo piano, dotata di 2 finestre semiaperte ed una porta tagliafuoco chiusa, è stato inserito un letto ed altre riproduzioni di arredo.

Una volta che qui l'incendio si è pienamente sviluppato, le fiamme sono fuoriuscite dalle finestre, lambendo le pareti esterne, ma le strutture dell'edificio sono state interessate solo marginalmente dall'evento, mentre il fumo ed il fuoco non si sono propagati alle camere vicine e agli altri piani, così come non si è diffuso il calore, dato che soltanto nella stanza in questione si è registrata una temperatura di 1000 °C.

3.7 Caratteristiche della tecnica costruttiva con pannelli x-lam

Il cross-lam, pur derivando dal legno massiccio, che ne costituisce la materia prima, è più resistente alle sollecitazioni meccaniche in genere, in quanto la composizione a più strati incrociati, ovvero l'artificio della disposizione bidirezionale della fibratura, fanno sì che ogni pannello sia stabile nelle due direzioni del piano.

L'instabilità dovuta a rigonfiamento e ritiro del legno è trascurabile, poiché i movimenti del legno disposto in una direzione sono compensati da quelli del legno disposto perpendicolarmente.

Grazie a tale effetto strutturale bidimensionale, il pannello di x-lam, usato come elemento di solaio, può essere immaginato come una griglia di travi, disposte senza discontinuità nelle 2 direzioni ortogonali del piano, così è possibile la distribuzione dei carichi su tutta la superficie, anche se gli spessori sono relativamente esigui.

Un discorso analogo si può fare se il pannello x-lam è usato come elemento di parete verticale, in quanto risponde come lastra verticale massiccia, con architravi incorporate, in corrispondenza delle aperture.

Per questo motivo una parete verticale in x-lam può essere anche considerata come fosse una trave di grande dimensioni, di rigidezza e resistenza ottimali, per cui ne consegue che si possono realizzare solai sospesi alla parete, i cui vincoli sono realizzati tramite semplici connessioni metalliche, sempre e attentamente calcolate affinché la struttura possa essere considerata sicura anche nell'eventualità di scosse sismiche di elevata magnitudo.

Se a ciò si sommano le caratteristiche di resistenza al fuoco e la straordinaria flessibilità compositiva nella progettazione degli spazi, si completa all'incirca il quadro dei principali pregi di una struttura in pannelli x-lam, a cui vanno aggiunti gli aspetti di eco-compatibilità del materiale e di risparmio energetico, conseguibile con tale sistema costruttivo.

La stratigrafia di una qualunque parete con struttura in x-lam, infatti, dal punto di vista delle prestazioni energetiche, supera enormemente quella di una comune parete in laterizi.

Effettivamente, ricorrendo al cross-lam, si realizzano pareti complessivamente meno spesse, ma che isolano termicamente molto di più, nel rispetto della normativa energetica aggiornata e con effetti positivi sul comfort degli abitanti.

Se, però, i ponti termici di un edificio sono piuttosto facili da eliminare in fase di progettazione, ponendo attenzione alla continuità dell'isolamento a cappotto su

tutto l'involucro ed al corretto posizionamento degli infissi, più difficile è l'eliminazione dei ponti acustici, onnipresenti a causa, ad esempio, della necessità di operare fori nella struttura per il passaggio degli impianti, insieme ai quali passa anche l'aria, conduttrice di suono.

Tuttavia, è possibile limitare il numero di tali ponti acustici, curando la stratigrafia, in modo da accostare gli uni agli altri materiali, con impedenza acustica diversa, creando discontinuità fra elementi strutturali rigidi, mediante l'interposizione di uno strato resiliente e sigillando i giunti strutturali con del buon nastro di tenuta all'aria.

Riguardo, invece, alla durabilità di una struttura in x-lam, si può concludere che essa è illimitata, a condizione che il materiale venga difeso dagli agenti di degrado, in primo luogo dall'umidità, che non deve mai restare imprigionata nel legno ed in secondo luogo da organismi, quali funghi ed insetti.

3.8 Criteri di progettazione di edifici x-lam in zona sismica

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

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

Come già detto, un edificio x-lam è sostanzialmente una struttura scatolare, in cui le pareti e i solai sono formati da diaframmi, costituiti da pannelli di legno massiccio, collegati fra loro mediante collegamenti meccanici.

La concezione strutturale a scatola è, quindi, alla base della progettazione strutturale. Nell'ipotesi di comportamento scatolare, quando l'edificio viene investito dall'azione sismica, questa viene trasferita dagli orizzontamenti, considerati rigidi nel proprio piano, alle pareti di piano in funzione della propria rigidità e da queste ai piani sottostanti fino ad arrivare alle fondazioni.

Naturalmente nell'ipotesi di diaframmi orizzontali rigidi il taglio sismico di piano andrà ripartito fra le varie pareti, in funzione della loro rigidità, considerando gli effetti torsionali calcolati sommando all'eccentricità effettiva, tra baricentro delle masse e baricentro delle rigidità, un'eccentricità accidentale, come prescritto dalla normativa, calcolata spostando il centro di massa di ogni

piano in ogni direzione considerata di una distanza pari a circa il 5% della dimensione massima del piano in direzione perpendicolare all'azione sismica.

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

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

Allo scopo di garantire il comportamento scatolare dell'intero organismo strutturale è necessario che non intervengano prima i cedimenti per perdita di geometria locale o globale, cioè la scatola strutturale non si apra ma resti connessa. A tale scopo alcune connessioni fra i diversi elementi strutturali devono essere dotate di adeguate riserve di sovra-resistenza, in maniera tale da rimanere sempre in campo elastico evitando eccessive deformazioni, in modo da consentire, in accordo con il criterio della gerarchia delle resistenze, agli elementi e alle connessioni a comportamento duttile, di dissipare l'energia trasferita dal sisma.

Queste sono:

1. la connessione fra i pannelli del solaio in modo da assicurare la pressoché totale assenza di scorrimento relativo e garantire l'ipotesi di diaframma rigido;
2. la connessione fra solaio e sottostante parete, in modo che ad ogni piano ci sia un diaframma rigido al quale le sottostanti pareti risultano rigidamente connesse e che quindi faccia da cintura di piano;
3. la connessione verticale fra pareti che si intersecano fra loro, in particolare agli spigoli dell'edificio, in maniera che la stabilità delle pareti stesse e dell'intera scatola strutturale risulti sempre garantita.

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

- le connessioni verticali fra pannelli-parete, quando presenti;
- le connessioni a taglio alla base delle pareti;

- le connessioni a sollevamento (hold-down) all'inizio ed alla fine di ciascuna parete ed in corrispondenza delle aperture.

In accordo con il criterio della gerarchia delle resistenze è necessario che questi elementi siano progettati per resistere alle azioni sismiche di competenza, senza effettuare sovradimensionamenti ed è importante che la resistenza alle azioni orizzontali sia maggiore ai piani bassi e diminuisca ai piani alti proporzionalmente alla variazione in altezza del taglio di piano, di conseguenza va evitato il sovradimensionamento delle unioni, oppure è opportuno adottare un fattore di sovradimensionamento unico a tutti i piani.

In altre parole, bisogna progettare in modo che, in linea teorica, a tutti i piani le unioni meccaniche si plasticizzino contemporaneamente e questo aspetto è importante sia al fine di garantire il necessario livello di duttilità e di dissipazione all'intero organismo strutturale, sia al fine di evitare sovradimensionamenti di queste connessioni rispetto a quelle devolute al mantenimento del comportamento scatolare e per questo motivo devono garantire una maggiore resistenza.

A questo proposito è opportuno osservare come la resistenza delle connessioni con mezzi di unione a gambo cilindrico (chiodi, spinotti, bulloni, viti) risenta fortemente dell'effetto della laminazione incrociata.

Studi scientifici recenti, in particolare, hanno evidenziato come le tavole incollate ortogonalmente alla direzione dello sforzo scongiurano il pericolo dello "splitting", cioè della prematura rottura per divaricazione delle libbre e che pertanto la resistenza possa risultare maggiore del 50% rispetto a quella calcolata secondo la teoria classica delle connessioni meccaniche di Johansen, descritta sull'Eurocodice 5, qualora la connessione interessi una parte di pannello in cui è presente l'effetto della laminazione incrociata.

Tuttavia, in assenza di chiare indicazioni normative a riguardo, la resistenza delle connessioni deve essere calcolata secondo formule attualmente riportate in normativa.

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

TECNOLOGIA E PROGETTO DEL SISTEMA COSTRUTTIVO IN PANNELLI X-LAM

4.1 Premessa

Il più grande istituto italiano per la ricerca nel settore foresta-legno, con sede a San Michele all'Adige (TN), è l'**Istituto** per la **Valorizzazione del Legno** e delle **Specie Arboree (IVALSA)** del **Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)**.

Creato nel 2002, è il frutto della fusione di tre istituti del CNR: l'Istituto sulla Propagazione delle Specie Legnose (IPSL), l'Istituto per la Ricerca sul Legno (IRL) e l'Istituto per la Tecnologia del Legno (ITL).

L'Ivalsa opera nel campo della tecnologia del legno e realizza specifici programmi di ricerca volti a migliorare la conoscenza della materia prima legno, a dare una risposta e fornire supporto scientifico ad un settore di grande rilevanza economica e sociale, mettendo a disposizione grandi strutture, laboratori, strumenti scientifici e personale altamente qualificato.

L'Istituto ha una lunga esperienza nella collaborazione con omologhi istituti di ricerca europei ed extra-europei che si occupano di legno e ha partecipato a molti progetti di ricerca nazionali ed europei. Il personale di ricerca ricopre cariche di rappresentanza dell'Italia in commissioni e comitati normativi, consultivi e accademici e opera valutazioni scientifiche per la commissione UE.

Tecnologie avanzate e innovative sono indirizzate alla ricerca scientifica e a supporto delle PMI (Piccole Medie Imprese).

L'attuale direttore dell'IVALSA è il **Prof. Ing. Ario Ceccotti**, circondato da uno staff di circa 70 persone, ripartite tra la sede di Trento e quella di Firenze.

Opera di notevole rilevanza a livello mondiale, realizzato dall'Ivalsa e finanziato dalla Provincia autonoma di Trento, è il **Progetto Sofie (Sistema Costruttivo Fiemme)**, un edificio completamente realizzato in legno, alto 7 piani e di c.a. 24 metri, la cui soluzione è perfettamente anti-sismica, in opposizione alle normative internazionali, secondo le quali in zona sismica gli edifici in legno non possono superare i 7,5 metri.

Il primo esempio è una casa costruita utilizzando l'abete rosso della Val di Fiemme ed è uno dei progetti "verdi" sostenuti da **Habitech**, il distretto del Trentino, che punta all'utilizzo delle energie rinnovabili.

Casa Sofie è stata realizzata anche grazie all'impegno del Prof. Ing. Ario Ceccotti, che da anni sostiene e porta avanti l'idea che il legno è un ottimo materiale da costruzione e che è possibile considerare rispettosa della natura anche una casa realizzata sfruttando gli alberi.

Le foreste del Trentino sono talmente ricche che tagliarne una gran parte nel corso di un anno può rappresentare una procedura sostenibile se gestita nella maniera adeguata. Se si accresce il valore economico del legno di conseguenza aumenta anche il valore delle foreste e quindi l'interesse a coordinarle correttamente, per cui, paradossalmente, lo sfruttamento del legno può diventare una soluzione ecologica.

4.2 Realizzazione di edifici in legno

La realizzazione di edifici di legno moderni si basa sulla costruzione intelaiata, dove pareti e solai sono realizzati dall'unione di un telaio, composto da elementi lineari (travi) con un pannello sottile (rivestimento strutturale), in modo da materializzare una superficie con funzione strutturale. Non ci sono dubbi sull'efficacia del sistema, tanto meno sul suo successo.

L'applicazione di questa tipologia costruttiva si adatta perfettamente a costruzioni e progetti semplici e regolari. L'incremento della flessibilità progettuale, sotto forma di aumento del numero di piani, della flessibilità delle forme, della disposizione delle superfici e delle loro aperture, rende l'applicazione pratica più complicata e impegnativa ed anche se il telaio strutturale è sempre in grado di adattarsi al progetto, non si possono sottovalutare le conseguenze.

Il risultato riguarda, dunque, costruzioni complesse e impegnative sotto tutti punti di vista, ma l'avvento dell'x-lam ha radicalmente modificato questa situazione, così ora la realizzazione di superfici strutturali di grandi dimensioni, come con altri materiali da tempo utilizzati, è possibile anche con il legno.

Il pannello x-lam è formato da più strati di tavole di spessore compreso fra 16 e 35 mm, sovrapposti e ruotati fra di loro di 90 gradi, secondo il medesimo principio con cui si realizzano i pannelli di compensato di piallacci.

L'incollatura, come per la produzione del legno lamellare incollato, permette di unire le singole tavole e i singoli strati fra loro, in modo da ottenere un materiale omogeneo e monolitico sotto forma di superficie strutturale di grandi dimensioni.

Le dimensioni dei pannelli x-lam arrivano fino a 4,80 m di larghezza e 24,00 m di lunghezza, mentre lo spessore può arrivare a svariate decine di centimetri,

anche se la dimensione del singolo pannello non è il criterio determinante per il progettista, in quanto la tecnologia offre la possibilità di realizzare grandi superfici addirittura con pannelli di dimensioni più ridotte.

I pannelli x-lam permettono di realizzare elementi strutturali di legno massiccio piani, che formano la struttura dell'edificio, composta di pareti (funzione strutturale di lastra) e solette (funzione strutturale di piastra), collegate fra loro con connessioni semplici e facilmente realizzabili.

Si riesce ad ottenere così una tipologia strutturale identica a quella delle costruzioni di calcestruzzo, formate da elementi piani di spessore ridotto e nel caso delle strutture di edifici con pannelli x-lam lo spessore delle pareti varia fra 120 e 160 mm e quello delle solette fra 140 e 200 mm.

Grazie a questa struttura massiccia resistenza e rigidità dell'edificio non hanno nulla da invidiare alle strutture formate da altri materiali, mentre i vantaggi derivanti dall'uso del legno possono essere sfruttati al meglio, primo fra tutti la prefabbricazione in officina di elementi completi di pareti e di solette, che saranno assemblati in modo semplice e rapido direttamente sul cantiere, riducendo così i tempi di costruzione al minimo e rendendo il processo progettuale e costruttivo più efficace sotto tutti i punti di vista.

Dal punto di vista progettuale, è particolarmente interessante constatare come questo materiale permetta di considerare le superfici della costruzione, senza doverle realizzare tramite la composizione di un telaio che ne rispetti la geometria e la forma, ma descrivendo con il materiale la forma e la geometria della superficie richiesta dal progetto. Infatti, nemmeno le aperture all'interno della superficie sono un ostacolo alla realizzazione della superficie strutturale, in quanto ottenute tramite l'eliminazione della parte formante l'apertura.

L'apertura in una parete, per esempio creata da una porta o da una finestra, non richiede per principio l'introduzione di un elemento strutturale supplementare di rinforzo della struttura, come nel caso dei sistemi a telaio. Inoltre, la superficie della parete, con la sua apertura, rappresenta un elemento strutturale piano e verticale, la cui composizione multistrato permette di mantenere le funzioni strutturali richieste, anche se è superfluo aggiungere che questo modo di procedere ha senz'altro una conseguenza sul comportamento strutturale dei diversi elementi, di cui lo strutturista dovrà tenere conto.

4.3 Costruire con il pannello di legno: ricostruzione dell'edificio di Le Corbusier a Les Mathes (1935) con il sistema Sofie

L'acquisizione di modelli compositivi, fondati su teorie progettuali consolidate, si esplica nel momento in cui l'innovazione tecnologica, lo sviluppo scientifico e lo studio compositivo si intersecano.

Il tentativo proposto affronta, con responsabilità e serietà, il compito che si è prefigurato; lo studio attento del progetto vuole, infatti, dimostrare la possibilità di coniugare la nuova tecnologia del pannello di legno con le regole progettuali dell'Architettura Contemporanea.

A questo fine risulta fondamentale la scelta dell'edificio più adatto ad affrontare questo esperimento di "traduzione" costruttiva e, per questo, dopo aver analizzato varie opere di importanti Maestri dell'Architettura Contemporanea, ci soffermiamo sulla casa Sextant a Les Mathes (presso La Rochelle), costruita nel 1935 da Le Corbusier, progetto fra i meno conosciuti dall'architetto svizzero.

L'edificio, costituito da un muro portante in pietra di cava locale, che definisce sapientemente dal punto di vista architettonico i pieni e i vuoti del volume, si sviluppa su due piani e presenta una copertura in lastre di eternit ondulato a doppio spiovente inclinato.

Lo sviluppo della pianta segue un passo modulare definito, che ripartisce i locali all'interno di una figura rettangolare, dove l'asse distributivo è posto a sud, mentre gli spazi serviti sono disposti a nord.

Affinché questo lavoro di "ricostruzione" trovi una sua coerente realizzazione sono stati approfonditi essenzialmente tre temi di ricerca:

- l'aspetto spaziale che, attraverso lo studio dell'architettura, è esplicito negli elementi del progetto; le regole compositive, la geometria, lo studio delle proporzioni e dei volumi genera nuovi modelli spaziali, che sono sempre in relazione con le esigenze mutevoli della società;
- l'aspetto teorico che, fondamentale per iniziare un percorso di ricerca, stabilisce regole sia scientifiche, pensando alla tecnica costruttiva, che compositive, poste in relazione alla città, al luogo e alla storia; la teoria basata su tesi già applicate può restituire modelli abitativi più appropriati all'uso che questi dovranno assolvere;
- l'aspetto scientifico-tecnologico che approfondisce le regole statiche e meccaniche dei materiali, permettendo di costruire edifici più efficienti; l'uso di questi sistemi costruttivi è stato condotto sviluppando una metodologia di montaggio che segue un iter ben preciso, alla quale sono

stati affiancati attenti studi sugli isolamenti acustici e termici, in modo da proporre un pacchetto tecnologico completo dal punto di vista delle prestazioni strutturali, del comfort abitativo e del risparmio energetico.

4.4 Il Progetto Sofie (Sistema Costruttivo Fiemme)

Il Sistema Costruttivo Fiemme (Sofie) è un progetto di ricerca sull'edilizia sostenibile condotto dall'Istituto IVALSA del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), con il sostegno della Provincia Autonoma di Trento.

Sofie ha lo scopo di definire le prestazioni e le potenzialità di un sistema per la costruzione di edifici a più piani, realizzato con struttura portante di legno trentino di qualità certificata e caratterizzato da elevate prestazioni meccaniche e basso consumo energetico, ottimi livelli di sicurezza al fuoco e al sisma, comfort acustico e durabilità nel tempo, tipico del sistema x-lam (pannelli lamellari di legno massiccio a strati incrociati).

Il progetto è diventato realizzabile anche perché la moderna tecnologia fornisce dei procedimenti che proteggono il legno dall'attacco di funghi ed insetti, rendendolo quindi un materiale adatto per costruire.

La casa è stata sottoposta ad un test di resistenza contro il fuoco ed è stato dimostrato che resiste allo stesso modo del cemento armato, se non meglio, essendo in grado di circoscrivere in maniera più definita la zona in cui si sviluppa l'incendio.

A prima vista Casa Sofie non è diversa da un normale edificio in muratura, solo che al posto dei mattoni per realizzarla sono stati impiegati pannelli in legno lamellare estremamente resistenti, dello spessore che va dai 5 ai 30 cm, realizzati incollando strati incrociati di tavole di 2 cm di spessore e assemblati con viti ed angolari di ferro.

Tali pannelli vengono tagliati a seconda delle esigenze architettoniche, completi di aperture per porte, finestre e vani scala e in seguito issati e collegati tra loro in opera con angolari metallici, chiodi a rilievi tronco-conici e viti auto-foranti. Realizzati interamente con legno di abete rosso, la materia prima dei pannelli x-lam proviene dalle foreste della Val di Fiemme e delle altre valli del Trentino e da cui deriva il nome dato al progetto (Sofie).

Questo famoso edificio di sette piani progettato da IVALSA-CNR, come già detto, supera le simulazioni sismiche del Giappone e dimostra che il legno si deforma, adeguandosi alle ondulazioni, ma poi ritorna al suo posto, per cui

accurati studi, prove e ricerche hanno dedotto che il sistema x-lam del progetto Sofie è indistruttibile.

4.5 Il potenziale della tecnologia costruttiva in pannelli x-lam di Casa Sofie

La tecnologia costruttiva di Casa Sofie si basa, dunque, sul **Sistema X-Lam (Cross Laminated Timber)**, ideato in Germania, ma sviluppato poi dai ricercatori italiani, il cui progetto ha portato alla realizzazione di questo prototipo di casa anti-sismica, testata in Giappone, in quanto sottoposta ad un'onda d'urto equivalente alla magnitudo 7,2 della scala Richter.

Il valore di riferimento corrisponde a quello di uno dei terremoti più disastrosi della storia, che colpì la cittadina giapponese di Kobe nel 1995 e che provocò più di 6.000 vittime.

Casa Sofie prevede l'utilizzo di pannelli in legno di spessore compreso tra 5 e 30 cm, da utilizzare per pareti e solai, che vengono poi incollati a strati incrociati su tavole in legno da 2 cm di spessore.

I pannelli vengono preventivamente tagliati per realizzare porte, finestre e vani scala e successivamente montati in opera con l'ausilio di montanti angolari, chiodi e viti autoforanti, che ne assicurano la necessaria elasticità.

In questo modo la leggerezza della struttura permette di resistere bene alle sollecitazioni del sisma e i giunti facilitano la dissipazione delle azioni dinamiche prima che l'edificio crolli.

Il legno impiegato è l'abete rosso delle foreste della Val di Fiemme, certificate per la gestione eco-sostenibile, per cui il materiale è naturale ed eco-compatibile, oltre che di grande pregio estetico.

La prima applicazione pratica del progetto Sofie è la realizzazione del Collegio Mayer, a Trento, il cui progetto architettonico è opera dello Studio BBS di Trento. Si tratta di uno studentato per 130 persone, contenente anche spazi pubblici, come la biblioteca, la palestra e sale internet, che non solo utilizza la tecnologia x-lam, ma sarà un edificio ad alta efficienza energetica e certificato LEED.

La scelta del legno strutturale, oltre ai vantaggi già esposti, presenta anche una indubbia economicità, per cui può rappresentare concretamente una soluzione costruttiva da adoperare in un paese a forte rischio sismico come il nostro.

La costruzione in pannelli x-lam può essere vista come una struttura tridimensionale monolitica, caratterizzata dalla continuità del materiale e dalla

distribuzione delle sollecitazioni meccaniche in modo quasi uniforme su tutto il materiale disponibile. Ne risultano spessori strutturali ridotti, che si manifestano in modo positivo su tutto il progetto. Strutture di questo tipo permettono di aumentare notevolmente la rigidità e la solidità della costruzione, riducendo nel contempo la sollecitazione del materiale.

Un sistema ottimale per combinare le caratteristiche del legno ed una tipologia costruttiva ideale anche in caso di sisma, a cui va aggiunta la possibilità di sfruttare la prefabbricazione in officina e il montaggio, estremamente rapido e tipico della costruzione di legno, delinea il quadro completo del potenziale che questa tipologia costruttiva basata sui pannelli x-lam può offrire.

Concludendo si può affermare che per lo strutturista l'uso di questi pannelli significa la possibilità di sfruttare la superficie massiccia quale elemento strutturale, svincolandosi dai limiti tradizionali della costruzione di legno, basata sulla struttura intelaiata, sulla travatura e sul principio degli assi verticali continui e interasse molto ridotto.

Per l'architetto e il progettista, l'applicazione di questo materiale significa una libertà molto vasta nella concezione degli spazi e della costruzione. Questa tipologia costruttiva apre alla costruzione di legno anche quei settori che fino a poco tempo fa le erano preclusi o, comunque, accessibili solo a costo di soluzioni complesse e compromessi importanti.

Con la avvento dell'x-lam, edifici abitativi multipiano, edifici pubblici, scuole, come pure edifici e costruzioni architettonicamente più esigenti, diventano semplicemente realizzabili in legno. Non è esagerato, quindi, definire questo processo una rivoluzione e probabilmente non solo per la costruzione di legno.

IL SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI INERENTI LA SICUREZZA

5.1 Efficienza e sicurezza nei confronti delle azioni statiche e dinamiche

Gli edifici x-lam possiedono, nei confronti delle azioni sismiche, tutte le caratteristiche che rendono le strutture di legno particolarmente adatte a resistere alle azioni sismiche. Semplificando e sintetizzando il problema, le forze sismiche, che agiscono su una struttura, possono essere calcolate secondo la Legge di Newton ($f = m \times a$).

È evidente che strutture realizzate con materiali leggeri, come il legno, col quale un tempo si costruivano addirittura gli aerei, avranno -masse ridotte e quindi saranno interessate da forze sismiche minori. Per resistere a tali forze, seppur minori, le strutture dovranno possedere delle adeguate riserve di resistenza e da questo punto di vista il legno strutturale, ossia il legno classificato secondo la resistenza, soggetto alle stesse regole di qualificazione e agli stessi requisiti richiesti per gli altri materiali, secondo le Norme Tecniche del 2008, che finalmente stabiliscono pari condizioni tra il legno e gli altri materiali da costruzione, non soffre certamente di “complessi di inferiorità” rispetto a questi ultimi. Tra l’altro, e questo è un concetto un po’ meno intuitivo, a livello di progettazione, le strutture rigide sono interessate da forze sismiche maggiori rispetto alle strutture flessibili e deformabili, quali le strutture di legno.

Il tempio di Horyu-ji, a Nara, antica capitale del Giappone, costruito nel 607 d.c., è un esempio mirabile di una struttura totalmente in legno, leggera, resistente e flessibile, con i suoi 31,5 m di altezza e i 14 secoli di vita, ed è la conferma dell’eccezionale durabilità e resistenza sismica di tali strutture.

Oltre alle proprietà citate ne esiste una quarta, altrettanto importante, ossia la duttilità e la capacità di una struttura di dissipare l’energia trasferita dal sisma attraverso lo sviluppo di deformazioni in campo non lineare.

Pur essendo il legno strutturale un materiale a comportamento fragile, ma solo per alcuni stati di sollecitazione, nelle strutture di legno è possibile raggiungere elevati livelli di duttilità, mediante l’utilizzo di connessioni meccaniche con elementi metallici, quali piastre metalliche, chiodi, viti e bulloni, per collegare i

vari elementi strutturali di legno. Questo in virtù delle modalità costruttive relative al sistema considerato e delle regole di duttilità, ossia alle regole specifiche per la progettazione e realizzazione dei collegamenti fra i vari componenti strutturali, specificate al fine di consentire all'intero organismo strutturale di raggiungere la classe di duttilità indicata.

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



Fig. 1: Tempio Horyu-ji, a Nara in Giappone

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

Dal punto di vista del comportamento sismico, un edificio x-lam è sostanzialmente assimilabile ad una struttura scatolare, in cui le pareti e i solai

sono formati da diaframmi, costituiti da pannelli di legno massiccio, molto rigidi e resistenti, collegati fra loro mediante collegamenti meccanici.

I pannelli per le pareti e i solai vengono prefabbricati in stabilimento, mediante il taglio computerizzato, con macchine a controllo numerico e arrivano in cantiere pronti per il montaggio già dotati di aperture per porte e finestre, alloggiamenti per travi ed architravi, lavorazioni per i giunti, aperture per cavedi ed impianti.

Le pareti vengono realizzate o con un unico elemento dotato di tutte le aperture per porte e finestre, con l'unica limitazione sulla lunghezza, data dalle esigenze di trasporto, normalmente sotto gli 11 m o anche fino a 16 m, oppure mediante l'assemblaggio di più pannelli, di norma di larghezza uguale o inferiore ai 3m, collegati fra di loro mediante collegamenti meccanici, realizzati con l'utilizzo di strisce di pannello multistrato o con giunti a mezzo-legno fra i pannelli e viti o chiodi.

I solai di interpiano e di copertura vengono, invece, sempre realizzati mediante l'assemblaggio di più pannelli di larghezza uguale o inferiore ai 3 m, con giunti meccanici realizzati con modalità simili a quelle utilizzate per il collegamento verticale fra i pannelli della parete, che poggiano e sono collegati alle pareti sottostanti ed eventualmente a travi rompitratta di legno lamellare.

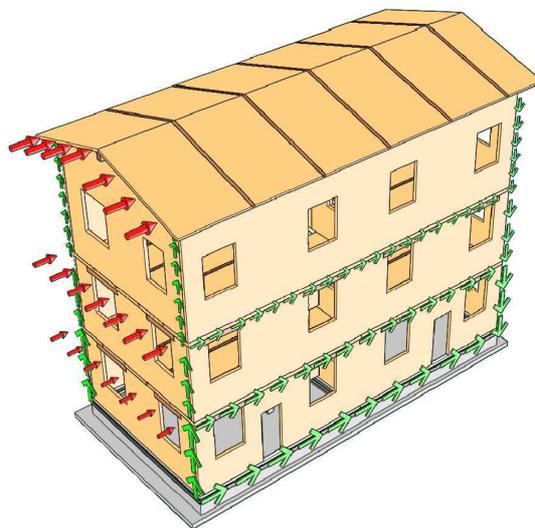


Fig. 2: Forze sismiche agenti su un edificio x-lam

5.1.1 Metodo di calcolo

Per quanto riguarda la progettazione strutturale di edifici x-lam multipiano sono stati analizzati due esempi di calcolo su due edifici differenti.

Il primo è un edificio di 3 piani a configurazione planimetrica e altimetrica semplice, mentre il secondo, di 2 piani, è a configurazione planimetrica e altimetrica più complessa.

Lo scopo è quello di fornire un metodo di calcolo comprensibile e affidabile, oltre che delle indicazioni utili per la progettazione e la costruzione di edifici multipiano, dalla conformazione planimetrica ed altimetrica regolare, realizzati con il sistema x-lam, la cui efficienza, sicurezza, sostenibilità e durabilità, non hanno nulla da invidiare alle classiche costruzioni in muratura, anche riguardo ai tempi e ai costi.

Per edifici di conformazione planimetrica e/o altimetrica fortemente irregolare, pur costituendo un valido riferimento, è comunque necessario effettuare un'analisi più accurata, servendosi dell'ausilio di software di calcolo agli elementi finiti.

Il metodo di calcolo utilizzato è quello agli Stati Limite e le verifiche per la progettazione strutturale vengono effettuate secondo le indicazioni contenute negli Eurocodici.

Tenendo presente che i pannelli x-lam sono pannelli di legno a 5 strati incrociati, verificati secondo la Teoria di Möhler, espressa all'interno dell'Eurocodice, in cui la rigidezza degli strati paralleli dipende dal modulo elastico parallelo E , mentre la rigidezza degli strati ortogonali dipende dal modulo G , in quanto la sollecitazione di taglio, in tale strato, sollecita il legno a "taglio per rotolamento" (rolling shear).

In pratica, nel caso di più sezioni di legno, collaboranti e unite fra loro mediante elementi meccanici di collegamento che, sollecitati a taglio, contrastano lo scorrimento tra le sezioni lignee, è come se gli strati ortogonali del pannello fungessero da elementi meccanici di collegamento fra gli strati paralleli, contrastando, con la loro rigidezza a taglio ortogonale E , lo scorrimento fra gli stessi strati paralleli.

Il metodo di calcolo per la verifica dei pannelli solaio e parete considera gli elementi pannello come elementi monodimensionali. In realtà, il comportamento è più simile a quello di una lastra per i pannelli di solaio e a quello di una piastra per i pannelli parete.

Va tenuto conto, però, che le caratteristiche di sollecitazione per gli elementi bidimensionali variano sia in funzione delle condizioni di vincolo che delle

condizioni di carico e per via della non omogeneità del materiale sono di difficile valutazione.

Il metodo utilizzato, pur portando a risultati più penalizzanti rispetto all'analisi dell'effettivo comportamento bidimensionale, comunque, consente una valutazione sufficientemente attendibile e conservativa dei requisiti strutturali richiesti.

5.1.2 Edificio semplice a tre piani

Come esempio prendiamo il primo degli edifici considerati, che è un edificio di 3 piani, le cui dimensioni in pianta sono di circa 7×7 per un'altezza totale di 10 m, con copertura a capanna. L'edificio è formato da 4 pareti esterne e da una interna posta al centro, parallela alla direzione E-O, che suddivide l'ambiente interno di ogni piano in due parti uguali. Ogni piano è dotato di un'apertura centrale di $2,25 \times 2,40$.

Le due pareti esterne al primo piano, poste in direzione E-O, hanno 2 aperture per porte di dimensioni diverse, una di $2,25 \times 2,20$ e l'altra di $4,00 \times 2,20$.

Le pareti esterne al piano terra, parallele alla direzione N-S e tutte le pareti esterne al primo e secondo piano, sono dotate di 2 aperture per finestre di $1,20 \times 1,20$.

L'altezza netta strutturale di ogni piano è di 2,95 m per i primi 2 piani e variabile, dai 2,75 m in gronda ai circa 3,80 m in colmo, per l'ultimo piano.

Per ottimizzare le fasi di trasporto e costruzione dell'edificio e migliorare il comportamento strutturale complessivo, incrementando la duttilità d'insieme dell'intero organismo strutturale, ogni parete è stata suddivisa in 3 pannelli, di larghezza di circa 2,3 m e di altezza pari all'altezza dell'interpiano e ogni solaio in pannelli di larghezze di 1,35 m e 2,30 m e stessa lunghezza di circa 7 m.

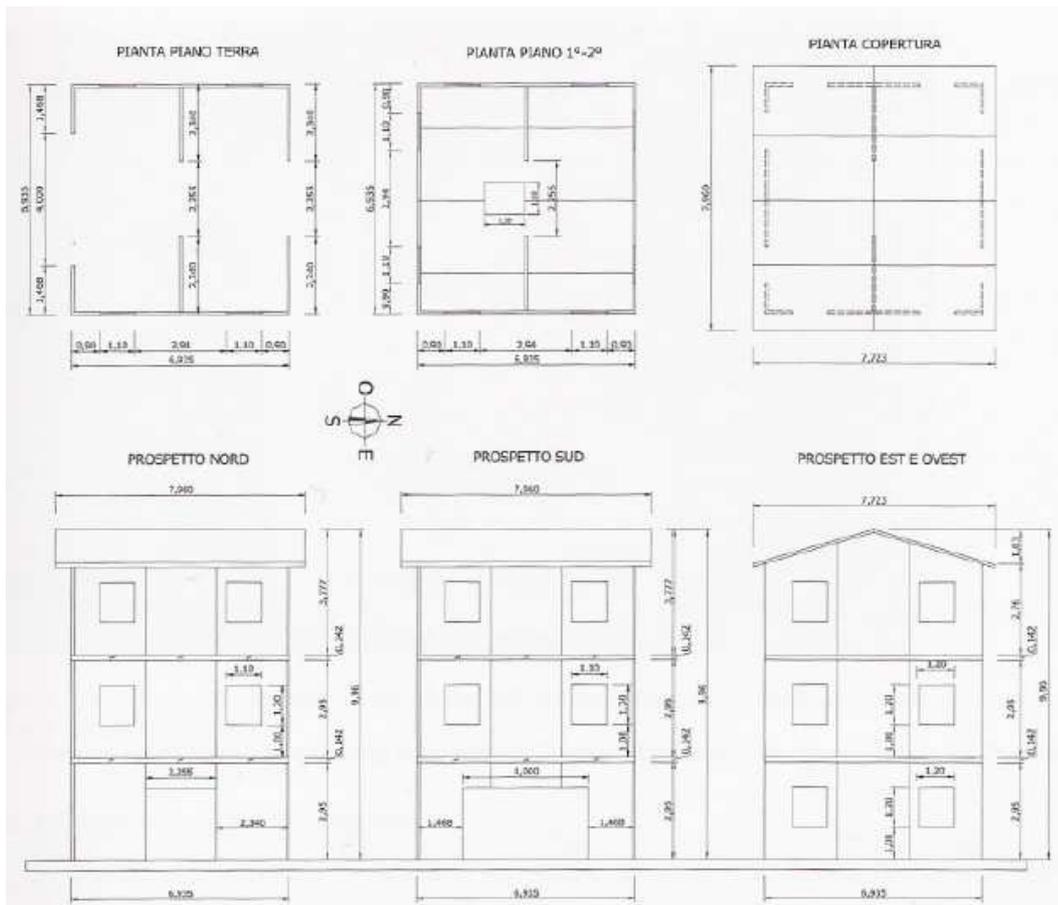


Fig. 3: Piante e prospetti dell'edificio a 3 piani.

