

POLITECNICO DI TORINO



TESI DI LAUREA MAGISTRALE
IN INGEGNERIA DEI SISTEMI EDILIZI

PROGETTAZIONE DEGLI EDIFICI CON STRUTTURA PORTANTE IN LEGNO

Relatore: Prof. Carlo Caldera

Correlatore: Prof. Jesús Cuadrado Rojo

Luca Gariazzo

LUGLIO 2019

<i>ABSTRACT</i>	3
<i>Premessa</i>	4
1. Introduzione	5
2. Il legno nelle costruzioni	7
2.1 Caratteristiche del legno	7
2.2 Durabilità e protezione del legno	18
2.3 I prodotti del legno per la costruzione	34
3. Sistemi costruttivi	59
3.1. Sistema costruttivo massiccio	61
3.2. Sistema costruttivo a pacchetti di tavole parallele	64
3.3. Sistema costruttivo con legno compensato di tavole	65
3.4. Sistema costruttivo ad ossatura portante in legno	72
3.5. Sistema costruttivo a traliccio di legno	74
3.6. Sistema costruttivo ad intelaiatura di legno	75
4. Caso pratico	78
4.1. Descrizione generale del progetto	78
4.2. Contesto territoriale	78
4.3. Inserimento nel contesto urbano	79
4.4. Idee progettuali	80
4.5. Caratteri funzionali distributivi	81
4.6. Particolari costruttivi	83
4.7. Rappresentazioni render	87
4.8. Fasi costruttive	90
4.9. Nodi costruttivi	93
4.10. Materiali utilizzati	104
4.11. Pannelli X-LAM	106
4.12. Criteri di progettazione antisismica	111
4.13. Comportamento al fuoco	114
5. Sostenibilità	118
5.1. Il metodo LCA (Life Cycle Assessment – analisi del ciclo di vita)	118
5.2. Analisi LCA della sola struttura portante	122
5.3. Analisi LCA intero edificio	126
5.4. Confronto di analisi con edificio in calcestruzzo armato	136
6. Stima dei costi	143
<i>Conclusioni</i>	153
<i>Indice delle figure</i>	154

<i>Riferimenti normativi</i>	158
<i>Bibliografia</i>	159
<i>Sitografia</i>	160

ABSTRACT

Wood is one of the most used natural building materials in the world. A number of valuable properties such as low heat conductivity, small bulk density, relatively high strength, amenability to mechanical working makes wood as famous building material.

Wood has been used in construction for thousands of years and is still one of the most widely used building materials. Certain properties of wood can be complex in terms of use for construction, but despite this, engineers have successfully harnessed this natural resource to build a variety of structures.

Increasing the proportion of wood in construction can facilitate a reduction in the use of other construction materials, such as concrete, steel and brick.

These construction materials don't come from renewable raw materials, they require a great deal of energy for their production and they entail higher emissions of carbon dioxide.

In the discussion about reducing the environmental impacts of a building, there should be useful ideas to be taken from traditional solutions for the further development of modern buildings.

In this context, the construction sector has opportunities over the short and long term to reduce emissions of carbon dioxide through the choice of materials with a low environmental impact and through energy-efficient structures. Increasing the use of wood products is part of the solution.

This thesis work investigates building wood constructions by analyzing and classifying their structural elements as well as interpreting the architectural values. A detailed description about wood-based applications in construction is given, and explications follow. Technical details of construction methods and figures are presented based on a literature review and field survey. Furthermore, this thesis will focus the attention into the development of a project of four wooden buildings with considerations about the architectural components, researches on sustainability factors and comparisons with concrete made buildings.

Premessa

Questa tesi si prepone come primo obiettivo quello di conoscere il legno, non solamente inteso come materiale da costruzione, quanto come risorsa a nostra disposizione, attraverso una fase iniziale di ricerca e di documentazione che conduce, in un secondo momento, ad una fase di applicazione che trova sviluppo mediante la progettazione di edifici con struttura portante in legno. Come effetto conseguente si giunge all'inserimento e all'approfondimento di tematiche relative al complesso processo di progettazione e di esecuzione che riguarda una categoria di costruzioni che prima d'ora solo in parte sono state trattate durante i percorsi di studio da me effettuati. L'attenzione è stata rivolta principalmente alle tematiche relative alle soluzioni architettoniche e strutturali, allo studio dei dettagli costruttivi, alle stratigrafie, al comportamento al fuoco, alle fasi di esecuzione e realizzazione, all'analisi economica e in modo particolare agli aspetti legati alla sostenibilità attraverso l'analisi del ciclo di vita secondo il metodo LCA.

Nel lavoro di tesi sono state considerate anche altre tematiche (energetica, strutturale, sismica) che seppur avrebbero meritato approfondimenti si è deciso di trattare in maniera meno esaustiva.

Le diverse tematiche sono state analizzate nella maniera più dettagliata e approfondita possibile nei limiti imposti da una esposizione che in alcuni casi non può che essere di livello generale vista la complessità e la vastità dei temi affrontati.

1. Introduzione

Probabilmente si può affermare che non c'è materiale da costruzione che con le sue caratteristiche sia tanto straordinario quanto lo è il legno. Fin dall'antichità, gli uomini avevano capito che il legno era un materiale perfetto per la costruzione; basti pensare alle abitazioni su palafitte le cui strutture sono ancora in piedi dopo quasi quattromila anni.

Nel corso dei secoli gli individui non hanno mai abbandonato l'utilizzo di questo materiale per costruire le proprie abitazioni, le case in legno e l'evoluzione di queste ultime è concisa con l'evoluzione delle tecniche di reperimento e lavorazione del materiale. Grazie alla grande disponibilità di questa materia prima si svilupparono diverse tecniche di costruzione.

Il legno porta con sé un fascino e delle potenzialità artistiche che da sempre caratterizzano l'uomo ed il rapporto con questo prezioso elemento che viene dalla natura.

Oggi gli edifici in legno suscitano un nuovo interesse per le loro prerogative di sostenibilità soprattutto perché realizzati con un materiale naturale, quindi rinnovabile, che minimizza l'impatto sulle matrici ambientali aria, acqua e suolo.

La produzione della maggioranza dei prodotti per l'edilizia incide in maniera rilevante sull'inquinamento atmosferico e il conseguente effetto serra, a causa delle notevoli emissioni di anidride carbonica.

Il legno è l'unico materiale, invece, che quando viene prodotto non induce alcun effetto negativo, anzi il contrario. Gli alberi, crescendo, inglobano anidride carbonica sottraendola all'atmosfera e fissandola per sempre nel manufatto. Anche in fase di realizzazione si riduce l'incremento di CO₂. La leggerezza del materiale¹, circa cinque volte inferiore al calcestruzzo armato a parità di resistenza, richiede meno impegno energetico nei trasferimenti stradali e nelle movimentazioni in cantiere, ovvero minore impegno di fonti energetiche non rinnovabili, potenzialmente origine di CO₂ e con pesanti costi ambientali. La facile movimentazione degli elementi costruttivi incentiva la prefabbricazione che consente di ridurre i tempi di realizzazione in cantiere, attraverso la razionalizzazione dei processi produttivi svolti in officina, liberando il processo edilizio dalla stagionalità, garantendo continuità di lavoro, apportando così, in ultima analisi, anche un positivo risultato in termini di sostenibilità sociale.

L'impatto con il suolo, in termini di eutrofizzazione² dei terreni, al contrario di quanto avviene con altri materiali, è inesistente in quanto tutte le lavorazioni sono a secco. Quest'ultima caratteristica incide inoltre in maniera rilevante anche nelle fasi di dismissione e riciclo, in quanto si riducono i costi economici e si riducono quelli ambientali dovuto alle caratteristiche delle giunzioni degli elementi costruttivi, totalmente di tipo meccanico, che facilitano lo smontaggio e la raccolta differenziata dei materiali per il riciclo.

Anche in fase di utilizzo degli edifici, quelli in legno hanno buone performance in termini di impatto sulle matrici ambientali. Spesso essi sono integrati con dispositivi e soluzioni costruttive finalizzate al basso consumo energetico in fase di gestione.

Costruire in legno significa abitare sano. L'uomo trascorre tre quarti della propria vita in spazi chiusi e di questi circa la metà nella sua abitazione. Dato che i materiali utilizzati influenzano notevolmente la nostra

¹ Il legno da costruzione ha un peso specifico di circa 500 kg/m³, il calcestruzzo di 2400 kg/m³

² Il termine eutrofizzazione, indica una condizione di ricchezza di sostanze nutritive in un dato ambiente, in particolare una sovrabbondanza di nitrati e fosfati.

salute è importante usare prodotti il più possibile naturali. Con la costruzione in legno, si crea un'atmosfera accogliente e salubre. Gli edifici in legno favoriscono l'instaurarsi di un equilibrio ideale tra temperatura e umidità dell'aria e contribuiscono alla "salute abitativa" di un edificio. Altri aspetti da valutare sono l'ottima resistenza sismica e la rapidità di realizzazione, oltre chiaramente all'eccellente risparmio energetico raggiungibile con un prodotto di qualità.

2. Il legno nelle costruzioni

2.1 Caratteristiche del legno

2.1.1 La struttura del legno

2.1.2 Caratteristiche fisiche del legno

2.1.2.1 Legno, acqua e umidità

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

L'umidità del legno (detta anche tenore di umidità o contenuto di umidità) ne influenza praticamente tutte le caratteristiche fisiche, meccaniche e tecnologiche. La stabilità dimensionale assume un ruolo rilevante e può essere garantita se, in fase di lavorazione, il legno possiede un'umidità che manterrà anche nel successivo impiego.³

2.1.2.2 Grandezze caratteristiche dell'umidità del legno

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

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

dove:

u umidità percentuale del legno;

m_u massa del legno allo stato umido;

m_o massa del legno allo stato anidro.

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

³ I parassitari del legno, animali e vegetali, necessitano, per la sopravvivenza di un determinato contenuto minimo di umidità; è quindi possibile ottenere una buona protezione del legno semplicemente mantenendo sufficientemente bassa la sua umidità.