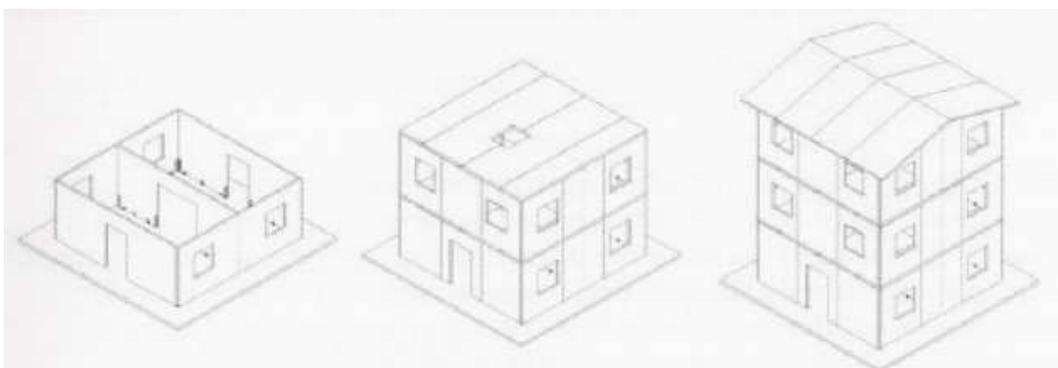


Fig. 4: Fasi di costruzione dell'edificio a 3 piani.

I giunti verticali fra pannelli parete vengono realizzati interponendo, in appositi intagli sui pannelli, delle strisce di legno micro lamellare (LVL) a strati incrociati, tipo KERTO Q, di spessore 27 mm ed effettuando il collegamento mediante viti auto foranti, tipo HBS della BMF.

I giunti fra i pannelli solaio vengono realizzati con giunti a mezzo legno fra i pannelli e il collegamento sempre con viti autoforanti.

È buona norma nella costruzione dell'edificio sfaldare i giunti orizzontali fra i pannelli solaio rispetto ai giunti verticali fra i pannelli parete.

Il pacchetto strutturale viene completato con l'aggiunta dell'isolamento termico e del rivestimento esterno sul lato esterno delle pareti e con un'intercapedine per il passaggio degli impianti, riempita con lana di roccia.

Il rivestimento esterno, sul lato esterno delle pareti, solitamente è composto da intonaco, ma può essere anche a doghe di legno o di qualsiasi altro materiale di rivestimento, mentre quello interno è in cartongesso sul lato interno.

Per quanto riguarda il solaio, questo viene completato con l'aggiunta di uno strato di sabbia, un massetto di calcestruzzo e con la pavimentazione (fig.5).



Fig. 5: Particolare costruttivo dei materiali generalmente utilizzati per completare il pacchetto parete esterna e solaio.

I connettori e gli elementi di collegamento utilizzati nei giunti sono:

- Holdown Simpson Strong Tie HTT22 e HTT16
- Angolari BMF 90×48×3×116
- Angolari BMF 105 con rinforzo
- Chiodi Anker 4×60
- Viti HBS 8×140, 10×260

Negli esempi di calcolo si fa riferimento ai valori di resistenza, di rigidità e alle proprietà fisiche degli elementi costituenti i vari strati dei pannelli, ossia alle tavole, ricavate dalle norme europee di riferimento.

5.1.3 Azioni di progetto e verifica dei solai e delle pareti

Per effettuare l'analisi dei carichi si considerano le sezioni tipiche di parete esterna, parete interna e solaio, con uno spessore dei pannelli di 85 mm (17-17-17-17-17) per le pareti e di 142 mm per i solai.

Dopo aver effettuato l'analisi dei carichi permanenti ed accidentali per la copertura, per le pareti e per i solai, si procede con:

- a) il calcolo dell'azione del vento;
- b) il calcolo dell'azione sismica.

Per quanto riguarda la verifica del solaio di copertura (formato da pannelli x-lam appoggiati sulle pareti esterne e sulla parete centrale interna, secondo la pendenza della falda) e del solaio di interpiano (formato da pannelli x-lam su tre appoggi, quali le due pareti esterne e la parete centrale), si effettuano:

1. il calcolo della sezione composta;
2. la verifica a flessione (il momento flettente esterno provoca tensioni normali sui vari elementi che compongono la sezione e si utilizzerà la tensione massima fra i tre elementi);
3. la verifica a taglio (condotta negli strati ortogonali, dove la tensione di taglio non è massima e la resistenza a taglio è bassa e nello strato centrale, dove la tensione a taglio è massima ed il legno viene sollecitato a taglio parallelo alla fibratura);
4. la verifica a deformabilità (condotta agli SLE a tempo zero e a tempo infinito).

Invece, per la verifica della parete interna (formata da pannelli x-lam a 5 strati da 85 mm e soggetta a sola sollecitazione di compressione) si effettua la verifica

per la parete più sollecitata, ossia per quella centrale al piano terra e si considera il sovraccarico accidentale dei solai come carico accidentale principale.

Considerando sempre una striscia di pannello unitario di 1 m ed un pannello da 85 mm, in cui lo spessore degli strati esterni e centrale è di 17 mm, così come quello degli strati ortogonali, si effettuano:

1. il calcolo della sezione composta;
2. la verifica a compressione;
3. la verifica a taglio;

Anche per la verifica della parete esterna (formata da pannelli x-lam a 5 strati da 85 mm e soggetta a sollecitazione di pressoflessione) si effettua la verifica per la parete più sollecitata, ossia quella al piano terra (lato Est), ma considerando come carico principale il vento.

Esaminando ancora una striscia di pannello unitario elementare di 1 m ed un pannello da 85 mm, in cui lo spessore degli strati esterni e centrale è di 17 mm, così come quello degli strati ortogonali, si effettuano: :

1. il calcolo della sezione composta;
2. la verifica a pressoflessione (sforzo normale e momento flettente);
3. la verifica a taglio.

5.1.4 Verifica delle connessioni

Gli elementi portanti strutturali dell'edificio (pannelli parete e solaio) sono collegati fra loro e alle fondazioni, utilizzando esclusivamente elementi meccanici di collegamento, la cui resistenza caratteristica è stata ricavata sulla base di prove effettuate presso il Laboratorio Prove Meccaniche del CNR-IVALSA di San Michele all'Adige (TN).

L'**unione pannello-pannello nei solai**, effettuata con l'inserimento di viti \varnothing 8 ogni 10 cm, è sufficiente per poter accreditare l'ipotesi di solaio infinitamente rigido, senza bisogno di ulteriori verifiche. In sostanza è sufficiente a garantire uno scorrimento ininfluenza fra i pannelli e questa assunzione è avvalorata dai risultati delle prove sismiche effettuate su modelli di edifici in scala reale.

Anche l'**unione verticale fra pareti ortogonali**, effettuata con viti \varnothing 10 ogni 10 cm, è sufficiente a garantire la perfetta solidarietà fra le pareti e la trasmissione degli sforzi con continuità, senza bisogno di effettuare ulteriori verifiche.

Comunque, nella realizzazione del collegamento fra pannelli parete ortogonali e fra pannello solaio e pannello parete sottostante, realizzato con viti, è necessario fare molta attenzione al corretto posizionamento delle viti.

La cosa migliore è realizzare il collegamento con la vite infissa con asse leggermente inclinato rispetto alla direzione del piano della parete, per essere sicuri di andare ad intercettare gli strati a fibratura ortogonale, per il corretto funzionamento del collegamento.

Se la vite viene infissa in uno strato con fibratura parallela (inserimento di testa) l'unione è totalmente inefficace.

5.1.5 Vari tipi di verifiche

Anche la verifica dell'intero edificio nei confronti dell'azione del vento va fatta nelle due direzioni principali ortogonali, considerando i coefficienti globali di pressione esterna ed interna della struttura. Si considera:

- a) il vento in direzione Est-Ovest;
- b) il vento in direzione Nord-Sud.

Essendo la configurazione dei giunti simmetrica nelle due direzioni principali, le verifiche vengono condotte per le sollecitazioni peggiori fra le due condizioni di vento agente nelle due direzioni considerate (E-O e N-S).

Altre verifiche che si fanno sono:

- verifica al ribaltamento (calcolo dei carichi permanenti per la valutazione del momento stabilizzante, che risulta maggiore del momento ribaltante dovuto al vento);
- verifica allo scorrimento alla base (ogni parete risulta ancorata al piano terra a taglio mediante 6 angolari, ognuno dei quali collegato con 11 chiodi alle pareti);
- verifica al sollevamento (l'edificio è ancorato alla fondazione, nei confronti del sollevamento e dello scorrimento, mediante piastre angolari di acciaio, tirafondi per il collegamento delle piastre alla fondazione e chiodi a rilievo tronco-conici per il collegamento delle stesse piastre alle pareti);
- verifica giunti verticali (i giunti verticali fra i pannelli sono soggetti allo stesso valore del taglio a metro lineare agente sulle pareti);

- verifica di instabilità dei pannelli (per effetto dei carichi orizzontali sismici le pareti esterne sono soggette ad un'ulteriore quota parte di sforzo normale, che può causare l'instabilità delle pareti).

Va sottolineato che la verifica delle fondazioni non si effettua, in quanto le fondazioni vengono realizzate o su travi di fondazione o con una platea di calcestruzzo, le cui dimensioni e armatura vanno calcolate sia in funzione dei carichi trasmessi dall'edificio che delle caratteristiche del terreno.

Generalmente, nel caso di edifici di pochi piani, lo spessore e l'armatura della platea risultano piuttosto contenuti, per il fatto che, come tutte le tipologie strutturali in cui la struttura portante è di legno, i carichi trasmessi alle fondazioni sono moderati.

È comunque buona norma costruttiva, anche nel caso di fondazione su platea, realizzare un cordolo di cemento armato di almeno 20 cm di altezza e spessore variabile, in funzione dello spessore della parete, sopra il quale posare le pareti del piano terra, interponendo uno strato di guaina bituminosa o di materiale a base di gomma, eliminando in tal modo la possibilità di pericolosi ristagni d'acqua. La parete va posizionata al lato esterno a filo del cordolo.

5.1.6 Prove sismiche effettuate su edifici in scala reale

Nell'ambito del Progetto Sofie sono state effettuate una serie di prove sperimentali volte a caratterizzare il comportamento strutturale di questa tipologia di edifici, con particolare riguardo al loro comportamento nei confronti delle azioni sismiche.

Anche a causa della rapidità con cui questo sistema costruttivo si sta diffondendo, fino ad ora le normative europee non contengono alcuna indicazione specifica sulla produzione, sulla progettazione, sul metodo costruttivo e sulle procedure di controllo e manutenzione, pur essendo queste abbastanza sviluppate nella pratica comune.

Se, ad esempio, si considera il comportamento sismico, fino ad ora non erano note ricerche che abbiano affrontato in maniera completa ed esaustiva tale argomento. In particolare, nessuno studio era stato effettuato sulla individuazione del fattore di struttura e non erano mai state effettuate prove sismiche su tavola vibrante su edifici interi.

Questa carenza di risultati scientifici si riflette nella carenza di indicazioni progettuali all'interno delle normative europee e ne consegue che le poche presenti sono troppo cautelative (ad esempio, il valore del fattore di struttura q nell'Eurocodice 8 o i limiti di altezza per gli edifici a struttura di legno dati nella Normativa Sismica Italiana).

Esiste, quindi, la necessità di effettuare indagini e ricerche allo scopo di ottenere dati che possano costituire un valido supporto per l'inserimento di prescrizioni normative sulla progettazione di edifici multipiano x-lam, nei confronti delle azioni sismiche, sia nell'Eurocodice 8 che all'interno della Normativa Sismica Italiana.

A questo proposito all'Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree del CNR è stato intrapreso un estensivo programma di ricerca in collaborazione con il NIED (National Institute for Earth Science and Disaster Prevention) del Giappone, che si è sviluppato attraverso le seguenti fasi:

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

Si farà riferimento esclusivamente a quest'ultima fase.

L'edificio sottoposto a prova, dunque, è di tre piani, con dimensioni in pianta di 7×7 m circa e 10 m di altezza totale, con copertura a due falde.

I pannelli parete e solaio sono stati realizzati con legno proveniente dalla Val di Fiemme e, lavorati e tagliati a misura mediante macchine a controllo numerico, sono stati spediti direttamente in Giappone. Qui un team di carpentieri italo-giapponesi ha provveduto al montaggio della casa direttamente sopra la tavola vibrante.



Fig. 6: Edificio sottoposto a prova sopra la tavola vibrante del NIED

Il collegamento alla tavola vibrante è stato effettuato mediante un telaio d'acciaio formato da profilati H 300×300×10×15, a sua volta connesso alla tavola mediante bulloni Ø50.

Le pareti del piano terra dell'edificio sono state collegate al telaio d'acciaio mediante piastre di tipo holdown, in corrispondenza degli angoli delle pareti e delle aperture per porte e piastre angolari d'acciaio diffuse lungo le pareti,

entrambe collegate al telaio mediante bulloni e alle pareti mediante chiodi a rilievi tronco-conici.

L'edificio era formato da quattro pareti esterne di 85 mm di spessore e una parete interna parallela alla direzione Est-Ovest dello stesso spessore (fig.6), con un'apertura di 2,55×2,25 m al centro.

I due solai sono stati realizzati sempre con pannelli x-lam, ma di 142 mm di spessore, mentre per il pannello della copertura è stato utilizzato ancora uno spessore di 85 mm, esattamente come per l'edificio semplice a tre piani visto prima. Le pareti esterne del primo e secondo piano sono state tutte realizzate con due aperture per finestre di dimensione di 1,1×1,2 m.

Le pareti esterne al piano terra, perpendicolari alla direzione di applicazione del sisma (direzione N-S), hanno due aperture per finestre di 1,1×1,2 m, mentre le pareti esterne, parallele alla direzione di applicazione del sisma, sono state dotate di aperture per porte, la cui larghezza è stata variata da 1,2 m a 4,0 m nelle 3 diverse configurazioni di prova, ossia le prime due con un distribuzione simmetrica delle aperture per porte al piano terra di 1,20 m e di 2,55 m, in direzione parallela a quella di applicazione del sisma e l'ultima asimmetrica, avendo un'apertura sul lato Nord al piano terra di 2.55 m e un'altra sul lato Sud di 4,00 m..

Per motivi di trasporto le dimensioni in larghezza di ciascun pannello parete e solaio sono state limitate ad un massimo di 2,30 m e di conseguenza ciascuna parete è stata realizzata con l'utilizzo di tre pannelli connessi tra loro mediante viti autoforanti di Ø8×80 e giunti verticali, realizzati con una striscia di legno micro lamellare (LVL) inserita in appositi intagli eseguiti sui bordi dei pannelli.

I pannelli solaio sono stati collegati fra loro con giunti di sovrapposizione a mezzo legno e viti auto-foranti di Ø10×180 e la stessa connessione con viti è stata utilizzata per il collegamento solaio-pareti inferiori.

La scelta di realizzare le pareti con più pannelli collegati fra loro mediante giunti verticali con viti è stata anche una scelta progettuale ben definita, allo scopo di ottenere il richiesto livello di duttilità per l'intero organismo strutturale.

Le stesse viti sono state utilizzate per collegare fra loro le pareti ortogonali e per collegare i solai alle pareti sottostanti. Il collegamento al telaio d'acciaio di base è stato, invece, effettuato con ancoraggi al sollevamento (holdown tipo Simpson Strong Tie HTT22, collegati al telaio con bulloni Ø16 classe 8.8 e alle pareti con chiodi Ø4 a rilievi tronco-conici), posizionati alle estremità delle pareti e in corrispondenza delle aperture per le porte, mediante collegamenti a taglio realizzati con angolari d'acciaio (tipo BMF 90×48×3×116 collegati al telaio con

bulloni Ø12 classe 8.8 e alle pareti con chiodi Ø4 a rilievi tronco-conici), distribuiti lungo la lunghezza delle stesse pareti.

Ai piani superiori i collegamenti per contrastare il sollevamento e lo scorrimento delle pareti sono stati effettuati ancora con holdown alle estremità e con angolari d'acciaio distribuiti sulla lunghezza delle pareti.

Sui due solai del primo e secondo piano dell'edificio sono state posizionate delle masse aggiuntive (blocchi d'acciaio di diversa dimensione e peso), per simulare il peso dei materiali costruttivi di completamento del pacchetto del solaio (rivestimento soffitto, isolamento acustico con strato di sabbia, massetto di calcestruzzo alleggerito, pavimentazione) e una certa percentuale di carichi accidentali (30%), da valutare nella combinazione di carico sismica, secondo la Normativa Italiana e l'Eurocodice 8.

In copertura non è stata prevista alcuna massa aggiuntiva, sia per limiti tecnici, sia in considerazione del fatto che il coefficiente parziale nella combinazione sismica per la neve è pari a 0 per l'Eurocodice 8.

5.1.7 Strumentazione utilizzata e risultati delle prove

L'edificio è stato attrezzato con 97 strumentazioni di misura, alcuni dei quali replicavano la stessa misura, ma con apparecchiature diverse.

Sono stati utilizzati in totale 20 accelerometri, due a ciascun piano in direzione E-O, due in direzione N-S, due in direzione verticale, uno in direzione E-O e uno in direzione N-S in copertura.

Sono stati posizionati trasduttori di spostamento per misurare lo scorrimento dei pannelli del piano terra rispetto alla base, mentre per misurare gli spostamenti di interpiano in entrambe le direzioni orizzontali sono stati posizionati 15 strumenti (5 per piano), composti da pannelli spessi di compensato, collegati al soffitto e al pavimento di ogni piano, ai quali sono stati attaccati dei trasduttori di spostamento.

Per misurare i sollevamenti sono stati posizionati 12 trasduttori di spostamento (4 a ciascun piano) e altri 14 per misurare lo scorrimento tra pannelli parete e solaio. Infine, per misurare il carico sugli holdown ai quattro angoli dell'edificio, sono state posizionate 8 celle di carico a rondella al piano terra.

In totale, l'edificio è stato sottoposto ad una serie di 26 accelerogrammi, 15 dei quali hanno avuto un valore dell'accelerazione di picco $\geq 0,5$ g.

Prima e dopo ogni prova, è stata misurata la frequenza propria dell'edificio, mediante un segnale ad impulsi, detto "rumore bianco".

Al termine di ogni prova più importante, ossia per valori di accelerazione di picco $\geq 0,50$ g (PGA), l'edificio è stato accuratamente ispezionato, per valutare se si fossero verificati eventuali danni. Nonostante i danni evidenziati, anche a seguito di terremoti più forti, siano stati minimi, si è comunque sempre provveduto a piccoli interventi di riparazione, al fine di ripristinare i valori di rigidità originari.

Lo stato limite di quasi- collasso è stato raggiunto con il terremoto di Kobe 0,90 g (PGA), al termine del quale è stata osservata la rottura solo di un paio di holdown. I danni osservati al termine dell'ultima prova erano, comunque, tali da consentire una totale riparazione dell'edificio con pochi e semplici interventi, ossia con la sostituzione delle piastre angolari danneggiate e quella delle viti deformate nei giunti verticali tra i pannelli.

L'edificio, al termine di tutte le prove effettuate, è ritornato perfettamente nella sua posizione originaria, senza evidenziare alcuna deformazione permanente.

5.1.8 Procedura per determinare il fattore di forma

La gran parte delle norme sismiche di tutto il mondo contemplano un fattore di riduzione delle azioni, il cosiddetto ARF (Action Reduction Factor), da adoperare nella progettazione della struttura, utilizzando una semplice analisi elastica globale.

L'ARF esprime la capacità della struttura di dissipare energia attraverso un comportamento post-elastico e di sopravvivere anche ad eventi sismici eccezionali, senza che si verifichi il collasso completo, ossia lo stato limite di collasso. Nell'Eurocodice 8 l'ARF è chiamato *fattore di struttura q*, che per definizione è il fattore da utilizzare nella progettazione per ridurre le forze ottenute da un'analisi lineare, che tiene conto della risposta non-lineare della struttura, in funzione del materiale, del sistema strutturale e del procedimento di progettazione adottato.

Esistono vari modi per valutare il valore del fattore di struttura q per un determinato sistema strutturale, ma è stata scelta la seguente procedura:

1. è stata progettata la struttura, utilizzando un valore del fattore di struttura $q=1$, secondo l'Eurocodice 8, per l'accelerazione di picco di progetto prescritta $PGA_{u,code}$ (0,35 g), che corrisponde all'accelerazione di picco

di progetto per la zona a più alta sismicità del territorio italiano, oltre che il relativo sistema resistente, secondo le normative (sismica e statica, Eurocodici 5 e 8), utilizzando i valori di progetto per le azioni;

2. è stato modellato il comportamento strutturale dell'edificio, partendo dalle caratteristiche meccaniche ottenute da prove cicliche effettuate in laboratorio su giunti e pannelli parete in varie configurazioni ed è stato calibrato sulla base dei risultati ottenuti dalle prove su tavola vibrante, mediante un programma di calcolo capace di determinare nel tempo la risposta non-lineare della struttura;
3. sulla base dei risultati delle prove su tavola vibrante, è stato definito come criterio di collasso il raggiungimento della rottura in uno o più holddown e dall'osservazione dei danni è stato deciso di scegliere come limite di collasso il massimo sollevamento misurato sugli holddown al termine della prova, decretato come il raggiungimento dello stato di quasi-collasso dell'edificio, ossia la prova con Kobe 0,90 g. Tale deformazione massima (25,5 mm) si è dimostrata di poco inferiore alla deformazione a rottura ricavata dalle prove cicliche sugli stessi giunti, ottenuta come deformazione corrispondente all' 80% del carico massimo, nel tratto discendente della curva di inviluppo, pari a 30 mm;
4. è stato utilizzato tale programma con un determinato numero di terremoti, scalandone le rispettive intensità fino a determinare il valore dell'accelerazione di picco $PGA_{u,eff}$, che porta l'edificio allo stato limite di quasi-collasso;
5. è stato calcolato il fattore di struttura q come il rapporto fra il valore che ha causato il raggiungimento del collasso dell'edificio ($PGA_{u,eff}$) e il valore dell'accelerazione di picco di progetto ($PGA_{u,code}$), prescritta dalla normativa.

Il modello utilizzato è formato da pannelli parete rigidi, realizzati mediante intelaiature formate da elementi asta infinitamente rigidi e rigidamente collegati fra loro, collegati alla fondazione e ai solai di interpiano mediante elementi molla verticale a ciclo asimmetrico, che simulano il comportamento degli holddown, collegati fra loro mediante elementi molla verticale a ciclo simmetrico, che simulano il giunto verticale fra i pannelli e collegati in senso orizzontale alla fondazione e ai solai di interpiano mediante molle orizzontali a ciclo simmetrico.

Per l'analisi dinamica è stato utilizzato un intervallo di tempo di 0,001 sec.

Le masse sismiche sono state concentrate nei nodi ed è stato utilizzato uno smorzamento viscoso del 5% sulle rigidezze. I solai sono stati ipotizzati infinitamente rigidi e schematizzati con una serie di controventi di irrigidimento.

Le molle sono state calibrate sulla base dei risultati di prove cicliche condotte su pannelli parete in dimensioni reali.

Definito il modello, è stato effettuato un confronto con i risultati delle prove sismiche effettuate sul terzo tipo di edificio, visto in precedenza, per i terremoti di Kobe, con un'accelerazione di picco di 0,82 g e di Nocera Umbra, con un'accelerazione di picco di 1,2 g .

Concludendo, in sette casi su otto è stato ricavato un valore del fattore di struttura $q \geq 3$ e in due casi $q > 4$.

Questi risultati, seppur parziali, confermano che l'adozione di un valore del fattore di struttura $q=3$ è largamente giustificata per questa tipologia strutturale.

Naturalmente, per una valutazione completa occorre proseguire nelle analisi effettuando simulazioni con terremoti ed edifici differenti e provando anche differenti ipotesi di criteri di collasso.

Tuttavia, il valore ricavato mantiene intatto il suo importante ruolo di indicatore, in considerazione del fatto che l'edificio ha superato almeno 15 terremoti distruttivi di fila, senza subire danni rilevanti e mantenendo intatta la sua conformazione originaria, anche a seguito dell'ultimo accelerogramma che ha prodotto lo stato di quasi-collasso.

Ciò significa che questa tipologia costruttiva si dimostra molto promettente nel caso in cui la filosofia scelta per la progettazione nei confronti delle azioni sismiche è quella della NDD (No Damage Design), ossia della progettazione per l'assenza di danni.

5.2 Comportamento al fuoco e sicurezza in caso di incendio

Sin dai tempi più remoti, il ripetersi di gravi eventi dovuti al propagarsi del fuoco nelle costruzioni, ha spinto e spinge l'uomo sulla strada della ricerca e dell'applicazione di adeguate forme di prevenzione e protezione contro gli incendi.

Il crescente sviluppo tecnologico che si è registrato negli ultimi anni e la presenza di nuovi materiali immessi sul mercato, hanno introdotto significativi cambiamenti nelle condizioni di sicurezza sia negli ambienti di lavoro, sia nelle civili abitazioni.

In questo contesto, non fanno eccezione le costruzioni con strutture portanti in legno, per le quali è inevitabile il binomio legno-fuoco e se da un lato questo materiale trova sempre più ampio impiego nell'edilizia, dall'altro, nei casi in cui lo si impiega, si riscontrano non poche difficoltà per l'ottenimento delle necessarie certificazioni, dovuto alla mancanza di una specifica e dettagliata normativa al riguardo e alla scarsa conoscenza del comportamento delle strutture di legno nei confronti del fuoco.

Molte volte, infatti, la scelta del materiale da costruzione, soprattutto nei casi in cui non esiste una specifica regola tecnica di prevenzione incendi, ricade su materiali non combustibili, tipo acciaio e cemento, a discapito di quelli combustibili, quali il legno, quasi a sottintendere che l'attacco termico derivante da un incendio non abbia nessun effetto sui primi.

Molto spesso il progettista deve scegliere il giusto compromesso tra le misure atte a ridurre le probabilità che insorga un incendio e, nello stesso tempo, prevedere il comportamento della costruzione nel momento in cui l'evento si verifichi, senza eccedere con le misure preventive, dovendo fare i conti anche con i costi.

Si comprende come sia necessario e doveroso, specialmente per i progettisti, acquisire un'adeguata formazione su cosa si intende per resistenza al fuoco, per affrontare una corretta e razionale progettazione in caso di incendio.

Il comportamento al fuoco è definito come la modifica delle proprietà fisiche e/o chimiche di un elemento e/o di una struttura esposti ad una reazione esotermica (combustione) autoalimentata, che si propaga nello spazio e nel tempo.

Questo concetto comprende sia la reazione al fuoco che la resistenza al fuoco. La reazione al fuoco è definita come il comportamento di un materiale che contribuisce, con la propria decomposizione, al fuoco a cui è sottoposto.

In particolare, il comportamento al fuoco del legno si può suddividere principalmente in due fasi:

- fase di innesco, correlata con la natura combustibile del materiale;
- fase di incendio generalizzato, con incontrollata propagazione del fuoco, dei fumi e dei gas caldi, che coinvolge le caratteristiche di stabilità, tenuta e isolamento termico dei materiali da costruzione.

Si comprende bene come la reazione al fuoco riveste particolare importanza soprattutto nella fase iniziale (fase di ignizione) di un incendio, la quale risulta influenzata dai seguenti fattori:

- infiammabilità e caratteristiche superficiali del combustibile;
- contenuto di umidità e porosità del combustibile, distribuzione e suo orientamento spaziale nell'ambiente;
- possibilità di propagazione della fiamma e grado di partecipazione all'incendio da parte del combustibile;
- velocità di decomposizione del combustibile coinvolto nell'incendio.

Il legno, quale materiale combustibile, se sottoposto ad una fonte di calore di determinata intensità e durata, brucia con modalità che dipendono dalle proprietà termo-fisiche intrinseche.

In passato, diversi studi condotti su provini di legno di varie specie legnose, hanno dimostrato che la combustibilità del legno è legata essenzialmente a:

- massa volumica;
- specie legnosa (caratteristiche anatomiche);
- umidità.

La specie legnosa presa in considerazione in questo studio è l'abete rosso, molto diffusa nella realizzazione di strutture in legno, la quale presenta ottime proprietà termo-fisiche.

In condizioni di incendio il legno partecipa alla combustione attraverso processi di carbonizzazione, che si sviluppano a partire dalla superficie esterna esposta al fuoco, mentre gli strati interni, al di sotto della zona carbonizzata, possono ancora sviluppare una resistenza residua.

Convenzionalmente, la resistenza di progetto del legno di abete rosso in condizioni di incendio, si assume pari a:

CATEGORIA	RESISTENZA CONVENZIONALE (N/mm ²)				MODULO ELETSTICO
	COMPRESSIONE	FLESSIONE	TRAZIONE	TAGLIO	
I	15	17	17	1.5	12500
II	12	14	14	1.3	11500
III	9	11	9	1.2	11000

Bisogna considerare che l'incendio è definito un'azione accidentale, cioè un'azione che si presenta in occasione di quegli eventi di origine antropica definiti incidenti.

Al fine di limitare l'insorgere di questo evento, le costruzioni devono essere progettate e costruite in modo da garantire la sicurezza in caso di incendio (requisito essenziale n° 2 della Direttiva Prodotti da Costruzione).

La progettazione delle strutture in condizioni di incendio deve evidenziare la capacità di un sistema strutturale di consentire il raggiungimento dei seguenti obiettivi di sicurezza:

- a) garantire la sicurezza degli occupanti durante la loro permanenza prevista nell'edificio;
- b) garantire la sicurezza delle squadre di soccorso e delle squadre antincendio;
- c) evitare crolli dell'edificio;
- d) consentire l'eventuale riutilizzazione della struttura.

Il modello del sistema strutturale adottato per la progettazione deve riflettere la prestazione della struttura nella situazione di incendio, ovvero le strutture devono essere progettate e costruite in modo da conservare la loro funzione portante e di separazione durante tutta la pertinente esposizione al fuoco.

Il progettista che si appresta alla progettazione contro l'incendio, di strutture in legno, definita la destinazione d'uso dell'edificio, ha la possibilità di seguire due strade:

1) approccio prescrittivo (sistema tradizionale): fare riferimento alle specifiche regole tecniche di prevenzione incendi, emanate dal Ministero dell'Interno, le quali fissano dei requisiti minimi che le opere devono possedere; tale approccio lascia poco margine di discrezionalità ai tecnici sulle misure di sicurezza da intraprendere e si comprende come, in questo caso, sia il legislatore ad eseguire preventivamente l'analisi del rischio, imponendo, nello stesso tempo, l'adozione di misure preventive e protettive, idonee a compensare il rischio;

2) approccio prestazionale: vengono fissati degli obiettivi di sicurezza, ma viene lasciato ampio spazio al progettista sulle modalità di raggiungimento degli stessi. E' il progettista ad eseguire una puntuale analisi del rischio, in relazione alla verosimile situazione che potrebbe riscontrarsi in caso di incendio. Questo metodo richiede che venga eseguita una accurata simulazione del tipo di incendio e una valutazione dei diversi eventi che esso è in grado di provocare durante il suo sviluppo.

Questo secondo metodo risulta oggi possibile grazie alla intensificazione dell'attività sperimentale, svolta a livello nazionale e internazionale.

La determinazione della resistenza al fuoco degli elementi strutturali in legno, può essere valutata con i seguenti metodi:

a) metodo analitico: individuato dalle norme:

- UNI 9504:1989 " Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi in legno ";

- Norma Tecnica contenuta nel Bollettino Ufficiale del consiglio Nazionale delle Ricerche n° 192 del 1999;

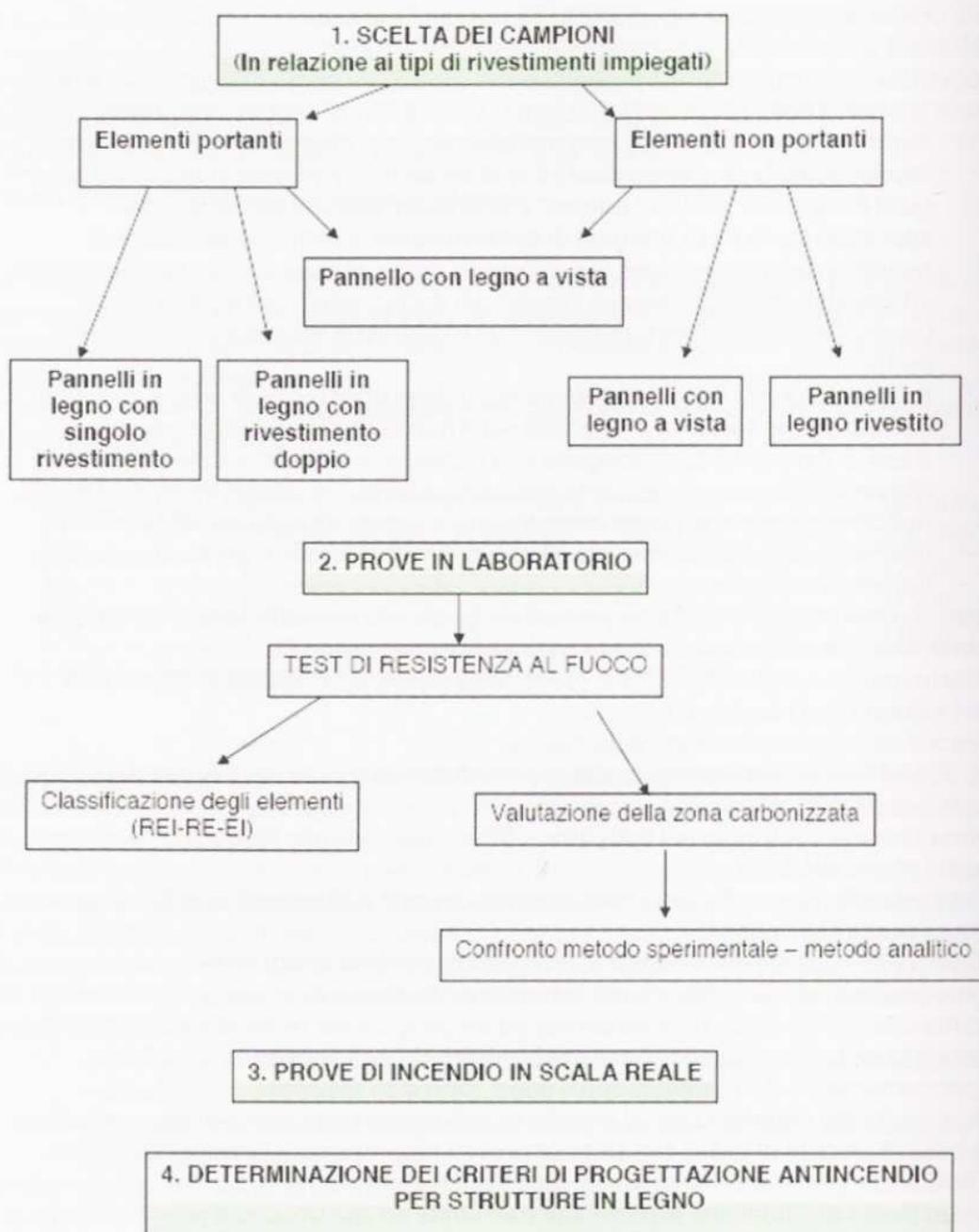
- Decreto del Ministero 06 marzo 1986 " Calcolo del carico di incendio per locali aventi strutture portanti in legno ";

- UNI EN 1995-1-2:2004-Eurocodice 5: "Progettazione delle strutture in legno";

b) metodo sperimentale: consiste nel sottoporre l'elemento di prova sia con funzione portante che con funzione di separazione, ad un programma termico equivalente all'azione termica di un incendio standard, stabilito da una norma (ISO 834), indipendentemente dal materiale con il quale è stato realizzato.

Vista la novità del sistema x-lam, si è preferito sviluppare una parte della progettazione sulla base di un ciclo di prove condotte su provini rappresentativi presso i laboratori dell' IVALSA. Le prove sono state condotte e valutate in modo tale che la struttura avesse lo stesso livello di affidabilità rispetto agli stati limite ed alle situazioni progettuali che si sarebbero ottenuti tramite una progettazione basata su procedure di calcolo specificate negli Eurocodici.

ITER DI PROVA



5.2.1 Risultati della prova

La temperatura ambiente iniziale all'inizio della prova era di 12°C. La prova è durata 67 minuti ed è stata volontariamente interrotta al fine di accertare le condizioni dell'elemento di prova ad un tempo di 60 minuti + 10% circa.

Nel corso della prova nessun requisito è venuto meno, infatti, una volta terminata, la temperatura media rilevata dalle termocoppie applicate sulla superficie non esposta all'elemento di prova è rimasta più o meno costante per tutta la durata, con un valore massimo di 13°C e non si è verificato il passaggio di fumi caldi-freddi o fiamme.

La superficie esposta dell'elemento di prova, presentava due lastre di cartongesso esterne con evidenti fessurazioni e variazioni delle caratteristiche fisiche, ma senza cedimenti.

Il pannello isolante interno è risultato integro, come lo strato di cartongesso a ridosso della parete, su cui si sono riscontrate delle fessurazioni in corrispondenza della scatola elettrica.

La parete di legno non ha subito alcuna alterazione, non essendo stata investita direttamente dal processo di combustione, tranne che nella zona in cui era collocata la scatola elettrica.

In conclusione, dall'analisi dei risultati emersi nel corso della prova, si deduce che l'elemento in esame è in grado di soddisfare i requisiti richiesti dalla Classe di Resistenza al Fuoco.

IL SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI INERENTI IL COMFORT AMBIENTALE

6.1 Efficienza energetica nelle costruzioni: leggi e norme

Il problema del contenimento dei consumi energetici è legato a tre aspetti complementari che ne rendono urgente la soluzione: si tratta della dipendenza energetica dall'estero e da fonti energetiche esauribili, dell'incidenza economica del fattore energetico e dell'impatto ambientale dei consumi energetici.

Quest'ultimo aspetto presenta le caratteristiche di maggiore urgenza, anche alla luce delle più recenti analisi sugli effetti climatici di riscaldamento globale delle emissioni di anidride carbonica. L'aumento della concentrazione di tale gas in atmosfera, legato alle attività antropiche, dal valore preindustriale di 280 ppm al valore attuale di 380 ppm, non si arresterà per effetto della semplice stabilizzazione delle emissioni. Per bloccare la concentrazione, accontentandosi di un livello massimo di 550 ppm, dato che livelli inferiori sono già fuori portata, sono necessari decisi interventi di riduzione delle emissioni, che devono essere dimezzate entro la fine del secolo. Anche a fronte di misure così drastiche, ci sarà da attendersi un incremento della temperatura media non inferiore a 1,5°C.

Per tali ragioni, l'obiettivo di riduzione delle emissioni di CO₂, previsto dal Protocollo di Kyoto, pari su scala globale al 5% rispetto al livello del 1990, da conseguire entro il 2012, appare come un passo intermedio verso risultati ben più ambiziosi.

Le emissioni pro-capite nazionali, derivanti dai soli impieghi energetici, pari a circa 8 tonnellate annuali, hanno già superato di circa 500 kg l'anno il livello del 1990, per cui dovranno diminuire di circa 800 kg l'anno per rispettare l'obiettivo di Kyoto ed il contributo di riduzione proveniente dal settore degli edifici è molto interessante.

In Italia, il settore civile, cioè il settore residenziale più il settore terziario, è responsabile di circa un terzo dei consumi energetici finali, ossia il 30,2% secondo i dati del 2003, impiegando circa 44 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio all'anno.

Per il solo riscaldamento, un'abitazione consuma in media l'equivalente di 12-13 m³ di gas per m² di superficie, più altri 2 m³ per la produzione di acqua calda

sanitaria, con una emissione di 27-30 kg di CO₂ per m², mentre per il gas naturale la produzione di CO₂ è di 1,9 kg.

Considerata una superficie media di 42 m² per abitante, ciascuno è responsabile per quanto riguarda il proprio fabbisogno di acqua calda sanitaria e di riscaldamento dell'emissione di circa 1,1-1,3 t di CO₂ l'anno.

Da questo scenario appare inevitabile il ricorso a misure, anche drastiche, volte alla riduzione dei consumi di energie da fonte fossile.

Sin dall'emanazione della Direttiva Europea 2002/91/CE le tipologie degli edifici di nuova costruzione avrebbero dovuto essere caratterizzate da consumi energetici contenuti, specie per quanto riguarda il riscaldamento. I principali obiettivi di tale direttiva sono:

adozione di una metodologia (a livello nazionale e regionale) di calcolo del rendimento energetico degli edifici, ossia la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio (Art.2), che deve considerare:

- coibentazione
- caratteristiche tecniche e di installazione
- progettazione e posizione in relazione agli aspetti climatici
- esposizione al sole
- influenza delle strutture adiacenti
- esistenza di sistemi di generazione propria di energia
- clima degli ambienti interni

adozione delle misure necessarie per garantire che siano istituiti requisiti minimi di rendimento;

adozione di un certificato che, in fase di costruzione, compravendita o locazione, sia messo a disposizione del proprietario;

ispezione periodica delle caldaie al fine di controllare l'emissione del Biossido di Carbonio.

Agli Stati membri è lasciata la libertà di fissare degli standard minimi secondo la tipologia degli edifici e distinguere tra edifici nuovi ed esistenti.

La Direttiva non impone alcun metodo di calcolo, ma richiama come normativa tecnica di riferimento la UNI EN 832 (Prestazione termica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento – Edifici residenziali), anche se a breve, tale norma sarà sostituita dalla EN ISO 13790, che esplicita il metodo di calcolo applicabili a qualunque edificio.

Per poter rendere pratica attuazione della Direttiva, il governo italiano ha emanato il D.Lgs. n° 192/2005, in cui, grazie anche alle successive modifiche

indicate nel D.Lgs. 311/2006, sono stati focalizzati e precisati gli obiettivi nazionali in materia di contenimento dei consumi energetici, pur rimandando a decreti attuativi l'operazione di fissare requisiti minimi e metodologie di calcolo.

Tuttavia, già da alcuni anni sono state condotte nel nostro paese alcune iniziative volte a definire degli standard costruttivi a basso consumo, indirizzati al rilascio di certificati di prestazione energetica, relativa ai consumi di riscaldamento sin dalla fase di progetto e quindi ispirati a metodologie di calcolo assodate..

A livello normativo, il Comitato Termotecnico Italiano ha riassunto le principali indicazioni normative in una pubblicazione che consente di eseguire il calcolo del Fabbisogno di Energia Primaria prescritto dalla legge applicando le normative vigenti.

Quindi, per determinare le caratteristiche termigrometriche delle strutture in legno, si fa ricorso alle metodologie di calcolo esposte negli standard approvati in sede nazionale ed europea.

6.1.1 Le caratteristiche termo-fisiche degli elementi di involucro

Le prestazioni termiche dell'involucro di un edificio sono legate essenzialmente alla capacità dei diversi elementi di opporsi al passaggio di calore.

Per determinare l'efficienza energetica delle costruzioni in legno sono state considerate tutte le caratteristiche termo-fisiche degli elementi e calcolate le varie resistenze termiche:

- la resistenza termica delle pareti opache;
- la resistenza termica degli strati omogenei e non omogenei;
- le resistenze superficiali;
- la resistenza termica delle intercapedini d'aria (non ventilate , debolmente ventilate e fortemente ventilate);
- la resistenza termica di ambienti non riscaldati, la cui somma, o meglio l'inverso della somma, permette di definire:
- la trasmittanza termica globale di una parete opaca.

Importanti, ai fini dei requisiti di risparmio energetico che devono avere le pareti, sono i ponti termici, ossia quella configurazione strutturale o geometrica che produce una deviazione del flusso termico dalla condizione di flusso monodimensionale tra le superfici interna ed esterna di una parete.

Le tipologie di ponte termico sono due:

1. ponte termico di forma (ad esempio: l'incontro tra due pareti esterne di uguale struttura);
2. ponte termico di struttura (ad esempio: la presenza di una parete piana di una nervatura di struttura diversa).

Gli effetti provocati dalla presenza di un ponte termico nella struttura sono riconducibili a:

- presenza di disomogeneità di temperatura sulle superfici interne, ossia diminuzione della temperatura superficiale interna con conseguente pericolo di condensa;
- aumento delle dispersioni termiche, accentuato dal maggiore isolamento delle pareti dell'edificio.

La presenza di un ponte termico è definita dal coefficiente di eterogeneità di temperatura superficiale interna, tanto più attenuata quanto più prossimo ad 1 è valore di tale coefficiente.

L'obbiettivo da raggiungere è far sì che il valore della temperatura della superficie interna nella zona del ponte termico sia superiore al valore della temperatura di rugiada dell'aria interna, per evitare la formazione di muffa sulla superficie interessata.

Quindi, per contribuire alla diminuzione del valore del coefficiente di eterogeneità è necessario agire in due modi diversi:

- 1) metodo dell'isolamento, che ridurre il flusso termico che attraversa la struttura edilizia;
- 2) metodo della ripartizione, basato sull'aumento della superficie interna del ponte termico.

6.2 Le prestazioni acustiche

Un'importante caratterizzazione fisica dei diversi elementi di involucro è quella che ne descrive le prestazioni acustiche. In questo campo il Decreto 5 Dicembre 1997 stabilisce i criteri ed i valori limite per le prestazioni acustiche degli edifici e dei loro componenti.

L'aspetto rilevante, su cui occorre prestare particolare attenzione, è che le grandezze di cui si richiede la verifica fanno riferimento alla reale situazione di posa in opera dei componenti edilizi, ovvero occorre effettuare una misurazione ad edificio ultimato.

Gli indici proposti, inoltre, sono grandezze indipendenti dalla frequenza, contrariamente ai valori ricavabili da misure in opera. Tra gli indici proposti nel decreto, il valore assunto dal potere fono-isolante costituisce, per le strutture in legno, un dato assai importante, anche perché in un ambiente di vita un buon isolamento acustico delle strutture è cruciale per il comfort delle persone.

6.2.1 Cenni sugli indici di valutazione acustica

Il suono è una vibrazione meccanica che si propaga in un mezzo elastico e che dipende dal mezzo stesso. Si può propagare per via aerea o per via strutturale e mentre nel primo caso viene percepito dall'udito, nel secondo, quando è molto forte, viene percepito come vibrazione. Tra i due c'è una mutua connessione.

La trasmissione aerea è creata da quasi tutte le attività che vengono svolte in un appartamento, nonché dai suoi impianti; invece, quella strutturale viene provocata dal calpestio sui solai degli edifici e dall'impatto di oggetti sui pavimenti.

Gli impatti, oltre a causare la vibrazione del solaio, creano anche trasmissione per via aerea negli appartamenti circostanti.

I suoni si propagano lungo strade diverse, ma la più comune è la trasmissione diretta attraverso le strutture che dividono le abitazioni.

La frequenza di un suono si riferisce al numero di oscillazioni dell'onda in un secondo e la sua unità di misura è l'Hertz (Hz). Normalmente contiene più componenti a differenti frequenze, motivo per cui viene descritto con uno spettro sonoro.

Tutto questo è essenziale per la progettazione dell'isolamento delle strutture in quanto il loro comportamento acustico cambia col variare delle frequenze.

Un edificio, infatti, deve essere ben isolato sia ai valori alti che a quelli bassi, valori che, in un'abitazione, variano molto. Per esempio, parlando si producono frequenze comprese fra i 50 ed i 10000 Hz, camminando fra i 25 e 200 Hz.

Una persona con udito normale riesce a sentire i suoni compresi nell'intervallo di 16-16000 Hz, ma se la frequenza è superiore o inferiore a questo intervallo non li percepisce (ultrasuoni ed infrasuoni). L'udito umano è, però, più sensibile all'intervallo di 100-3150 Hz.

L'isolamento acustico delle strutture residenziali è quindi tradizionalmente studiato in funzione di questi valori, anche se, contemporaneamente, si cerca di fare in modo che risponda al meglio possibile per tutto lo spettro udibile.

I suoni sotto i 100 Hz vengono presi molto in considerazione, in quanto pareti e solai con strutture leggere trasmettono i rumori a basse frequenze piuttosto facilmente.

L'isolamento di una struttura contro il suono trasmesso per via aerea è rappresentato dall'indice di riduzione sonora (R_w , espresso in dB). Alti valori di questo indice corrispondono ad un alto livello di protezione acustica della struttura.

Per quanto riguarda, invece, l'isolamento di un edificio contro la trasmissione del suono per via strutturale, questo è rappresentato dal livello di pressione sonora da calpestio normalizzato ($L_{n,w}$, espresso in dB).

Contrariamente a quanto indicato per il fono-isolamento, un basso indice corrisponde ad un buon isolamento acustico.

Molte variabili vanno ad influire sulla determinazione di questi parametri, quindi il livello di isolamento acustico può essere determinato precisamente solo con delle misurazioni in un'abitazione finita.

6.2.2 Isolamento acustico delle strutture in legno

Il legno è un materiale leggero, cosa che rende difficile il raggiungimento degli standard acustici richiesti per gli edifici residenziali, utilizzando solo la massa delle strutture con tipologia a telaio. L'unico modo per ottenere buoni risultati è quello di realizzare doppie pareti.

Speciale attenzione va data all'isolamento acustico alle basse frequenze, in particolare per i solai, in quanto il loro debole potere di isolamento è dovuto al poco spessore, per cui bisogna cercare di aumentarne la massa.

Le condizioni di una struttura intelaiata in legno differiscono da quelle delle strutture massicce, nelle quali il livello di pressione sonora cresce col crescere della frequenza, contrariamente che nelle prime, in cui i suoni a bassa frequenza (sotto i 100 Hz) possono essere sentiti in modo più forte e quelli ad alta frequenza possono essere effettivamente isolati.

Quindi, è possibile realizzare un comfort complessivo a livello di isolamento acustico nelle costruzioni intelaiate, in quanto la maggior parte dei suoni in un edificio residenziale hanno alte frequenze (tra i 50 ed i 10000 Hz).

Una struttura è acusticamente semplice se è fatta tutta con uno stesso materiale o se gli strati dei vari materiali sono in solido contatto l'uno con l'altro, in modo che vibrino come un tutt'uno. L'isolamento acustico è basato principalmente sulla massa.

Quando un'onda sonora incontra una struttura si genera in essa una vibrazione e più questa vibra più il suono è trasmesso dall'altro lato. Ciò accade sia nelle strutture leggere che in quelle pesanti, la sola differenza sta nel fatto che quelle pesanti isolano meglio.

L'isolamento acustico di strutture più leggere di 100 kg/m^2 cresce meno rapidamente che in quelle più pesanti, per cui quando una struttura è molto pesante il suo potere isolante non può essere significativamente incrementato con una piccola aggiunta di massa e molta influenza ha il tipo di materiale utilizzato.

Il fenomeno della risonanza avviene in una struttura quando questa viene colpita da un'onda sonora con una frequenza che casca entro l'intervallo di risonanza della stessa.

Questo fenomeno fa sì che essa vibri e trasmetta il suono intensivamente, in quanto causa una riduzione del suo potere isolante e ciò è dovuto al fatto che il sistema di vibrazioni fra le strutture continua a guadagnare energia dall'onda sonora diretta ad esse.

L'intervallo di risonanza di una struttura può essere determinato dalla sua frequenza naturale più bassa, alla quale la vibrazione arriva al suo massimo valore, che deve risultare inferiore all'intervallo di frequenza di 100-3150 Hz.

Il fenomeno della coincidenza, invece, avviene, per esempio, in un pannello e si ha quando l'onda sonora, che ne percuote la superficie con un certo angolo di incidenza e l'onda all'interno del pannello stesso, viaggiano con la medesima velocità.

Durante la propagazione del suono la situazione rimane la stessa per tutto il tempo ed il pannello non isola efficacemente come ci si potrebbe aspettare sulla

carta. L'isolamento dipende principalmente dal meccanismo di perdita del pannello e della struttura.

Ogni pannello ha una frequenza di coincidenza che dovrebbe essere superiore all'intervallo 100-3150 Hz, in quanto il fenomeno avviene a valori più alti e maggiore è più piccolo sarà il fenomeno correlato.

Se la struttura è formata da più strati di pannelli non incollati fra loro, che è preferibile dal punto di vista acustico, la frequenza di coincidenza si determina per ogni strato separatamente.

Le strutture formate da doppie pareti basano l'efficacia dell'isolamento acustico sull'interazione fra le due masse separate tra loro e sullo spazio d'aria interposto.

In una doppia parete l'onda sonora fa vibrare la prima metà del muro, mentre l'aria compresa fra le due parti trasmette il moto oscillatorio all'altra metà, per cui più spesso è lo strato d'aria, minore sarà la trasmissione delle vibrazioni all'altra metà della partizione (fig.1).

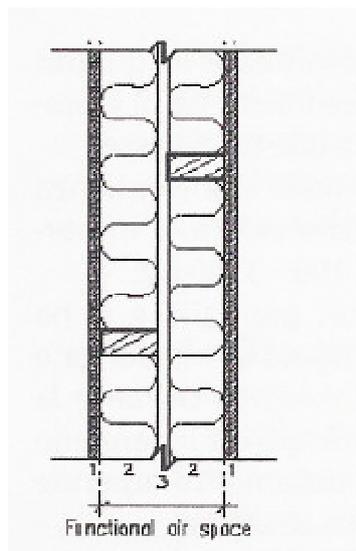


Fig. 1: Doppia parete

Mentre fra strutture pesanti e massicce sono sufficienti pochi centimetri, nel caso di muri leggeri, lo spazio deve essere sufficientemente grande per far sì che le due pareti non si mettano a vibrare insieme. Ad alte frequenze in questa intercapedine si formano, però, delle onde che ne riducono il potere di isolamento acustico.

L'effetto creato può essere ridotto tramite l'utilizzo di materiali fonoassorbenti, come la fibra di legno, da inserire nello spazio, che può essere completamente

riempito con materiale leggero. In questo modo l'isolamento acustico può migliorare fino a 6 dB. Di notevole importanza è anche il peso dei pannelli

Per quanto riguarda la frequenza di coincidenza di una doppia parete, il valore da ottenere dovrebbe essere il più alto possibile, in modo che il fenomeno della coincidenza non indebolisca considerevolmente l'isolamento acustico della parete e per questo la struttura del muro deve essere realizzata con elementi sottili e non incollati l'un l'altro.

Il principio descritto per le pareti doppie può essere utilizzato anche per i solai, per cui, per avere un buon isolamento acustico, il solaio dovrebbe includere un pavimento galleggiante o un controsoffitto realizzato con ancoraggi elastici.

In quest'ultimo caso la struttura viene creata con un profilo d'acciaio flessibile attaccato alle travi del solaio, che tiene sospese le lastre del controsoffitto, ottenendo così una doppia partizione (fig.2).

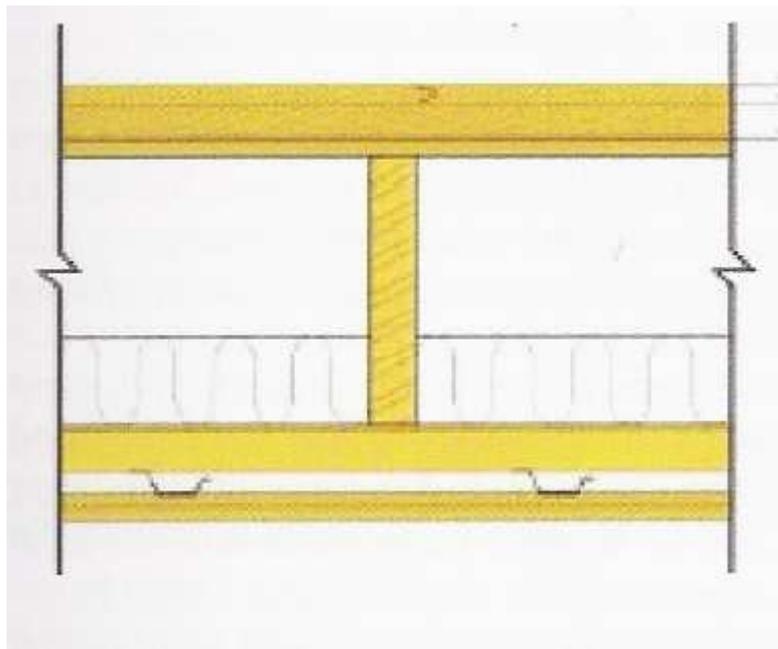


Fig. 2: Solaio con controsoffitto con ancoraggi elastici

La presenza dello strato d'aria è utile sia per quanto riguarda i rumori trasmessi per via aerea che per quelli trasmessi dalla struttura. Il suo spessore, per dare buone prestazioni, dovrebbe essere di almeno 200 mm. Dai 200 ai 450 mm l'isolamento acustico migliora infatti fino a 2-3 dB.

In questo tipo di strutture si registra, però, un deterioramento dell'isolamento sonoro da impatto al di sotto dei 50 Hz.

Come succede per le pareti doppie, alle alte frequenze si vengono a formare delle onde all'interno dello spazio d'aria del solaio, che ne indeboliscono la capacità di isolare. L'effetto di queste si riduce installando nell'intercapedine un materiale fonoassorbente.

E' stato osservato che uno strato di 100 mm di questo tipo di materiale elimina in modo sufficiente le onde prima presenti e un miglioramento di 1-2 dB può essere ottenuto riempiendone completamente l'intercapedine d'aria.

Un'altra soluzione è quella di realizzare un solaio galleggiante su uno strato elastico, oppure una copertura elastica direttamente sopra il piano del solaio.

Nel primo caso si ottiene un miglioramento nell'isolamento sia del suono aereo che in quello da impatto; questo metodo solitamente viene utilizzato quando si vogliono ottenere valori di indice di riduzione sonora R_w superiori a 55 dB.

Nel caso della copertura elastica non si ottengono effetti significativi nell'isolamento del suono trasmesso per via aerea, ma per quanto riguarda i rumori da impatto porta a buoni risultati a partire dai 160 Hz.

Come succede per le pareti doppie anche l'isolamento acustico di un solaio doppio aumenta al di sopra dell'intervallo della frequenza di risonanza, ma l'aumento, però, è inferiore a quello che si ottiene con le pareti, perché nei solai ci sono delle connessioni meccaniche tra le due masse separate, ovvero i travetti.

La frequenza di coincidenza per i doppi solai dovrebbe essere la più alta possibile, per minimizzare l'effetto del fenomeno connesso che influisce sulla qualità dell'isolamento acustico. La vibrazione della struttura portante di un solaio non ne intacca le prestazioni acustiche.

In un edificio residenziale le vibrazioni sono normalmente causate dal calpestio e dalle lavatrici. Solitamente queste non sono percepite da chi le produce, ma dalle altre persone sedute nello stesso appartamento. L'effetto si sente particolarmente nei solai leggeri che non hanno una struttura rigida e pesante come, per esempio, i solai in cemento.

Il problema per quanto riguarda il pavimento di un bagno, in una costruzione residenziale in legno, può essere ridotto costruendo un solaio galleggiante pesante o creando una struttura portante indipendente, che prevenga la propagazione orizzontale delle vibrazioni.

Il suono può anche propagarsi fra strutture vicine e attraverso le giunzioni, ma la trasmissione del suono per via strutturale, causata in un edificio, può essere eliminata, o possono esserne ridotti gli effetti, con alcuni principi:

1. eliminare i percorsi possibili di propagazione strutturale del suono separando alcune parti della struttura o utilizzando uno strato elastico lungo le vie di trasmissione;
2. utilizzare una struttura pesante e, quindi, non soggetta a vibrazioni fra i diversi appartamenti;
3. legare le varie strutture con giunti flessibili.

Per quanto riguarda i tetti, questi fanno sia da copertura che da soffitto e il miglioramento dell'isolamento acustico da rumori esterni, nel loro caso, può essere fatto tramite la costruzione di uno strato assorbente all'interno dello strato d'aria utilizzato per la ventilazione del tetto.

In queste strutture lo spessore d'aria è la condizione di base per l'isolamento del suono trasmesso per via aerea.

Un foro in una di queste non ha nessun potere isolante, diventando anzi un punto di accumulo e anche una piccola apertura nella struttura può danneggiarne sostanzialmente le sue prestazioni acustiche.

6.3 La ventilazione ed il comfort degli ambienti residenziali

Nel mandato M 343 che la Comunità Europea ha assegnato al CEN (Ente Normatore Europeo) è presente una proposta di standard che richiama oltre che le caratteristiche di comfort termo-igrometrico, di comfort acustico e di luminosità, anche quelle inerenti la qualità dell'aria dei diversi ambienti.

Relativamente al comfort, secondo un livello decrescente dal primo all'ultimo, gli edifici vengono classificati in 3 categorie: A, B e C e la classificazione è basata sul valore della temperatura operante interna.

Tipologia	Categoria	Temperatura invernale	Temperatura estiva
Edificio residenziale: cucine, camere da letto,...	A	21 °C	25,5 °C
	B	20 °C	26 °C
	C	18 °C	27 °C
Edificio residenziale: altri spazi	A	18 °C	
	B	16 °C	
	C	14 °C	

(Condizioni di comfort per edifici residenziali)

Nel corso della stagione invernale, le variazioni di temperatura sono controllate dal sistema di riscaldamento, ma anche il comportamento delle persone è fondamentale nel determinare lo scostamento massimo, ossia la differenza tra il valore massimo e minimo della temperatura. Ad esempio, all'apertura di una finestra al primo piano consegue la diminuzione di temperatura dell'aria e dell'umidità dell'aria interna.

A seconda dell'orientazione dei vani e dell'estensione della superficie finestrata, anche i contributi solari, oltre all'impianto di riscaldamento, risultano essere rilevanti.

Si è rilevato che i valori di umidità relativa interna nei fabbricati in x-lam sono sufficientemente bassi e non superano mai valori di 45-50%.

Comunque, nelle valutazioni si è tenuto conto del comportamento degli abitanti, delle ore di occupazione della casa, piuttosto poche e della superficie abitata, abbastanza elevata.

Durante l'estate, il livello della ventilazione naturale influenza fortemente i valori di temperatura interna e di umidità relativa alta, con picchi oltre il 60%, anche se le temperature interne non subiscono variazioni tra valori massimi e

minimi oltre i 10 K, mentre la differenza media tra la temperatura esterna e quella interna media è pari a 3 K

I valori massimi registrati risultano pari a 28,3°C e a 26,5°C , mentre quelli medi a 22,9°C e a 23,5°C, a seconda delle sonde utilizzate, mentre i ritardi temporali oscillano tra 1 e 6 ore.

L'integrazione al sistema impiantistico di una ventilazione meccanica, con eventuale sistema di raffreddamento a terreno, può risultare fondamentale per mantenere i valori di umidità interna e di qualità dell'aria sotto controllo, specie in condizioni climatiche estive più gravose (Pianura Padana, Centro e Sud Italia).

6.4 Efficienza della regolazione dell'umidità all'interno delle strutture portanti ai fini della durabilità ottimale

La presenza di umidità in eccesso nelle strutture edilizie, che generalmente è dovuta all'azione combinata di diverse cause variabili nel tempo, tra cui la presenza di infiltrazioni, la formazione di condensa superficiale e/o interstiziale e la risalita capillare, può provocare problemi di degradamento dei materiali ed inoltre può modificarne il comportamento termico, diminuendone le capacità isolanti.

Per la durabilità della struttura è necessario evitare la formazione della condensa superficiale, che si verifica quando la temperatura superficiale scende al di sotto della temperatura di rugiada, e della condensa interstiziale, legata alla trasmissione del vapor d'acqua attraverso il componente edilizio, che avviene se, in qualche punto, la concentrazione del vapore raggiunge il valore di saturazione.

Questi fenomeni devono, quindi, essere presi in considerazione già in fase di progettazione.

Un primo criterio da adottare, per ottenere un comportamento termigrometrico ottimale di una parete, è quello di disporre gli strati con maggiore resistenza termica verso l'esterno, mentre quelli con maggiore resistenza alla diffusione del vapore sul lato interno. Così facendo, infatti, la maggior parte della struttura si troverà a temperatura prossima a quella dell'ambiente interno, con una pressione di saturazione relativamente elevata, riducendo il rischio di formazione di condensa.

Un secondo criterio fondamentale riguarda l'opportunità o meno di inserire strati impermeabili al vapore in una struttura edilizia, in particolare in una parete esterna, ma la presenza di tali "barriere al vapore", è spesso fonte di problemi.

Durante il periodo invernale, infatti, risulta pericolosa la presenza di uno strato impermeabile posto sul lato esterno di una parete, a valle del materiale isolante, in quanto impedisce la fuoriuscita del vapore penetrato nella struttura stessa.

Contemporaneamente la bassa temperatura sul lato esterno riduce la pressione di saturazione, rendendo molto elevato il rischio di condensazione.

La norma tecnica UNI EN ISO 73788: 2003 prescrive la procedura per evitare fenomeni di condensazione superficiale e/o interstiziale ed permette di valutare la possibilità che nell'arco dell'anno l'acqua eventualmente condensata possa rievaporare.

Si è riscontrato che l'utilizzo di barriere al vapore, per tentare di correggere il comportamento di strutture non idonee, spesso non produce i risultati desiderati, anzi può peggiorare la situazione. Per questo motivo l'orientamento della normativa è quello di introdurre il concetto di bilancio di vapore annuale, al fine di limitare l'impiego delle barriere vapore ai casi strettamente indispensabili e soltanto dopo aver verificato che la condensa accumulatasi nel periodo invernale non si asciughi naturalmente durante la stagione estiva.

Per valutare il comportamento termo-igrometrico dei materiali da costruzione, sono state condotte alcune campagne di misura su edifici esistenti, nonché simulazioni numeriche, tramite un modello di trasporto accoppiato di calore e di massa. I rilievi hanno riguardato sia l'analisi dell'umidità e della temperatura dell'aria, interna ed esterna all'edificio, sia dell'umidità contenuta nei materiali costituenti i diversi strati delle pareti.

6.4.1 Umidità di parete del legno

Si definisce umidità u del legno il rapporto percentuale tra la massa dell'acqua contenuta in un qualsiasi pezzo di legno e la sua massa anidra.

La ventilazione è necessaria per asportare il vapore liberato dal provino, mentre la temperatura consente di trasformare tutta l'acqua in vapore, a pressione normale, senza dar luogo a distillazione degli estrattivi del legno, oppure al degradamento termico di certi costituenti della parete cellulare, che devono rimanere intatti affinché le pesate non risultino falsate.

Operativamente si esegue una prima pesata del provino e si determina la massa umida; inseguito si pone il provino in stufa, lasciandolo indisturbato per 48 ore, in modo che possa perdere gran parte dell'umidità e si effettua, quindi, una seconda pesata, annotando la misura. Poi si mette di nuovo il provino in stufa per ulteriori

6 ore. Si ripete la pesata e si confronta l'ultimo dato con la registrazione precedente. Se la variazione di peso intervenuta nelle 6 ore è trascurabile, ossia minore dell'1 %, si assume che tutto il vapore, l'acqua libera e quella di saturazione siano stati eliminati dal provino e quindi risulterà perfettamente anidro. Se, invece, la pesata rivela una perdita di peso non trascurabile, si rimette il provino in stufa per ulteriori 6 ore e si ripete la procedura fino al raggiungimento di un valore di peso costante tra le due ultime letture.

Determinata così la massa idrica, si procede al calcolo dell'umidità originale del provino, tenendo presente che questo metodo non è esente da errori, in parte inevitabili.

Inoltre, l'umidità di equilibrio di un provino, a determinate condizioni di temperatura e umidità relativa dell'aria, è leggermente diversa a seconda che l'equilibrio avvenga mediante aumento oppure diminuzione dell'umidità iniziale, si tratta del fenomeno dell'isteresi igroscopica.

La ragione dell'isteresi risiede principalmente nel fatto che, durante il desorbimento, una parte degli ossidrili (-OH), disponibili in seguito all'allontanamento delle molecole d'acqua che li saturavano, invece di rimanere liberi si saturano reciprocamente, aumentando il grado di cristallizzazione della cellulosa e provocando una diminuzione netta dei siti in cui l'acqua potrà attestarsi nei successivi cicli di assorbimento.

6.4.2 Umidità di equilibrio

Per comprendere il comportamento igrometrico del legno è necessario ricordare che normalmente per questo materiale si considerano 4 diversi tipi di acqua:

- acqua di costituzione (chimica): sono molecole d'acqua che entrano a far parte della composizione chimica delle principali molecole costituenti il legno (molecole idratate);

- acqua di saturazione delle pareti cellulari o acqua legata: è acqua che si unisce con legami di idrogeno ai radicali ossidrilici liberi disponibili sulle pareti cellulari e riferibili prevalentemente alla struttura molecolare delle microfibrille di cellulosa; questo tipo di acqua influenza notevolmente le proprietà del legno;

- acqua di imbibizione o acqua libera: è acqua allo stato liquido che riempie i lumi cellulari e che può fluire liberamente da una cellula all'altra in condizioni di legno fresco; il movimento dell'acqua all'interno del legno è governato da leggi

fisiche relative a fenomeni di tipo assai diverso, quali, ad esempio, la permeabilità, l'adsorbimento, la diffusione, la capillarità, l'osmosi, ecc...

Trascurando i fenomeni di capillarità e di osmosi, molto importanti per la fisiologia della pianta vivente, meno per gli aspetti tecnologici, questo tipo di acqua influenza solo marginalmente le caratteristiche del legno, comportandosi fondamentalmente come una zavorra uniformemente distribuita;

- vapore acqueo: è presente nell'aria che riempie parzialmente le cavità cellulari ed è in equilibrio con l'acqua di saturazione e l'acqua di imbibizione.

Si definisce punto di saturazione delle pareti cellulari, o più sinteticamente punto di saturazione, il valore di umidità del legno in corrispondenza del quale tutta l'acqua di imbibizione è stata eliminata, mentre tutta l'acqua di saturazione è ancora legata alle pareti cellulari.

Il punto di saturazione dipende da diversi fattori, di conseguenza l'umidità del legno corrispondente al punto di saturazione può variare tra il 28% ed il 40%, ma per la maggior parte dei fini pratici è sufficiente considerare il punto di saturazione convenzionalmente fissato ad $u = 30\%$.

L'importanza del punto di saturazione consiste nel fatto che esso segna una sorta di soglia al di sotto della quale il legno diventa igroscopico e comincia a presentare sensibili variazioni delle sue proprietà fisico-meccaniche in funzione dell'umidità.

Il legno presenta una struttura eterogenea di tipo poroso, ed è rappresentabile come una matrice solida attraversata da cavità ed interstizi parzialmente riempiti di gas e/o liquido. In generale, l'acqua contenuta in un solido umido ha una tensione di vapore che dipende non solo dalla temperatura, ma anche dalle caratteristiche del materiale, dalle modalità con cui l'acqua viene trattenuta all'interno della matrice solida e dalla quantità d'acqua globalmente presente.

Tale tensione di vapore è in generale minore di quella dell'acqua libera alla stessa temperatura e ciò può essere sommariamente spiegato considerando che le molecole d'acqua all'interno del materiale risentono di forze d'attrazione non solo da parte delle altre molecole di liquido, come per l'acqua libera, ma anche da parte della matrice solida, alla quale sono in qualche modo legate.

Nel legno l'acqua legata alle pareti cellulari necessita, per evaporare, di una quantità di energia leggermente superiore a quella necessaria per far evaporare l'acqua libera.

L'esposizione per un lungo periodo di un solido umido ad una corrente d'aria, avente umidità costante, comporta uno scambio di umidità tale da rendere la

tensione di vapore dell'umidità, presente nel solido, uguale alla pressione parziale del vapore, presente nell'aria.

In tali condizioni l'umidità del solido ha raggiunto un equilibrio dinamico ed è perciò detto umidità di equilibrio igroscopico per i valori di umidità e temperatura dell'aria circostante.

Se tale operazione viene ripetuta, mantenendo costante la temperatura dell'aria e variando l'umidità relativa dell'aria, si ottiene una curva definita isoterma di equilibrio.

6.4.3 Isoterma di equilibrio per il pannello di fibre di legno

Per studiare il comportamento termo-igrometrico della parete di un edificio è necessario conoscere il comportamento di ciascun materiale di cui è composta e per quanto riguarda i pannelli isolanti di fibra di legno, le caratteristiche necessarie all'analisi non sono presenti in letteratura, per cui è stato necessario ricavarli per via sperimentale.

Per determinare l'isoterma di equilibrio si sono perciò analizzati due pannelli di fibre di legno, caratterizzati da diverse densità, ma generalmente utilizzati insieme nel pacchetto isolante.

I provini ricavati da questi pannelli sono stati prima condizionati a diversi valori di umidità dell'aria ed in seguito essiccati in stufa, seguendo il metodo descritto nel precedente paragrafo, per determinare i relativi valori di umidità del materiale.

Si sono, perciò, ricavati 8 punti sperimentali della curva, che corrispondono ad altrettanti condizionamenti ottenuti in stanze con impianto di condizionamento, per 30%, 65% e 85% RH, in celle con diverse soluzioni saline sature:

- 12% RH: cloruro di litio;
- 24% RH: acetato di potassio;
- 44% RH: carbonato di potassio di-idratato;
- 76% RH: cloruro di sodio;
- 96% RH: nitrato di potassio;

ma di questi dati due sono stati scartati, in quanto le celle di condizionamento a RH = 30% e RH = 85% non sono risultate stabili.

6.4.4 Misure di umidità di parete

Per testare l'attendibilità dei risultati del modello di simulazione, è necessario conoscere il reale andamento dell'umidità all'interno di una parete di un edificio ed è quindi fondamentale poter misurare, a diverse profondità, l'umidità dei materiali lignei. In questo modo è possibile verificare che nella parete non vi sia condensa interstiziale e nemmeno condizioni di umidità tali da consentire lo sviluppo dei funghi nel legno e causare il degradamento dei materiali.

Il metodo più indicato per misurare localmente l'umidità del legno in modo rapido e poco distruttivo è il metodo elettrico, che si basa sul fatto che il legno allo stato anidro è un pessimo conduttore dell'elettricità, tanto da poter essere annoverato fra i materiali isolanti.

All'aumentare dell'umidità la sua resistività diminuisce, seguendo una legge all'incirca esponenziale fino al punto di saturazione, continuando poi a diminuire anche al di sopra di esso, ma in modo più lento e meno regolare.