2.1.2.3 Scambio di vapore acqueo

Essendo un materiale igroscopico, il legno stabilisce un equilibrio con l'ambiente circostante assorbendo o cedendo vapore acqueo. Per le diverse situazioni climatiche, si considerano le umidità di equilibrio $u_{eq,ad}$ o $u_{eq,de}$ [%]. L'umidità di equilibrio nella situazione di adsorbimento è però diversa da quella relativa al desorbimento, ovvero vale la relazione $u_{eq,ad} \neq u_{eq,de}$. Le curve a due flessi di adsorbimento e di desorbimento del legno (curve u_{eq} a temperatura costante) mostrano un fenomeno di isteresi nello scambio di vapore acqueo. L'umidità di saturazione u_s [%] è quell'umidità del legno per la quale tutte le pareti cellulari (ossia l'intero sistema capillare all'interno di esse) sono completamente saturate di acqua. Se l'umidità del legno si trova al di sopra del punto di saturazione ($u > u_s$), l'acqua si trova allo stato liquido nel lume delle cellule come cosiddetta "acqua libera" o "di imbibizione".⁴ Per umidità del legno al di sotto del punto di saturazione ($u < u_s$), l'acqua viene adsorbita o desorbita solo dalle pareti cellulari come cosiddetta "acqua legata" o "di saturazione". In questo intervallo, l'acqua immagazzinata ha un'influenza decisiva sulle caratteristiche fisico-meccaniche del legno. L'umidità di saturazione dipende dalla specie legnosa e per la maggior parte di esse si trova nell'intervallo $24\% \leq u_s \leq 32\%$. In prima approssimazione si può considerare un valor medio $u_s \approx 28\%$.

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

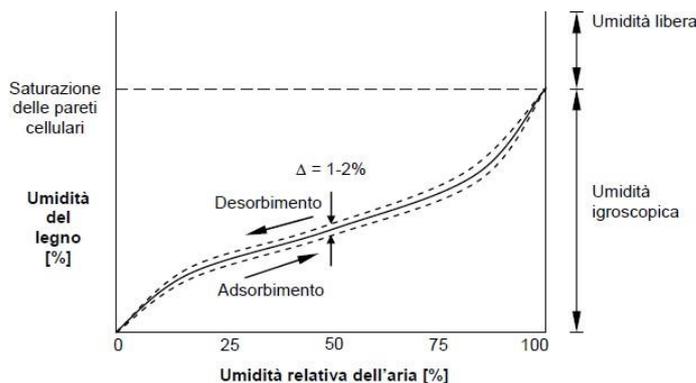


Figura 3 Curve di adsorbimento e desorbimento d'acqua nel legno.

2.1.2.4 Ritiro e rigonfiamento del legno

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

Le grandezze caratteristiche per la valutazione del ritiro e del rigonfiamento del legno sono il valore del rigonfiamento α e quello del ritiro β . Il primo si riferisce allo stato anidro, il secondo a quello di rigonfiamento massimo. I due valori si differenziano quindi solo per la base di riferimento per le variazioni di lunghezza l_0 e l_w considerate. Per questo motivo risulta sempre $\alpha > \beta$. Essi possono essere convertiti l'uno nell'altro.

Per la sua struttura anisotropa, il legno subisce variazioni di forma differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali tangenziale (indice t), radiale (indice r) e longitudinale (indice l). Da esse risultano i valori di ritiro e di rigonfiamento volumetrico (indice V).

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

⁴ Variazioni di umidità in questo intervallo influenzano pochissimo le caratteristiche fisico-meccaniche del legno.

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

2.1.2.5 Anisotropia del rigonfiamento

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

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

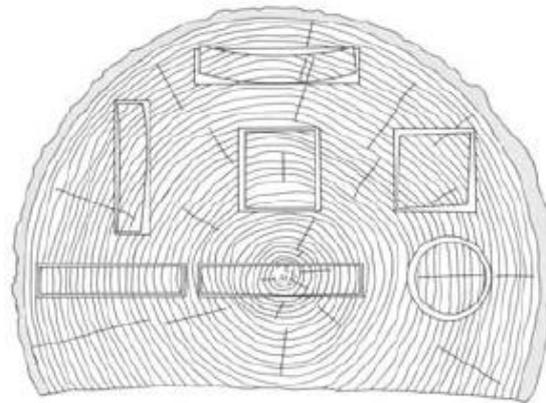


Figura 4 Deformazioni del legno in seguito a fenomeni di ritiro nelle direzioni tangenziale e radiale

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

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

2.1.2.6 Ritiro e rigonfiamento delle diverse specie legnose

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

Mediamente nei legni di provenienza europea risulta:

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

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

Figura 5 Valori massimi del rigonfiamento, coefficiente di rigonfiamento e rigonfiamento differenziale di alcune specie legnose.

2.1.2.7 Umidità “normali” dei prodotti di legno

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

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

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

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

2.1.2.8 Densità

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.2.9 Parametri che influenzano la massa volumica

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

La massa volumica dipende soprattutto dai seguenti parametri.

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

Il rapporto tra la superficie occupata dalla parete cellulare e dai pori varia notevolmente tra le singole specie legnose; la massa volumica dipende perciò dalla specie legnosa. Per motivi fisiologici, c'è un limite inferiore della massa volumica (volume occupato dalle pareti $\approx 6\%$) pari a circa 100 kg/m³, ed uno superiore (volume occupato dalle pareti $\approx 93\%$) pari a circa 1200 ÷ 1400 kg/m³.

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

Figura 6 Densità anidra e massa volumica (per $u=15\%$) delle più importanti specie legnose appartenenti alle Conifere e alle Latifoglie.

Ampiezza degli anelli di accrescimento e rapporto tra legno primaverile e tardivo In virtù delle loro differenti funzioni e della loro struttura molto diversa risultante da esse, il legno primaverile) possiede una densità nettamente inferiore a quella del legno tardivo⁵.

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

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

2.1.2.10 Caratteristiche termiche

Capacità termica:

Per valutare la capacità termica isolante di un elemento costruttivo risulta di particolare importanza la conduttività termica λ ⁶. A causa della sua elevata percentuale di pori, il legno è un cattivo conduttore di calore. Il materiale legno è costituito da sostanza legnosa, acqua ed aria e quindi la sua conduttività termica è funzione di: $\lambda_{\text{Legno}} = f(\text{massa volumica, umidità, struttura, temperatura})$.

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

DILATAZIONE TERMICA

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

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

dove:

- Δl variazione di lunghezza;
- l_0 lunghezza di partenza;
- ΔT differenza di temperatura in K.

⁵ funzione conduttrice della linfa, $\rho_{0,LP} \approx 250 \div 350 \text{ kg/m}^3$; funzione di sostegno, $\rho_{0,LT} \approx 850 \div 1000 \text{ kg/m}^3$

⁶ Con essa si intende la quantità di calore che in un'ora passa attraverso un cubo di 1 m di spigolo, quando tra due superfici laterali parallele esiste una differenza di temperatura, costante nel tempo, di 1°K. Si misura in W/(mK).

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

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

2.1.2.11 Caratteristiche elettriche

RESISTENZA E CONDUCIBILITÀ ELETTRICHE

Le grandezze caratteristiche sono:

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

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

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

- Umidità: il legno allo stato anidro è un buon isolante. All'aumentare del contenuto di umidità, diminuisce la resistenza elettrica molto rapidamente tendendo, in condizioni di saturazione delle pareti cellulari, a raggiungere asintoticamente all'incirca il valore dell'acqua.
- Temperatura: all'aumentare della temperatura, la resistenza elettrica diminuisce notevolmente. Nei metodi di misurazione elettrica dell'umidità è necessario, quindi, un fattore correttivo dovuto alla temperatura.
- Massa volumica.
- Struttura del legno.
- Specie legnosa

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

Direzione della fibratura

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

CARATTERISTICHE DIELETTRICHE

Come grandezza caratteristica per le proprietà dielettriche si utilizza di regola la costante dielettrica relativa ϵ_{rel} . Essa indica di quanto aumenta la capacità di un condensatore (costituito da due piastre piane immerse in aria ed a distanza d) interponendo un determinato dielettrico, quindi di quante volte la costante dielettrica del materiale è più grande di quella del vuoto ($\epsilon_{vuoto} = 1$):

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{vuoto}}$$

La costante dielettrica dell'acqua è pari all'incirca a 81, quella del legno anidro è 2 ÷ 3. La costante dielettrica del legno dipende dai seguenti parametri.

- Umidità: poiché la costante dielettrica dell'acqua è molto più grande di quella del legno anidro, la costante dielettrica aumenta all'aumentare dell'umidità.
- Massa volumica,
- Struttura del legno,
- Specie legnosa.

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

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

2.1.2.12 Caratteristiche acustiche

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

VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEL SUONO

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

FREQUENZA PROPRIA DI VIBRAZIONE

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

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

2.1.3 Caratteristiche meccaniche del legno

2.1.3.1 Differenza tra prove sul materiale (provini di legno di dimensioni ridotte) e prove sugli elementi strutturali (provini di dimensione strutturale)

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

Le sezioni dei provini di legno di dimensione ridotte hanno dimensioni fino a 20 mm x 20 mm.⁷

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

Figura 7 Confronto tra i tipici valori nominali dell'abete rosso, determinati su provini di legno netto ed in dimensione strutturale.

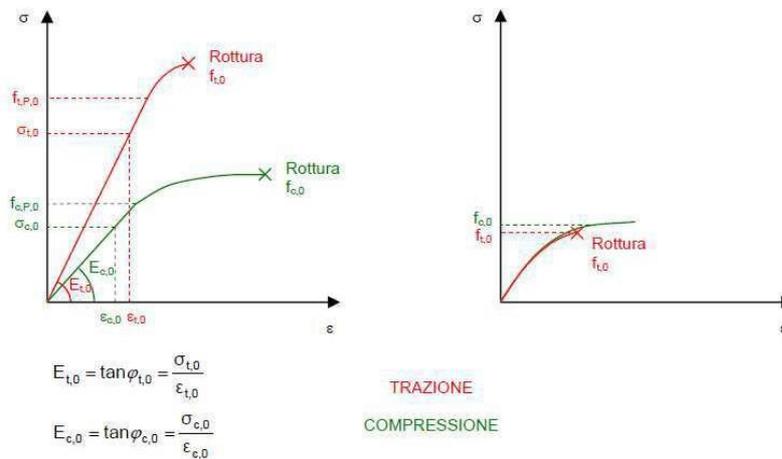
Dalla tabella precedente si può osservare chiaramente come i valori nominali del legno privo di difetti non possano rappresentare, con sicurezza ed affidabilità, il comportamento meccanico dei prodotti di legno per le costruzioni. Le cause delle differenze che si presentano nei provini in dimensione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

2.1.3.2 Diagramma costitutivo

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

Figura 8 Diagramma costitutivo del legno nella direzione della fibratura: sinistra: provino di legno di piccole dimensioni (privo di difetti);

⁷ Nelle norme per le prove su campioni in dimensione strutturale, non sono stabilite dimensioni fisse degli stessi; i valori caratteristici si riferiscono, tuttavia, a larghezze o altezze di riferimento.



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

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

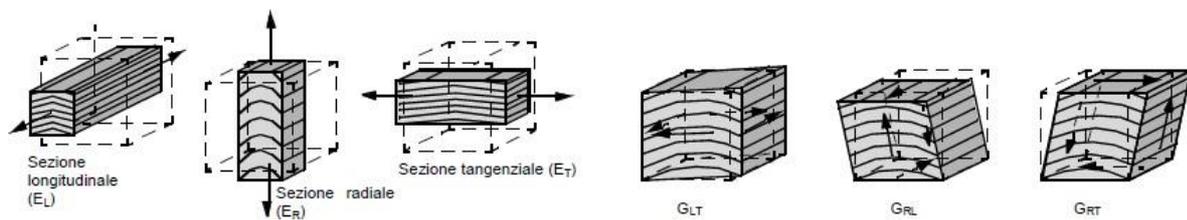


Figura 9 Dilatazioni lineari e scorrimenti mutui.

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

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

In virtù della sua struttura, il legno possiede caratteristiche meccaniche che assumono ordini di grandezza differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali⁸: longitudinale (L); radiale (R); tangenziale (T).

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

⁸ Questa dipendenza delle grandezze caratteristiche dalla particolare direzione viene denominata "anisotropia".

- parallelamente alla fibratura: la resistenza e la rigidezza parallelamente alla fibratura raggiungono i valori massimi rappresenta la direzione portante principale;
- perpendicolarmente alla fibratura: la distinzione tra direzione radiale e tangenziale è difficilmente realizzabile ai fini del dimensionamento e non porterebbe a significativi vantaggi sia tecnici che economici nell'utilizzo pratico del legno.

Per questo motivo, le caratteristiche in direzione radiale e tangenziale vengono riassunte per semplicità in "perpendicolarmente alla fibratura" (piano trasversale all'asse del tronco). Esse sono inferiori di quelle nella direzione della fibratura.

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

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

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

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

2.1.3.3 Caratteristiche meccaniche del legno in dimensione strutturale

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

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

Figura 10 Grandezze caratteristiche di resistenza del legno in dimensione strutturale in relazione al tipo di sollecitazione.

Gli indici utilizzati nella precedente tabella sono:

- 0 = Parallelamente alla fibratura
- 90 = Perpendicolarmente alla fibratura
- K = Valore caratteristico
- d = Valore di calcolo ("Design")

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

2.2 Durabilità e protezione del legno

2.2.1 Introduzione

Ciascun elemento facente parte di una struttura è esposto ripetutamente alle condizioni climatiche dell'ambiente in cui si trova, e deve quindi sopportare le azioni e gli effetti che ne derivano. Costruire con il legno impone da sempre un confronto serrato con questa problematica, per la naturale tendenza di tale materiale al degrado biologico naturale.

Ai fini dello sfruttamento del legno per la produzione di oggetti e opere durature nel tempo, il degrado biologico deve essere quindi impedito o comunque ritardato almeno tanto a lungo, quanto lunga è la durata di vita richiesta al prodotto in questione.

Ad ogni elemento costruttivo corrisponde quindi una richiesta di durabilità, cioè una durata di vita dettata dalle aspettative del Committente e dell'utilizzatore della costruzione.

La durabilità è determinata da molti fattori, in parte legati alle caratteristiche fisiche e biologiche dei materiali usati, in parte alle condizioni di servizio e in parte legati alle misure progettuali, protettive e di manutenzione messe in atto per impedire il degrado del materiale e delle strutture. Con la definizione generica di misure di protezione si intendono tutti i provvedimenti atti a mantenere, garantire o assicurare la durabilità della costruzione.

Sebbene il legno sia con certezza, tra i materiali da costruzione, quello più sensibile al degrado, è nel contempo anche il materiale che può assicurare una notevole durabilità alla costruzione, come dimostrano i ponti di legno costruiti fino a cinque secoli fa, ancora perfettamente funzionali e in ottimo stato di conservazione. Il ponte stradale della figura precedente è stato costruito attorno al 1850 e la sua struttura principale è ancora quella originale. L'esempio dei ponti non è scelto a caso, in quanto questo tipo di costruzioni è particolarmente esposto agli agenti atmosferici e biologici.

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

La considerazione del possibile degrado del legno è quindi un aspetto indispensabile della fase di pianificazione e progettazione di una costruzione.

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

2.2.2 La durabilità del legno

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

2.2.2.1 Gli attacchi biotici

Lo sviluppo delle spore dei funghi sulle pareti cellulari, può avvenire non appena si verificano le condizioni climatiche adatte, ovvero adeguati valori di temperatura e di umidità. La temperatura ideale per il processo vitale dei funghi varia tra i 18 e i 30 °C, mentre al di sotto dei 5 °C non vi è possibilità di sviluppo

delle spore.

Da questi dati si può concludere che soltanto nella stagione invernale e in condizioni di temperatura particolarmente bassa, ci si trova al sicuro da un possibile degrado del legno per attacchi fungini. Risulta però ancora più interessante constatare che la condizione critica per lo sviluppo di questi organismi su un substrato legnoso, è la presenza di un contenuto di acqua nel legno superiore al 20%.

Questa condizione si può raggiungere soltanto con un'umidità dell'aria superiore al 90%, oppure in presenza di ristagni di acqua allo stato liquido: evitando tali condizioni di servizio degli elementi strutturali, è possibile limitare l'umidità del legno sotto al 20%, eliminando praticamente tutti i rischi legati al degrado dovuto all'attacco fungino, ed assicurando alla costruzione una durabilità praticamente illimitata rispetto a questo fattore.

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

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

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

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

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

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

2.2.2.2 L'azione delle intemperie

Analizzando un elemento strutturale di legno massiccio o di legno lamellare incollato, messo in opera in

equilibrio igroscopico con l'ambiente, l'effetto delle intemperie può essere descritto in modo semplificato come un'azione ciclica ed irregolare di essiccazione e umidificazione del materiale.

L'azione diretta dell'acqua piovana sulla superficie (in genere limitata a pochi millimetri di profondità) provoca un elevato gradiente di umidità e, a causa del rigonfiamento della zona superficiale, la presenza di coazioni che possono portare ad un collasso locale del materiale. Dopo la cessazione delle precipitazioni, in presenza di irraggiamento solare diretto, questa zona superficiale tende a riportarsi velocemente in equilibrio igroscopico con l'ambiente, rilasciando acqua all'esterno.

Il fenomeno di essiccazione è accelerato dalla maggiore conducibilità del legno umido e questo determina un ritiro maggiore della zona superficiale rispetto alle zone interne.

Di conseguenza nella zona di superficie, già in presenza di collassi locali per compressione, si formano facilmente delle fessurazioni, anche di piccole dimensioni, ma permanenti e irreversibili.⁹ Il fenomeno ciclico di degrado appena descritto prosegue quindi per strati sempre più profondi, aggravato da un aumento progressivo e inevitabile dell'umidità del legno, in quanto l'assorbimento di acqua è comunque più rapido rispetto all'essiccazione del materiale.

Il contenuto di acqua può facilmente superare il limite del 20% all'interno della sezione, contribuendo all'instaurarsi di condizioni favorevoli allo sviluppo di funghi.

A tale fenomeno sono sottoposti tutti gli elementi di grandi dimensioni, direttamente esposti alle intemperie, e la cui sezione è così grande da non permettere il ritorno dell'umidità al di sotto del valore critico di umidità del 20%: di conseguenza, in maniera particolarmente pericolosa, il materiale può degradarsi dall'interno senza presentare necessariamente sintomi esterni.

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

Del primo gruppo fanno parte gli elementi della struttura portante, in genere di dimensioni ragguardevoli, non sostituibili o di difficile sostituzione, e indispensabili per la sicurezza e la funzionalità della struttura: considerate le dimensioni della sezione può verificarsi, in caso di esposizione diretta alle intemperie, il fenomeno di marcimento del materiale a partire dagli strati più interni. Poiché per questi elementi il cedimento o il degrado determina direttamente la messa fuori servizio della costruzione, essi devono essere protetti con misure adeguate, in modo da assicurare una durata di vita sufficiente.

Del secondo gruppo fanno parte gli elementi sottili, con uno spessore inferiore a 20 mm, quindi non soggetti al fenomeno sopra descritto, in quanto la loro essiccazione avviene in modo sufficientemente rapido, non appena le condizioni climatiche dell'ambiente circostante lo permettono. Il degrado biologico, in questi casi, si sviluppa in modo più o meno uniforme e visibile sulla sezione, o comunque cominciando dall'esterno. Si tratta in genere di elementi non strutturali, ma comunque direttamente responsabili della durabilità della costruzione, in quanto formano spesso gli elementi di protezione costruttiva e assicurano quindi la durabilità degli elementi strutturali portanti del primo gruppo. Questi elementi sono, solitamente, direttamente accessibili e sostituibili, e la loro durata di vita, prevista o effettiva, non determina necessariamente anche la durata di vita della costruzione.

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

⁹ Le fessurazioni superficiali rimangono presenti anche nel caso di ritorno di umidità del legno nelle condizioni iniziali, facilitando la penetrazione dell'acqua, con le precipitazioni successive, più in profondità nella sezione.

2.2.3 Le azioni del degrado

Con riferimento ai problemi legati alla durabilità e alla protezione del legno, si parla di azione per le cause che determinano l'apporto di acqua o di vapore acqueo all'elemento di legno, di effetto per descrivere l'aumento di umidità de legno, e di rischio in relazione alle possibilità di degrado biologico del materiale. In questo paragrafo ci si limita alla descrizione delle azioni, ovvero di quei fenomeni che possono provocare un aumento di umidità del legno e creare quindi un rischio di degrado biologico dello stesso.