Sfruttando la correlazione esistente tra umidità del legno e resistività è possibile ricavare indirettamente la prima misurando la seconda, ma il campo di variazione della resistività del legno in funzione dell'umidità è molto ampio, tale da rendere poco influenti, in certi limiti, i parametri geometrici di lunghezza e sezione del tratto attraversato dalla corrente.

Ciò che è misurato attraverso gli strumenti ad elettrodi, pertanto, è in effetti una resistenza, ma l'errore che si compie è quasi sempre trascurabile ai fini pratici.

I misuratori elettrici dell'umidità del legno sono costituiti da un ohmetro, ossia un misuratore di resistenza elettrica in corrente continua, concepito specificamente per misurare resistenze molto elevate (tra 10^4 e 10^{12} Ω circa), collegato ad una coppia di elettrodi metallici cilindrici, che vengono infissi nel legno al momento della misura.

La resistenza totale, misurata attraverso gli elettrodi infissi nel legno, è inoltre influenzata in modo prevalente dalla resistività del materiale nell'immediato intorno degli elettrodi e assai meno dal resto del legno.

La misura elettrica dell'umidità ha pertanto carattere locale e dà informazioni sulla massima umidità comune alle due zone di legno a contatto con gli elettrodi, a differenza del metodo gravimetrico, che fornisce l'umidità media globale del provino messo in stufa.

Se si utilizzano elettrodi con stelo isolato, in cui uno strato di apposito smalto riveste tutta la loro superficie, tranne la punta, che rimane scoperta e conduttrice, è

possibile il rilevamento di eventuali gradienti trasversali di umidità, mediante letture ripetute a profondità crescenti.

I misuratori elettrici a resistenza sono utili in tutte le occasioni in cui servono misure dell'umidità del legno immediate e poco distruttive, sono poco ingombranti, alimentati a batteria e se correttamente utilizzati forniscono risultati con una precisione tipica pari all'1%.

Le misure di umidità interna alle pareti di edifici di legno sono state eseguite utilizzando un misuratore elettronico, attrezzato con una coppia di elettrodi appositamente progettati e realizzati per poter raggiungere i diversi strati che compongono la parete. Gli elettrodi hanno una lunghezza di 24,5 cm, necessaria per poter misurare, attraverso un foro realizzato a partire dal lato esterno della parete dell'edificio, l'umidità della parte più interna del pannello multistrato di legno.

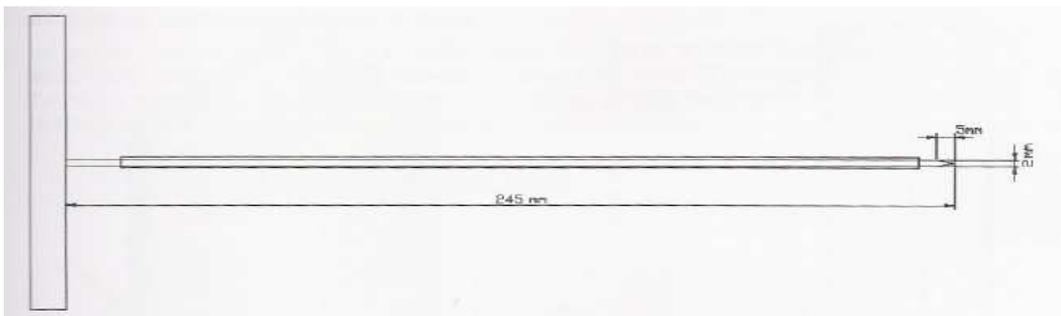


Fig.3: Elettrodo

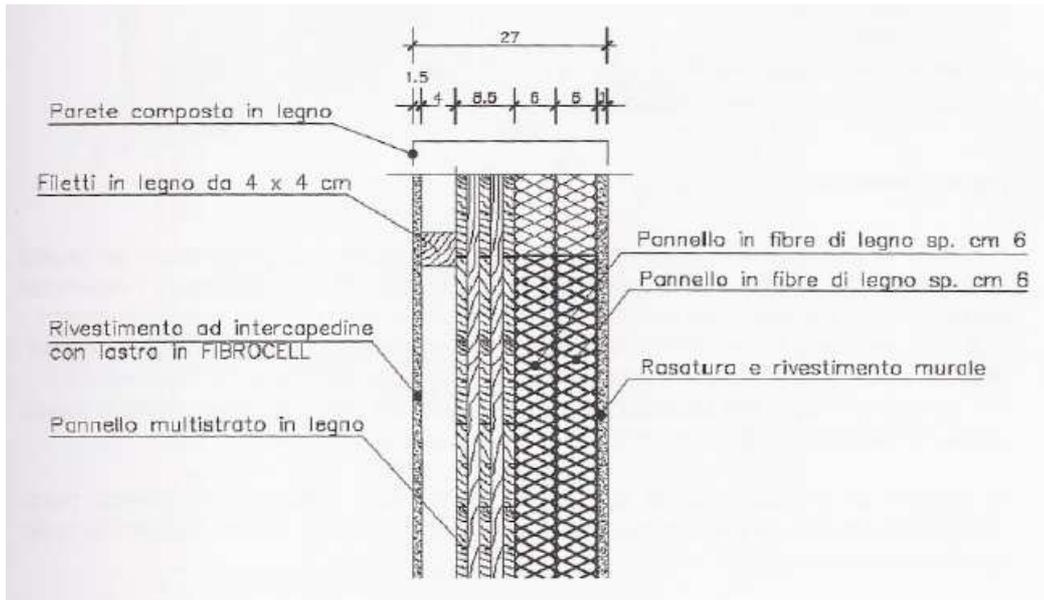
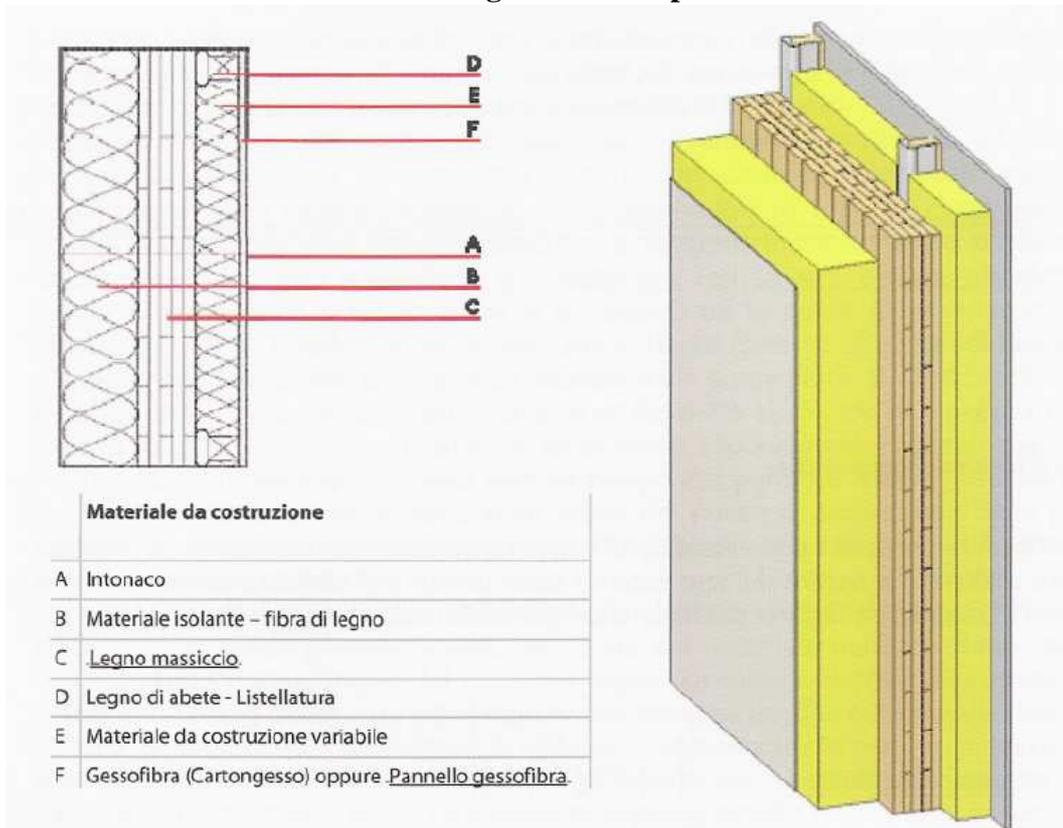


Fig. 4: Parete tipo



Le misure di umidità interna alla parete sono state effettuate in diversi punti dell'edificio, sia per diverse esposizioni che per diverse altezze rispetto al suolo e sono risultate più attendibili con l'utilizzo dell'elettrodo sperimentale.

L'analisi dei dati misurati ha evidenziato l'assenza di valori di umidità, tali da evidenziare problemi di condensa interstiziale, addirittura sono risultati essere

inferiori al 18-20 %, che rappresenta la soglia minima per lo sviluppo dei funghi nel legno, che comporterebbero il degrado del materiale..

6.4.5 Comfort termo-igrometrico dell'edificio

L'applicazione all'interno degli ambienti applicativi di misuratori di temperatura e umidità dell'aria interna può consentire di avere un'idea chiara del grado di comfort che si stabilisce negli edifici.

L'uso di strutture di legno impone al progetto di considerare con particolare riguardo gli aspetti connessi alla produzione e al controllo dell'umidità interna.

In alcuni ambienti, quali cucine e soggiorni, sono state rilevate condizioni di umidità non critiche, ma certamente considerevoli, che si aggirano attorno al 70-75% , anche se in realtà la normativa prevede, per le verifiche termo-igrometriche, valori di umidità relativa pari all' 80%.

Le temperature rilevate in aria confermano che anche durante la stagione fredda, in ambienti non riscaldati, i valori di temperatura interna restano elevati.

Dunque, la stabilità termica invernale è una caratteristica degli ambienti interni, per cui la temperatura misurata nelle camere da letto risulta costantemente elevata anche durante le ore notturne. Solo il garage sembra risentire maggiormente delle oscillazioni termiche esterne, a causa dell'apertura e chiusura della porta per l'ingresso delle auto.

In conclusione, l'analisi dei dati ha evidenziato l'importanza della ventilazione per il comfort dell'edificio, per evitare valori elevati di umidità dell'aria interna.

Le temperature invernali, elevate anche in zone non riscaldate, confermano il buon isolamento termico delle pareti, mentre il surriscaldamento estivo denota la mancanza di sistemi oscuranti esterni.

IL SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI INERENTI LA DURABILITA' E LA SOSTENIBILITA'

7.1 Premessa

In condizioni ideali il legno può rimanere in esercizio per secoli senza subire una significativa alterazione biologica. Tuttavia, se le condizioni non sono ideali, molte specie legnose largamente impiegate necessitano di un trattamento preservante per essere protette dagli agenti biologici responsabili del degradamento del legno, soprattutto funghi ed insetti. I trattamenti preservanti sono trattamenti chimici, nei quali prodotti specificamente formulati contenenti biocidi (fungicidi e/o insetticidi) sono introdotti nel legno allo scopo di accrescere la sua durabilità contro gli attacchi biologici. Questi trattamenti preservanti sono di solito applicati al legno prima dell'uso, ma in casi estremi possono essere applicati al legno anche in corso d'opera.

I due principali agenti biologici responsabili del degradamento del legno sono i funghi ed gli insetti, anche se in particolari situazioni d'impiego il legno può anche essere attaccato da organismi marini.

a) I funghi si possono distinguere due tipi di funghi:

- funghi che distruggono il legno,
- funghi che si limitano a macchiarlo.

L'attacco di questi ultimi non ha di solito un effetto significativo sulla resistenza meccanica del legno e peggiorano soltanto l'apparenza estetica del materiale, senza distruggere la parete cellulare..

I funghi distruttori del legno, che comprendono i funghi Basimiodiceti lignivori, invece, riducono la resistenza meccanica attaccando il legno per mezzo di un'azione enzimatica che dà luogo a marciume, che si divide in:

- carie bruna e bianca, che conferisce al legno attaccato questa colorazione;
- carie molle, che forma cavità nella parete cellulare e porta ad un ammorbidimento superficiale del legno ed eventualmente ad una carie in profondità.

L'attacco da parte dei funghi ha luogo nel legno ad umidità elevata, in generale, tra il 20-30%. Per potersi sviluppare i funghi hanno bisogno della

presenza d'acqua e ossigeno e l'umidità ottimale del legno varia secondo la particolare specie fungina. Pertanto, dove possibile, la progettazione di un edificio dovrebbe minimizzare le situazioni in cui il legno strutturale è soggetto ad elevate umidità, che favoriscono il degradamento garantendo condizioni che:

- prevengono l'inumidimento del legname;
- assicurano il rapido drenaggio e la ventilazione del legname, dove è impossibile evitare periodi d'inumidimento;
- impiegano legname con sufficiente curabilità naturale, oppure legname trattato con un appropriato preservante.

b) Gli insetti, invece, attaccano il legno aprendo gallerie che qualche volta sono stipate di rosone. I due tipi principali d'insetti che causano il degradamento del legno sono:

- Coleotteri (Coleoptera),
- Termiti (Isoptera).

I coleotteri adulti, in grado di volare, depongono le uova in crepe, fessurazioni, superfici irregolari o nei pori del legno e le larve che ne nascono penetrano nel legno scavando gallerie durante il loro sviluppo.

Questa è la fase distruttiva del ciclo di vita, infatti, dopo la metamorfosi e l'apertura del foro d'uscita, probabilmente il solo segno visibile dell'attacco sulla superficie del legno, lo sfarfallamento del nuovo adulto completerà tale ciclo.

Esistono molte specie di coleotteri xilofagi in Europa:

- Capricorno delle case
- Tarlo comune delle case
- Tarlo comune dei mobili
- Orologio della morte
- Lyctus

Sebbene attacchi soltanto le Conifere , il Capricorno è il più dannoso e può provocare danni nel legname strutturale, ma mentre i Coleotteri attaccano il legno stagionato e possono tollerare umidità più alte, le Termiti sono insetti sociali che costruiscono i loro nidi a contatto con il terreno e cercano a distanza il legno di cui si nutrono, costruendo gallerie di collegamento.

L'attacco da parte d'insetti è favorito da condizioni calde che ne facilitano lo sviluppo e la riproduzione, anche se il legno più appetibile è quello in condizioni d'umidità simili a quelle riportate per i funghi.

Nome commerciale	Hylotrupes	Anobium	Termiti
Abete bianco, Abete rosso	SH	SH	S
Larice, Douglasia, Pino marittimo	S	S	S
Pino silvestre	S	S	S
Quercia, Castagno	n/a	S	M
Faggio europeo, Pioppo	n/a	S	S

Durabilità naturale di alcune specie legnose (S: suscettibile, SH: anche durame suscettibile, M: moderatamente durabile, n/a: non applicabile)

La durabilità naturale di specie legnose diverse, in relazione all'attacco degli insetti, è variabile. Nella maggior parte dei legnami, il durame è di norma durabile, ma il durame di specie diverse mostra diversi livelli di resistenza all'attacco delle Termiti. La zona dell'alburno può o non può essere durabile a seconda della specie legnosa e del tipo d'insetto.

7.2 Uso di legno in esterni: alterazione cromatica e problemi di durabilità

I criteri per la scelta del legno da utilizzare in esterni, come parte integrante di elementi di strutture edilizie, destinate a uso abitativo, commerciale e pubblico, sono stati determinati in base ai seguenti parametri:

- Durabilità agli agenti biologici
- Colore del legno e sue variazioni nel tempo
- Compatibilità degli estrattivi con la ferramenta
- Aspetti estetici

I risultati della ricerca sono stati effettuati in campo e in laboratorio, relativamente al comportamento di numerose specie legnose lasciate allo stato naturale e prive di qualunque trattamento protettivo, oppure trattate con differenti cicli protettivi.

L'uso in esterni del legno massiccio e dei prodotti a base di legno è certamente possibile, purché siano tenuti nel dovuto conto alcuni criteri generali, indispensabili alla buona riuscita e alla lunga durata in servizio delle opere eseguite.

Una distinzione fondamentale si attiene ad ambiti fra loro ben distinti, anche se parzialmente correlati:

- il mantenimento della funzionalità iniziale (prestazioni meccaniche, stabilità dimensionale e di forma, funzionamento delle unioni, ecc...);
- il mantenimento dell'estetica iniziale (colore, integrità delle superfici, forma e dimensioni degli elementi, dimensione e aspetto delle fughe fra elementi accostati, ecc.);
- gestione delle variazioni di colore e dell'estetica della facciata (manutenzione).

La scelta delle caratteristiche tecnologiche, atte a rispondere a criteri di funzionalità ed estetica, sono funzione delle condizioni ambientali in cui è posto il manufatto, cioè di quelle che vengono definite le classi di rischio biologico.

In relazione alla destinazione d'uso e alla situazione di servizio, la norma UNI-EN 335:1993 prevede 5 classi di rischio:

- **Classe 1:** legno non a contatto con il terreno, al coperto (ambiente secco), nessuna esposizione a umidificazione;
- **Classe 2:** legno non a contatto con il terreno, al coperto, esposizione a umidificazione occasionale;
- **Classe 3:** legno non a contatto con il terreno, non al coperto, esposizione a umidificazione frequente;
- **Classe 4:** legno a contatto con terreno o con acqua dolce, esposizione a umidificazione permanente;
- **Classe 5:** legno in acqua salata, esposizione a umidificazione permanente.

Le facciate di edifici rientrano normalmente nelle classi 2 e 3 e in certi casi , spesso per cattiva progettazione, nella classe 4. Rientrano in classe 2 tutte le facciate, pilastri, colonne e altri elementi in legno con funzione strutturale od estetica protetti e riparati da tetti o altri elementi architettonici aggettanti, in esposizione soleggiata (est, sud e ovest), in posizione protetta da piogge di stravento (al netto di eventi eccezionali).

Rientrano in classe 3 tutte le facciate, pilastri, colonne e altri elementi in legno, con funzione strutturale o estetica, non riparati o solo parzialmente riparati da tetti o altri elementi architettonici poco aggettanti, o in esposizione non soleggiata (nord), in posizione non protetta da piogge di stravento (al netto di eventi eccezionali) o da accumuli accidentali di neve.

Rientrano in classe 4 tutte le facciate, pilastri, colonne e altri elementi in legno con funzione strutturale o estetica a contatto col terreno, non protetti e riparati da

tetti ,o altri elementi architettonici aggettanti, o soggetta ad accumuli di neve o fonti di inumidimento frequenti o permanenti.

Per le facciate in classe di rischio 3 e 4 i criteri di scelta del materiale dovrà tenere in conto le caratteristiche di durabilità biologica, considerando la durabilità estetica come elemento secondario e fortemente penalizzato.

Per il legno operante nelle condizioni della classe di rischio 2, i fattori di degrado biologico escludono il fattore di degrado più rilevante, i funghi, e si verificano quelle condizioni in cui il principale fattore di degrado è limitato alle variazioni di colore e di apparenza determinato dalle condizioni ambientali.

I risultati delle sperimentazioni effettuate, fanno riferimento al legno impiegato nelle condizioni di esercizio che determinano la classe di rischio 2, cioè legno non a contatto con il terreno, riparato e esposizione a umidificazione occasionale.

7.3 Funzionalità, estetica e integrità delle superfici

Gli aspetti legati alla funzionalità degli elementi lignei entranti, a far parte di una costruzione, possono a loro volta essere distinti in due categorie fondamentali:

1. Aspetti legati alle prestazioni meccaniche iniziali dei singoli elementi lignei (regolati tramite opportune procedure di classificazione del legno secondo la resistenza meccanica, necessarie per fornire affidabili dati di progetto per il dimensionamento statico e dinamico delle strutture).
2. Aspetti legati al mantenimento nel tempo delle prestazioni iniziali (regolati tramite opportune procedure di valutazione della classe di servizio, abbinate a criteri di scelta delle specie legnose idonee e delle eventuali misure di protezione dal degradamento, biologico o abiotico).

Per poter fornire indicazioni puntuali relativamente alla funzionalità iniziale e al suo mantenimento nel tempo, è indispensabile disporre del progetto esecutivo, in cui siano ben visibili tutti i dettagli costruttivi.

Il legno naturale presenta una capacità sorprendentemente alta di resistere alle intemperie, purché siano soddisfatti alcuni requisiti indispensabili.

Tuttavia, è esperienza comune rilevare come il legno esposto alle intemperie subisca spesso alterazioni estetiche, anche notevoli, in un tempo relativamente breve, che possono verificarsi in dipendenza di fenomeni qualitativamente molto

diversi fra loro, da tenere necessariamente distinti se si intendono adottare contromisure efficaci per ciascuno di essi.

- **Variabilità naturale del colore del legno:** ciascuna specie legnosa ha colore e aspetto estetico tipici e si riscontra una certa variabilità naturale, spesso spiccata, in funzione della provenienza geografica, del tipo di selvicoltura, ecc... In alcune specie legnose si riscontrano, inoltre, fenomeni di alterazione del colore sotto forma di venature di colore scuro, dovute a patologie dell'albero, oppure ad un anomalo accumulo di sostanze chimiche in certe zone del fusto. La selezione del materiale al momento della segagione è la misura più ovvia ed efficace per assicurare l'omogeneità di aspetto del materiale fornito.

- **Variazione di colore dallo stato fresco allo stato essiccato:** la presenza di umidità nel legno ne rende il colore significativamente più scuro rispetto a quello dello stesso legno essiccato. Il fenomeno è limitato alla presenza o meno di umidità, o di qualsiasi altra sostanza bagnante incolore, quale ad esempio l'olio, o il solvente, sulla superficie, causata da una diversa riflessione e rifrazione dei raggi luminosi incidenti. Accanto a tale fenomeno, per determinate specie legnose, l'esposizione delle superfici lavorate all'aria provoca l'ossidazione di certi composti chimici, con conseguente viraggio del colore del legno anche in assenza di luce. Non esistono contromisure alternative al mantenere costantemente asciutta la superficie del legno, evitando il contatto con l'acqua o proteggendo con idoneo prodotto filmogeno, che richiede precauzioni, come per l'azzurramento.

- **Variazione di colore per azione della luce:** i principali responsabili del viraggio del colore del legno, in seguito alla prolungata esposizione alla luce solare, sono i raggi ultravioletti, spesso combinati con i fenomeni ossidativi. L'azione schermante contro gli U.V. è fino ad oggi l'arma principale utilizzata dai fabbricanti di prodotti per la finitura al naturale del legno, sia con vernici filmogene, sia con impregnanti, che non formano alcuna pellicola aderente alla superficie del pezzo.
- **Ingrigimento superficiale:** nelle superfici più esposte, l'azione combinata dei raggi ultravioletti, della pioggia, dell'erosione eolica, del gelo, ecc..., porta, in un tempo variabile da caso a caso, al dilavamento delle sostanze colorate dalle superfici lignee. La cellulosa residua, più o meno colpita da tale degradamento, conferisce alla superficie un caratteristico colore grigio-argento, che se bagnata vira verso il nero. L'interno non subisce particolari mutamenti di colore e consistenza, in assenza di degradamento da

funghi. Le contromisure efficaci sono tutte legate all'accurata manutenzione del legno.

- **Azzurramento (funghi cromogeni)**: l'alburno delle conifere e di alcune latifoglie, in presenza di umidità elevata, possono colorarsi di una tonalità bruno-azzurra, a causa del proliferare di funghi cromogeni all'interno dei tessuti. Il danno è estetico e la contromisura più efficace è quella di mantenere il legno a umidità inferiore alla soglia di sviluppo dei funghi (umidità del legno inferiore al 20%) o di eliminare l'alburno dagli elementi esposti. I trattamenti chimici anti-azzurramento sono efficaci, ma hanno durata assai limitata e vengono presto dilavati dalla pioggia. La protezione degli elementi di legno esposti alle intemperie tramite vernici trasparenti filmogene, oltre a richiedere una regolare manutenzione, spesso sono controproducenti, perché impediscono il veloce smaltimento dell'acqua eventualmente penetrata a contatto del legno dalle inevitabili discontinuità, anche microscopiche, del film di rivestimento.
- **Macchie dovute a contatto con metalli**: un'ultima possibile causa di alterazione del colore è dovuta alla presenza nel legno di sostanze chimiche, ad esempio tannini, che reagiscono, in presenza di umidità con i materiali ferrosi, dando origine a macchie e aloni nerastri di effetto estetico estremamente sgradevole. Sebbene l'effetto sia molto più marcato per certe specie legnose assai ricche di tannini, come il Rovere, in generale è raccomandabile evitare di mettere a diretto contatto il legno con elementi di acciaio non adeguatamente protetti in tutti quei casi in cui è prevedibile la presenza di umidità o addirittura di acqua allo stato liquido. Punti critici sono tipicamente le zone di ancoraggio al legno di piastre di acciaio, le rosette utilizzate nelle unioni con bulloni, le teste di chiodi, viti e cambrette non sufficientemente affondati nel legno e non protetti da tasselli, le zone di appoggio dei rivestimenti di facciata con tavole su scossaline di lamiera, i gocciolatoi non buttati sufficientemente in aggetto rispetto agli elementi di facciata sottostante, ecc... L'annerimento è ancora più rapido e intenso in presenza di vapori ammoniacali, che si possono sviluppare anche con l'uso di detersivi o prodotti chimici.
- **Carie (funghi cariogeni)**: se il legno viene mantenuto in condizioni di umidità maggiori del 18%, esiste un elevato rischio di

attacco di funghi agenti della carie. Il primo stadio di tali attacchi è costituito da piccole alterazioni di colore, alle quali corrisponde già un grave indebolimento dell'elemento ligneo. Successivamente, l'attacco si estende e si aggrava ulteriormente, provocando vistose alterazioni di colore, spesso visibili come fiamme di colore scuro, aloni, macchie, e simili.

L'unica misura veramente efficace nel lungo periodo, per gli elementi non sottoposti a manutenzione periodica ravvicinata, è data dalla combinazione fra:

1. scelta di una specie legnosa naturalmente durabile;
2. utilizzo di assortimenti idonei;
3. protezione delle sezioni di estremità degli assortimenti e delle sezioni trasversali, nelle quali rimane esposto del *legno di testa*, molto più facile a imbibirsi d'acqua rispetto al *legno di fianco*;
4. progettazione di dettagli costruttivi finalizzati a ridurre al minimo il contatto dell'acqua con l'elemento ligneo, controllando le forze elementari, quali la gravità e la capillarità, facendo attenzione a percolazioni e risalite ;
5. progettazione di dettagli costruttivi finalizzati alla rapida evacuazione dell'umidità entrata, a contatto con l'elemento, evitando accuratamente le trappole per l'acqua e nelle unioni prevedere sempre una via di scolo per la stessa, che può entrare nel giunto.
6. progettazione tale da ridurre al minimo la formazione di condensa sulle superfici di legno, prestando attenzione ai punti di contatto del legno con particolari metallici.
7. progettare in modo da assicurare la massima ventilazione e quindi il passaggio d'aria libera a tutte le superfici di legno e la ventilazione degli appoggi nelle murature.

L'adozione della combinazione di misure rappresenta la strada maestra per ridurre al minimo anche tutti gli altri inconvenienti segnalati, pertanto, assumendo la realizzazione di elementi lignei di facciata, per i quali non sarà effettuabile una manutenzione regolare a scadenze ravvicinate, si raccomanda:

1. scelta di una specie legnosa per la quale sia possibile effettuare un'accurata selezione preventiva del materiale di fornitura;
2. scelta di una specie legnosa avente buona durabilità naturale;
3. scelta di una specie legnosa dalla quale sia agevole ottenere segati privi di alborno;

4. scelta di tavole prevalentemente radiali, cioè a venatura rigata e non fiammata, venatura che riduce significativamente i problemi di stabilità dimensionale e di forma degli elementi e migliora di molto le possibilità di smaltimento delle gocce d'acqua piovana dalle superfici piallate e lasciate al naturale;
5. scelta di unioni prevalentemente realizzate con mezzi meccanici (viti, spinotti e connettori speciali per le strutture di legno), limitando al minimo le unioni incollate;
6. progettazione dei particolari costruttivi e delle unioni, tale da evitare la formazione di trappole d'acqua nonché di macchie e aloni da gocciolamento;
7. considerare la possibilità di dare alle superfici di legno finite una tonalità non troppo lontana dal grigio-argento, al quale il legno tenderà naturalmente, in assenza di manutenzione, qualsiasi sia il colore di partenza, naturale o conferito.

Esistono oggi fondamentalmente due possibilità tecniche per conferire un aspetto “vissuto” al legno, la prima prevede l'applicazione di una finitura superficiale di tonalità grigio-argento, la seconda prevede il trattamento termico del legno fino a "tostatura" della superficie.

7.4 Stabilità del colore alla luce

È la proprietà del colore del legno di mantenersi invariato nel tempo in presenza di illuminazione. Lo spettro visibile della luce solare è il principale responsabile del viraggio iniziale di colore delle superfici del legno, mentre lo spettro ultravioletto del foto degrado della superficie e della conseguente alterazione drastica del colore, prevalentemente verso varie tonalità di grigio.

La stabilità del colore alla luce varia significativamente in funzione della specie legnosa.

L'ingrigimento superficiale è l'alterazione del colore dovuta all'esposizione del legno alle intemperie ed è un fenomeno complesso, che include anche altri fattori, legati all'azione dell'acqua piovana, del gelo, delle differenze di esposizione al sole durante la giornata e della presenza di materiali diversi a contatto con il legno.

Il fenomeno viene anche definito impropriamente come "invecchiamento" del legno, sebbene le alterazioni riguardino esclusivamente lo strato più superficiale di legno per uno spessore limitato a pochi decimi di millimetro. Al di sotto di questo strato protettivo naturale il legno non subisce alterazioni significative.

7.5 Durame

Il durame è la porzione centrale del tronco e si può presentare di colore simile all'alburno (cerchia più esterna del tronco) o di colore più scuro.

Questa colorazione è dovuta alla presenza di estrattivi naturali nel lume delle cellule legnose (sostanze chimiche appartenenti al gruppo dei tannini, fenoli, terpeni, e molti altri), destinati ad assicurare una sorta di protezione chimica della cellulosa e lignina dagli attacchi degli organismi distruttori del legno.

La tossicità biologica di queste sostanze non pregiudica la salute dell'albero in piedi, in quanto tutto il durame è formato da cellule morte e svolge una funzione puramente di sostegno meccanico della pianta.

Nell'alburno, che costituisce la corona circolare più esterna del tronco, una parte delle cellule del tessuto legnoso è ancora vivente e funzionale e, in generale, tale tessuto svolge funzioni importanti per la fisiologia dell'albero in piedi.

Poiché all'interno dell'alburno non sono presenti i biocidi naturali colorati il suo colore è tipicamente biancastro, con tendenza all'avorio o al crema, a seconda delle specie legnose, per via della mescolanza del bianco della cellulosa con il marroncino della lignina.

In molte specie importanti, quali gli abeti, non si riscontra alcuna differenza di colore fra durame e alburno e si dicono specie "a durame non differenziato" e sono inserite nelle classi di durabilità più basse.

Se il durame è di colore nettamente diverso dall'alburno, allora la specie legnosa viene detta "a durame differenziato" e viene inserita in una delle classi di durabilità più alte.

Risulta chiaro che la classificazione della durabilità naturale delle specie legnose è sempre riferita al solo durame, in quanto l'alburno di qualsiasi specie legnosa è classificato come "non naturalmente durabile".

7.6 Massa volumica normale e stabilità dimensionale

Si definisce come il rapporto fra massa e volume geometrico di provini di legno equilibrato a condizioni atmosferiche normalizzate (65% di umidità relativa e 20°C di temperatura dell'aria), espresso in kg/m^3 .

La massa volumica normale è un indicatore sintetico delle caratteristiche meccaniche e di altre proprietà di una specie legnosa. In generale, le prestazioni aumentano all'aumentare della massa volumica normale, ma questa regola presenta numerose e importanti eccezioni e quindi va utilizzata con cautela.

A causa della estrema variabilità del legno, i dati disponibili sono sempre intesi come valori medi, riferiti a specifiche provenienze geografiche di una data specie legnosa.

Ad ogni variazione delle condizioni termo-igrometriche ambientali il legno reagisce equilibrando la propria umidità tramite meccanismi di adsorbimento e desorbimento del vapore presente nell'atmosfera. Di conseguenza il legno si ritira al diminuire dell'umidità e ciò avviene nell'intervallo igroscopico, che va dallo stato anidro, allo 0 % di umidità, fino al punto di saturazione, al 30 % circa di umidità.

L'anisotropia del legno si evidenzia con valori di ritiro assai differenti, a seconda della direzione anatomica considerata, tanto maggiore è la differenza fra i ritiri nelle diverse direzioni anatomiche, tanto più spiccata è la tendenza di un elemento ligneo a deformarsi o a distorcersi in seguito alle variazioni di umidità, per tanto si classifica la **stabilità dimensionale** come:

- **Bassa:** per specie legnose poco stabili, con alta tendenza alle deformazioni.
- **Media:** per specie legnose mediamente stabili, relativamente soggette alle deformazioni.
- **Buona:** per specie legnose stabili, poco soggette alle deformazioni.

7.7 Durabilità

Con il termine “durabilità” si intende genericamente la resistenza del legno all'azione di organismi in grado di degradare e distruggere la sostanza legnosa.

In sede di normativa europea, invece, la UNI EN 350 opera precise distinzioni terminologiche:

a) Resistenza agli insetti (Coleotteri): per classificare la resistenza del legno agli attacchi di insetti viene utilizzato un sistema a 4 classi:

- **R**: resistente
- **NR**: non resistente
- **nd**: non disponibile
- **NRH**: durame conosciuto come non resistente

La resistenza del legno agli attacchi di insetti xilofagi non viene in alcun modo quantificata. La norma si limita a dichiarare la possibilità o meno che un certo insetto xilofago si insedi a danno di una certa specie legnosa, sussistendo le condizioni ambientali favorevoli. Gli insetti xilofagi sono organismi adattati a condizioni ambientali naturali tipiche degli ecosistemi forestali, significativamente diverse da quelle riscontrabili nelle opere dell'uomo ben progettate e ben eseguite.

Partendo, quindi, da legname esente da attacchi di insetti, magari essiccato artificialmente a temperature elevate e successivamente lavorato e messo in opera a regola d'arte, l'entità degli attacchi di insetti xilofagi anche sulle specie non resistenti risulta di norma piuttosto ridotta.

L'analisi dei casi, in cui tali attacchi si presentano con grande intensità ed estensione, rivelano sistematicamente una “falla” in qualche punto della catena produttiva (fornitura di legname già attaccato, condizioni di servizio inadeguate, mancanza di pulizia e manutenzione, ecc...).

A riprova di ciò, l'incidenza degli attacchi di insetti sulle strutture moderne, realizzate con legno lamellare incollato, è del tutto marginale, nonostante quest'ultimo prodotto venga realizzato nella quasi totalità dei casi a partire dal legno di Abete rosso, che è una specie non resistente di certi insetti.

In definitiva, le condizioni di esercizio assumono un'importanza ai fini della conservazione del legno pari a quella rappresentata dalla scelta della specie legnosa idonea.

b) Durabilità naturale propriamente intesa: nelle norme tecniche, il termine durabilità ha un ambito di applicazione molto specifico, in quanto esprime la resistenza naturale del durame di una specie legnosa all'azione distruttrice di funghi agenti della carie.

Per classificare la durabilità naturale del legno nei confronti dei funghi lignivori viene utilizzato un sistema a 5 classi:

- **Classe 1**: molto durabile
- **Classe 2**: durabile
- **Classe 3**: moderatamente durabile

- **Classe 4:** poco durabile
- **Classe 5:** non durabile

L'alburno di tutte le specie è da considerare in classe 5 a meno di esplicita diversa indicazione. Le specie a durame non differenziato sono assegnate alla classe 5.

c) Resistenza alle termiti: pur essendo insetti, le termiti appartengono a un gruppo tassonomico diverso ed hanno un ciclo biologico del tutto peculiare, per cui vengono trattate separatamente. La loro diffusione geografica è in continua evoluzione e mentre fino a qualche anno fa non si spingevano più a nord delle regioni del Centro-Italia, oggi se ne segnala la presenza, anche se sporadica, praticamente in tutto il territorio nazionale, fino ad altitudini, però, non troppo elevate.

I danni derivanti da un attacco di termiti su una struttura di legno sono di norma molto ingenti e la loro occorrenza è favorita da condizioni di umidità eccessiva, dalla presenza di ambienti malsani o semi abbandonati, ecc...

Per classificare la resistenza naturale del legno nei confronti delle termiti viene utilizzato un sistema a 3 classi:

- **R:** resistente
- **MR:** moderatamente resistente
- **NR:** non resistente

La resistenza si riferisce solo al durame e l'alburno di tutte le specie è classificato NR.

d) Classi di impregnabilità: la norma utilizza un sistema di classificazione a 4 classi, del tipo:

1. Legno Impregnabile (facile da impregnare): i segati possono venire penetrati completamente senza difficoltà mediante trattamento a pressione.