2.2.3.1 Azioni legate direttamente all'acqua

Il materiale legnoso tende naturalmente a porsi in equilibrio igroscopico con l'ambiente in cui si trova: ciò significa che a determinate condizioni di temperatura e di umidità relativa dell'aria, il contenuto di acqua all'interno del materiale è univocamente determinato.

Per poter mantenere tale contenuto al di sotto del 20%, è necessario che l'umidità relativa dell'aria circostante non superi il 90%: si tratta di un'indicazione molto approssimativa, e valida soltanto per condizioni di temperatura ordinarie (18-25°C), ma costituisce comunque un utile riferimento pratico. Inoltre questa condizione di umidità relativa dell'aria non dev'essere mantenuta a lungo, in modo da non permettere l'assorbimento di quantità sufficiente di acqua.

Situazioni del genere sono naturalmente presenti in condizioni atmosferiche estreme, come per esempio durante temporali estivi, con piogge intense e temperature piuttosto elevate (che sono però di regola di breve durata). Si tratta delle condizioni climatiche tipiche di alcune zone tropicali ma si possono instaurare anche in una cantina (in questo caso ciò non dipende direttamente dalle condizioni atmosferiche, ma piuttosto dalle condizioni ambientali).

Ogni elemento di legno posto all'aperto ed in assenza di accorgimenti protettivi può essere direttamente esposto all'azione diretta delle intemperie, con le conseguenze già illustrate nel precedente paragrafo. Un'azione più o meno intensa può derivare da un diverso grado di esposizione dell'elemento, o del sito dove è posta la costruzione.

L'azione delle intemperie può avvenire sia in maniera indiretta, come capita quando l'acqua piovana è trasportata fino alla superficie del legno dal vento o in altro modo.

Il caso più semplice è rappresentato dagli elementi strutturali protetti tramite speciali elementi di protezione che richiedono sempre la presenza di una zona di aria tale da garantire una adeguata ventilazione.

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

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

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

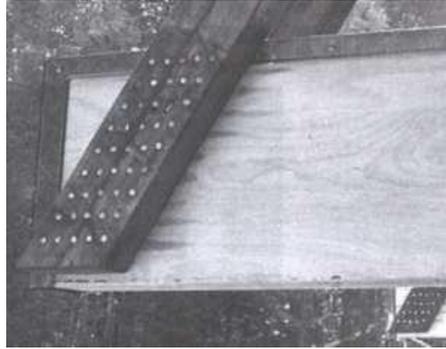


Figura 11 Superficie di contatto fra due elementi strutturali: malgrado l'inclinazione della diagonale, l'elemento orizzontale evidenzia macchie dovute all'assorbimento di acqua proveniente dalla superficie.

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

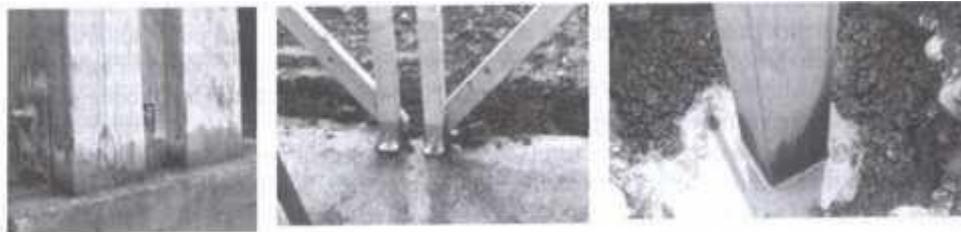


Figura 12 Assorbimento di acqua causato dal contatto con un altro materiale contenente acqua; contatto con il terreno causato da distanza insufficiente o da fondazione diretta.

Nei locali degli edifici abitati possono instaurarsi condizioni di umidità anche molto elevata. In particolar modo nelle cucine, nei bagni e nelle lavanderie, la mancanza di una adeguata aerazione può creare condizioni di rischio per gli elementi di legno della costruzione.

Le azioni legate ai fenomeni di condensazione possono presentarsi in diversi casi:

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

son un tipico esempio nell'ambiente domestico).

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

2.2.3.2 Azioni legate ad altre sostanze

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

2.2.3.3 Classi di rischio e tipologia di situazioni

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

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

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

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

sopra illustrate, consente un apporto in acqua in quantità sufficiente a superare il limite del 20%.

Questa situazione corrisponde, in pratica, ad elementi situati all'interno di costruzioni riscaldate (umidità del legno sempre al di sotto del 12-14%) e ad elementi situati all'interno o all'esterno di costruzioni, in condizioni climatiche esterne, ma comunque non direttamente esposti alle azioni elencate sopra.

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

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

2.2.4 Le misure di protezione

La verifica della durabilità impone che l'azione del degrado sia minore della resistenza al degrado stesso della costruzione e dei materiali di cui è composta. Per influenzare la durabilità si può quindi intervenire su entrambe le componenti, cioè riducendo le azioni e/o aumentando la resistenza agli attacchi biologici in genere e, in particolare, a quelli fungini.

La riduzione delle azioni avviene tramite provvedimenti costruttivi, quali un'adeguata concezione della costruzione, o con l'aggiunta di appositi elementi aventi esclusiva funzione di protezione del legno. L'aumento della resistenza al degrado può avvenire tramite l'utilizzo di specie legnose più resistenti, sfruttandone quindi la resistenza naturale, o tramite il trattamento del legno, di superficie o per impregnazione.

2.2.4.1 Il legno "resistente"

La resistenza naturale agli agenti biologici varia in modo importante fra le diverse specie legnose. La normativa Europea permette di classificare le diverse specie legnose nelle classi dette "classi di resistenza" in ordine decrescente di durabilità da 1 a 5.¹⁰

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

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

Figura 13 Classi di resistenza ed "aspettativa di vita" di alcune specie legnose.

¹⁰ 1: molto durabile; 2: durabile; 3: moderatamente durabile; 4: poco durabile; 5: non durabile.

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

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

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

Tra gli elementi non portanti sono compresi tutti gli elementi che non hanno dimensioni particolarmente elevate e che possono essere direttamente esposti alle azioni delle intemperie, senza che per questo presentino un'umidità costantemente elevata.

Si tratta prevalentemente di elementi secondari, quali, per esempio, le balaustrate o i sostegni per le installazioni, oppure degli elementi costruttivi di protezione che non necessariamente devono avere la durata di vita della struttura portante e che possono essere concepiti in modo tale da essere sostituiti periodicamente.

L'uso di specie più resistenti permette in questo caso di aumentare gli intervalli fra una sostituzione e l'altra, quindi di ridurre le spese di manutenzione dell'opera. In questi casi è abbastanza normale ricorrere al legno di larice o di douglasia, che non presenta nessuna difficoltà di lavorazione supplementare rispetto all'abete rosso, ma ha una resistenza decisamente migliore.

L'uso di legno di quercia si dimostra pure soluzione valida, essendo la lavorazione più impegnativa ed il costo del materiale più elevato compensati da una durabilità ancora maggiore che, in certi casi, può raggiungere la durata di vita della costruzione stessa.

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

2.2.4.2 Aumento della resistenza tramite trattamenti appositi

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

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

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

profondità molto limitato;

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

Trattamento superficiale: per trattamento superficiale si intende l'applicazione di uno o più strati di sostanza protettiva sulla superficie del legno.

Applicate ad elementi della struttura portante, queste sostanze hanno anche un effetto secondario di rendere il legno meno invitante agli insetti.

Non offrono però una protezione efficace e duratura del materiale, in quanto non impediscono lo scambio d'acqua con l'ambiente circostante, e non impediscono nemmeno la formazione di fessure, che espongono il legno all'umidità e agli organismi patogeni dell'ambiente.

Si tratta quindi di una protezione complementare, molto importante durante le fasi di trasporto e montaggio, quando un contatto accidentale con l'acqua può essere escluso, ma non di una misura atta ad aumentare la resistenza del materiale.

L'idea di un trattamento superficiale, al fine di rendere l'elemento legno più o meno impermeabile e di impedire quindi l'aumento di umidità del legno oltre il limite critico del 20% anche in condizioni di azioni sfavorevoli, è priva di importanza pratica per gli elementi strutturali.

Le variazioni di temperatura e di clima cui sono sottoposti gli elementi provocano infatti comunque una variazione delle condizioni di umidità del materiale, con conseguenti fenomeni di ritiro, rigonfiamento, fessurazione, che non possono essere impediti da alcun trattamento superficiale.

Ne risulta quindi una superficie di protezione non più integra, con ulteriori conseguenze negative in quanto l'acqua penetra nel legno attraverso le fessure e fatica ad essere ceduta all'ambiente circostante a causa dello strato di protezione stesso.

Trattamento per impregnazione: tramite il trattamento per impregnazione si introducono nel legno sostanze preservanti, che ne aumentano la resistenza biologica. Anche in questo caso si deve tener conto di differenze importanti fra le specie legnose, che possono essere più o meno facilmente impregnabili: nella seguente tabella, è sintetizzata la classificazione delle specie più comunemente usate nelle costruzioni, secondo la normativa europea.¹¹

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

Figura 14 Classi di impregnabilità di alcune specie legnose usate nella costruzione (EN 350).

Dalla tabella risulta evidente che le specie di conifere comunemente usate nelle costruzioni sono, al di

¹¹ La classe di impregnabilità 1 indica una facile impregnabilità, mentre la classe 4 indica una impregnabilità molto difficile.

fuori dell'abete bianco, tutt'altro che facilmente impregnabili. In genere ci si dovrà accontentare di un effetto piuttosto superficiale anche per le procedure di impregnazione più complesse.

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

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

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

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

Negli ultimi anni sono stati sviluppati e implementati, in procedimenti di lavorazione industriale, i cosiddetti trattamenti termici del legno. Il principio di questi trattamenti si basa sui cambiamenti, a livello di struttura chimica, di alcune componenti della sostanza legnosa in presenza di temperature elevate, che permette di aumentare la durabilità del materiale anche in modo notevole.¹²

E' indubbio che questo tipo di trattamento permetta di aumentare la resistenza biologica del legno. E' però altrettanto vero che questi trattamenti modificano anche le caratteristiche meccaniche del legno, aumentandone la fragilità e riducendone resistenza e rigidità.