2. Legno moderatamente impregnabile (abbastanza facile da impregnare): normalmente non è possibile una penetrazione completa, ma con un trattamento a pressione di 2-3 ore si può raggiungere una penetrazione laterale di 6 mm nelle conifere e una penetrazione di un'ampia porzione di vasi nelle latifoglie.

3. Legno poco impregnabile (difficile da impregnare): un trattamento a pressione di 3-4 ore permette solo una penetrazione laterale compresa tra 3 e 6 mm.

4. Legno non impregnabile (virtualmente impossibile da impregnare): scarsa quantità di preservante assorbita anche dopo 3-4 ore di trattamento a pressione, penetrazione laterale e longitudinale minima.

Data la diversa impregnabilità di alborno e durame vengono forniti due dati differenti. Nel caso di specie senza distinzione tra i due, la norma impone di considerare il legno come composto interamente da durame per quanto riguarda l'impregnabilità. Il durame delle specie a durame differenziato, da un lato presenta caratteristiche di durabilità naturale più o meno elevate, dall'altro presenta frequentemente classi di impregnabilità elevate (poco o non impregnabile).

e) Classe di rischio biologico: in relazione alla destinazione d'uso e alla situazione di servizio, la norma prevede 5 classi di rischio:

- **Classe 1**: non a contatto con il terreno, al coperto
- **Classe 2**: non a contatto con il terreno, al coperto
- **Classe 3**: non a contatto con il terreno, non al coperto
- **Classe 4**: a contatto con terreno o con acqua dolce
- **Classe 5**: in acqua salata

Nel caso di facciate di edifici si considera appropriata l'assegnazione degli elementi strutturali in opera alle classi di rischio 2, 3 e sporadicamente in classe 4, a seconda della tipologia costruttiva.

In tali condizioni, esiste un rischio biologico principale costituito da possibili attacchi di funghi e un rischio secondario costituito da eventuali attacchi di insetti.

f) Requisiti di durabilità in funzione della classe di rischio: la norma UNI-EN 460:1996 definisce i requisiti di durabilità naturale o acquisita con trattamento preservante, ossia, specie per specie, a seconda della classe di rischio e di durabilità, se è necessario o meno un trattamento preservante.

Utilizzando, ad esempio, una specie legnosa ricadente nella classe di durabilità 3, la semplice eliminazione di tutto l'alburno potrebbe essere una misura sufficiente per assicurare la lunga durata del materiale in una situazione di esercizio ricadente in classe di rischio 3.

7.8 Sostenibilità

La sostenibilità delle differenti specie legnose può essere valutata secondo differenti punti di vista. In generale, le specie legnose europee sono meno problematiche delle specie di provenienza esotica, in quanto inserite in un ambiente geografico e civile, dove la gestione del territorio è caratterizzata da una opinione pubblica informata, istituzioni efficienti, forza lavoro tutelata dal punto di vista sindacale e della sicurezza sul lavoro, con una gestione forestale

efficacemente supportata da esperienze, studi e istituzioni di ricerca. Perciò tutte le specie non europee in qualche modo risultano a rischio.

Molte specie legnose sono utilizzate da foreste con capacità di rigenerazione spontanea e sono di importante sostegno per le comunità locali e per l'industria del legno di molti Paesi, dalla quale ricavano una parte importante delle risorse.

Tra l'altro vi sono organismi sovranazionali (FAO) e organizzazioni non governative (ATIBT) che operano nel controllo e nella gestione delle foreste.

Esistono altre fonti, quali CITES ed FSC, a cui fare riferimento per la sostenibilità delle specie legnose, ma la fonte più esplicita di informazione è Greenpeace (ONG), attiva nella tutela degli ecosistemi, che fornisce una lista rossa con le specie che non andrebbero utilizzate, quali il Pino Cembro, il Pino Silvestre ed il Pioppo.

La stragrande maggioranza delle foreste europee a gestione demaniale non è certificata FSC, ma hanno un controllo assai affidabile da parte degli organi statali nazionali. Molti paesi francofoni, tra i quali quelli africani, tendono ad evitare l'FSC, di origine britannica, per motivi geo-politici.

CARATTERISTICHE DEL CANTIERE DELLE COSTRUZIONI IN LEGNO: CANTIERE SECCO

8.1 Premessa

L'evoluzione della tecnologia classica del legno, specie di quello lamellare incollato, avviene essenzialmente in due direzioni: l'aumento delle prestazioni strutturali del materiale, tramite armature, fibre, ancoraggi, ecc... e la creazione di sistemi prefabbricati, assemblati a secco o misti, per i pacchetti di copertura e parete, utilizzando in abbinamento al lamellare altri materiali composti (pannelli strutturali, pannelli composti, perlinato, compensato, OSB, PLS), derivati dalla lavorazione del legno, che garantiscono migliori prestazioni e una sempre più vasta gamma di soluzioni progettuali.

Per questo motivo le aziende produttrici di legno lamellare hanno spesso al loro interno una struttura tecnica capace di rispondere a molteplici problemi ed esigenze, che guidano il cliente dalla scelta delle alternative possibili al montaggio in cantiere, fino ad arrivare alla produzione completa dei disegni esecutivi.

I vantaggi delle costruzioni in legno sono davvero tanti:

1. Benessere e comfort abitativo
2. Ecocompatibilità eccezionale
3. Alta protezione termica
4. Assenza di umidità
5. Statica ed antisismica
6. Prefabbricazione
7. Isolamento acustico elevato
8. Protezione antincendio
9. Durabilità e manutenzione

L'impiego crescente dei sistemi a secco nell'edilizia è dovuto ai numerosi vantaggi che essi offrono. Tra i principali vanno citati la riduzione dei tempi di cantiere, l'elevata economicità e l'offerta di prestazioni fisico-tecniche superiori a quelle dei sistemi in muratura massiccia, a parità di spessore murario, soprattutto in ordine all'isolamento acustico e alla protezione antincendio.

Altri vantaggi dei sistemi a secco sono l'elevata compatibilità impiantistica, la perfetta integrabilità di accessori ad incasso, quali corpi illuminati, altoparlanti, avvisatori acustici e sensori, nonché una libertà compositiva, pressoché illimitata,

che permette di adeguare le caratteristiche formali e di superficie alle soluzioni estetiche di volta in volta richieste.

L'approccio, volto a ridurre al minimo il materiale da movimentare, che nell'industria automobilistica, aeronautica e navale ha condotto allo sviluppo di una sofisticata tecnologia delle costruzioni leggere, nell'edilizia è rimasto lettera morta, se si esclude il caso, per altro poco frequente, di qualche cantiere mobile o temporaneo. Osservando le strutture esistenti in natura e le più recenti realizzazioni tecnologiche ad alte prestazioni si notano vari elementi in comune:

- economia di mezzi;
- elevata efficienza funzionale;
- particolare cura esecutiva.

In futuro i sistemi costruttivi a secco e leggeri daranno un contributo sempre maggiore all'edilizia, in quanto in questo settore si parla più di sistemi che di elementi costruttivi, più di semilavorati e di prodotti edilizi che di materiali, più di processo di montaggio che di cantieri e di processi di costruzione.

I principi fondamentali su cui si basano i sistemi a secco sono tre e possono essere combinati in modi differenti:

- costruzione con materiali leggeri;
- costruzione con strutture leggere;
- costruzione con sistemi leggeri.

L'evoluzione tecnologica nel campo dei sistemi a secco e dei sistemi leggeri ha portato alla creazione di elementi costruttivi complessi, in cui per soddisfare i requisiti tecnico-funzionali è necessario sovrapporre vari strati di materiali con caratteristiche meccaniche e fisico-tecniche spesso radicalmente differenti.

In molti casi la combinazione di differenti tipologie di materiali o di componenti può risultare utile anche sotto il profilo statico.

L'unione tra profili di acciaio sottili e pannelli di materiali ottimizzati funzionalmente, come ad esempio lastre di gesso o pannelli di materiali derivati dal legno, permette di realizzare facilmente strutture composte di grande superficie, autoportanti e di partizione.

Progettare in modo consapevole vuol dire saper collocare dove servono i materiali che risultano più idonei, in base ad un certo numero di parametri, ossia combinazione con materiali leggeri e costruzione con sistemi leggeri.

Questo processo conduce inevitabilmente ai sistemi costruttivi a secco.

8.2 Le costruzioni a secco: evoluzione costruttiva sostenibile

La costruzione a secco di un edificio è la tecnologia più ecologica e naturale possibile. Si tratta di una modalità costruttiva utilizzata già in anni molto lontani, ma che si è evoluta nel tempo adattandosi alle diverse epoche storiche.

Prima della rivoluzione industriale venivano utilizzate le risorse che la natura metteva a disposizione come la pietra, il legno e la paglia. Nel periodo postindustriale, invece, sono aumentati i materiali e di conseguenza anche le tipologie di costruzioni, per cui si sono sviluppate le modalità di assemblaggio dei componenti impiegati per le costruzioni. Oggi si utilizzano, a tal fine, anche il vetro, il cartongesso, il laterizio, i pannelli in fibra naturale, nonché altri componenti prodotti con metodi industriali.

Per unire tra loro i vari componenti dell'edificio si ricorre all'appoggio, all'incastro o si utilizzano connettori di fissaggio metallici o lignei. L'uso di uno o dell'altro metodo di assemblaggio varia a seconda del materiale impiegato.

L'assemblaggio a secco permette di costruire un edificio "legando" tra loro in modo irreversibile i vari elementi, attraverso l'utilizzo di mezzi di fissaggio meccanici e incastri. La bontà della tecnica sta anche nel fatto che gli elementi con cui viene costruito un edificio a secco possono in un secondo momento essere separati e riutilizzati. Di solito i materiali vengono montati su un'intelaiatura di legno o d'acciaio, ma in altri casi anche su una di cemento armato.

Oggi il sistema a secco è utilizzato non solo per la costruzione di un edificio, ma anche per finiture d'interni, come pareti divisorie, colonne e armadi a muro.

Le tecniche di assemblaggio a secco si delineano in modo sempre più chiaro quale nuovo paradigma del costruire e rappresentano un punto di riferimento per dare risposte concrete alle esigenze del moderno costruire, chiamato a confrontarsi con le seguenti problematiche:

- ridurre i tempi di costruzione, sovrapponendo la fase di progettazione con quella di costruzione;
- raggiungere un alto livello di flessibilità d'uso dell'edificio realizzato.

La possibilità di progettare e realizzare le parti dell'edificio in luoghi differenti, per assemblarle successivamente in cantiere, in tempi brevi, unita alla maggiore facilità nella sostituzione degli elementi, eventualmente degradati, porta a considerare tali tecniche una componente fondamentale della progettazione, caratterizzando non tanto le fasi esecutive, ma intervenendo sin dalle prime fasi di ideazione dell'opera da realizzare.

L'introduzione di tecniche costruttive a secco consente di prevedere con buona approssimazione i tempi e le fasi di lavoro in cantiere favorendo una programmazione più puntuale delle operazioni da effettuare e limitando al massimo i tempi morti nella realizzazione, che provocano inevitabilmente l'innalzamento dei costi di costruzione.

Anche se comunemente l'assemblaggio è considerato come una tecnica specifica della costruzione industrializzata, bisogna sottolineare che oggi esso interagisce fortemente con gli aspetti ideativi e metodologici del fare architettonico, tanto da poter essere considerato una vera e propria tecnica progettuale.

Attraverso lo studio delle tecniche esecutive si scopre come molti edifici, antichi e moderni, nei contesti geografici più disparati, sono stati realizzati attraverso l'unione a secco di elementi lavorati fuori dal cantiere o a piè d'opera.

Nella cultura preindustriale tali tecniche costruttive costituivano il risultato di culture materiali consolidate, capaci di fare uso sapiente delle risorse che l'ambiente circostante metteva a disposizione. Un esempio è dato dall'impiego di materiali quali la pietra o il legno strutturale che per le loro caratteristiche imponevano l'utilizzo dell'assemblaggio a secco in modo quasi deterministico, ad esempio nelle fasi di progettazione, realizzazione e gestione di un green building.

Il sistema costruttivo a secco si contrappone alle tecniche costruttive tradizionali, che impiegano leganti, come malte, cementi, colle, ecc..., poiché le strutture vengono assemblate meccanicamente in cantiere a strati funzionali.

Questo metodo d'intervento presuppone che tutti i componenti da assemblare vengano direttamente forniti, secondo progetto esecutivo, da fabbriche specializzate e siano, quindi, una volta confluiti in cantiere, già collaudati e dotati di certificazione

8.2.1 Il sistema a secco ed il sistema a umido

La tecnica costruttiva del sistema a secco si distingue da quella del sistema a umido, che al contrario unisce tra loro i materiali in modo permanente, attraverso il ricorso a malte di vario tipo, senza permettere il successivo riutilizzo del materiale da costruzione.

Con il termine costruzione a secco si intende la realizzazione di un'opera di materiali e componenti prefabbricati, evitando metodi tradizionali che prevedono lavorazioni di vera e propria produzione in cantiere, come ad esempio i massetti.

Con i sistemi a secco si ottengono importanti vantaggi:

1. utilizzo di materiali e componenti di qualità garantita e certificata;
2. certezza dei costi e dei tempi di costruzione;
3. riduzione dei tempi del cantiere e minimo impatto sul vicinato;
4. maggior leggerezza delle strutture;
5. requisiti di isolamento termico, acustico e antincendio certificabili.

Dunque, rispetto ai tradizionali sistemi costruttivi a umido, il sistema a secco rappresenta una risposta alle esigenze di sostenibilità ambientale e abbraccia i principi della bioedilizia.

8.2.2 Bioedilizia e sostenibilità del sistema a secco

Il termine **bioedilizia** si riferisce all'applicazione di criteri ecosostenibili nel campo dell'edilizia e può essere sinonimo di bioarchitettura.

La bioedilizia sfrutta prodotti naturali per la realizzazione di strutture, opere ed edifici realizzati in materiali ecocompatibili. Un buon esempio moderno sono le case (di solito villette), realizzate interamente in legno di pino o altri materiali, scelti a seconda della facilità di reperimento nelle varie nazioni e realizzate con pareti esterno-interno con camera d'aria isolante, composte da travi di legno disposti a sandwich. Queste strutture, se ben costruite, riescono a riprodurre le pareti e le strutture di abitazioni tradizionali.

La bioedilizia prevede l'utilizzo nel nostro Paese di strutture portanti, realizzate per la maggior parte in laterizio, l'eventuale uso di isolanti traspiranti, ottenuti da materie prime naturali o anche la realizzazione di semplici camere d'aria all'interno dei muri. Molto importante è che i muri abbiano uno spessore di almeno 45-50 cm e nei casi di pareti rivolte a sud, est ed ovest anche un camera d'aria; ciò contribuisce ad aumentare il risparmio energetico fino al 40% in più rispetto ai muri che hanno uno spessore minimo.

Dunque, una costruzione a secco ha il vantaggio:

- di essere realizzata con materiali ecocompatibili ed in parte anche riciclabili;
- di garantire un maggior risparmio energetico, grazie all'ottimo isolamento termico ed acustico e al ridotto consumo di acqua ed energia già nella fase di costruzione dell'edificio;
- di richiedere un minor tempo e dei minori costi per la realizzazione dell'edificio;

- di durare a lungo nel tempo;
- di avere elevate prestazioni antisismiche;
- di essere realizzata con strutture flessibili che possono essere modificate nel tempo per adattarsi alle mutate esigenze del proprietario.

La tecnologia della stratificazione a secco si presenta come alternativa efficace ai sistemi costruttivi tradizionali, perché è **ecosostenibile**, in quanto minimizza l'uso dei materiali che in gran parte sono riciclabili e consentono, per le loro caratteristiche prestazionali, un elevato risparmio energetico.

L'ecosostenibilità del sistema di costruzione consiste, dunque, nel miglior rapporto tra costruzione, funzionamento e mantenimento, dismissione e impatto che tutti questi cicli hanno sull'ambiente

La **sostenibilità** è un concetto molto ampio, che coinvolge molti aspetti della vita degli edifici, dal processo di nascita dei componenti, al loro assemblaggio in cantiere, dalla vita dell'edificio una volta che viene utilizzato, alla sua demolizione. La sostenibilità non si esaurisce, quindi, nel concetto di risparmio energetico, ma la sua definizione e il suo raggiungimento sono molto più complessi e coinvolgono una serie di aspetti che non possono prescindere dalla sua storia costruttiva, dalla gestione dell'edificio e dalla sua riqualificazione o demolizione finale.

Poiché i consumi energetici sono, dunque, calcolabili e controllabili in ogni loro fase di vita, dalla nascita dei suoi componenti, all'assemblaggio, dalla gestione dell'edificio, alla sua demolizione, con questo non si rinuncia agli stili dell'architettura contemporanea.

Esistono, dunque, alcuni punti fondamentali che devono essere rispettati nelle costruzioni a secco:

- **Assemblabilità:** i componenti devono essere maneggevoli e collegabili con facilità e devono essere assemblati anche in previsione della loro smontabilità e del loro riutilizzo.
- **Flessibilità:** i componenti devono consentire anche modifiche in fase di esercizio, come per esempio il cambiamento della distribuzione degli spazi interni di un edificio.
- **Reversibilità:** vi deve essere la possibilità di dismissione di un'opera con riferimento all'eventuale possibilità di riuso, riciclo o smaltimento delle parti, per consentire un ridotto uso delle materie prime per la produzione di nuovi componenti.

In un contesto in cui l'architettura moderna, finalmente anche in Italia, guarda con particolare attenzione ed entusiasmo all'utilizzo di sistemi costruttivi di

elevato contenuto tecnologico, per far fronte alle esigenze funzionali ed estetiche dell'opera, ma anche ad esigenze organizzative e gestionali del processo di costruzione, la **prefabbricazione a secco** viene ad assumere un ruolo fondamentale, grazie agli elevati livelli raggiunti dai sistemi, dai materiali in commercio e dalle tecniche di lavorazione e montaggio.

Con il termine costruzione a secco si individua, così, l'impiego nella realizzazione di un'opera di materiali e componenti prefabbricati attraverso un processo industrializzato; rispetto alle metodologie tradizionali, che prevedono lavorazioni di vera e propria produzione in cantiere, di strutture in c.a., solai a travetti, murature, tavolati, ecc..., si garantisce la perfetta rispondenza dell'opera finita ai requisiti prestabiliti a progetto e si ottengono importanti vantaggi:

- Pianificazione e controllo capillare del processo di costruzione e utilizzo di materiali e componenti di qualità garantita e certificata.
- Riduzione e certezza dei costi e dei tempi di costruzione.
- Piena libertà di pensiero nella progettazione architettonica per forme, geometrie e requisiti.
- Riduzione dei tempi, con conseguente calo dei costi, del cantiere e delle sue infrastrutture e con riduzione dell'impatto di esso sul contesto urbano limitrofo.
- Riduzioni delle opere di fondazione grazie alla maggior leggerezza delle strutture.
- Riduzione degli ingombri e notevoli distanze tra i pilastri, con conseguente aumento degli spazi interni e maggior duttilità degli stessi.
- Raggiungimento di ambiziosi obiettivi certificabili per i requisiti di isolamento termico, acustico, antincendio, con l'eliminazione di ponti termici ed acustici nell'edificio.
- Integrabilità con le reti tecnologiche, ispezionabilità ed accesso agli impianti meccanici ed elettrici, che vengono realizzati secondo schemi e passaggi precisi, senza la consueta discrezionalità di cantiere e senza necessità di demolizione alcuna.
- Piena rispondenza, senza alcun costo aggiuntivo, alle nuove esigenze antisismiche (D.M. 14/01/2008).
- Durabilità e ridotta manutenzione delle opere (nulla nella maggior parte dei casi).
- Flessibilità massima e facilità esecutiva nel momento di rivisitazione degli spazi, di ampliamento o cambio di destinazione d'uso dell'edificio o di singole parti di esso.

- Abbattimento del costo di demolizione delle opere che risultano altamente riciclabili.

Il cantiere, che principalmente è un cantiere di carpenteria, diventa, quindi, luogo dell'assemblaggio di componenti di alta qualità, in cui operai specializzati compongono quello che è un "sistema meccanico", tutto realizzato a priori dal progettista.

8.2.3 Canali di ventilazione, canalizzazioni per cavi ed impianti

I carichi di incendio dovuti, ad esempio, agli strati di isolamento di cavi e tubazioni, non sono ammessi nelle vie di soccorso, nei corridoi di utilizzo comune e nelle gabbie delle scale. E' necessario, pertanto, confinare tali di incendio per mezzo di strutture a secco che evitino la penetrazione del fumo nelle vie di soccorso e per farlo si può procedere nei modi seguenti:

1. con controsoffitti dimensionali, per garantire la protezione antincendio;
2. con pavimenti sopraelevati;
3. con cavedi e canalizzazioni per gli impianti.

Le canalizzazioni per la ventilazione, i cablaggi e le linee impiantistiche possono essere confrontate sulla base delle rispettive strutture.

Il confinamento del carico di incendio consente di proteggere dal fuoco per un certo lasso di tempo le vie di fuga, i corridoi e gli ambienti adiacenti.

A seconda della classe di resistenza al fuoco richiesta, i rivestimenti vengono realizzati con lastre monostrato o multistrato di spessore differente ed è necessaria una certificazione di prova.

I sistemi più economici prevedono semplicemente un canalizzazione piatta, sulla quale le lastre di protezione possono essere applicate fissandole tra loro senza l'ausilio di una struttura portante. Per il fissaggio reciproco delle lastre, a seconda del materiale di cui sono composte, vengono utilizzate viti autofilettanti o graffe di acciaio. Per quanto riguarda la protezione antincendio non è richiesta la rasatura a stucco finale.

Le canalizzazioni possono essere a due, tre e quattro lati ed un progetto a regola d'arte di un sistema di canalizzazioni non deve solo preoccuparsi di stabilire la dimensione della struttura, ma deve partire dalla conoscenza della densità degli impianti, espressa in kg/m, dove il peso della degli eventuali impianti inseriti deve essere preso in considerazione in fase di progetto.

8.3 Organizzazione del cantiere: cantierizzazione delle strutture in legno lamellare

La “cantierizzazione” è un termine, ormai, di uso comune e non può certo consistere nel completamento del progetto esecutivo, il quale non deve, in base alle nuove norme, risultare tale da rendere necessari ulteriori livelli progettuali in senso proprio, né implicare attività progettuale destinata a colmare lacune eventualmente presenti nel progetto esecutivo, ma deve intendersi come produzione di quella documentazione che l'esecutore elabora per tradurre le indicazioni e scelte contenute nel progetto in istruzioni e piani operativi, cioè, l'attività propria dell'impresa che ha piena competenza nel determinare l'organizzazione dei lavori.

Nella pratica ciò si verifica, per esempio, nel caso di impiego di manufatti prefabbricati. Infatti, il progettista è responsabile essenzialmente dell'organico inserimento e della previsione di utilizzazione dei manufatti, mentre il relativo dimensionamento e calcolo rientra principalmente tra i compiti del produttore.

La scelta delle ditte fornitrici dei prodotti prefabbricati deve essere riservata all'appaltatore e non può essere predefinita, se non violando le norme di mercato, mentre gli elaborati redatti in ragione delle caratteristiche specifiche del prodotto prefabbricato, spesso soggetto ad omologazione, sono il frutto delle attività di cantierizzazione.

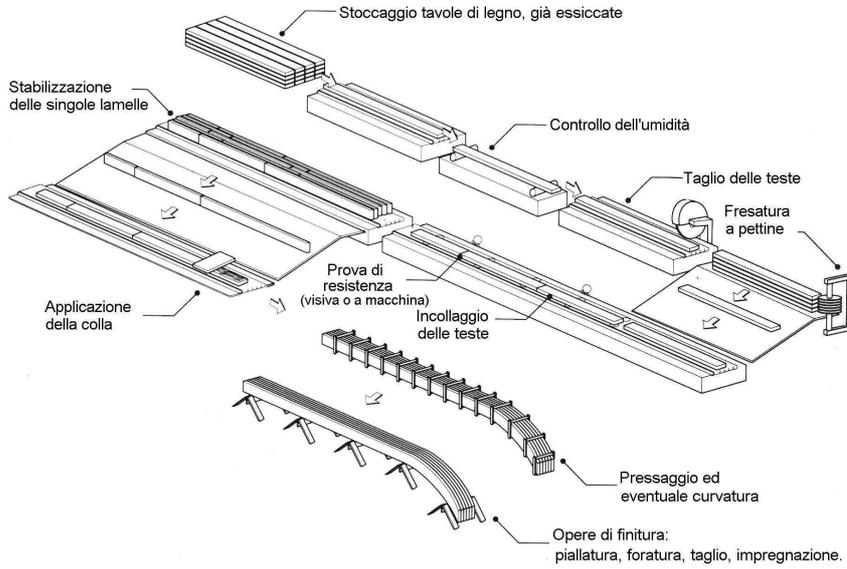
Dunque, la cantierizzazione costituisce nella redazione degli eventuali documenti di interfaccia tra il progetto e l'esecuzione, consentendo di coniugare le esigenze progettuali con quelle di realizzazione delle opere.

- **Cantierizzazione del progetto:**

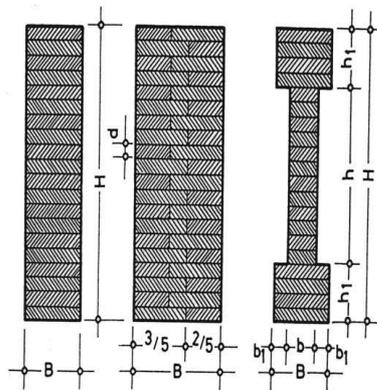
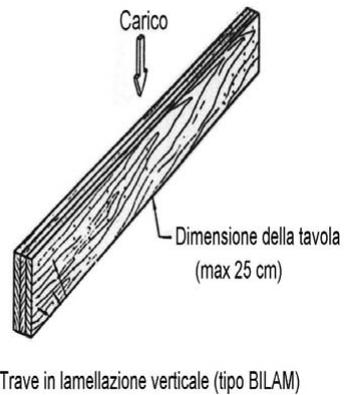
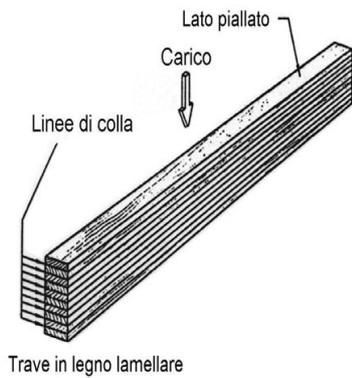
1. Adeguamento alle dimensioni di produzione
2. Adeguamento tipologico nodi di carpenteria metallica
3. Progetto di produzione (holz-liste e distinte officina)
4. Piano di carico e di trasporto
5. Progetto di montaggio
6. Piano di manutenzione–As Built

- Adeguamento alle dimensioni di produzione:

(Ciclo produttivo del legno lamellare incollato)

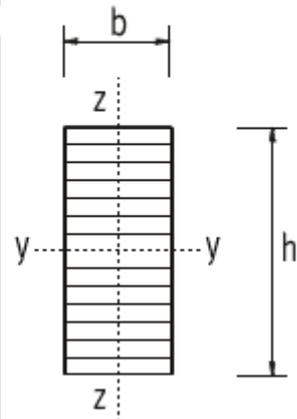


(Tipologie di sezioni di trave in legno lamellare)



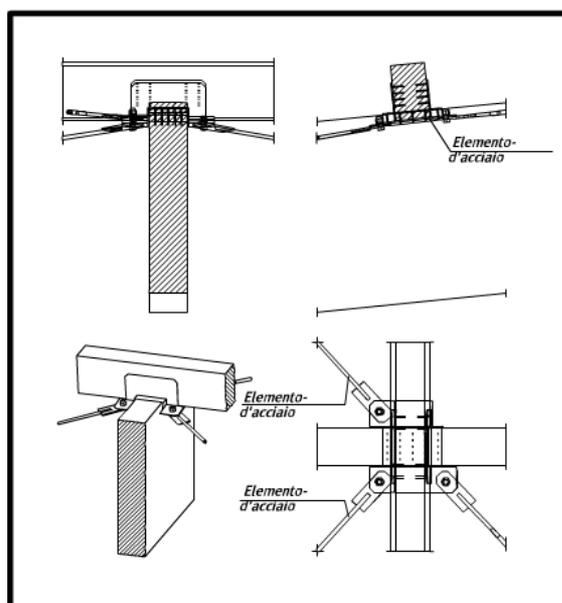
Spessore trave b...[cm]							
8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0

Altezza trave h...[cm]							
3.3	39.7	76.9	113.7	150.6	187.4		
6.2	43.1	80.2	117.1	153.9	190.8		
9.6	46.4	83.6	120.4	157.3	194.1		
12.9	50.1	86.9	123.8	160.6	197.5		
16.3	53.4	90.3	127.1	164.0	200.8		
19.6	56.8	93.6	130.5	167.3	204.2		
23.0	60.1	97.0	133.8	170.7	207.5		
26.3	63.5	100.3	137.2	174.0	210.9		
29.7	66.8	103.7	140.5	177.4	214.2		
33.0	70.2	107.0	143.9	180.7	217.6		
36.4	73.5	110.4	147.2	184.1	220.9		



Altezza trave	h...	[cm]
Spessore	b...	[cm]
Area	$A = b \times h$	[cm ²]
Momento resistente	$W_y = b \times h^2/6$ $W_z = h \times b^2/6$	[cm ³] [cm ³]
Momento d'inerzia	$I_y = b \times h^3/12$ $I_z = h \times b^3/12$	[cm ⁴] [cm ⁴]
Raggio d'inerzia	$i_y = \sqrt{I_y/A} = 0.289 \times h$ $i_z = \sqrt{I_z/A} = 0.289 \times h$	[cm]

- Adeguamento tipologico nodi di carpenteria metallica:



- Progetto di produzione: consiste nell'holz-liste e nelle distinte officina.

- Piano di carico e di trasporto:

Il trasporto delle travi in legno lamellare, in genere, non presenta grandi problemi di portata, perché il loro peso specifico è relativamente basso, in ogni caso, già nella fase di progettazione dell'opera in legno lamellare, è consigliabile una corretta valutazione degli ingombri e delle dimensioni degli elementi da trasportare.



La scelta del mezzo di trasporto dipende dalla morfologia del percorso e dagli accessi al cantiere, dalla lunghezza e dall'ingombro complessivo del singolo elemento, mentre lo spessore e la ferramenta eventualmente preassemblata determinano il numero di pezzi che la larghezza del mezzo consente di caricare.

In ambito nazionale il trasporto avviene quasi esclusivamente su gomma e gli automezzi comunemente utilizzati sono le motrici (lunghezza del cassone fino a 6 m), gli autoarticolati (12 m o 13,6 m) e i mezzi speciali per trasporti eccezionali con rimorchio ribassato o allungabile (fino ad oltre 40 m).

- Peso legale max. in Italia : 44 tonnellate
- Carico utile (esclusa tara): 20-24 tons [42-51 mc]

Mentre se si supera il peso legale (massimo 3 pezzi per carico):

- Sagoma: 4,30 m × 2,50 m
- Scorta se lunghezza >25 m e/o larghezza 3 m

- Progetto di montaggio:

La progettazione e la programmazione del cantiere costituiscono la base per un corretto montaggio. Le operazioni di montaggio vengono anticipate da una serie di verifiche in cantiere e dalla consegna del Piano Operativo di Sicurezza.

a) **Briefing di cantiere:** vi partecipano il Direttore di Cantiere, il Capo Cantiere, il Direttore di Montaggio ed il Capo squadra montatori e i temi da affrontare in questa fase riguardano, essenzialmente, l'organizzazione della logistica, la verifica delle norme antinfortunistiche, la definizione del programma dei lavori e il controllo dei mezzi necessari per eseguire l'intervento (gru, piattaforme, ponteggi).

b) **Tracciamento:** lo scopo principale di questa fase è la verifica della rispondenza del progetto esecutivo con la geometria plano-altimetrica del cantiere. Inoltre, vanno verificate tutte le quote primarie, le contropiastre e ogni sistema di connessione con le strutture murarie.

c) **Follow-up montaggio:** in questa fase è previsto lo scarico dei materiali, in zone individuate nella visita preliminare o nel progetto di cantiere. Il montaggio ed il pre-assemblaggio della struttura deve seguire le indicazioni del progetto costruttivo e di montaggio, dove sono definite le posizioni di ogni elemento ligneo e metallico. Gli elementi dovranno essere messi in sicurezza mediante l'utilizzo di stralli in acciaio e tirfort, fissati a punti inamovibili.

E' previsto, inoltre, il montaggio dell'orditura di irrigidimento e della controventatura.

Relativamente al cantiere e all'impresa esecutrice del montaggio delle strutture in legno infine si hanno:

d) **Piano operativo di sicurezza per il montaggio delle strutture in legno.**

e) **Piano di montaggio:** descrizione delle fasi esecutive in ordine cronologico.

- Piano di manutenzione-As Built:

Il piano di manutenzione riguarda le travature in legno lamellare e le componenti metalliche in acciaio.

8.3.1 Sicurezza nel cantiere delle costruzioni in legno

Le case in legno prevedono tempi costruttivi assai ridotti, pari ad un terzo rispetto ai cantieri tradizionali. Il segreto risiede nella prefabbricazione delle strutture e nel montaggio a secco in pochi giorni.

Come nell'edilizia tradizionale, in un cantiere in legno, le fasi lavorative che sottopongono ai rischi maggiori i lavoratori sono quelli che presentano il pericolo di cadute dall'alto.

La normativa in vigore, in tema di sicurezza nelle costruzioni, identifica questo rischio specifico a partire da un dislivello di 2 metri tra il piano di lavoro e quello di caduta, per cui le attività soggette a protezione sono numerose e riguardano, in particolare, gli scavi, le strutture in elevazione, dal montaggio alla manutenzione delle facciate, le coperture, le scale.

Nello specifico, i cantieri delle case prefabbricate limitano i rischi, in quanto la tempistica viene compressa in pochi giorni.

In una costruzione tradizionale la realizzazione della struttura comporta tempi lunghi, anche per opere semplici, mentre alcune ditte di case in legno riescono a concludere il grezzo in uno, due giorni appena.

Il prolungamento nel tempo delle suddette condizioni di rischio aumenta inevitabilmente le probabilità dell'evento infortunio, ma questo non deve, tuttavia, in nessun modo indurre a sottovalutare i pericoli che le operazioni di montaggio delle case prefabbricate in legno possono produrre.

I presidi per la sicurezza dei lavoratori devono essere presenti senza eccezione come per qualsiasi altra costruzione, per cui vanno redatti i Piani di Sicurezza (P.O.S. e P.S.C.), nominate le figure responsabili e addette al controllo del cantiere e adottate tutte le misure, attive e passive, per la protezione dei lavoratori.

Le normative sulla sicurezza nei cantieri in vigore in Italia sono senz'altro le più avanzate e restrittive in Europa e la loro corretta attuazione garantisce la massima sicurezza per i lavoratori.

A tal proposito, nel nostro paese, la normativa è stata recentemente aggiornata con l'introduzione del **Testo Unico 81/2008**, andando ad abrogare il vecchio Decreto **494/96**, che per anni ha costituito il riferimento legislativo per la sicurezza sui cantieri.

Premesso che l'edilizia rimane ad oggi il settore con il maggior numero di incidenti, spesso gravi o mortali, dovuti in particolar modo a cadute dall'alto, schiacciamenti e folgorazioni, i severi controlli da parte degli organi competenti, la redazione obbligatoria di Piani di Sicurezza e Coordinamento (P.S.C.),

l'istituzione di figure di responsabilità anche penale ed il sempre maggiore rispetto da parte delle imprese costruttrici delle procedure corrette, ha contribuito a diminuire negli ultimi anni il numero di incidenti.

Purtroppo, è la natura stessa dell'organizzazione del lavoro nei cantieri a costituire un problema, in particolare quando la volontà di contenere i costi da parte di committenti e imprese prevale sulle ragioni di fondo della sicurezza.

La presenza, inoltre, di manodopera poco specializzata, a maggioranza extracomunitaria, con scarsa conoscenza della nostra lingua e poco preparata a recepire un'adeguata formazione in materia, resta il grande limite dei nostri cantieri tradizionali.

Nel caso della prefabbricazione, relativa alle costruzioni in legno, per via della breve tempistica della fase di montaggio, da parte di manodopera altamente specializzata, quanto più volte sottolineato, costituisce uno dei tanti vantaggi anche a livello di sicurezza nel cantiere.

8.3.2 Piano Operativo di Sicurezza

Il Piano esplica le scelte autonome nell'organizzazione del cantiere e nell'esecuzione dei lavori sulla base di quanto indicato nel Piano di Sicurezza e Coordinamento allegato alla documentazione di contratto e delle prescrizioni dettate dalla vigente normativa.

Il presente Piano, in conformità allo spirito della normativa antinfortunistica, non deve essere considerato un documento statico, ma al contrario dinamico; nel senso che la pianificazione e l'informazione fornita prima dell'inizio dei lavori dovrà essere aggiornata man mano nell'evoluzione esecutiva e organizzativa dell'appalto.