Le modifiche fisiche, meccaniche, biologiche e chimiche dipendono direttamente dalla temperatura raggiunta durante il trattamento.

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

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

2.2.4.3 La protezione costruttiva del legno strutturale

La protezione del legno ha come scopo principale la riduzione delle azioni già sopra descritte. Inoltre i provvedimenti costruttivi di protezione devono permettere una rapida essiccazione del legno in caso di aumento accidentale della sua umidità.

In caso di protezione cosiddetta completa, i provvedimenti di protezione costruttiva hanno due compiti essenziali: eliminare o ridurre tutte le azioni possibili, in modo da evitare, fin dalla fase di progetto, qualsiasi condizione per cui l'umidità del legno possa salire al di sopra del 20%; permettere l'essiccazione rapida del legno in caso di evento accidentale o non previsto che ne possa favorire l'aumento dell'umidità. Gli elementi di legno in questo modo non saranno mai soggetti a condizioni climatiche che ne possano limitare la durata della vita, che può quindi essere descritta come illimitata riguardo alla possibilità di

¹² Questo trattamento avviene, per esempio, in autoclavi nelle quali gli elementi di legno si trovano immersi in sostanze oleose, per una durata variabile ed a temperature diverse che, comunque, superano i 120°C.

degrado biologico del legno.

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

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

2.2.4.4 Gli accorgimenti costruttivi

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

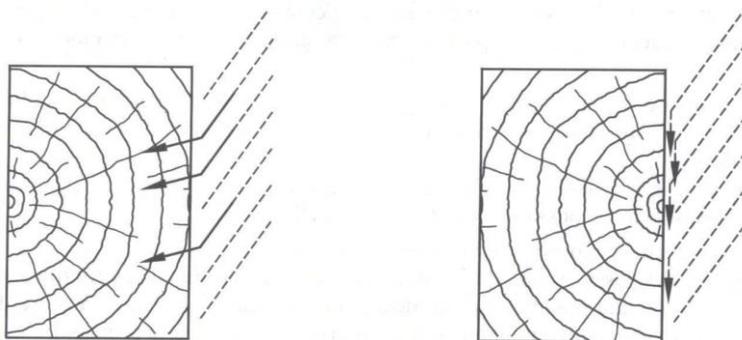


Figura 15 L'orientazione della superficie fessurata può favorire l'assorbimento d'acqua o ritardarlo.

Poiché il tipo di intaglio non può essere direttamente imposto o direttamente predeterminato dal progettista, in generale si può affermare che l'apertura di fessure in seguito ad essiccazione è da considerarsi come inevitabile per ogni elemento di legno massiccio.

Tali fessure offrono, in presenza di acqua o di elevata umidità, un aumento del rischio di degrado. L'apertura delle fessure, nelle tavole tangenziali, avviene di solito sulla faccia esterna del segato, cioè quella più eccentrica rispetto alla posizione originale del midollo.

E' quindi possibile ridurre il rischio di penetrazione dell'acqua nella sezione, orientando verso la direzione più esposta la superficie interna (ovvero quella verso il midollo) che presenta un minor rischio di fessurazione.

Anche nel caso di sezioni di legno lamellare incollato l'orientazione delle lamelle assume un'importanza fondamentale non solo per la riduzione del rischio di penetrazione dell'acqua, ma anche per possibili inconvenienti di ordine estetico e strutturale conseguenti al ritiro del materiale.

Infatti, le sezioni sono solitamente composte da lamelle con anelli orientati nello stesso modo, così da ridurre al minimo le sollecitazioni della superficie incollata dovute alla tendenza dell'imbarcamento delle lamelle in caso di variazioni dell'umidità, ad eccezione delle lamelle esterne, in cui gli anelli sono orientati in direzioni opposte per avere sempre esposte le facce interne della tavola.

Tale accorgimento tuttavia non deve esimere il progettista dall'individuare dei sistemi di protezione anche delle superfici laterali della trave. Infatti anche la semplice orientazione in opera del medesimo elemento strutturale in legno lamellare incollato può favorire e sfavorire notevolmente l'assorbimento di acqua eventualmente presente sulla superficie della trave.

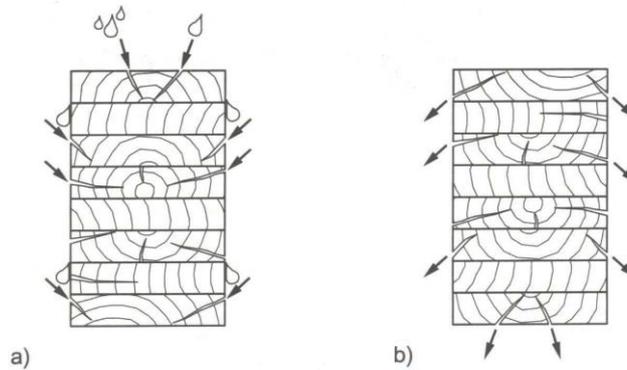


Figura 16 Effetto dell'orientazione di una trave in legno lamellare sulla possibilità di assorbimento di acqua.

Dato che l'assorbimento dell'acqua da parte del legno avviene in modo piuttosto lento, spesso il solo fatto che l'acqua non ristagni su una superficie orizzontale permette di ridurre notevolmente il rischio di degrado.

Si possono quindi individuare accorgimenti costruttivi molto semplici basati sia su un'orientazione appropriata delle tavole, sia sulla realizzazione di inclinazioni anche leggere delle superfici orizzontali, che evitino il ristagno dell'acqua.

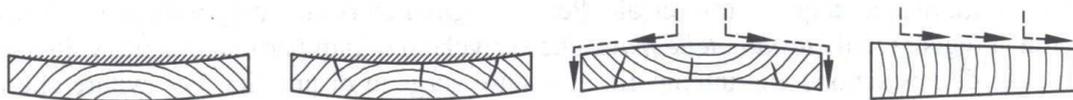


Figura 17 Ristagno o deflusso dell'acqua provocati dalla deformazione delle sezioni di una tavola, con problemi aggravati dalla posizione delle fessure.

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

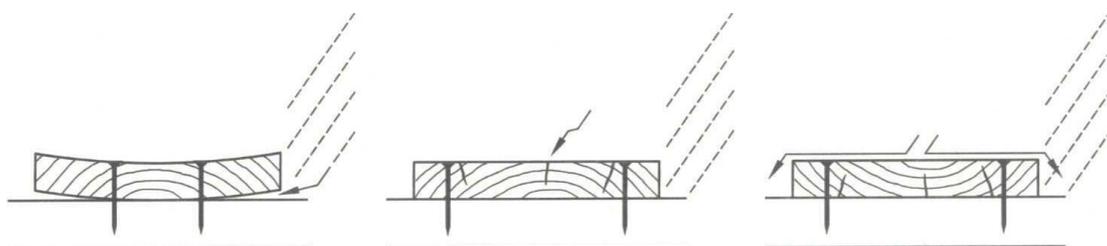


Figura 18 Modalità costruttive che possono favorire o sfavorire la penetrazione dell'acqua, o il deflusso rapido della stessa.

I fenomeni di assorbimento e di essiccazione sono più rapidi nella direzione parallela alla fibratura rispetto a quella trasversale. Per tali ragioni un rischio maggiore di apertura di fessure si registra nelle testate delle travi, che si rivelano particolarmente vulnerabili in caso di esposizione alle intemperie o ad altre sorgenti di umidità. Per evitare che un degrado prematuro inizi in questa zona e si diffonda rapidamente a tutta la trave, occorre ridurre il più possibile in tali zone il rischio di assorbimento dell'acqua.

L'accorgimento più semplice è la riduzione della superficie esposta della testata della trave al minimo per esempio con una forma adeguata delle estremità della trave stessa oppure con elementi di protezione.

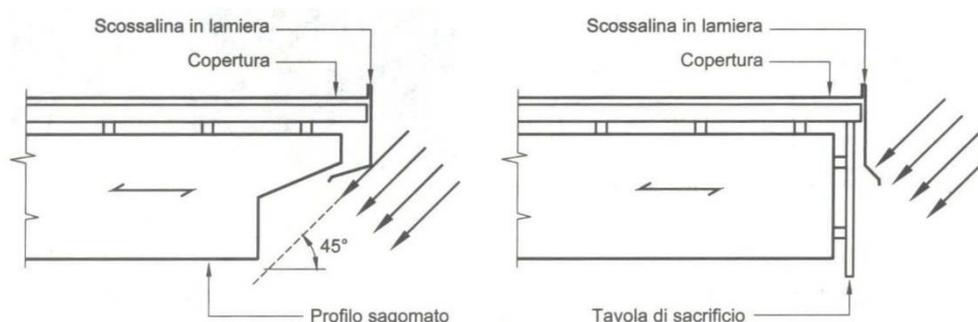


Figura 19 Riduzione del rischio di assorbimento di acqua nella zona di estremità di una trave mediante lavorazioni della testata e/o sistemi di protezione.

L'acqua può essere anche assorbita o trattenuta per capillarità sulle superfici delle zone di contatto, che possono così intrappolarla al loro interno. La prima regola da rispettare, al riguardo, è quella di evitare il contatto fra il legno e una parte umida.

Nel caso di appoggi di travi e pilastri su muratura o su calcestruzzo, per evitare il contatto diretto fra il legno e questi ultimi, si utilizzeranno quindi elementi intermedi.

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

In linea di principio, gli elementi di copertura non devono essere a contatto con l'elemento da proteggere. Tramite la superficie del legno avviene infatti lo scambio di vapore con l'ambiente circostante. In caso di superfici non ventilate a sufficienza, e quindi di condizioni climatiche locali a rischio, la probabilità di condensazione è molto elevata.

L'uso di elementi di protezione formati da lamiere metalliche può peggiorare la situazione, in quanto nell'aria già molto umida dell'intercapedine fra superficie del legno e lamiera, in caso di soleggiamento diretto, si instaura anche una temperatura elevata.

L'impiego di connettori comporta, quasi sempre, la presenza di fori o intagli, che permettono la penetrazione di acqua all'interno dell'elemento. Anche in questo caso è necessario adottare oculati accorgimenti costruttivi.