Di conseguenza devono considerarsi parte integrante del presente Piano tutti i documenti in progressione, che verranno aggiornati in forma indipendente in cantiere, oltre a quelli complementari, che potranno rendersi necessari sulla base delle situazioni di rischio riscontrate nell'arco del cantiere:

1. Organigramma di cantiere (deleghe, nomine).
2. Elenco Personale operativo (libro matricola, elenco presenze, turni lavoro, cartellini identificazione, etc...).
3. Lavorazioni affidate a sub-fornitori (subappalto, fornitura in opera, comunicazioni, verbali di consegna P.S.C., trasmissione del P.O.S., etc...).

4. Installazione di cantiere (planimetrie, occupazione suolo pubblico, recinzioni, etc...).

5. Presenza e utilizzo di materiali pericolosi (schede di rischio, verbali di informazione e uso ai lavoratori, etc...).

6. Elenco macchine ed attrezzature (elenco, dichiarazioni CE, libretti manutenzione).

7. In caso di lavorazioni in quota, la redazione del PIMUS e dei documenti collegati (verbali formazione maestranze, progetto esecutivo e relazione di calcolo ponteggio, libretto autorizzazione ministeriale, etc...), sia per interventi diretti che tramite sub-fornitori.

8. Sorveglianza sanitaria (idoneità alla mansione, registro infortuni, etc...).

9. Formazione generale (formazione rumore, dispositivi di protezione individuale, ossia D.P.I., vibrazioni, carichi pesanti, attestati di corsi, etc...).

10. Informazione rischi (verbali di riunioni di cantiere, verbali di consegna macchine, verbali di informazione rischi, verbali di consegna D.P.I., etc...).

11. Eventuale misurazione strumentale per il rischio rumore, nel caso di superamento dei livelli.

12. Ulteriori documenti previsti nelle procedure aziendali e schede allegate.

Il Piano di sicurezza è relativo al cantiere dove vengono svolti i lavori per la realizzazione dell'opera affidata e costituisce un documento riepilogativo illustrante i mezzi di prevenzione e di igiene da attuare ed attuati, congiuntamente, alla organizzazione del lavoro e all'utilizzo delle attrezzature necessarie all'esecuzione dell'appalto.

L'obiettivo del Piano è quello di predisporre un'organizzazione capace di assicurare le migliori condizioni di lavoro a tutela della salute e della integrità fisica dei lavoratori occupati.

Per l'elaborazione del Piano di Sicurezza sono stati presi in considerazione gli ambienti in cui operano gli addetti, gli impianti installati, le macchine e/o le attrezzature utilizzate, nonché le lavorazioni effettuate. Alla stesura del Piano di Sicurezza si è arrivati attraverso:

- l'analisi dei rischi esistenti nell'ambiente di lavoro;
- l'analisi dei rischi che può presentare ogni singola operazione;
- l'individuazione dei provvedimenti di sicurezza da adottare per eliminare i rischi esistenti;
- l'individuazione dei provvedimenti di igiene da adottare a tutela della salute dei lavoratori.

8.3.3 Piano di Sicurezza e Coordinamento

La pianificazione della sicurezza e del coordinamento dovrà tenere conto delle modalità e delle fasi di impiego del ponteggio, in relazione anche alle caratteristiche dell'opera in corso di costruzione e all'organizzazione dell'appalto.

Si pensi alla possibilità di mantenere montato in cantiere il ponteggio precedentemente utilizzato in fase di elevazione dell'opera per l'esecuzione dei lavori di finitura (intonaci, dipinture, cappotti di isolamento), oppure, in subordine, alla possibilità di mantenere in opera i golfari di ancoraggio.

Si tratta di aspetti da prevedere nel P.S.C., in relazione all'utilizzazione comune di attrezzature che hanno una diretta ricaduta sul piano contrattuale e quindi in termini di costi della sicurezza.

In breve, nei due Piani di Sicurezza vanno indicate e descritte, rispettivamente, le seguenti attività e fasi cantieristiche:

A) Piano Operativo di Sicurezza (P.O.S.):

- Indicare le modalità di accesso alla copertura.
- Indicare i percorsi per raggiungere la zona di lavoro.
- Indicare la portata della copertura nel percorso e nella zona di lavoro, in assenza di un piano di sicurezza e coordinamento.
- Descrivere i sistemi di protezione collettiva e individuale utilizzati dai lavoratori nelle varie lavorazioni.
- Descrivere la successione delle fasi dei lavori da realizzare in copertura.
- Descrivere la successione delle operazioni di realizzazione delle protezioni.
- Indicare la presenza sul posto di dispositivi per vincolare l'imbracatura di sicurezza.

B) Piano di Sicurezza e Coordinamento (P.S.C.):

- Indicare la corretta collocazione e conformazione del ponteggio perimetrale.
- Indicare l'accesso alla copertura.
- Indicare i percorsi per raggiungere la zona di lavoro.

- Indicare i sovraccarichi consentiti della copertura, comprese le sporgenze di gronda.
- Indicare la successione delle fasi lavorative necessarie alla manutenzione della copertura.
- Indicare la tipologia del lucernario e le protezioni di cui è eventualmente dotato.
- Indicare la presenza sul posto di dispositivi per vincolare l'imbracatura di sicurezza.
- Indicare le modalità di realizzazione del sistema di ancoraggio dei DPI anticaduta.
- Indicare le modalità per la rimozione dal tetto del materiale di demolizione.

8.3.4 Realizzazione e assemblaggio delle case in legno, sicurezza dei lavoratori: influenza su tempi e costi

Le case prefabbricate in legno vengono realizzate in condizioni di controllo, all'interno dell'ambiente dello stabilimento e montate in appena un paio di giorni, sopra le strutture di fondazione, eseguite in precedenza da un'impresa tradizionale.

L'assemblaggio viene effettuato a secco da squadre di montatori specializzati, dotati di dispositivi di protezione, di ponteggi, imbracature o linee vita a norma di legge. I tempi ridottissimi e le semplici modalità di esecuzione abbattano i rischi di incidenti rispetto ai cantieri tradizionali, inoltre, i montatori delle ditte di case prefabbricate possiedono tutte le informazioni, la formazione e l'esperienza necessaria per eseguire l'installazione delle strutture, prefabbricate secondo metodologie consolidate che prevedono rischi minimi per i lavoratori stessi.

E' la scarsa valutazione delle conseguenze che comportano scelte e decisioni improvvisate alla base degli incidenti più comuni, in quanto, dietro a molte tragedie si nascondono spesso la superficialità, l'ignoranza, la poca preparazione, la mancanza di formazione e informazione. Quasi mai l'incidente in cantiere risulta inevitabile o dovuto a cause fortuite.

Il rispetto della sicurezza, obbligatorio moralmente e legalmente, costituisce, comunque, un fardello necessario, i cui costi gravano necessariamente sul prezzo finale, ma le costruzioni prefabbricate in legno riescono a garantire un altissimo livello di protezione e prevenzione dei lavoratori con costi assolutamente più bassi rispetto al cantiere tradizionale in latero-cemento.

L'impatto economico della sicurezza nei cantieri, pur semplificando, è valutato in "uomini-giorno", per cui una costruzione eretta in pochi giorni, di fatto prefabbricata in stabilimento e semplicemente montata a secco, comporterà in questo caso un impatto economico senz'altro inferiore, pur nel rigoroso rispetto delle prescrizioni contenute nel piano di sicurezza e coordinamento.

Va ribadito che si tratta di costi fissi e non ribassabili per qualsiasi impresa costruttrice, ma che il differente processo costruttivo delle case prefabbricate di legno consente di ridurre comunque considerevolmente.

8.3.5 Cenni sul cantiere tradizionale

Il cantiere, dal latino *cantherius*, ossia "cavallo castrato", passato poi a significare "cavalletto di sostegno", è un qualsiasi posto di lavoro temporaneo, che eventualmente si sposta progressivamente come conseguenza dell'esecuzione del lavoro stesso, come ad esempio i cantieri delle gallerie.

Dal punto di vista produttivo, il cantiere è un'organizzazione a punto fisso, nel quale il prodotto rimane fermo e sono le attrezzature e le maestranze che si muovono, in contrapposizione a quanto accade nelle organizzazioni per processo o per prodotto.

Con lo scopo di costruire grossi manufatti, generalmente si distinguono vari tipi di cantiere, ma i più noti sono:

1. il cantiere edilizio
2. il cantiere impiantistico
3. il cantiere navale
4. il cantiere aeronautico

Quello che a noi interessa è il cantiere edilizio, nel quale si innalzano edifici di vari tipi. L'organizzazione del cantiere edilizio si divide in due fasi:

a) la preparazione della zona di lavoro:

- distribuzione logistica dei macchinari fissi
- ricevimento dei materiali
- controllo dei materiali
- deposito dei materiali

b) il ciclo costruttivo:

- lavori preparatori e accessori di sterro

- lavori di erezione impalcature
- posa in opera dei materiali

Particolare attenzione viene rivolta alle macchine per ridurre le discontinuità di utilizzazione; con percorsi interni minimi e contemporaneamente agevoli ad autocarri e macchinari.

Il notevole sviluppo dell'edilizia e la conseguente necessità di eseguire rapidamente sia i lavori che le costruzioni progettate hanno richiesto un uso sempre più diffuso degli elementi prefabbricati.

8.4 I ponteggi

I ponteggi sono definiti “opere provvisorie”, cioè strutture di servizio di tipo temporaneo non facenti parte integrante della costruzione, ma allestiti o impiegati per la realizzazione, la manutenzione e il recupero di opere edilizie.

Sono assolutamente necessari per evitare i pericoli di caduta di uomini o cose ed è obbligatorio impiegarli ad altezze superiori a 2 m.

Sono costituiti da una serie di diversi elementi da collegare fra loro al fine di ottenere una struttura rigida, in grado di crescere non solo in senso verticale, ma anche orizzontale, adattandosi con facilità e modularmente alle caratteristiche geometriche e dimensionali dell'edificio.

I materiali di cui sono costituiti i ponteggi possono essere il legno o il metallo. In Italia i ponteggi a elementi metallici sono stati adottati negli anni '30, sostituendo quasi totalmente quelli in legno. Il metallo più utilizzato è l'acciaio, grazie alla sua resistenza, ma in alcune situazioni vengono usati ponteggi in leghe di alluminio, in grado di offrire maggiore leggerezza. Talvolta vengono allestiti ponteggi in metallo con camminamento in legno, non sempre rispondenti alle norme di sicurezza.

I ponteggi in acciaio sono estremamente diffusi e si trovano disponibili sul mercato in tre principali tipologie:

- ponteggio a tubi e giunti;
- ponteggio a telai prefabbricati;
- ponteggio a montanti e traversi prefabbricati (multi direzionale).

1) Per le sue caratteristiche di flessibilità, robustezza e manutenzione contenuta, il sistema a “tubo e giunto” è quello che, nel tempo, ha soppiantato definitivamente il sistema di ponteggio in legno.

Con questo sistema si può eseguire qualsiasi tipo di opera provvisoria, sia tradizionale che speciale (centinature per la costruzione di ponti anche di grande luce o lavori di ristrutturazione su edifici architettonici importanti).

Se la flessibilità è il suo principale vantaggio, gli aspetti negativi di questo sistema sono sicuramente il peso della struttura, necessità di maestranze qualificate, maggiori tempi di montaggio e smontaggio e di conseguenza costi più alti. Contrariamente al resto dell'Europa, dove il sistema a tubi e giunti è stato quasi completamente abbandonato, in Italia si utilizza ancora molto, ma di anno in anno il suo impiego è sempre meno frequente.

2) Il sistema a “telaio prefabbricato” si presenta nei due schemi strutturali, a portale e ad acca, con due tipologie di attacchi, a perni e a boccole.

Non ha la stessa flessibilità del sistema a tubi e giunti, ma per strutture architettoniche lineari e non complesse può essere una valida alternativa al primo.

Non ha nemmeno la stessa robustezza del primo, tuttavia i vantaggiosi costi iniziali d'acquisto, la velocità della messa in opera, la facilità di trasporto e i costi di manutenzione accettabili, lo rendono comunque competitivo nella dinamica economica imprenditoriale.

3) Il sistema a “montanti e traversi prefabbricati” (multi direzionale) è una recente innovazione che si basa su tre semplici elementi: il montante, la diagonale e il corrente.

Il cuore del sistema è una piastra ottagonale di collegamento, dotata di otto forature sagomate, posizionata sul montante, a passo costante di 50 cm, su cui convergono correnti e diagonali, che vengono fissati con un cuneo, incorporato in modo centrico sulle piastre di giunzione, il quale elimina il gioco e garantisce la necessaria stabilità.

Questo giunto ad incastro soppianta definitivamente i morsetti e le chiavi di fissaggio e necessita per bloccare la struttura, esclusivamente di uno o due colpi di martello.

Il sistema multi direzionale unisce i vantaggi delle due precedenti tipologie di ponteggio, ha infatti la solidità e la flessibilità del sistema a tubo e giunto e la leggerezza e la velocità di montaggio e smontaggio di quello a telai prefabbricati.

La scelta della tipologia di ponteggio da utilizzare è legata alla specificità del cantiere da allestire: i luoghi, l'opera da realizzare, lo spazio disponibile, ecc...

La scelta del ponteggio diviene così parte integrante del Piano di Sicurezza e Coordinamento (P.S.C.).

8.4.1 Gli ancoraggi

L'ancoraggio è un elemento o sistema che vincola il ponteggio agganciandolo ad una struttura idonea a sopportare le azioni ad essa trasmesse, in modo che ne resti impedito il movimento e resti stabile contro il ribaltamento e la caduta. Gli ancoraggi più usati sono dei seguenti tipi:

- 1) a cravatta: con fissaggio a tubi e giunti attorno a muri o pilastri dell'edificio servito e con l'interposizione di una tavola di ripartizione del carico;
- 2) ad anello: è possibile solo nel caso di nuove costruzioni, richiede, infatti, la possibilità di aggancio ad una parete abbastanza solida da attraversare con un tondino di acciaio sagomato ad U, che viene vincolato all'armatura della parete stessa prima che sia stato realizzato il getto di conglomerato cementizio. Il diametro del tondino è da calcolare secondo lo sforzo applicato e comunque non è minore di 6 mm;
- 3) a vitone: realizzato con elemento di bloccaggio estensibile a vite per forzare su due pareti di contrasto parallele ed ortogonali al vitone stesso;
- 4) a tassello: permette di ancorare il ponteggio alle pareti nei punti voluti, indipendentemente dalla presenza di aperture o fori preesistenti.



Ai sensi del D.lgs 81/2008 (articolo 125 comma 6), gli ancoraggi vanno realizzati almeno ogni due piani di ponteggio e ogni due impalcati. Questa disposizione è più cautelativa rispetto all'indicazione contenuta in molti libretti di autorizzazione che prescrivono la realizzazione di un ancoraggio ogni 22 mq. Per far sì che il progetto non sia necessario, in presenza di ponteggi con campate standard da 1,8 m, occorre almeno realizzare un ancoraggio ogni 14,4 m² nelle modalità previste dal libretto di autorizzazione ministeriale.

Nei libretti ne sono contenuti però solo alcuni tipi e nei casi in cui si debba realizzarli in altro modo occorre, comunque, il progetto del ponteggio, con la relativa relazione di calcolo in cui verrà verificata la compatibilità tra la resistenza dell'ancoraggio e le sollecitazioni impresse dal ponteggio.

La resistenza degli ancoraggi cambia in funzione del tipo di ancoraggio e di supporto utilizzato. Decidendo di realizzare ancoraggi a golfare, occorre in linea di massima utilizzare tasselli meccanici, in presenza di calcestruzzo, pietre, mattoni pieni e tasselli chimici nelle altre situazioni. Nelle istruzioni d'uso che accompagnano i tasselli sono solitamente contenute tutte le informazioni necessarie all'impiego.

8.4.2 Il progetto dei ponteggi

In tutti i cantieri, dove vengono utilizzati ponteggi metallici, deve essere tenuta ed esibita una copia dell'autorizzazione ministeriale, ossia il libretto, che con i suoi schemi e calcoli è la base per la realizzazione della struttura, unitamente ad una copia del disegno esecutivo, specifico per quel cantiere, dal quale risulti l'indicazione del tipo di ponteggio utilizzato, i sovraccarichi massimi, le generalità e la firma del responsabile di cantiere.

Ciò vale nell' ipotesi che si tratti di una realizzazione perfettamente aderente allo schema standardizzato contenuto nel libretto.

La necessità di predisporre uno specifico progetto, qualora si esca fuori anche da una delle prescrizioni previste nell'autorizzazione ministeriale, deriva dalle sostanziali considerazioni secondo le quali il ponteggio metallico nel suo insieme è rappresentato da elementi caratterizzati da notevole snellezza delle aste ed elevata mobilità dei nodi che li costituiscono.

Tali considerazioni hanno indotto il legislatore a stabilire come criterio generale di verifica dei ponteggi metallici quello per cui, con l'adozione delle prove sperimentali di laboratorio, si fissano i limiti di impiego nell'uso, che sono chiaramente indicati nel libretto.

Quando lo schema da realizzare è conforme agli schemi tipo, non essendo necessario predisporre alcun progetto con verifica statica, i disegni del ponteggio presenti in cantiere dovranno semplicemente recare le generalità e la firma del capocantiere.

Nell'ipotesi in cui gli schemi da realizzare differiscono da quelli autorizzati nel libretto, si deve predisporre un apposito progetto di verifica redatto, attenendosi alle istruzioni approvate nell'autorizzazione ministeriale, da parte di tecnico abilitato, che sia un ingegnere o un architetto.

8.4.3 I criteri di misurazione dei ponteggi

I criteri riportati sono quelli adottati dalla maggior parte degli allestitori e sono di norma ritenuti idonei per tutti i tipi di ponteggi fissi, salvo diversa pattuizione contrattuale.

I ponteggi si misurano in proiezione verticale di facciata, calcolando la loro superficie, che non coincide con quella dei fabbricati serviti, in quanto, per consentire il passaggio degli operatori da una facciata ad un'altra, se ne rende

necessario il prolungamento e di ciò è importante tenerne conto in fase di elaborazione dei capitolati, che vedranno computi metrici differenti per i ponteggi rispetto alle lavorazioni (intonaci, ecc...).

Base: la base è determinata misurando l'effettiva estensione orizzontale di ogni singola facciata del ponteggio.

Altezza: l'altezza viene misurata dal piano di appoggio all'ultimo parapetto superiore.

Profondità: la profondità standard è normalmente considerata 1 m, quindi non conteggiata nei ponteggi normali; qualora le circostanze determinino la necessità di impiegare ponteggi o parti di essi con larghezze superiori, ad esempio in presenza di sporti o aggetti particolarmente considerevoli, si moltiplica la superficie interessata in proporzione alla reale larghezza.

Balconi: gli aggetti del ponteggio posti in opera tra le solette dei balconi vengono contabilizzati aumentando del 30 % la superficie totale del ponteggio esterno ai balconi.

Sbalzi, passi carrai, stilate sospese: qualora le necessità del cantiere richiedano la sospensione di una stilata, per esempio uno sbalzo per passo carraio o per l'entrata di un negozio, il ponteggio viene misurato vuoto per pieno, come se fosse continuo.

8.4.4 Realizzazione del ponteggio

La realizzazione del ponteggio metallico segue di pari passo l'opera in costruzione. Preliminarmente alla realizzazione del ponteggio si prepara la base di appoggio della stilata sul terreno solido, il più possibile livellato.

Durante la costruzione del primo solaio si inizia la installazione del ponteggio sul perimetro dell'edificio. Le strutture metalliche componenti il ponteggio, fornite di basette di appoggio, si collocano sul terreno e si pongono i correnti di collegamento, in modo che si possa avere la base per il posizionamento di un primo impalcato ad altezza di circa 2 m.

Successivamente, servendosi del primo impalcato, si posizionano i prolungamenti delle stilate, costituite da tubi o telai prefabbricati, per preparare gli appoggi al secondo impalcato. Poi si predispongono le funi, sulle quali si agganceranno le funi di trattenuta della cintura, una volta costituito parte dell'impalcato superiore.

Con la cintura allacciata alla fune predisposta si prosegue nella realizzazione dell'impalcato, ponendo anche i correnti dei parapetti e le diagonali.

Tale operazione prosegue fino all'altezza ritenuta necessaria, tenendo presente di ancorare il ponteggio all'opera in costruzione, in modo prescritto, ponendo gli impalcati quanto più accostati all'opera in costruzione, in ogni caso a meno 20 cm.

La realizzazione del ponteggio viene di solito eseguita da due persone esperte nel tipo di operazioni. E' da evidenziare che, mentre i telai prefabbricati, montati ad incastro gli uni sugli altri, vengono fissati contro lo sfilamento eventuale con spinotti passanti, i tubi vengono fissati con giunto a morsetto, le cui bullonerie vengono serrate con chiavi dinamometriche, allo scopo di assicurare un omogeneo e corretto serraggio.

La realizzazione dei ponteggi deve essere seguita come quanto espressamente individuato nel libretto fornito dal costruttore della struttura, che ne garantisce, con la relativa certificazione, la relativa omologazione di fatto. Schemi diversi da quello tipo richiedono un calcolo di verifica e relativo disegno.

Lo smontaggio del ponteggio avviene eseguendo in maniera inversa le operazioni di montaggio, tenendo presente che i materiali smontati non devono essere gettati dall'alto, ma devono essere portati a terra con apparecchi o apparecchiature di sollevamento (carrucola, gru, paranco), al fine di evitare eventuali danni ai materiali, che, talora non visibili ad occhio nudo, possono costituire pericolo ai fini della stabilità del ponteggio montato.

Spesso per ragioni pratiche, oltre che economiche, si preferisce il noleggio all'acquisto dei ponteggi. Il noleggio avviene, previa stipula di contratto, secondo due modalità denominate dagli operatori del settore:

1) a freddo : quando è previsto il nolo di tutti gli elementi componenti il ponteggio;

2) a caldo : quando sono previste, oltre al nolo di tutti gli elementi componenti il ponteggio, anche le operazioni di montaggio e smontaggio.

La società di noleggio all'atto della consegna è tenuta a fornire al contraente il libretto contenente: l'Autorizzazione Ministeriale, le istruzioni per il calcolo, le indicazioni per impiego, montaggio e smontaggio del ponteggio.

Premesso che le clausole contrattuali sono a discrezione di ogni società di nolo, una clausola di rilievo è quella che prevede un aggravio di spesa, qualora il materiale non venga riconsegnato nelle stesse condizioni in cui è stato ricevuto e nello stesso tipo di imballo fornito dalla società.

8.4.5 Montaggio del ponteggio

- Devono essere installate idonee impalcature, ponteggi od opere provvisionali per i lavori che si eseguono oltre i 2 m di altezza atti ad eliminare i pericoli di caduta di persone e di cose.
- Le operazioni di montaggio dei ponteggi dovranno essere eseguite sotto il diretto controllo del preposto ai lavoratori.
- Il responsabile del cantiere deve assicurarsi che il ponteggio venga montato conformemente al progetto e a regola d'arte.
- Le operazioni di montaggio devono essere effettuate da personale pratico e fornito di attrezzi appropriati ed in buono stato di manutenzione.
- Nel montaggio è da escludere l'ipotesi di apportare modifiche in autonomia.
- Una volta controllato il piano di appoggio viene eseguito il tracciamento della struttura e vengono posti in opera i telai di base; devono essere verificate costantemente la distanza tra ponteggio ed edificio, la verticalità dei montanti, l'orizzontalità dei correnti e dei traversi.
- E' necessario non anticipare il montaggio rispetto allo sviluppo della costruzione, in ogni caso è comunque necessario non superare mai i 4 m di dislivello.
- L'altezza dei montanti deve superare di almeno 1,20 m il piano di gronda o l'ultimo impalcato.
- Non è consentito utilizzare elementi facenti parte di ponteggi di tipo diverso e/o misto, ancorché trattasi di elementi di ponteggi autorizzati, a meno che ciò non sia previsto da uno specifico progetto.
- Operando dal basso, mettere in opera le tavole di impalcato del 1° piano di ponteggio.
- Attuato il primo orizzontamento si mettono in opera gli ancoraggi e si controlla la verticalità dei montanti; il ponteggio deve essere ancorato a parti stabili dell'edificio e comunque deve essere sempre presente un ancoraggio ogni 22 m² di superficie.
- Accedere al primo piano di impalcato attraverso la scala e la botola, quindi ancorare il moschettone del proprio dispositivo di trattenuta alla linea di ancoraggio (fettuccia di ancoraggio che si assicura girandola intorno ai montanti), che deve essere adeguatamente messa in tensione.

- Si consiglia di completare la costruzione degli impalcati piano per piano, anziché salire solo con una o due tavole, operando dal di sotto, ossia dal piano di tavole sottostante a quello di esecuzione.

- Gli ancoraggi e le controventature devono essere in numero sufficiente e realizzati in conformità alla relazione tecnica.

- Il ponteggio deve essere collegato elettricamente a terra almeno ogni 25 m di sviluppo lineare, secondo il percorso più breve possibile, evitando brusche svolte e strozzature; i conduttori di terra devono avere sezione non inferiore a 35 mm².

- I ponteggi di sviluppo perimetrale minori di 25 m devono avere non meno di due collegamenti a terra.

- Nel corso del montaggio agli incastri dei singoli elementi metallici del ponteggio non devono venire interposti materiali isolanti.

- L'estremità inferiore dei montanti deve essere sostenuta da una piastra metallica di base (basetta), atta a ripartire il carico sul piano d'appoggio.

- Evitare di poggiare le basette direttamente sull'asfalto.

- Gli impalcati ed i ponti di servizio devono avere un sottoponte di sicurezza, costruito come il ponte di servizio e posto a distanza non superiore a 2,50 m, che ha la funzione di trattenere persone o materiali, che possono cadere dal ponte soprastante in caso di rottura di una tavola.

- La costruzione del sottoponte può essere omessa per i lavori di manutenzione e riparazione di durata non superiore a 5 giorni.

- Gli impalcati e ponti di servizio, le passerelle, le andatoie, che siano posti ad altezza superiore a 2 m, devono essere provvisti su tutti i lati verso il vuoto di un robusto parapetto alto non meno di 1 m, di una tavola fermapiiede alta non meno di 20 cm, messa di taglio e aderente all'intavolato e di un traverso intermedi, posto ad una distanza non superiore a 60 cm dal corrente superiore; fissati alla parte interna dei montanti.

- Nel caso si utilizzino tavole o impalcati metallici, occorre inserire il fermo antisollevamento.

- Le tavole di legno costituenti il piano di calpestio di ponti, sottoponti, passerelle e andatoie devono:

- essere idonee per spessore e larghezza (4×30 cm oppure 5×20 cm);
 - poggiare almeno su tre traversi del ponteggio metallico (su quattro se il ponteggio è di legno);
 - essere in buono stato di conservazione;
 - non presentare parti a sbalzo;

- avere le estremità sovrapposte per non meno di 40 cm;
- essere ben accostate tra loro in modo tale da non far passare materiale anche minuto;
- assicurate contro gli spostamenti.

- Le tavole devono essere assicurate contro gli spostamenti sia trasversali che longitudinali, essere fissate in modo che non possono scostarsi dalla posizione in cui sono state collocate o scivolare sui traversi metallici e ben accostate tra loro a coprire tutto lo spazio tra i montanti contrapposti. Verso l'edificio, è ammessa una distanza fino a 20 cm tra muro ed intavolato solo quando debbono essere eseguiti lavori in finitura della parete. Negli altri casi il ponteggio deve essere accostato alla parete.

- Devono essere predisposti idonei sistemi per l'accesso ai piani di lavoro (scale o ascensori) al fine di evitare la salita e discesa lungo i montanti.

- Se avviene, come d'uso, che si accede ai vari piani del ponteggio tramite scale portatili, queste devono risultare vincolate, disposte non in prosecuzione una dell'altra, sporgere di almeno 1 m oltre il piano di arrivo e se allestite verso la parte esterna devono essere provviste di corrimano-parapetto.

- Se alla base del ponteggio è previsto il transito di persone e/o di mezzi è necessario installare mantovane lungo la facciata esterna che trattengano materiali e oggetti caduti accidentalmente. La prima mantovana deve essere montata all'altezza di circa 4 m da terra, raccordata ad un impalcato e deve essere ripetuta ad intervalli di 12 m. Se, invece, la mantovana ha proiezione orizzontale di almeno 1,5 m, ne è sufficiente una sola, a 4 m di quota, per qualsiasi altezza del ponteggio.

- Se alla base del ponteggio non è previsto il transito di persone e/o mezzi, occorre darne segnalazione con appositi cartelli e altro sistema, tipo transenne, strisce con bande bianche e rosse, ecc...

- Teli o reti non esonerano dall'obbligo di applicare i parasassi (mantovane) in corrispondenza dei luoghi di transito, devono essere contenuti all'interno dei correnti o, in ogni caso, devono essere fissati molto saldamente. La presenza di teli così come di affissi pubblicitari sul fronte del ponteggio aumenta la superficie esposta al vento, pertanto incombe l'obbligo all'utilizzatore di una apposita verifica di calcolo a cura di un professionista abilitato e di tenerne copia presso il cantiere.

- Deve essere esposto in cantiere, in modo chiaramente visibile, un cartello riportante le caratteristiche essenziali del ponteggio e, precisamente:

- natura (da costruzione o da manutenzione),

- numero complessivo degli impalcati,
- numero degli impalcati, su cui è consentita l'attività lavorativa,
- carichi ammissibili.
- Il montaggio di apparecchi di sollevamento sui ponteggi è consentito per apparecchi aventi portata non superiore a 200 kg e sbraccio non superiore a 1,20 metri alla condizione seguente:
 - che venga raddoppiato il montante interessato, realizzando tale raddoppio con tubi collegati da giunti resistenti a trazione e attuando un adeguato sistema di ancoraggio;
 - il raddoppio viene effettuato affiancando al montante interessato, per tutta la sua altezza, un tubo collegato, mediante giunti, in corrispondenza del piede di ciascun telaio. Tubo e giunti debbono appartenere ad un ponteggio autorizzato.
 - Verificare che gli argani o verricelli azionati a mano per altezze superiori a 5 metri siano muniti di dispositivo che impedisca la discesa libera del carico.
 - Verificare che il ponteggio sia realizzato dove necessario.
 - Il personale addetto al montaggio dei ponteggi dovrà essere dotato del seguente equipaggiamento fornito dall'impresa:
 - cintura di sicurezza ad imbraco totale, regolarmente approvata a norma europea,
 - fune di trattenuta con moschettone lunga al massimo 1,50 m, se semplice, 2 m se provvista di dissipatore di energia nel rispetto di quanto previsto nello specifico riconoscimento di efficacia, oppure secondo quanto previsto nel certificato a norme europee vigenti;
 - arrotolatore a norma europea sempre nel rispetto dei limiti stabiliti o comunque delle modalità di impiego, in modo che sia evitata la caduta oltre la lunghezza ammessa;
 - guanti da lavoro;
 - casco di sicurezza con sottogola;
 - calzature di sicurezza con suola flessibile antidrucciolevole;
 - livella torica;
 - filo a piombo;
 - chiavi serra bulloni \varnothing 21÷22 lunghe circa 28 cm;
 - squadra metallica.

Il personale addetto segnalerà tempestivamente eventuali carenze della suddetta attrezzatura.

8.4.6 I ponteggi e gli ancoraggi delle costruzioni in legno

I ponteggi utilizzati nei cantieri delle costruzioni in legno, secondo il criterio della prefabbricazione, non differiscono di molto dai ponteggi per le costruzioni in muratura, a parte per il tempo impiegato per il montaggio, che è di circa 2 giorni.

Essenzialmente il ponteggio è ancorato all'impalcato tramite fissaggi a pressione e diagonali esterne. Per gli ancoraggi si utilizzano delle fischer (a cravatta, a stop, resistenti allo strappo), con dei tasselli, dei vitoni con occhiello, inserite nei pannelli orizzontali , che fungono da solai, ma anche in quelli verticali di parete, in pratica su entrambe le fasce di piano. Si procede con la rasatura, dall'alto verso il basso, per chiudere i fori.

La disposizione degli ancoraggi è a rombo e sono distribuiti al massimo ogni 25 m². Le Fischer sono ancorate in acciaio con altissime prestazioni su calcestruzzo fessurato e non fessurato. Questo tipo è un ancorante in acciaio con marcatura CE, con altissime prestazioni su calcestruzzo fessurato e non fessurato.

L'ancorante FH II è stato il primo della sua categoria ad ottenere il Benestare Tecnico Europeo, Opzione 1 per calcestruzzo fessurato.

E' adatto a installazioni di tipo passante e a supporti come: calcestruzzo fessurato e non fessurato e pietra naturale con struttura densa e trova applicazione in strutture in metallo o acciaio, scaffalature per magazzini, ringhiere, scale, parapetti, ecc...

I vantaggi sono:

- c) Veloce da installare.
- d) Quattro differenti finiture della testa, a seconda delle esigenze di installazione.
- e) Alte resistenze a taglio, grazie alla sezione maggiorata dell'ancorante e alla qualità dell'acciaio.
- f) Fissaggio, con distanze minime dal bordo e ridotti interassi tra ancoranti, ideale per calcestruzzo fessurato e non fessurato.

L'ancoraggio ha il compito di assorbire le forze orizzontali e nel ponteggio tali forze sono da attribuire alle seguenti:

- azioni del vento (azione diretta);
- azioni dovute ai carichi verticali (azione indiretta): le linee di carico possono non coincidere con l'asse teorico del montante, o per difetti di montaggio o di produzione, per cui nascono dei momenti che vengono assorbiti dagli ancoraggi;
- azioni derivanti da elementi a sbalzo (mensole, etc...).

Si distinguono le seguenti tipologie di ancoraggio:

- ancoraggio a cravatta
- ancoraggio ad anello
- ancoraggio con barra munita di gancio
- ancoraggio a sbatacchio
- ancoraggio a vitone

A seconda della tipologia di ancoraggio, durante la verifica si deve considerare la direzione della forza che agisce e se la direzione è verso l'esterno dell'opera servita, l'ancoraggio è a tirare, in caso contrario è a puntare.

È buona norma costruire gli ancoraggi in prossimità dei traversi dei telai.



8.5 Produzione e posa in opera dei pannelli x-lam

Il pannello x-lam è un compensato multistrato composto da tre, cinque o sette strati sovrapposti di lamelle in legno abete C24 strutturale, incrociati tra loro di 90°. In questo modo i pannelli acquistano un ottimo comportamento meccanico ed un'omogenea stabilità geometrica e strutturale. Le tavole impiegate per la composizione del pannello vengono inizialmente essiccate artificialmente, piallate, unite con un giunto a pettine ed incollate in modo da rendere la tavola un corpo unico.

Il processo di giunzione viene effettuato da una linea certificata, dove vengono rispettate le dimensioni del giunto, la quantità di colla e la pressione esercitata durante la giunzione. Le dimensioni massime del prodotto finito sono 3 m di altezza e 10 m di lunghezza per uno spessore variabile in base all'utilità dello stesso, indicato sia come parete che come solaio in base alle esigenze specifiche e di finitura.



Il pannello **x-lam** viene prodotto sulla base di un progetto statico in rispetto alle norme tecniche per le costruzioni, che non concedono la possibilità di impiegare nelle costruzioni un prodotto che non sia in possesso di marcatura CE, con destinazione strutturale.

I pannelli prodotti seguono un iter di produzione ben preciso dettato dalla procedura **ETA**, di cui la ditta produttrice deve dotarsi, dove sono descritti in dettaglio tutti i rigorosi passaggi di produzione. Una volta terminata la

progettazione e definiti i dettagli tecnici della struttura, si procede con la lavorazione dei pannelli che avranno una finitura non a vista o su richiesta con finitura a vista industriale. Utilizzando i dati dei progetti esecutivi, i pannelli vengono tagliati come da disegno impiegando le più moderne tecnologie CNC e CAD-CAM, per una assoluta precisione di fresatura e taglio.

I pannelli x-lam vengono consegnati in cantiere tramite apposito mezzo, scaricati e posati con l'ausilio della gru di cantiere. Le pareti arrivano in cantiere tagliate su misura, numerate e dotate di cinghie per il sollevamento in modo da facilitarne la posa.

8.5.1 Fornitura, trasporto e deposito (stoccaggio) in cantiere

Sia i blocchi di legno massiccio che quelli in legno lamellare vengono trasportati con normali autocarri, dato il loro peso contenuto e poi stoccati in cantiere, al coperto o in zone riparate. Eventualmente si possono proteggere superiormente con teli di polietilene, possibilmente opaco, anche se tale soluzione non permette di allontanare facilmente l'umidità di condensa che si forma al di sotto, anche se, talvolta, potrebbe essere più opportuno avvolgere completamente i blocchi in modo che non risentano delle variazioni idrometriche esterne.