I connettori devono essere posizionati, di preferenza, in una zona non direttamente esposta alle intemperie, in modo che i fori e gli intagli necessari non possano favorire la penetrazione dell'acqua. Le connessioni più complesse, ad esempio con spinotti, devono essere concepite in modo che l'acqua, che si annida nei fori e negli intagli, possa sempre defluire in modo rapido ed efficace.

Gli intagli devono essere sempre possibilmente aperti verso il basso e le parti metalliche non devono impedire il deflusso dell'acqua dalle superfici di legno.

I connettori provvisti di testa o di dadi, combinati con rondelle di diametro in genere piuttosto grande, sono spesso fonte di problemi. Oltre a frenare il deflusso normale dell'acqua sulle superfici verticali, impediscono anche il rigonfiamento trasversale del legno.

Le tensioni di compressione che localmente ne derivano provocano facilmente una fessurazione elevata in caso di successivo essiccamento, ricreando le condizioni per la penetrazione dell'acqua. Mediante semplici intagli è possibile ovviare a questo problema, come illustrato nella seguente figura, oppure introducendo guarnizioni elastiche fra il metallo e il legno.

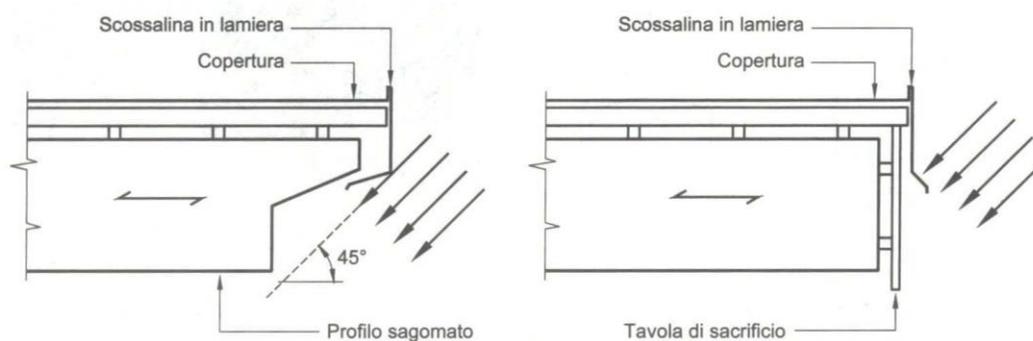


Figura 20 Problema posto dalle viti e possibile soluzione.

2.2.4.5 Misure di tipo costruttivo

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

Per ottenere una simile situazione occorre che:

- non sia possibile nessun contatto diretto o indiretto con l'acqua, e nessun irraggiamento solare diretto, per l'elemento protetto: in questo modo le cause di rischio del degrado sono eliminate, la sola possibilità di assorbire acqua da parte del legno è data dalla presenza di umidità relativa elevata nell'ambiente;
- la possibilità di una rapida eliminazione dell'acqua del legno sia sempre assicurata, anche in caso di evento eccezionale o imprevisto: prevedendo una ventilazione delle superfici del legno e evitando ogni tipo di dettaglio a rischio, l'essiccazione del legno troppo umido dovrebbe essere sempre possibile in tempi sufficientemente rapidi.

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

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

- la protezione tramite altri elementi della costruzione, cioè di elementi non espressamente concepiti come elemento di protezione;
- la protezione tramite elementi appositamente concepiti, progettati e messi in opera per

adempiere alla funzione di protezione del legno;

- la separazione della zona umida da quella asciutta.

Protezione tramite altre parti della costruzione

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

Protezione con elementi appositi

Gli elementi di protezione costruttiva sono appositamente concepiti e messi in opera per la protezione degli elementi strutturali del legno. Possono essere di materiali diversi dall'elemento che proteggono e avere durata di vita inferiore. Si tratta solitamente di tavole di altri elementi di legno direttamente esposti alle intemperie, e sono definiti come elementi di sacrificio.

Devono essere concepiti e costruiti in modo da poter essere sostituiti senza grossi problemi, nell'ambito delle normali operazioni di manutenzione ordinaria, ad esempio a mezzo di lamiera metalliche, con particolare attenzione, in questo caso, alla ventilazione.

E' spesso nei dettagli, nei giunti, nelle connessioni, nelle parti terminali dei singoli elementi, che si verificano le condizioni più sfavorevoli alle azioni sopra indicate e quindi al degrado del legno. L'estremità delle travi è un punto particolarmente vulnerabile dal punto di vista della durabilità del legno. Si può per esempio eseguire una protezione superiore della trave mediante una lamiera di rame, lavorata in modo da evitare le infiltrazioni di acqua nell'intercapedine di ventilazione fra gli elementi di copertura e l'elemento di legno da proteggere.

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

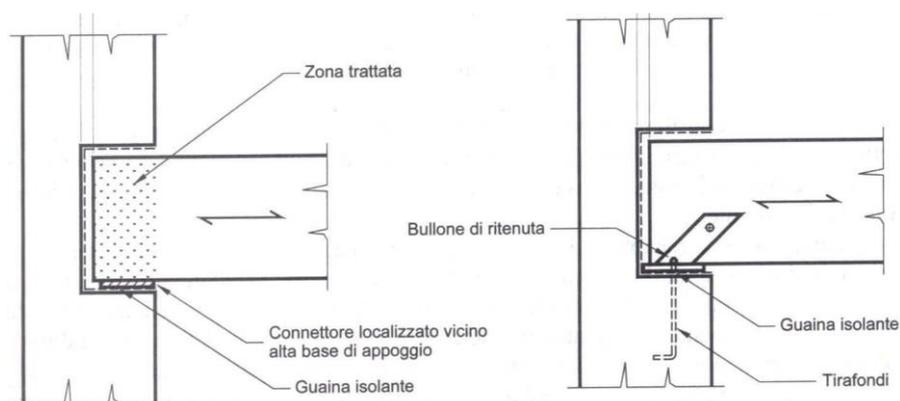


Figura 21 Estremità di trave inserita in una muratura, con misure di protezione costruttiva.

Protezione tramite separazione della zona umida da quella asciutta

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

efficace per assicurare una protezione efficace del legno.

Questa separazione può avvenire nel caso di elementi strutturali piani, in cui la superficie sia utilizzata direttamente, e quindi una areazione risulti difficile se non impossibile.

E' possibile ottenere una protezione efficace delle superfici del legno tramite scelte adeguate e con l'applicazione di strati impermeabili all'acqua.

La durabilità dell'elemento di legno dipende, in queste applicazioni, dalla qualità e durabilità della membrana impermeabile, nonché della sua corretta messa in opera. Alcune parti di costruzioni, ad esempio le fondazioni, sono a contatto diretto con zone umide che possono trasportare acqua per capillarità trasmettendola poi agli elementi di legno. La separazione fisica è in questi casi l'accorgimento più semplice.

Protezione parziale del legno

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

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

2.3 I prodotti del legno per la costruzione

2.3.1 Introduzione

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

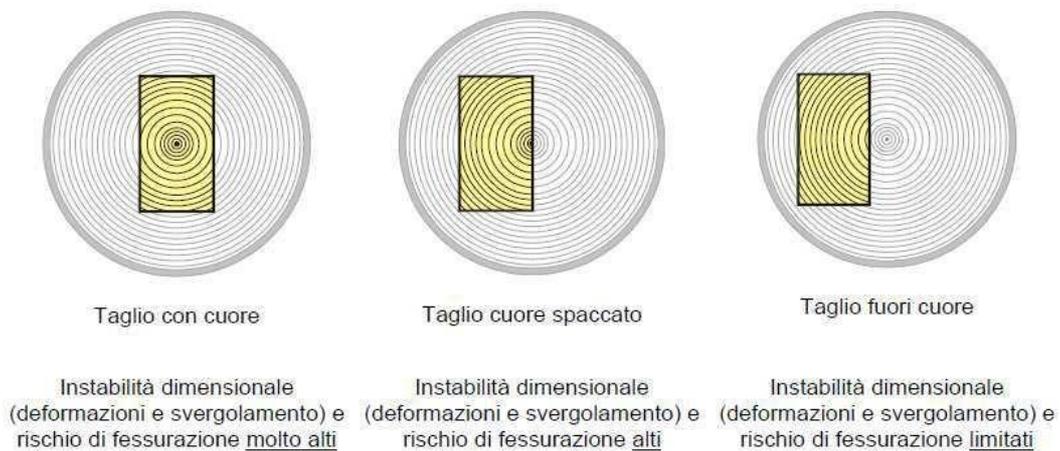


Figura 22 Possibili tipi di taglio del legno.

I segati possono essere classificati secondo la resistenza ed essere usati con funzione strutturale per elementi di tipo lineare di legno massiccio. Gli evidenti limiti nelle dimensioni e nelle caratteristiche fisico-meccaniche, derivanti dal fatto che i segati provengano da un unico tronco di legno, vengono superati grazie al processo di incollaggio, attraverso il quale è possibile realizzare prodotti di tipo lineare (legno massiccio da costruzione, travi DUO/TRIO e legno lamellare incollato).

I segati vengono giuntati in direzione longitudinale mediante il giunto a pettine (di cui si parlerà nel seguito), realizzando così un prodotto di maggiore lunghezza.

Tramite incollatura della superficie possono essere uniti più elementi in direzione trasversale, ottenendo sezioni di dimensioni più grandi; tramite incollatura di più strati vengono prodotti gli elementi piani di legno massiccio e il compensato di tavole.

Mediante processi di lavorazione e produzione industriali, si possono realizzare prodotti a base legno con caratteristiche meccaniche definite e con minore dispersione rispetto al legno massiccio. Di essi fanno parte prodotti piani o a forma di trave ricavati da piallacci, trucioli e fibre di legno.

Gli elementi costruttivi di legno di forma lineare, ad esempio travi o aste, sono da sempre utilizzati nel settore edile.

Un'evoluzione significativa si è avuta negli ultimi anni in seguito allo sviluppo di elementi costruttivi a base legno di forma piana, che è stato possibile mettere sul mercato grazie all'evolversi della possibilità di lavorazione e della tecnologia di incollaggio.

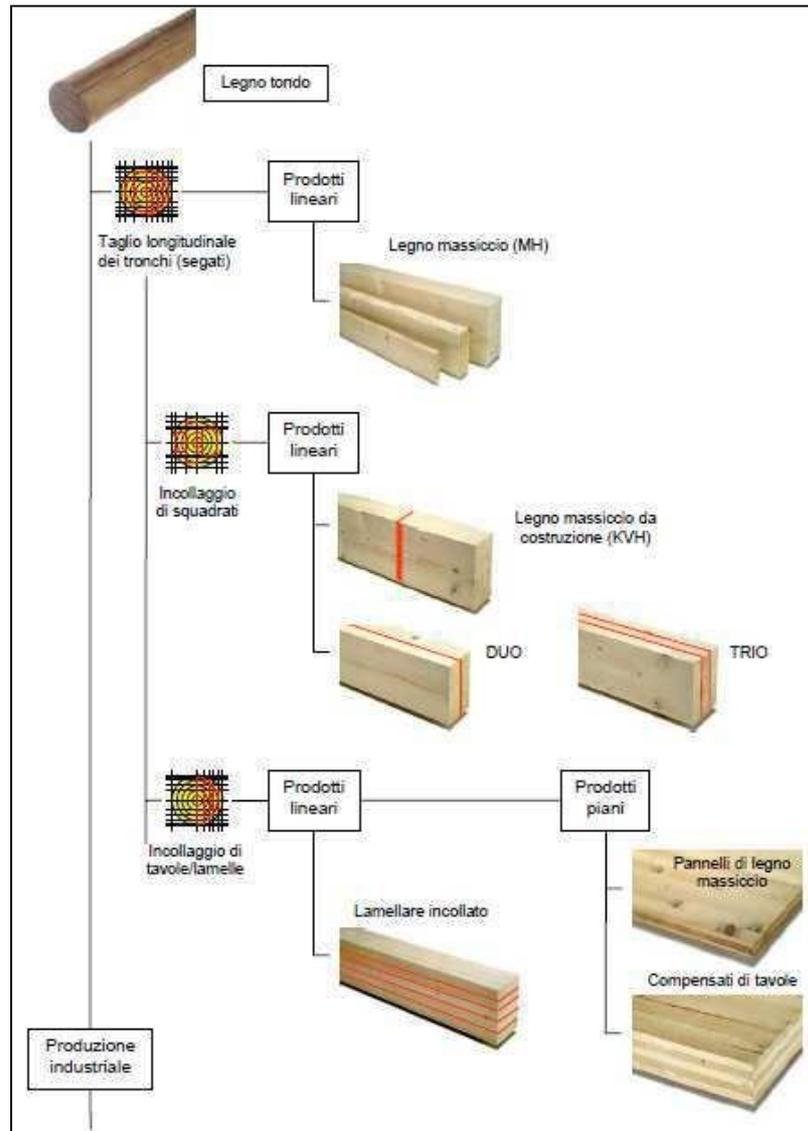


Figura 23 Lavorazioni del legno dall'elemento iniziale al prodotto finito.

2.3.2 Prodotti di tipo lineare

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

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

2.3.3 Legno massiccio

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

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

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

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

Figura 24 Classificazione del legno massiccio in base alle dimensioni.

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

Di regola, il legname squadrato viene fornito, in base alle richieste del cliente, ad incrementi di lunghezza di 0,5 m. La lunghezza massima dipende tuttavia dal taglio e dal trasporto e non supera, di norma, i 14 m. Le dimensioni delle sezioni variano ad incrementi di 20 mm e, a causa del diametro del tronco, sono limitate a circa 260 mm (in casi eccezionali 320 mm).

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

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

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

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

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

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

La travatura Uso Trieste deriva dal legno di abete rosso scortecciato, con squadratura continua sulle quattro facce. Questo tipo di squadratura con smusso su tutta la lunghezza, seguendo la conicità del legno, intacca solo superficialmente le fibre determinando una più elevata resistenza meccanica.

La travatura Uso Trieste è adatta a lavori di carpenteria ed è utilizzata per la costruzione di tetti e coperture. Le sezioni vanno da 9 x 9 cm fino a 30 x 30 cm e le lunghezze da 3 m a 10 m.

La travatura Uso Fiume viene realizzata in tronchi di legno d'abete rosso. Piallata/asciata sui 4 lati a sezione parallela, mantiene i caratteristici bordi smussati per tutta la lunghezza. La maggior parte delle fibre legnose rimane intatta, conferendole ottime caratteristiche meccaniche e di elasticità. La travatura Uso Fiume viene utilizzata in lavori di restauro e laddove siano richiesti risultati estetici particolari. Le sezioni vanno da 12 x 12 cm fino a 24 x 24 cm e le lunghezze da 4 m a 8 m.

2.3.4 Prodotti di legno massiccio

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



Figura 25 Giunto a pettine.

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

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

Contrariamente a quanto accade per il legno massiccio e il legno massiccio (MH), che sono disponibili in tutte le dimensioni realizzabili in base al diametro del legno tondo di partenza e che vengono forniti sulla base delle liste di ordinazione, il legno massiccio da costruzione (KVH) viene offerto in dimensioni standard. Le lunghezze disponibili dipendono generalmente dalla sezione e raggiungono i 5 m per gli elementi senza giunti a pettine, mentre per quelli giuntati sono normali lunghezze fino a 18 m. Il legno massiccio da costruzione (KVH) e il legno massiccio (MH-Plus) sono di regola prodotti piallati e smussati.

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

2.3.4.1 travi duo/trio

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

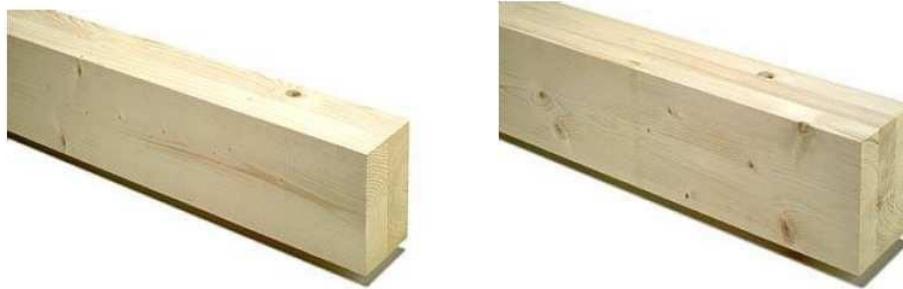


Figura 26 Trave DUO (sinistra) e TRIO (destra).

Le travi DUO e TRIO vengono offerte generalmente nelle cosiddette “sezioni preferenziali”, le cui dimensioni possono desumersi dalle seguenti tabelle. In linea di principio, le dimensioni massime della sezione sono definite dalle dimensioni massime del singolo elemento di legno squadrato.

Trave DUO

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

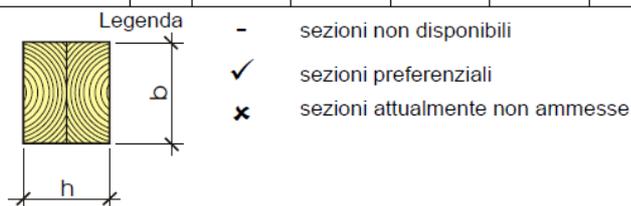
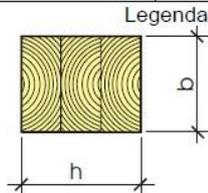


Figura 27 Sezioni standard disponibili per le travi DUO.

Trave TRIO

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



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

Figura 28 Sezioni standard disponibili per le travi TRIO.

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

Le travi DUO e TRIO soddisfano le principali esigenze riguardanti le strutture in elevazione, in particolar modo per le travi (a vista) dei solai, per strutture di copertura (puntoni ed arcarecci) e per tutti i rimanenti elementi strutturali non esposti direttamente agli agenti atmosferici.

2.3.5 Legno lamellare incollato

Il legno lamellare incollato è un prodotto composito costituito da lamelle solitamente di una sola specie legnosa e incollate parallelamente alla fibratura. Si vengono a formare elementi strutturali di qualsiasi dimensione e forma (anche curvi e con sezione variabile) con dimensione, sezione e caratteristiche geometriche svincolate dalla geometria iniziale del tronco. Il legno lamellare ha una maggiore resistenza del legno massiccio.¹³



Figura 29 Legno lamellare incollato.

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

¹³il controllo di qualità sulle lamelle permette di eliminare i difetti che possono compromettere la resistenza del materiale, mentre i piccoli difetti che restano nelle singole lamelle risultano casualmente ripartiti nella struttura.

la quercia, la robinia o il castagno.

Le caratteristiche fisico-meccaniche del legno lamellare sono determinate principalmente dalla qualità delle lamelle, dalla corretta realizzazione del giunto a pettine e dalla posizione delle lamelle all'interno dell'elemento finito. Oltre che dalle proprietà delle lamelle classificate, e tra queste soprattutto quelle relative al comportamento a trazione, la resistenza degli elementi strutturali di legno lamellare incollato è influenzata anche dal giunto di testa delle lamelle, il giunto a pettine di cui si è già parlato nel paragrafo dedicato al legno massiccio da costruzione (KVH). Soltanto grazie al giunto a pettine è possibile la produzione di una "lamella continua" e quindi del legno lamellare incollato. A seconda della classe di resistenza del legno lamellare, il giunto a pettine deve raggiungere valori ben determinati della resistenza a flessione e a trazione. Le potenzialità di questa giunzione dipendono prevalentemente dalle caratteristiche geometriche dei denti e dalla qualità della produzione, che a sua volta dipende dagli impianti di produzione. La lamella continua così realizzata presenta, in base alla specie legnosa utilizzata e al tipo d'impiego previsto, uno spessore massimo finale di 45 mm. Per gli elementi strutturali di legno lamellare di tipo lineare prodotti da legname di Conifere, lo spessore finale delle lamelle è di regola compreso fra 32 mm e 40 mm.¹⁴ Per quanto concerne la posizione delle lamelle all'interno del pacchetto finito, si deve tener conto del fatto che la parte "destra" della tavola (quella più vicina al midollo) deve trovarsi sempre dallo stesso lato. Nel legno lamellare della classe di servizio 3, entrambe le lamelle esterne devono avere la parte "destra" rivolta verso l'esterno.