Lo stoccaggio deve avvenire su appoggi che evitino il contatto con il terreno e l'umidità che ne promana. Gli appoggi saranno in numero e posizione sufficienti ad evitare o a limitare i fenomeni d'imbarcamento e svergolamento degli elementi.

Se risulta piuttosto semplice operare un esame visivo degli eventuali difetti del materiale, non altrettanto risulta facile la determinazione del tenore dell'umidità del legno, controllo da eseguirsi con apposite apparecchiature. Per questa ragione al momento dell'accettazione in cantiere del materiale il direttore dei lavori può richiedere un attestato di conformità della fornitura ai requisiti ed alle caratteristiche di progetto, contenute nelle prescrizioni capitolari o negli elaborati grafici.

La presenza di fenditure e spacchi longitudinali nei blocchi non costituisce una prova di scarsa qualità della materia prima o di cattiva stagionatura, in quanto fessurazioni fino ad un centimetro di spessore per sezioni di trave portante, se radiali e non passanti, sono da considerarsi conformi ai normali processi di perdita d'umidità del legno fresco.

In sede di progettazione esecutiva è necessario controllare che non vi siano problemi di trasporto sul percorso che gli elementi di possibile notevole dimensione dovranno fare per raggiungere il cantiere.

La difficile accessibilità in cantiere, ad esempio per la presenza di strettoie, o perché la località è di montagna o la sua angustia, tipo lavori in centro storico, possono richiedere la revisione d'alcune scelte progettuali iniziali per la riduzione della dimensione longitudinale. Per tali motivi, può accadere che, nel momento in cui si persegua un certo grado di prefabbricazione in stabilimento, per velocizzare le operazioni di montaggio in cantiere, parti strutturali di un certo ingombro e, generalmente, di tipo reticolare, debbano essere preassemblate in stabilimento, smontate interamente o in conci, per facilitare il trasporto, ed infine facilmente rimontate a piè d'opera prima di essere portate in sede a livello.

In termini di verifica della competitività con altre tecnologie è bene, inoltre, accertarsi che la zona del cantiere sia in un raggio ammissibile dagli stabilimenti di produzione o dai magazzini di distribuzione, per evitare un innalzamento non previsto dei costi della fornitura.

In linea di massima sarà bene procedere al montaggio entro due settimane circa dalla consegna, per evitare che i profili possano deformarsi eccessivamente.

8.5.2 Demolizione e gestione rifiuti

Si prevede che i requisiti sempre più severi per la gestione e la limitazione dei rifiuti interesseranno tutti i produttori sempre di più nel futuro. Il settore delle costruzioni, al giorno d'oggi, produce grandi quantità di rifiuti sia in fase di costruzione che di demolizione. C'è una crescente domanda per l'accresciuto riuso e riciclaggio dei materiali da costruzione.

Dopo l'utilizzo, il legno ed i prodotti del legno, possono essere riutilizzati in altre costruzioni, riciclati, ossia fabbricati in nuovi prodotti, quali i pannelli ricostruiti, oppure sfruttati per la produzione d'energia.

Dal punto di vista della gestione dei rifiuti, il legno ha un vantaggio su molti materiali in quanto in natura viene semplicemente degradato biologicamente.

Tuttavia, il riuso o il riciclaggio o l'utilizzazione per produrre energia dovrebbero, di norma, essere preferiti allo smaltimento in discarica.

Si possono ottenere considerevoli vantaggi ambientali dall'accresciuta utilizzazione dei prodotti del legno per la produzione d'energia dopo il periodo d'impiego come materiale da costruzione.

La combustione del legno produce, in generale, emissioni simili alla combustione d'altri combustibili, ma non produce elevate emissioni di zolfo. La qualità e la quantità d'emissioni dipende dalle condizioni di combustione e per completare la combustione dei composti organici sono necessarie alte temperature. Le ceneri di legno sono, tra l'altro utili, perché possono essere usate per la fertilizzazione del terreno.

Il problema nasce nel momento in cui si brucia legno umido o se si hanno condizioni non idonee per la combustione, in quanto si possono dar luogo ad emissioni elevate di monossido di carbonio e idrocarburi.

Poiché i prodotti e le costruzioni di legno sono raramente fatti di legno puro, ma di legno combinato con molti altri materiali, ciò può rendere il riuso ed il riciclaggio difficile. Per questa ragione è necessario porre più attenzione agli aspetti di riuso e gestione dei rifiuti già nelle fasi di sviluppo, impostazione e progettazione del prodotto.

LA REALIZZAZIONE DEL COMPLESSO RESIDENZIALE A SERRAVALLE, COMUNE DI ALA (TN)

9.1 Premessa

Tra i molteplici fattori che vanno ad incidere sull'andamento dell'economia a livello mondiale vi è senza dubbio la gestione e l'utilizzo delle risorse ambientali, per cui il settore energetico legato ai prodotti petroliferi e tutte le problematiche ad esso correlate sono più che mai d'attualità; tra le più note vi sono:

- il rispetto dell' ambiente;
- l'utilizzo di materiali da costruzione bio-compatibili ed eco-sostenibili;
- le strutture a basso consumo energetico e ridotte emissioni di CO₂;
- l'alto comfort acustico interno ed esterno.

1) Rispetto dell'ambiente:

La struttura è stata concepita, progettata e costruita ponendo grande attenzione al rispetto verso la natura, avvalendosi di tecnologie costruttive altamente innovative dal punto di vista strutturale e del risparmio energetico, utilizzando materiali di tipo biologico ed ecologicamente compatibili con l'ambiente.

Nello specifico, la struttura portante della parte in legno (solai, pareti interne ed esterne) è stata realizzata in legno di abete rosso, proveniente dalle foreste del Trentino, mediante pannelli in legno lamellare a fibre incrociate (pannelli x-lam), incollate per mezzo di colle non inquinanti e prive di formaldeide.

Le caratteristiche statico-strutturali di queste pareti sono paragonabili al legno lamellare e risultano avere alte prestazioni nell'assorbimento di carichi verticali ed orizzontali, derivanti principalmente dall'azione del vento o da eventi sismici.

2) Utilizzo di materiali da costruzione bio-compatibili ed eco-sostenibili:

Una scelta oculata ed attenta è stata effettuata anche nei confronti dei materiali di rifinitura. Per la realizzazione dell'edificio è stato fatto un largo utilizzo di fibre naturali, quali la fibra di legno, come isolante termico ed acustico, di pannelli x-lam per la struttura portante, serramenti in legno, pavimenti in legno bio-compatibili di produzione trentina, gesso rivestito, anziché malte ed intonaci

trattati chimicamente, calciosilicato anidridico naturale, anziché cementi additivati, per la realizzazione dei massetti ai piani.

3) Strutture a basso consumo energetico e ridotte emissioni di CO2:

Grazie a queste tecniche costruttive, ponendo grande attenzione alla scelta dei materiali e alle modalità del loro utilizzo, è possibile realizzare una struttura a basso consumo energetico, ottemperando alle più rigorose Normative Europee in materia, superando di gran lunga quelle imposte dalla normativa vigente italiana.

La struttura presenta, dunque, un ridotto fabbisogno energetico, con una conseguente drastica riduzione di emissione di CO2 nell'atmosfera.

4) Alto comfort acustico interno ed esterno:

Particolare attenzione è stata posta anche nell'ambito dell'isolamento acustico, per cui i solai sono stati realizzati con pacchetti termo-acustici stratificati ad alte prestazioni, così come le pareti esterne ed i serramenti, mentre internamente è possibile raggiungere alti livelli prestazionali grazie all'utilizzo di strutture in gesso rivestite certificate. In questo modo gli utenti potranno vivere in un ambiente ovattato e ad alto comfort.

9.2 Caratteristiche dell'opera

Il complesso edilizio di civile abitazione, oggetto di studio, è situato a Serravalle, nel comune di Ala, in provincia di Trento ed è formato da quattro unità immobiliari (A,B,C,D), due delle quali (A e B) realizzate in muratura, mentre le altre due (C e D) in legno.

Ognuna delle quattro abitazioni è costituita da un piano terra e da un primo piano, destinato alla vendita da parte dell'Impresa Immobiliare T5, Tomasoni s.r.l., committente dell'opera, la cui esecuzione dei lavori è stata affidata all'impresa costruttrice Rasom Wood Technology.

Pur soffermandoci su uno solo dei due, in quanto identici, gli edifici interessati al nostro studio sono gli ultimi due (C e D), realizzati in legno, secondo lo schema a pannello, mediante l'utilizzo di pareti portanti e solai in legno lamellare a fibre incrociate (pannelli x-lam).

Tale sistema costruttivo a pannelli portanti così strutturati è stato adottato anche all'interno del Progetto Sofie (Sistema Costruttivo Fiemme), il quale vede la collaborazione del CNR-IVALSA (Istituto per la Valorizzazione delle Specie

Arboree), della Provincia Autonoma di Trento e di numerosi centri di ricerca internazionali, il cui obiettivo è quello di migliorare la tecnologia nel settore delle costruzioni, utilizzando il legno a fini strutturali, giungendo così ad un miglioramento della qualità abitativa degli edifici, perché utilizza il legno, la materia naturale per eccellenza.

Le caratteristiche di resistenza dei materiali impiegati sono relative non solo ai pannelli portanti di tipo x-lam, ma anche agli elementi strutturali costituenti la copertura ed ad altri elementi strutturali.

Le caratteristiche statico-strutturali di queste pareti sono paragonabili al legno lamellare e risultano avere alte prestazioni nell'assorbimento di carichi verticali ed orizzontali, derivanti principalmente dall'azione del vento o da eventi sismici.

La stratigrafia costituente i vari elementi costruttivi portanti di tipo x-lam utilizzati è la seguente:

Pareti esterne: pannello a 5 strati ($17+17+17+17+17= 85$ mm di spessore);

Pareti interne: pannello a 3 strati ($27+27+27 = 81$ mm di spessore);

Solai: pannello a 5 strati ($33+33+33+33+33 = 165$ mm di spessore).

La struttura è stata concepita, progettata e costruita ponendo grande attenzione al rispetto verso la natura, utilizzando tecnologie costruttive altamente innovative, dal punto di vista strutturale e del risparmio energetico, ricorrendo a materiali di tipo biologico ed ecologicamente compatibili con l'ambiente.

Per quanto riguarda la parte degli edifici in legno, l'orditura principale della copertura è stata realizzata mediante travi in legno lamellare, mentre quella secondaria mediante legno bilama.

La struttura portante dei solai e le strutture portanti verticali (pareti interne ed esterne) sono state realizzate in legno di abete rosso, con pannelli in legno lamellare a fibre incrociate (pannelli x-lam), incollate per mezzo di colle non inquinanti e prive di formaldeide.

La copertura è stata realizzata mediante un'orditura principale, costituita da travi in legno lamellare (trave di colmo e arcarecci), mentre l'orditura secondaria mediante travetti in legno bilama, mentre l'intero edificio poggia su di un solaio in cemento armato.

Struttura completa in oggetto:



Pareti portanti della struttura in oggetto:



Noto che la struttura è di tipo a pannello, i pannelli portanti in legno lamellare (x-lam), realizzati mediante l'incollaggio di lamelle, poste alternativamente a fibre incrociate, i collegamenti tra questi pannelli vengono realizzati tramite l'utilizzo di elementi in acciaio (angolari tipo BMF), fissati alla parete mediante viti e chiodi, meglio se ad aderenza migliorata.

Particolarmente importante è il collegamento della struttura in legno al sottostante basamento in cemento armato, fondamentale per quanto riguarda le sollecitazioni derivanti da azioni sismiche e composto da una staffa ad "L", chiamata holdown , collegata a terra mediante tasselli e fissata alla parete mediante chiodi (fig.1).

In particolare, è stato dimensionato rispettando la gerarchia delle resistenze, progettato per la rottura lato legno (rifollamento) e preservando il tassello lato cls.

Questi concetti sono suffragati da prove sismiche effettuate in Giappone, nel laboratorio di Kobe, dove è presente la più grande piattaforma a livello mondiale per test sismici.

Tali prove sono state eseguite in due momenti diversi e su due strutture differenti: nel 2006 è stato fatto un test su un edificio di tre piani, costruito con questa tipologia strutturale, sottoposto a due scosse sismiche, riproducenti rispettivamente il terremoto di Kobe (scossa con accelerazione pari a 0,8 g) ed il terremoto di Nocera Umbra (scossa con accelerazione pari a 1,2 g). ed un anno più tardi un ulteriore test sismico su una struttura di 7 piani, per un'altezza pari a 24 m.

Ai fini del dimensionamento sono state considerate le sollecitazioni derivanti dal peso proprio e dai carichi permanenti portati, nonché dai carichi accidentali e dalle azioni ambientali e naturali: azione del vento, carico neve e azione sismica, calcolate secondo le disposizioni delle Nuove Norme Tecniche, dettate dal D.M. del 14 gennaio 2008.

Il calcolo e la verifica degli elementi strutturali si effettua secondo il metodo degli Stati Limite.



Prima



Dopo

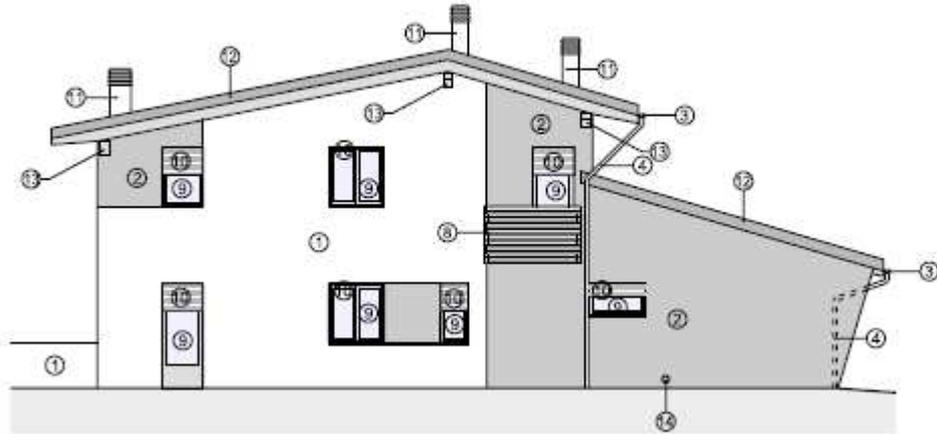
Fig. 1: Collegamenti a terra utilizzato nella prova (prima e dopo il test sismico)

9.3 Viste virtuali del complesso residenziale di Serravalle e prospetti dell'edificio C (o D)





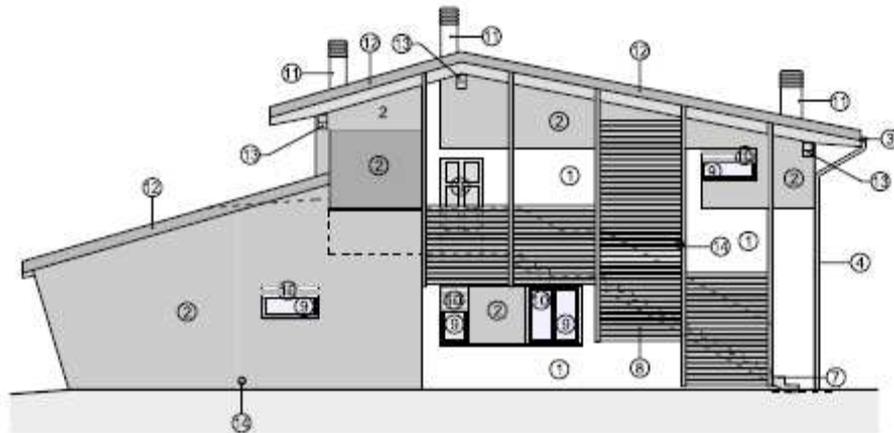
FRONTE SUD-OVEST
 SCALA 1:100



FRONTE SUD-EST
 SCALA 1:100

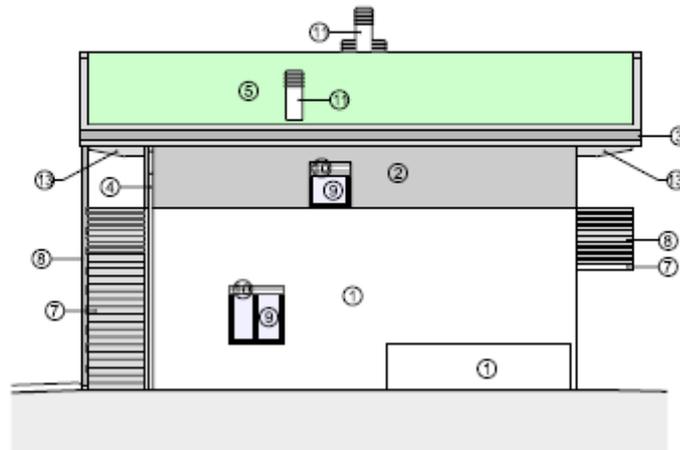


FRONTE NORD-EST
 SCALA 1:100



FRONTE NORD-OVEST

SCALA 1:100



LEGENDA:

- ① PITTURA MURARIA COLOR CREMA
- ② PITTURA MURARIA ROSSO MATTONE
- ③ CANALE DI GRONDA IN LAMIERA PREVERNICIATA GRIGIA sviluppo 40 cm
- ④ TUBO PLUVIALE IN LAMIERA PREVERNICIATA GRIGIA ø 100
- ⑤ COPERTURA A VERDE
- ⑥ COPERTURA IN TEGOLA-COPPO COLOR COTTO
- ⑦ SCALA ESTERNA E POGGIOLI IN LEGNO
- ⑧ PARAPETTI E RINGHIERE IN LEGNO A DOGHE ORIZZONTALI
- ⑨ SERRAMENTO ESTERNO IN LEGNO COLOR BIANCO
- ⑩ AVVOLGIBILE IN ALLUMINIO COLOR MARRONE SCURO
- ⑪ TORRETTA CAMINI E SFIATI TINTEGGIATE COLOR CREMA
- ⑫ BORDATURA IN LEGNO DI FINITURA
- ⑬ ELEMENTI STRUTTURALI COPERTURA IN LEGNO
- ⑭ GRIGLIA ø 160 PER APPORTO ARIA COMBURENTE
- ⑮ BANCALE IN LAMIERA DI ALLUMINIO

9.4 Processo costruttivo e modalità di collegamento fra i vari componenti strutturali

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

Le strutture di fondazione vengono realizzate o con una platea o con travi rovesce in c.a. Se viene utilizzata una platea di fondazione è buona norma realizzare sopra di essa un piccolo cordolo in c.a., oppure in legno di specie durevole, per evitare il contatto diretto delle pareti di legno con la platea stessa.

Se le strutture di fondazione fuoriescono dal livello del terreno il cordolo può essere evitato.

In tutti i casi, tra la struttura di legno e la fondazione in ca. va interposto uno strato di guaina bituminosa, che deve risvoltare sulla struttura di fondazione e non sulla parete di legno, per evitare le trappole di umidità.

Il cordolo di legno, quando previsto, deve essere realizzato con una specie legnosa durevole (ad esempio lancia) e può essere di legno massiccio o lamellare.

E' bene che non superi un'altezza di 100-120 mm per non rendere difficoltoso il successivo collegamento delle pareti alle fondazioni generalmente effettuato con piastre metalliche angolari. Talvolta, fra la parete e le fondazioni, oltre alla guaina, viene posizionato un ulteriore *strato di gomma*, utilizzato anche in tutte le zone di contatto fra le pareti ortogonali e fra pareti e solaio, usato non solo con la funzione di impedire il passaggio dell'aria attraverso le zone di contatto, ma anche come smorzatore acustico (fig.2).



Fig. 2: Strato di gomma fra parete e cordolo

Il collegamento delle pareti del piano terra alle fondazioni deve svolgere una duplice funzione: impedire che per effetto delle azioni orizzontali (vento o sisma), agenti nel piano stesso della parete e, in generale, su tutto l'edificio, si possa verificare sia il ribaltamento che lo scorrimento rispetto alle fondazioni.

Il ribaltamento viene solitamente contrastato con delle piastre angolari allungate, dette comunemente holdown (dall'inglese hold down, ossia appunto tieni giù). Gli holdown vengono collegati alle pareti di legno con chiodi o viti e alle fondazioni in calcestruzzo con delle barre filettate in acciaio, inserite in fori sigillati con malta cementizia o epossidica.

Devono essere posizionati in corrispondenza dei limiti estremi delle pareti e in prossimità delle aperture. I chiodi, meglio se ad aderenza migliorata, e le viti di collegamento alla parete hanno diametri variabili dai 3 ai 6 mm e barre filettate dai 12 ai 18 mm, a seconda del tipo di holdown e dei carichi in gioco.

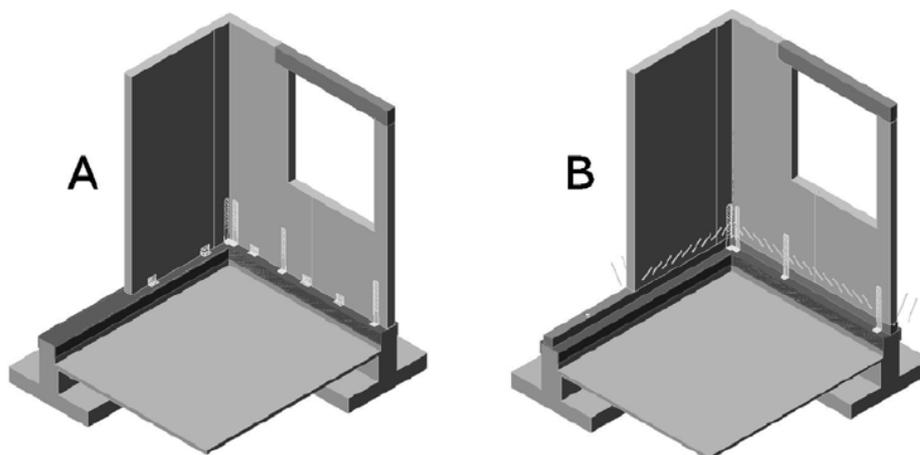


Fig. 3: Collegamento delle pareti alle fondazioni: direttamente al cordolo di cls (A) o mediante l'interposizione di un cordolo di legno (B)

Lo scorrimento, invece, può essere contrastato in vari modi, a seconda del metodo di collegamento delle pareti alle fondazioni.

Nel caso di presenza di cordolo di legno di interposizione fra le pareti e la fondazione, deve essere previsto un doppio collegamento del cordolo di legno alle fondazioni, realizzato sempre con barre filettate, e della parete al cordolo di legno, garantito con viti auto-foranti, del diametro di 8-10 mm, inserite inclinate sui due lati della parete.

Nel caso, invece, di parete collegata direttamente al cordolo di fondazione, solitamente si prevedono delle staffe angolari di acciaio, collegate con chiodi o viti alle pareti, dello stesso diametro delle viti autoforanti e sempre con tirafondi in acciaio alle fondazioni, di diametro 12-18 mm.



Fig. 4: Holddown sugli spigoli dell’edificio e in corrispondenza delle aperture (di presidio al sollevamento)

Le pareti possono essere costituite da pannelli interi per lunghezze fino a 16 m e con una altezza pari all’altezza di interpiano, preparati in stabilimento mediante il taglio con macchine a controllo numerico e già completi di aperture.

Una volta arrivate in cantiere vengono issate con mezzi meccanici di sollevamento e collegate fra loro e alle fondazioni. il processo costruttivo è molto veloce, sebbene il trasporto possa risultare più difficoltoso soprattutto in aree di cantiere con accessibilità limitata.

L’utilizzo di pareti intere è in diversi casi la soluzione migliore in termini di velocità di montaggio e per alcune situazioni progettuali particolari, come ad esempio il caso di pareti che fuoriescono a sbalzo rispetto al piano inferiore.

In alternativa, soprattutto per esigenze di trasporto e facilità di maneggevolezza e montaggio in cantiere, vengono suddivise in pannelli di larghezze variabili a seconda del produttore fino ad un massimo di 3m e collegate fra loro con la realizzazione di giunti verticali. Questi ultimi vengono solitamente eseguiti con l’interposizione di una striscia di pannello multistrato a base di legno che può essere inserita in apposite fresature internamente alla parete o su una sua faccia.

Talvolta viene realizzato anche un giunto a mezzo legno a tutta altezza, mentre il collegamento avviene sempre mediante l’inserimento di viti auto-foranti di diametro variabile dai 6 ai 10 mm o chiodi di 3 mm di diametro e interasse variabile in funzione dei carichi (fig.5).

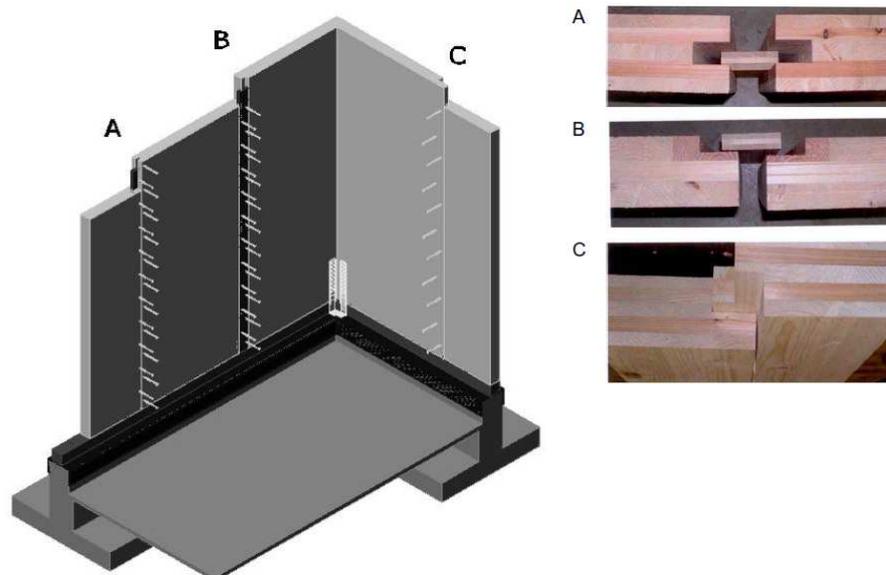


Fig. 5: Tre diversi modi di realizzare il giunto verticale fra pannelli parete;

- **A: con striscia di pannello multistrato inserita in fresatura interna ai pannelli e viti;**
- **B: con striscia di pannello multistrato inserita in fresatura sul lato interno parete e viti;**
- **C: con giunto a mezzo legno a tutta altezza e viti.**

La sperimentazione scientifica, finora effettuata, ha dimostrato che edifici realizzati con pareti composte da più pannelli di larghezza massima fino a 3 m e collegati verticalmente con giunti meccanici, se progettati nel pieno rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze, dimostrano un livello di duttilità maggiore e, quindi, una maggiore capacità dissipativa dell'energia trasferita dal sisma, rispetto a edifici formati da pareti intere.

Le norme attualmente in vigore indicano un unico valore del fattore di struttura ($q = 2$) da impiegare nella progettazione, utilizzabile per entrambi i casi di pareti intere o pareti a pannelli.

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

Dato che l'inserimento nello strato "corretto" non è sempre agevole e preciso (caso C, fig.6), la cosa migliore è realizzare il collegamento con la vite infissa con

asse leggermente inclinato rispetto alla direzione del piano della parete, come nei casi D ed E, in modo da essere assolutamente sicuri di andare a intercettare gli strati di tavole a fibratura ortogonale e dell'efficacia del collegamento.

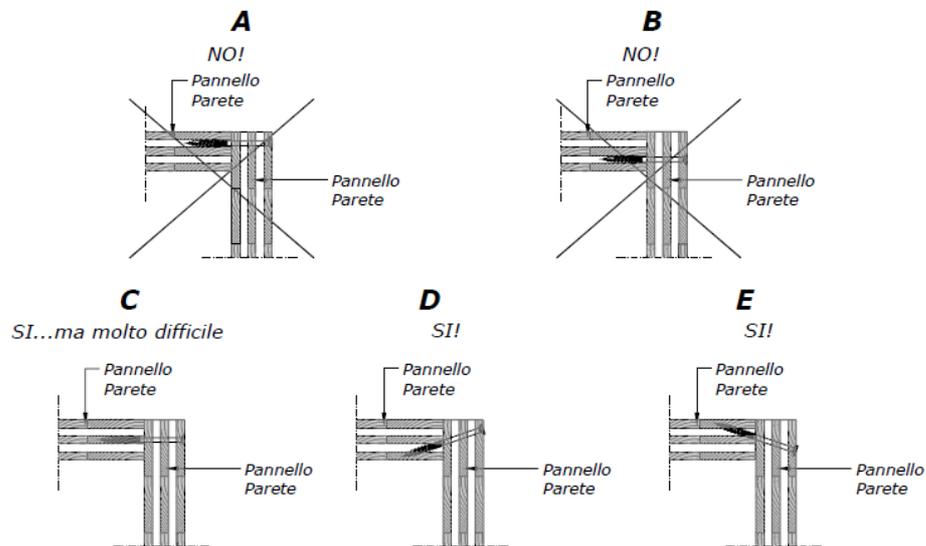


Fig. 6: Collegamento verticale fra pannelli parete ortogonali con viti auto-foranti

Una volta montate le pareti del piano terra è possibile posare il primo solaio, formato da pannelli a strati incrociati di spessore solitamente maggiore di quello delle pareti, ovviamente in funzione delle luci e dei carichi, che poggiano sulle pareti del piano inferiore e su travi di legno lamellare quando previste.

Anche per il solaio, per esigenze di trasporto e montaggio, si preferisce il montaggio a pannelli di larghezza inferiore ai 3 m, che vengono poi collegati fra loro mediante giunti orizzontali, realizzati con le stesse tecniche utilizzate per la realizzazione dei giunti verticali fra pannelli parete e alle pareti sottostanti, sempre mediante l'utilizzo di viti auto-foranti.

Realizzato il primo solaio, il processo costruttivo si ripete, ossia il primo solaio fa da piattaforma per la realizzazione dei piani successivi. Le pareti del primo piano devono essere collegate al solaio sottostante sempre con mezzi di collegamento meccanico, piastre metalliche angolari, chiodi e viti, di presidio al sollevamento e allo scorrimento, con le stesse modalità del collegamento alle fondazioni.

Per il sollevamento si possono continuare ad utilizzare gli stessi holdown utilizzati in fondazione, in questo caso posti a coppie di due, uno sopra e uno sotto

il solaio, collegati da un bullone, per garantire la trasmissione dell'azione di sollevamento dalla parete del piano superiore a quella del piano inferiore.

In alternativa possono essere utilizzate delle più pratiche bande forate da collegare esternamente alla parete esterna, con chiodi sia alla parete del piano inferiore che a quella del piano superiore.



Fig. 7: Angolare di collegamento (staffe) fra la parete ed il sottostante solaio e bande forate sul lato esterno dell'edificio

La copertura può essere realizzata a pannelli, oppure con metodo tradizionale, ovvero con travi principali, secondarie e sovrastante tavolato a doppio strato incrociato o pannello a base di legno. Il collegamento, nel caso di copertura a pannelli, avviene come per i solai, mentre nel caso di copertura a travi, il metodo di prefabbricazione in stabilimento dei pannelli, consente di realizzare con estrema precisione le sedi di alloggio per le travi di copertura, che poi possono essere più praticamente collegate con l'utilizzo sempre di viti auto-foranti oppure di viti a doppio filetto o, in alternativa, anche con le classiche scarpe metalliche, che però in caso di edifici pubblici, soggetti ai requisiti di resistenza al fuoco, vanno adeguatamente protette con pannelli di rivestimento (fig.8).

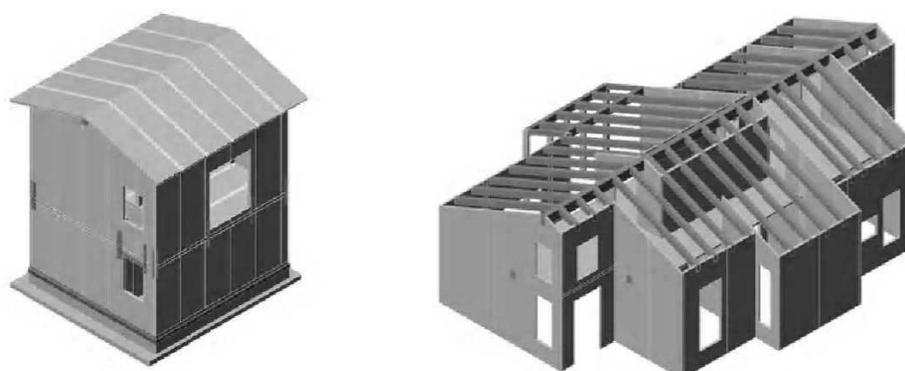


Fig. 8: Copertura a pannelli e copertura tradizionale

9.5 Materiali isolanti e complementari ecologici

1. Fibra di legno a media densità (Pavatherm): per la produzione vengono utilizzati esclusivamente residui di legno di scarto delle segherie in forma di sciaveri e schegge di legno di conifera. Il pannello è dotato di un elevato potere di accumulo del calore con una minima conducibilità termica e garantisce un'ottima protezione dal freddo invernale e un'eccellente protezione dal caldo estivo. Offre un tipo di costruzione traspirante per un clima abitativo piacevole; inoltre è un materiale ecologico di qualità controllata, raccomandato dall'IBR (Istituto di Biologia Edile di Rosenheim, Germania). Pavatherm isola sensibilmente dal rumore e viene anche messo in opera per la protezione antincendio in elementi costruttivi antincendio.

2. Fibra di legno ad alta densità (Diffutherm): il pannello isolante Diffutherm si compone di vari strati di fibre di legno. Avendo una speciale densità, gli strati esterni consentono una notevole aderenza del rinzafo ed offrono le migliori condizioni per l'applicazione di sistemi di intonacatura.

Il fabbricante rinuncia volutamente all'uso di materiali ignifughi, fungicidi e pesticidi sintetici. La lignina, resina propria del legno, funge da legante naturale, conferendo al pannello isolante la necessaria stabilità dimensionale senza aggiunta di leganti artificiali. Il prodotto può essere riutilizzato anche dopo decenni e al momento dello smaltimento, grazie ai suoi componenti naturali, può essere sia riciclato che sfruttato come fonte di energia termica.

3. Granulato di vetro cellulare sfuso costipato (Foamglas): si tratta di un sottofondo ecologico per l'isolamento termico, adatto per pavimentazioni civili e industriali, realizzato in vetro cellulare, di colore grigio, riciclabile al 100%, resistente alla compressione, con granuli da 30 a 60 mm, con assorbimento idrico quasi nullo e classe di infiammabilità A1, ideale per l'isolamento di solai contro terra, grazie alle sue proprietà di materiale stabilizzante dei terreni con scarse caratteristiche portanti, oltre che drenante, impermeabile, imputrescibile, resistente al gelo ed alla compressione.

4. Lana di canapa (Thermo-hanf) : viene fornita in forma di pannelli o rotoli e si adatta all'isolamento di tetti, pareti e pavimenti. Garantisce sia l'isolamento invernale contro il freddo che l'isolamento estivo contro il caldo. Le sue buone

proprietà di diffusione garantiscono una regolazione automatica dell'umidità, che assicura così un clima abitativo sano e piacevole.

Poiché le fibre di canapa non contengono proteine, non c'è bisogno di un trattamento contro tarme e coleotteri. Può essere impiegato nella realizzazione di contro-pareti, pareti divisorie, controsoffitti, solai con travatura in legno e risanamento termoacustico di tetti in legno e laterocemento.

5. Membrana di facciata (Stamisolfa): è un materiale di impermeabilizzazione adatto per facciate aperte o ventilate, costruite con carpenteria di legno o di metallo. La membrana è aperta alla diffusione e si comporta, quindi, come la pelle umana, in quanto garantisce contemporaneamente una perfetta impermeabilizzazione all'acqua e una eccellente attività traspiratoria dell'edificio.

Essendo una membrana di facciata a base poliacrilica, aperta alla diffusione, ermetica al vento, resistente agli agenti atmosferici e resistente ai raggi UV, protegge durevolmente qualsiasi opera.

Economica sia nell'acquisto che nella posa, migliora le condizioni climatiche per coloro che abitano e fa risparmiare preziosa energia. Il velo composito di poliestere e vetro mantiene la massima resistenza meccanica e stabilità superficiale, mentre lo strato di poliacrilico garantisce una resistenza duratura ai raggi UV, lunga durata di vita e impermeabilità all'acqua e permeabilità al vapore.

9.6 Criteri di verifica

1.Verifiche degli elementi strutturali in termini di resistenza: necessarie per le costruzioni di classe III o IV, per limitare i danneggiamenti degli elementi strutturali, consistono nel verificare che il valore di progetto di ciascuna sollecitazione, calcolato in presenza delle azioni sismiche corrispondenti allo SLD (Stato Limite di Danno), con un coefficiente h pari a $2/3$, sia inferiore al corrispondente valore della resistenza di progetto. Ogni singolo elemento strutturale è stato verificato agli SLU (Stati Limite Ultimi), sotto l'azione sismica corrispondente allo SLV (Stato Limite di salvaguardia della Vita), con un coefficiente di struttura pari a 1,6.

Tale condizione di verifica è, comunque, sempre peggiorativa rispetto a quella prescritta per la verifica degli stessi elementi in termini di resistenza agli SLE (Stati Limite di Esercizio).

Si ritengono, quindi, verificati allo SLE in termini di resistenza dal momento in cui risultano verificati allo SLU.

2.Verifiche degli elementi strutturali in termini di contenimento del danno agli elementi non strutturali: secondo quanto disposto dalle norme, è necessario, per gli edifici in classe d'uso I e II, verificare che l'azione sismica di progetto non produca danni agli elementi costruttivi non aventi funzione strutturale, tali da rendere la costruzione temporaneamente inagibile (edifici ricadenti in classe d'uso I o II) o non operativa (edifici ricadenti in classe d'uso III o IV).

La medesima normativa al punto dispone che sono esclusi da tale verifica i tamponamenti di spessore inferiore ai 100 mm.

Nel caso in esame gli elementi costruttivi non aventi funzione strutturale sono costituiti da tramezze in cartongesso, le quali presentano uno spessore inferiore ai 100 mm, ragion per cui non si sottopongono a tale verifica.

9.7 Normative di riferimento

Il calcolo strutturale è stato eseguito in conformità con quanto disposto dalle seguenti normative:

* D.M. 12 febbraio 1982 del Ministero dei LL. PP.: “Aggiornamento norme tecniche per carichi e sovraccarichi”;

* Circolare del Ministero dei LL.PP. n° 156 del 4 luglio 1996, relativa al D.M. 16 gennaio 1996: "Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi";

* Circolare del Ministero LL.PP. n° 18591 del 9 novembre 1978: “Istruzioni per i carichi, sovraccarichi e criteri per la verifica di sicurezza delle costruzioni”;

* Legge 2 febbraio 1974 n° 64: “Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”;

* D.M. 16 gennaio 1996: “Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi”;

* Circolare del Ministero dei LL.PP. del 24 giugno 1993 n° 37406/STC, relativa alla Legge 5 novembre 1971 n° 1086: “Istruzioni relative alle norme tecniche per l’esecuzione delle opere in c.a. normale e precompresso e per le strutture metalliche”, di cui al D.M. 14 febbraio 1992;

* UNI ENV 1993-1-1, Eurocodice 3 , “Progettazione delle strutture in acciaio”, Parte 1-1: “Regole generali e regole per gli edifici”;

* D.M. 14 febbraio 1992: “Norme tecniche per le opere in c.a. normale e precompresso e per le strutture metalliche”;

* D.M. 24 gennaio 1986: “Norme tecniche relative alle costruzioni sismiche”;

* D.M. n° 18407 d.d. 3 ottobre 1972: “ Criteri per la verifica della sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi”;

* Legge 5 novembre 1971 n° 1086: “Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche”, EN 1995-1-1-2003, Eurocodice 5: “Progettazione delle strutture in legno”, Parte 1-1: “Regole generali e regole per gli edifici”;

* Circolare 2 febbraio 2009 n° 617: “Istruzioni per l'applicazione delle nuove Norme Tecniche per le costruzioni”, di cui al D.M. 14 gennaio 2008;

* D.M. 14 gennaio 2008: “Approvazione delle nuove Norme Tecniche”, pubblicato nel Supplemento Ordinario della G.U. n° 29 del 4 febbraio 2008;

* UNI EN 1998-1, Eurocodice 8: “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica”, Parte 1: “Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici”, marzo 2005;

* Ordinanza n° 3274 del 20 marzo 2003, relativa alle costruzioni in zona sismica e successive modifiche ed integrazioni (Ordinanza n° 3431).

9.8 Visita in cantiere

Nel periodo che risale a fine novembre 2010, grazie al Prof. Ceccotti, ho potuto assistere ad alcune fasi di realizzazione dell'opera sopra menzionata, progettata dall'Ing. Croce ed eseguita dalla Ditta Rasom.

Durante la visita in cantiere di ogni soluzione tecnologica ho potuto verificare personalmente gli effetti sul piano dell'efficienza energetica, acustica, del comfort e di quanto teoricamente avevo già avuto modo di apprendere riguardo il sistema costruttivo a pannelli x-lam, partendo dalle fondazioni, per poi passare alle pareti portanti esterne ed interne, ai tramezzi e agli alloggiamenti degli impianti, fino ai solai e alle aperture per gli infissi.

A) Fondazioni:

Il principale problema dell'attacco a terra di un qualsiasi edificio in legno è la protezione di questo materiale igroscopico dall'umidità, trattenuta per l'accumulo che potrebbe verificarsi in seguito alla risalita dal terreno dell'acqua, per via della capillarità o per bagnatura diretta.

Tale umidità, imprigionata nel legno, senza possibilità di migrare all'esterno del materiale strutturale, come abbiamo già avuto modo di evidenziare nei precedenti capitoli, è uno dei principali fattori di degrado del materiale legnoso, per cui come gli edifici tradizionali di montagna, caratterizzati da un attacco a terra in pietra e dai piani superiori in legno, anche quelli realizzati coi pannelli x-lam non sfuggono a severe precauzioni nei confronti dell'acqua.

Così le fondazioni vengono realizzate in calcestruzzo armato, oppure opportunamente isolate termicamente, impermeabilizzate e protette sia dall'umidità del terreno che dalle infiltrazioni di gas radon, nocivo alla salute umana. Nel caso vi sia questo particolare pericolo si opta per un solaio controterra, che abbia un sottostante vespaio aerato, realizzato in igloo, isolato termicamente, con XPS ad alta densità, oppure si adopera una platea in cls armato su un letto di vetro cellulare.

Un altro problema da risolvere è quello dei ponti acustici, che si hanno in corrispondenza delle connessioni dirette fra gli elementi rigidi, ad esempio fra il cordolo in cls e la soprastante parete in x-lam, e delle fessure attraverso cui può passare dell'aria. La soluzione al primo problema è data dall'interposizione di uno strato di gomma resiliente fra gli elementi rigidi, mentre al secondo dal la sigillatura dei giunti con del nastro di tenuta all'aria.

B) Pareti portanti esterne ed interne:

L'Unione Europea sta emanando nuove norme sempre più orientate verso l'obiettivo del "Zero Energy Building", ossia del modello di edificio energeticamente indipendente, dotato di sistemi di captazione passiva ed in grado di cedere parte dell'energia guadagnata ai sistemi vicini. A tal riguardo, la certificazione energetica a cui fa riferimento il cantiere oggetto di studio è quella di Casaclima ed è dotato di pareti verticali con un isolamento a cappotto, di lana di legno, spesso almeno 16 cm ed un doppio strato di pannelli.

La sigillatura dei giunti strutturali con nastro di tenuta all'aria, a cui si aggiunge il telo di tenuta al vento e all'acqua, che riveste esternamente il cappotto, contribuisce a limitare le dispersioni energetiche per infiltrazioni di aria dall'esterno, oltre a migliorare l'acustica, come lo strato di gomma interposto nei giunti strutturali rigidi.

C) Tramezzi e alloggiamenti degli impianti:

Le pareti divisorie interne non portanti possono essere teoricamente eseguite con qualsiasi tecnica, ma in un edificio in x-lam, costituito da elevazioni interconnesse a secco, sono preferibili tramezzi realizzati pure a secco, con struttura leggera e all'occorrenza smontabili, quali le pareti in cartongesso a struttura metallica. Queste hanno il pregio di essere all'interno sufficientemente cave, in modo da poter ospitare degli impianti e di poter realizzare intercapedini di spessori variabili, a seconda delle esigenze, inoltre, rendono continua la barriera alla propagazione di un eventuale incendio.

Il materiale di riempimento dell'intercapedine può essere un isolante poco denso come la lana di canapa, ma che funge da buon isolamento dal rumore.

Il rivestimento in doppia lastra di cartongesso di due spessori differenti ha la funzione di contribuire allo smorzamento acustico.

I tramezzi leggeri di cartongesso o gesso fibra, in pratica sono coerenti con la tecnologia del cross-lam, in quanto consentono un'organizzazione flessibile degli spazi interni, così come l'altrettanta flessibilità che permettono i pannelli x-lam nel concepire le strutture.

D) Solai:

Gli edifici in x-lam, per via di quanto detto a proposito delle fondazioni e del problema dell'umidità, hanno al piano terra un solaio in cemento, mentre gli eventuali solai di interpiano le solette. Talvolta le coperture sono realizzate con pannelli x-lam, per cui le luci di solaio possono raggiungere anche i 13,60 m.

Per i tetti a falde la Ditta Rasom si avvale del Sistema Tetto Fassa, consistenti in travi lignee inclinate, che sorreggono un tavolato destinato a supportare lo

strato di isolamento, mentre l'acqua piovana, allontanata dagli elementi lignei tramite la scossalina metallica, viene convogliata nella grondaia.

Per quanto riguarda gli altri solai e le solette, i cui giunti possono essere realizzati con un incastro a maschio-femmina, come nel caso di balconi esterni, o per sospensioni alle pareti, possono essere necessari dei rinforzi strutturali isolati, come i pilastri lignei.

Nel caso di solette esterne, è bene curare l'allontanamento dell'acqua dai cross-lam, mediante scossaline metalliche e opportune pendenze, oltre che con rivestimenti idrofughi del materiale strutturale.

Per le strutture lignee, data l'importanza degli aspetti acustici, poiché non esiste ancora un software che quantifichi i ponti acustici, sono fondamentali le prove sperimentali acustiche in cantiere, ad esempio con un fonometro, per testare l'isolamento acustico fra ambienti separati da un solaio.

E) Infissi:

Le chiusure vetrate costituiscono sempre un punto debole per le dispersioni di calore, motivo per cui è necessario optare per vetri con ricoprimento basso emissivo, oltre che curare i dettagli di telaio e controtelaio.

Buone prestazioni si ottengono con infissi a telaio ligneo, meglio se rivestiti esternamente da lamiera di alluminio per l'allontanamento, una funzione espletata assieme alle scossaline con rompi goccia, poste sopra e sotto ogni apertura..

Per evitare i ponti termici è bene che il falso telaio sia fissato alla struttura a ridosso dell'isolante e che ne sia parzialmente ricoperto.

Uno dei vantaggi dei pannelli strutturali in x-lam è la semplicità nella creazione di aperture e a tal proposito è sufficiente predisporre il pannello tagliandolo completo dei fori di porte e finestre, senza ricorrere a pilastri o architravi aggiuntive in corso d'opera, come avviene nelle costruzioni in muratura.

In presenza di porte esterne, ai lati dell'apertura sono presenti gli holdown, che fungono da connettori strutturali fra parete e solaio, mentre la soglia costituisce un delicatissimo punto critico per i ponti acustici se viene connessa rigidamente.

I numerosi giunti, che vengono creati in corrispondenza degli infissi, rendono necessaria un'abbondante sigillatura con nastro di tenuta all'aria, per evitare la penetrazione del rumore.

9.9 Documentazione fotografica

Nel corso della visita del cantiere di Serravalle, in fase di esecuzione dei lavori, ho potuto raccogliere il seguente materiale fotografico, che testimonia, quanto visto nel paragrafo precedente e quindi il corretto utilizzo del sistema costruttivo a pannelli x-lam, la scelta ottimale dei collegamenti tra materiali isolanti e pannelli portanti e non, esterni ed interni, la suddivisione degli ambienti, il posizionamento degli impianti e tutto il ciò che caratterizza il cantiere a secco, nel caso di costruzioni in legno, anche dal punto di vista dei ponteggi e della sicurezza nel cantiere. Certamente quello che più mi ha colpito è stato l'ordine in cui si trovava il cantiere ed i tempi, decisamente più fluidi, di realizzazione dell'opera, rispetto a quelli delle più tradizionali costruzioni in muratura.



Ponteggi utilizzati





**Isolamento termico in prossimità della quota del terreno
(telo traspirante di tenuta all'acqua)**



Pannello x-lam a 7 strati utilizzato per la parete esterna



Materiale isolante utilizzato (lana di roccia e di legno)



Particolare della disposizione dei pannelli dell'isolamento a cappotto



Collegamento tra i materiali isolanti della parete esterna con particolari rondelle che non ne danneggiano il tessuto



Viti



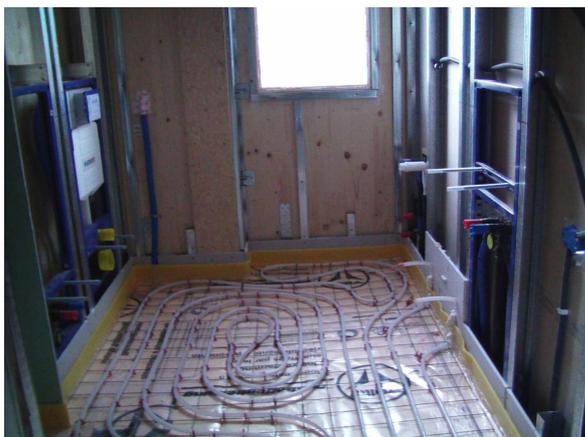
Pannelli isolanti



Parete interna rivestita di cartongesso contenuto dai profili metallici



Disposizione dei profili metallici a sostegno del rivestimento interno di lastre di cartongesso e alloggiamento degli impianti



Disposizione a terra dell'impianto di riscaldamento (zona bagno)



Posizionamento della canna fumaria



Fori per la collocazione dell'impianto elettrico





Holdown fissati ai solai con un bullone e alla parete verticale con 12 chiodi



Particolare bullone



Squadrette angolari di connessione con nastro di tenuta all'aria



Pareti interne divisorie con pannelli x-lam a 3 strati



Aperture per finestre concorrenti in uno spigolo



Esempio di solaio



Particolare solaio bianco/grigio



Giunti fra le pareti portanti x-lam e la struttura di copertura



Esempio di copertura esterna finale con intonaco



Spazio sottostante destinato ai posti auto



Gru per il sollevamento ed il posizionamento dei pannelli x-lam

CONCLUSIONI

Il cross-lam, pur derivando dal legno massiccio, che ne costituisce la materia prima, in genere, è più resistente alle sollecitazioni meccaniche, in quanto la composizione a più strati incrociati, ovvero l'artificio della disposizione “bidirezionale” della fibratura fa sì che ogni pannello sia stabile nelle due direzioni del piano. L'instabilità dovuta a rigonfiamento e ritiro del legno, inoltre, è trascurabile, poiché i movimenti del legno, disposto in una direzione, sono compensati da quelli del legno disposto perpendicolarmente.

Grazie a tale effetto strutturale bidirezionale, il pannello di x-lam, usato come elemento di solaio, può essere immaginato come una griglia di travi, disposte senza discontinuità nelle due direzioni ortogonali del piano, sicché è possibile la distribuzione dei carichi su tutta la superficie, pur con spessori relativamente esigui. Lo stesso discorso vale per il pannello in x-lam usato come elemento di parete verticale, in quanto risponde come una lastra verticale massiccia con architravi “incorporate” in corrispondenza delle aperture; per questo motivo.

In definitiva, una parete verticale in x-lam può essere considerata come una trave di grandi dimensioni, di resistenza e rigidezza ottimali e ne consegue che si possono realizzare solai sospesi alla parete.

I vincoli sono realizzati tramite semplici connessioni metalliche che vanno, tuttavia, sempre attentamente calcolate, affinché la struttura possa considerarsi sicura anche nell'eventualità di scosse sismiche di elevata magnitudo.

Se a ciò si sommano le caratteristiche di resistenza al fuoco e la straordinaria flessibilità compositiva nella progettazione degli spazi, si completa il quadro dei principali pregi di una struttura in pannelli x-lam, cui vanno aggiunti gli aspetti di eco-compatibilità del materiale e di risparmio energetico, conseguibile con il sistema costruttivo basato su tale tipo di struttura.

La stratigrafia di una qualunque parete con struttura in x-lam, infatti, supera enormemente quella di una parete in laterizi dal punto di vista delle prestazioni energetiche. Ricorrendo al cross-lam, dunque, si realizzano pareti complessivamente meno spesse e che isolano molto di più termicamente, nel rispetto della normativa energetica e con effetti molto positivi sul comfort degli abitanti.

Se, però, i ponti termici di un edificio sono piuttosto facili da eliminare in fase di progettazione, ponendo attenzione alla continuità dell'isolamento a cappotto su tutto l'involucro e al corretto posizionamento degli infissi, più difficile è

l'eliminazione dei ponti acustici, onnipresenti a causa, ad esempio, della necessità di operare fori nella struttura per il passaggio degli impianti, insieme ai quali passa anche l'aria, conduttrice di suono.

E' comunque possibile limitare il numero dei ponti acustici curando la stratigrafia, in modo da accostare gli uni agli altri materiali con impedenza acustica diversa, creando discontinuità fra gli elementi strutturali rigidi mediante

l'interposizione di uno strato resiliente, sigillando i giunti strutturali con del buon nastro di tenuta all'aria.

Riguardo, invece, alla durabilità di una struttura in x-lam, si può concludere che essa è illimitata, a condizione che il materiale venga difeso dagli agenti di degrado, tra i quali l'umidità, che non deve mai restare imprigionata nel legno, i funghi e gli insetti.

a) Vantaggi dei pannelli x-lam:

- Ottimizzazione delle tempistiche produttive
- Adattabilità ad ogni tipo di costruzione
- Selezione accurata dei materiali
- Strutture antisismiche
- Risparmio energetico
- Prodotti certificati
- Progettazione esecutiva

b) Campi di utilizzo dei pannelli x-lam:

- Pareti portanti
- Solai portanti
- Coperture portanti
- Tamponamenti

c) Tipi di costruzioni realizzabili coi pannelli x-lam:

- Case unifamiliari o plurifamiliari
- Appartamenti su più piani
- Edifici industriali e commerciali
- Strutture pubbliche

Dopo aver analizzato, in breve, i vantaggi, il vasto campo di utilizzo ed il tipo di costruzioni realizzabili con i pannelli x-lam, si conclude che questo sistema costruttivo, recentemente in via di sviluppo in diverse zone d'Italia, da ogni punto di vista, in particolare da quello dei costi e dei tempi di realizzazione, risulta più conveniente rispetto al tradizionale sistema costruttivo in muratura.

Infatti, dal 2005 in poi c'è stato un vero e proprio balzo consistente, pari al 2,8% dell'intero mercato abitativo. Un incremento inatteso in ragione della persistente crisi dell'edilizia, in parte giustificato dall'interesse verso l'edificazione a secco, che contrae i tempi di realizzazione.

Il cantiere delle case in legno, estremamente veloce, lascia pochi margini agli imprevisti e ciò aiuta la diffusione del sistema costruttivo, che trova un forte alleato nell'x-lam, tecnologia apprezzata per le costruzioni residenziali, in particolare per quelle pluripiano (5-7-9 piani), per le quali si attende un forte sviluppo nelle aree urbane. Si ipotizzano 7.500 nuove abitazioni in legno nel 2015 (+ 700 % rispetto al 2005), dato che contribuirà a costruire quel trend positivo di tutto il mondo dell'edilizia abitativa nel periodo 2011-2015.

Le case in legno nel 2015 occuperanno il 4,5% dell'intero mercato, con una presenza più cospicua al Nord e al Centro piuttosto che al sud.

Analizziamo in breve i motivi:

1. **Cantiere efficiente, pulito e silenzioso:** l'utilizzo di materiali naturali, ecologici e biocompatibili determina un impatto ambientale dell'edificio sostanzialmente ridotto, con molteplici benefici sia durante la realizzazione, che durante l'uso e una volta dismesso. Durante la realizzazione non c'è spreco di materiale aggressivo per l'ambiente, non c'è produzione di percolato di acidi o altre sostanze normalmente in uso nei normali cantieri.

Il cantiere risulta, quindi molto pulito, ordinato e silenzioso, grazie all'uso molto meno intenso, perché non necessario, di mezzi meccanici e la ridotta necessità di personale in cantiere.

Tutto questo va ad aggiungersi alle peculiarità e prestazioni dei materiali utilizzati e si ripercuote positivamente su scala locale e globale.

La certificazione LEED premia in questo senso il sistema delle costruzioni in legno ed i sistemi costruttivi in pannelli x-lam.

2. **Prezzi delle case in legno, costi e tempi:** una casa in legno è un vantaggio sotto tutti i punti di vista. Il prezzo è fisso e il tempo di costruzione notevolmente ridotto rispetto ai sistemi tradizionali.

Il procedimento di realizzazione prevede fasi altamente raffinate di preassemblaggio in stabilimento ed una semplice di montaggio in sito.

Grazie all'organizzazione e l'assenza di elementi di incertezza, permette di fissare una data di fine lavori e di rispettarla fedelmente e tutto questo si traduce anche in un risparmio degli oneri finanziari, in quanto la fruibilità dell'edificio si ottiene in tempi molto ridotti.

Per massimizzare l'efficienza del cantiere e perfezionarne la riuscita, il sistema a pannelli x-lam permette di posare pareti complete e finite, comprendendo addirittura predisposizioni elettriche ed idrauliche, per garantire la rapida messa in servizio e soprattutto riducendo a zero le economie e le assistenze, in maniera tale che non ci siano sorprese su prezzi e tempi.

3. **Durata case in legno:** per quanto riguarda la durata delle case e degli edifici in legno, ancora una volta, la storia insegna e a tal proposito ci sono esempi di strutture realizzate in legno che sono state capaci di attraversare addirittura i secoli, mantenendo le proprie funzioni e sono visibili in molte parti del mondo.

Basti pensare alle strutture religiose presenti nell'est europeo, in particolare in Russia ed alla struttura portante sulla quale poggia a tutt'oggi Venezia (struttura immersa in acqua). Con le tecnologie tradizionali non si può certo affermare la stessa cosa.

Ovviamente gioca un ruolo importantissimo la conoscenza dei materiali e la corretta progettazione. Grazie ai materiali certificati utilizzati, agli accorgimenti in fase di progetto e montaggio ed al mirato accostamento dei componenti, si ottengono delle strutture solide, efficienti e durature.

4. **Certificazione case in legno:** le nuove norme tecniche (D.M. 14/01/2008) hanno finalmente attribuito al legno il ruolo di "elemento strutturale" e si sono definiti criteri precisi di progettazione e di marcatura. In quest'ambito di professionalità le ditte che costruiscono in legno, tipo la Rasom, che ho avuto modo di conoscere, perché opera in diverse zone del Trentino, possiede certificazioni ed attestati per i procedimenti, per il personale e per i materiali (marchiati CE, CEI o IMQ) e come nel caso di Casa Sofie si garantisce la tracciabilità dell'intera filiera dalla parete al singolo albero.

Dalla progettazione all'esecuzione troviamo tecnici d'ufficio formati in tema di strutture, sicurezza ed efficienza energetica (**CasaSofie**, **Casaclima** e **Leed**), nonché tecnici e stabilimento abilitati al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Un sistema di qualità agile ed efficiente assicura che all'uscita dalla stabilimento ogni elemento parete ha attraversato 4 controlli da parte di Ingegneri e Tecnici qualificati.

5. **Benessere e risparmio case in legno:** grazie alle proprietà intrinseche del legno ed alla sapiente progettazione si ottengono risultati inarrivabili con altre metodologie costruttive.

Sfruttando la ridotta conducibilità termica del materiale e interfacciandolo con altri componenti naturali è possibile ottenere edifici caldi d'inverno e freschi d'estate, con la conseguenza di ridurre drasticamente i consumi energetici e di rispondere alle più recenti normative e direttive in materia di isolamento termoacustico.

L'utilizzo di materiali naturali, sani e di origine certificata, permette di assicurare il rispetto dei parametri di **eco-compatibilità**, poiché l'edificio rispetta la natura non inquinando e di **biocompatibilità**, poiché una casa costruita con materiali naturali ed ecologici meglio accoglie la vita umana, garantendo **comfort e benessere**.

Infatti, il legno respira e regola il clima, prevenendo la formazione di muffa, in sintesi, crea l'ambiente ideale al quale ognuno aspira, per se e per i propri figli.

Particolarmente interessante è lo sfasamento dell'onda termica, permesso dai sistemi costruttivi Log House, una delle aziende accreditate, con soluzioni studiate su misura, in funzione delle esigenze del cliente e della zona geografica.

Il caldo ed il freddo esterni all'edificio, vengono mitigati e sfasati nel tempo, migliorando il comfort abitativo e fruitivo dell'abitazione e limitando la necessità di ricorrere a tecnologie termo-impiantistiche con conseguente risparmio energetico ed economico.

Una Casa Sofie è un edificio, dunque, con dei requisiti prestazionali di alto livello, ben definiti e con standard qualitativi molto elevati.

I requisiti prestazionali obbligatori per il riconoscimento di Casa Sofie sono:

- resistenza alle azioni sismiche;
- efficienza energetica, ossia risparmio energetico, inerzia termica estiva ed invernale e tenuta all'aria.

mentre i requisiti prestazionali opzionali sono:

- resistenza al fuoco, pari almeno a 60 minuti;
- isolamento acustico, con conseguente comfort acustico, con valori più rigorosi dei limiti minimi di legge in vigore.

La certificazione è composta da tre fasi:

1. presa visione del progetto e valutazione;
2. visite in cantiere (minimo 3);
3. redazione del certificato e consegna della targhetta distintiva;

e viene rilasciata dal consorzio Sofie Veritas, a seguito di istruttoria effettuata dal CNR/IVALSA, Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree, per quanto riguarda la parte strutturale, la resistenza al fuoco e l'isolamento acustico e a seguito di istruttoria effettuata dall'Agenzia CasaClima di Bolzano per quanto riguarda la parte energetica.

I materiali impiegati per la costruzione e l'impiantistica dovranno avere caratteristiche di eco-sostenibilità comprovata e solo le imprese accreditate potranno pregiarsi del marchio e della certificazione Casasofie.

Poiché i tempi di costruzione sono notevolmente ridotti rispetto agli altri sistemi costruttivi, le abitazioni in legno, oltre che sicure, costituiscono una soluzione ideale per contenere i prezzi di realizzazione del 20-30%.

Inoltre, per il basso consumo energetico ed il comfort abitativo unico, abitare il legno aiuta a migliorare la vita!

BIBLIOGRAFIA

Progetto Sofie, Sistema Costruttivo Fiemme:

Giordano G., 1981 - "Tecnologia del legno.1. La materia prima", UTET, Torino.

Giordano G., 1988 - "Tecnologia del legno.3. I legnami del commercio", UTET, Torino.

Jan F.Rijdijsk e Peter B.Laming, 1994 - "Physical and related properties of 145 timber", Kluwer Academic Publishers.

Jurgen Sell e Francois Kropf, 1990 - "Propriétés et caractéristiques des essences de bois", Lignum.

Nardi Berti R., 1994 - "La struttura anatomica del legno ed il riconoscimento dei legnami italiani di più corrente impiego", Contributi scientifico-pratici per una migliore conoscenza ed utilizzazione del legno, CNR, Firenze.

Jean Giuliano, 1987 - "Bois Essences et variétés", H.Vial.

UNI EN 350-2, 1996 - "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Durabilità naturale del legno massiccio. Guida alla durabilità naturale e trattabilità di specie legnose scelte di importazione in Europa".

UNI EN 335 1-2, 1993 - Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Definizione delle classi di rischio di attacco biologico.

UNI EN 460, 1996 - "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Durabilità naturale del legno massiccio. Guida ai requisiti di durabilità per legno da utilizzare nelle classi di rischio".

Abitare il legno, Ricerca, innovazione, tecnologia, Corso per progettisti, "Progettazione strutturale e fisico-termica", 9, 10, 11 novembre 2009, presso IVALSA/CNR San Michele All'Adige (TN):

Giordano G., 1998 - "Tecnica delle costruzioni in legno", Hoepli Ed., Milano.

Glos P., 1994 - "Solid timber - Strength classes", STEP lecture A7, Centrum Hout, The Netherlands.

Larsen H.J. e Riberholdt H., 1883 - "Traekonstruktioner", SBI-anvising, Hoersholm, DK.

Macaulay D., 1979 - “La città moderna, il sottosuolo”, Nuove edizioni Romane, Roma.

Madsen B., 1994 - “The structural behaviour of timber”, Timber Devlp., Vancouver, B.C., Canada.

Mohler L., 1946 - “Uber das Tragverhalten von zusammengesetztem Querschnitt und Karlsruhe Universitat, Germania.

Natterer J., 1998 - “Atlante del legno, UTET Ed., Torino.

Pozzati P., 1990 - “Teoria e tecnica delle strutture”, UTET, Torino.

Benedetti C., 1995 - “Il legno nell’architettura”, Kappa, Roma.

Blass Hans, (a cura di), STEP 1&2, 1995 - Structural Timber Education Programme, Centrum Hout, The Netherlands.

Bodig J.& Jayne B.A., 1982 - “Mechanics of wood and wood composites”, Van Nostrand Reinhold Co, New York, 1982.

Ceccotti A., Marradi P., 1994 - “Nuove tecnologie negli interventi di recupero delle antiche capriate di legno: materiali e metodi”, CLEAN Ed., Napoli.

Eurocodice 5 parte 1.1, 1993 - “Progettazione delle strutture di legno, Regole generali e regole per gli edifici”, UNI, Milano.

Eurocodice 5 parte 1.2, 1995 - “Progettazione delle strutture di legno, Regole supplementari per la resistenza al fuoco”, UNI, Milano.

Eurocodice 5 parte 2, 1997 - “Progettazione delle strutture di legno. Ponti”, UNI, Milano.

Foschi R. O., Yao F., 1990 - “Reliability based design of timber structures”, UBC Reports, Vancouver, B.C., Canada.

Karsten Tichelmann, Jochen Pfau - “Costruzioni a secco, Praxis”, Edizione Italiana, a cura di Enrico De Angelis, UTET (Scienze tecniche).

SITOGRAFIA

<http://www.progein.it/home/ancoraggi.php>

<http://www.edilportale.com/prodotti/fischer-italia/sistema-di-ancoraggio.html>

<http://www.viterietrevigiane.it>

<http://www.pezzigaponteggi.it>

<http://www.edilio.it>

<http://www.asl20.piemonte.it>

<http://www.edilportale.com>

<http://www.ispesl.it>

<http://www.sicurezzaipmi.it>

<http://www.guide.supereva.it>

Ringraziamenti

Non è facile riuscire ad esprimere a parole tutto quello che in questo momento ho nel cuore o che mi passa per la testa, nonostante per tanti anni ho cercato di immaginare che cosa avrei potuto scrivere o chi per primo e poi a seguire avrei dovuto ringraziare.

Un pensiero ricorrente è sempre stato quello di che cosa avrei potuto provare alla vigilia, o quasi, di questo traguardo, nel mio caso caratterizzato da un lungo e spesso travagliato percorso, ma ricco di imprevisti dalle mille sfumature, che mi hanno formata, fatta crescere e maturare, di cui spero di non dimenticare nemmeno una virgola per tutto il resto della mia vita.

Ho incontrato innumerevoli ostacoli e ho faticato tanto per superarli, sempre consapevole che avrei potuto fare di più. Molte volte mi sono quasi pentita di avere intrapreso questo percorso di studio, ma mai una volta in tutti questi lunghissimi anni ho ceduto o buttato la spugna, in quanto certa che un giorno ce l'avrei fatta.

In questi anni ho sempre avuto la fortuna di avere accanto persone meravigliose, come la mia mamma Rina, che mi ha amata ed incoraggiata in silenzio, alla quale va un grazie immenso e di cuore, per tutto quello che ha fatto e continua a fare per me, alla quale dedico questo titolo di studio. Questa mia laurea è tutta sua, per lei che ha finanziato a lungo e con tanti sacrifici, senza mai lamentarsi, per lei che con pazienza ha creduto in me, senza mai rimproverarmi o pressarmi ed è per lei e per come ha agito in questi lunghi anni che non mi sono mai arresa e sono arrivata alla fine, per ricompensarla e farla felice. Grazie infinite mamma, ti voglio bene!

Un capitolo a parte poi ci vorrebbe per ringraziare mio marito Pasquale, che mi ha sempre spronato, a volte bruscamente, ad impegnarmi di più, accettando i miei tempi e limiti con amore e pazienza. Accanto a lui e grazie a lui sono maturata e andata oltre allo studio, dando più senso alla mia vita. Con amore mi ha fatto capire che al mondo ci sono altre priorità, come la gioia di creare una famiglia, arricchendola con dei figli. Grazie a lui ho ricevuto il dono più grande che esiste al mondo, la nostra bimba, che a breve nascerà e che in questi mesi è stata con me e dentro di me, dandomi la forza e la costanza necessaria per arrivare alla meta prefissa. Grazie amori miei!

Grazie anche a mia sorella Cinzia, a mio cognato Michele e il mio nipotino Mattia, che ha allietato i miei studi con i suoi scarabocchi, ai miei zii e ai miei

cugini, che hanno aspettato che concludessi gli studi senza mai giudicare o criticare.

Grazie ai miei carissimi nonni, Rosa e Francesco, che non ci sono più, ma che sarebbero stati tanto orgogliosi di me, anzi lo sono, perché non mi hanno mai abbandonata, sono sempre al mio fianco e mi proteggono.

Durante la mia carriera universitaria, ho conosciuto tante persone fantastiche, amici veri e sinceri, dai quali ho attinto molto, specialmente nei momenti difficili, con i quali e ho lottato per raggiungere l'obiettivo comune della laurea, perché come me consapevoli delle difficoltà che si possono incontrare anche se si fa bene il proprio dovere di studente.

Mi riferisco al mio più caro amico Michele, a cui sono legata da un profondo affetto, con cui negli ultimi 11 anni ho condiviso soddisfazioni e delusioni, gioie e dolori, anche di vita privata, con lui ho preparato, a volte superato e a volte no, gran parte degli esami universitari. Lo ringrazio per tutto quello che ha fatto e che continua a fare per me, per tutte le volte che mi ha ascoltato, per la sua amicizia incondizionata e anche per la pazienza che ha sempre mostrato nei miei confronti nel corso di questi anni, dato che, per via del tempo che abbiamo passato assieme a studiare, più di tutti ha dovuto sopportare il mio carattere lunatico e difficile.

In tutti questi anni qualcosa anch'io ho dato, ma ho certamente di più ricevuto, non basterebbe un libro per ricordare tutti o semplicemente per ringraziare tutti gli altri amici e compagni di avventura e spero di non tralasciare almeno quelli a cui sono più affezionata, tipo Piero, che conosco dal secondo anno di università, con cui ho studiato tanto e con cui è nata una bella amicizia, oppure Antonio e Antonello, con i quali ho iniziato questo lungo percorso, poi Marta, Fabrizio, Massimo, Pino, il mio amico Francesco, di un altro corso di laurea, ma che ha conosciuto la realtà di Ingegneria.

E cosa dire del caro Giuseppe Redi, che mi ha dato un paio di spunti per la tesi, con il supporto dell'Ing. Giuseppe Corizzo, un vecchio amico ed ex collega universitario ritrovato dopo tanti anni.

Un grazie particolare va alla mia amica Lucia, per la sua disponibilità e il sostegno morale, specie nell'ultimo anno e ai miei amici di sempre Salvatore e Franco Manfredi, sempre pronti a correre in mio aiuto e a consigliarmi, da bravi fratelli maggiori e dall'alto della loro esperienza.

Ringrazio tutti gli altri con affetto, uno per uno, ma per questioni di spazio non posso citare tutti, per il loro piccolo o grande contributo, grazie al quale ho potuto raggiungere questo traguardo.

E' un piacere per me, ma anche doveroso, ringraziare tutti coloro che mi hanno seguita ed aiutata nella parte conclusiva di questo percorso, anche a livello pratico, mi riferisco, innanzitutto, al mio Relatore **Prof. Ing. Marco Alvisè Bragadin**, che ho avuto modo di conoscere ed apprezzare già qualche anno fa, durante il corso di Organizzazione del Cantiere, docente preparatissimo, gentile e disponibile con tutti, che mi ha dato la possibilità di allargare le mie vedute ed accrescere il mio livello di preparazione su un argomento interessante ed innovativo, quale quello della tesi.

Un ringraziamento speciale va all'Illustre **Prof. Ing. Ario Ceccotti**, un luminaire dei pannelli x-lam e di tanto altro, che mi ha dato l'onore di accettare la correlazione di questo mio elaborato e nonostante i suoi impegni lavorativi anche all'estero, si è reso disponibilissimo e più di una volta mi ha invitata presso l'**IVALSA/CNR** di San Michele All'Adige (Tn), offrendomi spiegazioni illuminanti sull'argomento oggetto di studio e fornendomi gran parte del materiale utile ai fini della tesi.

Ringrazio anche tutti i suoi collaboratori ed il resto delle persone conosciute sia all'interno dell'Istituto che nei cantieri che ho avuto il piacere di visitare, grazie alla disponibilità di ognuno di loro.

Mi riferisco in particolare all'Impresa Costruttrice Rasom e ai suoi dipendenti, all'Immobiliare T5 s.r.l. e al signor Tomasoni, a tutti gli operatori presenti durante la visita nel cantiere di Serravalle, all'Ing. Igor Gavrić, all'Ing. Paola Eccel ed al Consorzio Sofie Veritas. Grazie di cuore a tutti!