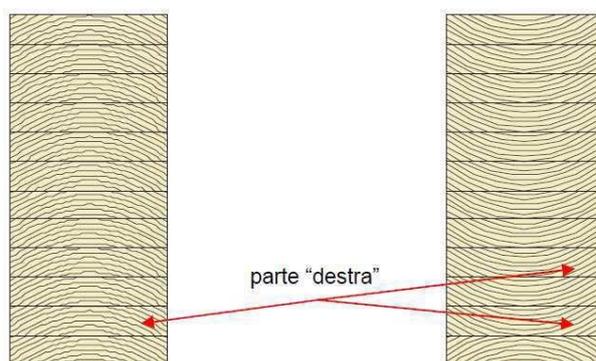


Figura 30 Posizione delle lamelle normale (sinistra) e per la classe di servizio 3 (destra).

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

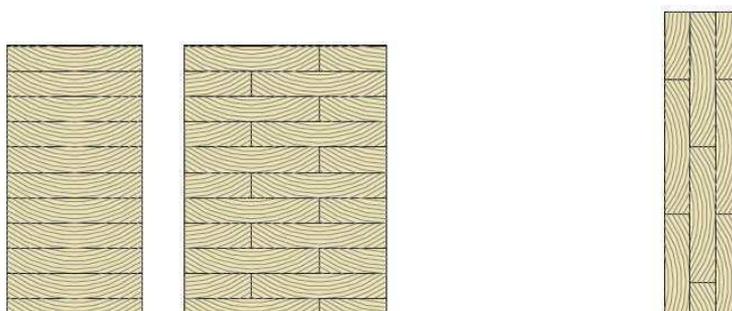


Figura 31 Legno lamellare incollato laminato in orizzontale (sinistra) e in verticale (destra).

¹⁴ La larghezza finale delle lamelle aventi uno spessore $d = 40$ mm, in base alla classe di servizio, risulta al massimo pari a $b = 250$ mm (per la classe 3) oppure $b = 300$ mm (per la classe 1).

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

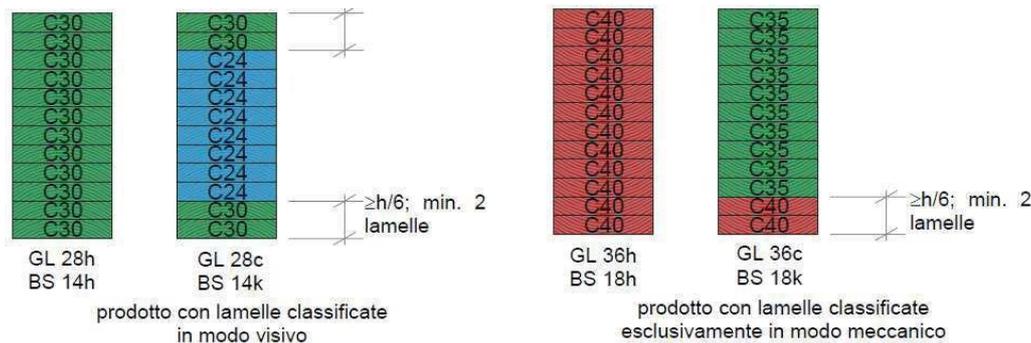


Figura 32 Sezioni omogenee e sezioni combinate.

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

2.3.6 Prodotti di tipo piano

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

Essi possono lavorare sia come piastre (per carichi agenti perpendicolarmente al piano del pannello) che come lastre (per carichi agenti nel piano del pannello).

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

La classificazione dei prodotti piani a base legno può essere fatta in base a diversi criteri e non può essere

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

Per grado di scomposizione si intende la grandezza (granulometria) del materiale di base destinato alla produzione. Per i prodotti a base legno, a seconda delle dimensioni, si distingue tra fibre di legno (o fasci di fibre), trucioli, piallacci e tavole (lamelle). Quanto maggiore è il grado di scomposizione, tanto maggiore sarà l'effetto di omogeneizzazione all'interno dell'elemento a base legno. In base a queste considerazioni è logico aspettarsi la maggiore omogeneità nei pannelli composti da fibre di legno. Ciò significa che in questi elementi costruttivi la dispersione dei parametri caratteristici del materiale, ad esempio i valori di resistenza e rigidezza, è inferiore rispetto al materiale da costruzione legno massiccio, caratterizzato da elevata disomogeneità e anisotropia.

D'altro canto, più aumenta il grado di scomposizione, più la fibra è soggetta a danni, con una conseguente perdita di resistenza del materiale ottenuto e quindi dell'elemento costruttivo con esso realizzato. Pertanto la produzione di prodotti a base legno richiede sempre un compromesso tra questi due aspetti. La struttura dei prodotti stratificati e compensati è simmetrica rispetto al piano medio al fine di evitare deformazioni indesiderate (ad esempio l'imbarcamento). Il legame tra i singoli strati viene realizzato mediante incollaggio con sostanze adesive specifiche.

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

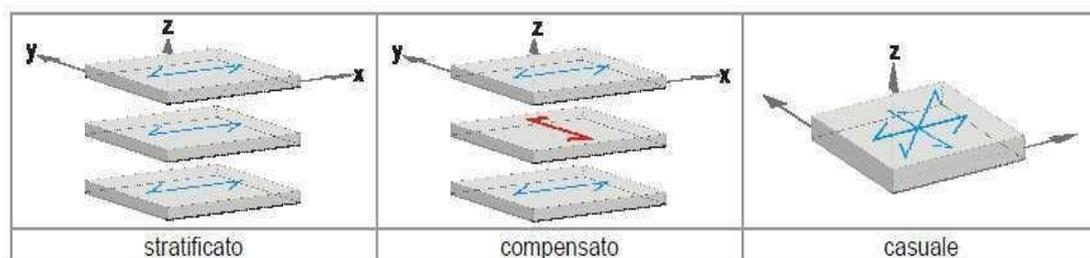


Figura 33 Possibile orientamento degli strati all'interno di un prodotto di tipo piano.

Negli elementi stratificati piani, i singoli elementi che costituiscono l'elemento piano sono disposti con la direzione della fibratura parallela l'uno all'altro. In questo modo si ottiene una resistenza simile al legno massiccio, mantenendo tuttavia buone proprietà di ritiro e rigonfiamento e valori bassi di resistenza a trazione e a flessione trasversale perpendicolarmente alla fibra. In molti casi questi elementi vengono sottoposti a successiva lavorazione per ottenere elementi lineari, poiché la maggior omogeneità del prodotto ricomposto assicura resistenze caratteristiche superiori rispetto al legno massiccio per la più limitata dispersione dei parametri caratteristici del materiale (ad es. legno a trucioli lunghi TimberStrand). Negli elementi piani di tipo compensati, una parte degli strati (di norma circa la metà degli strati) è orientata in direzione perpendicolare alla fibra degli strati esterni. È però possibile anche l'orientamento casuale della direzione della fibratura dei componenti dei singoli strati. In virtù del collegamento fra i vari elementi, le deformazioni di ritiro e rigonfiamento nel piano del pannello perpendicolarmente alla direzione della fibra vengono impediti dagli elementi la cui fibra è orientata nella medesima direzione. In questo caso si subisce una perdita di resistenza e rigidezza nella direzione principale (che in genere corrisponde all'orientamento degli strati esterni e/o alla direzione principale di sollecitazione), ma d'altro canto si ottiene un elemento piano di forma notevolmente più stabile. In questo modo è possibile costruire

elementi di chiusura che da un lato consentono di realizzare pareti, solai e coperture, rispettando nel contempo le vigenti norme di fisica tecnica (soprattutto la permeabilità all'aria e al vento), e dall'altro sono in grado di sostenere carichi in direzione sia parallela al piano (esercitando così una funzione di irrigidimento) che perpendicolare ad esso (vento per le pareti, carichi verticali per solai e coperture).

Il grado di scomposizione prevede, come descritto precedentemente, la suddivisione dei materiali di base in tavola, piallaccio, truciolo e fibra. L'orientamento introduce l'ulteriore classificazione in "compensati" e "stratificati". Da queste due classificazioni derivano le denominazioni dei singoli prodotti, ricavate dalla combinazione delle diverse categorie (ad esempio "tavole + orientamento compensato = legno compensato di tavole" o "piallacci + orientamento stratificato = legno stratificato di piallacci"). La denominazione è così indicativa sia della struttura che del comportamento dell'elemento a base di legno. Gli elementi stratificati presentano un'elevata resistenza in direzione della fibratura, mentre la resistenza e la rigidezza trasversalmente alla fibratura sono ridotte. Gli elementi compensati, al contrario, possono essere realizzati con una sezione trasversale specificamente studiata per diversi ambiti applicativi, in modo da ottenere valori di resistenza identici in entrambe le direzioni.

2.3.6.1 PANNELLI COMPOSTI DA FIBRE DI LEGNO

Il materiale di base fibra di legno viene ottenuto mediante un processo di sfibratura della materia prima legno, normalmente dopo che il legno grezzo è stato sottoposto a una prima riduzione in minuzzolo. In questo modo si ottiene una completa disgregazione della struttura naturale del legno, che viene ridotto in fasci di fibre.



Figura 34 Fasi produttive delle fibre di legno.

Il legame delle fibre all'interno del pannello viene ottenuto mediante l'intreccio delle fibre stesse e l'azione adesiva delle sostanze proprie del legno. Inoltre è possibile aggiungere altre sostanze adesive alla miscela. In base al processo di produzione, i pannelli di fibra di legno vengono suddivisi in "pannelli per via umida" e "pannelli per via secca". Secondo la norma DIN EN 316:12.1999, la distinzione è determinata dalla percentuale di umidità nella fibra nel processo di fabbricazione del pannello:

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

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

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

Figura 35 Classificazione e denominazione dei pannelli di fibra di legno secondo DIN EN 316:1999.

2.3.6.2 PANNELLI DI FIBRA DI LEGNO POROSI

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



Figura 36 Pannello di fibra di legno poroso.

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

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

I pannelli di fibre di legno bituminosi, proprio per la presenza di bitume, risultano essere non suscettibili all'umidità, non tendono a presentare marciume e sono resistenti agli attacchi biotici. Per queste caratteristiche, essi possono essere impiegati come isolanti termo-acustici anche in zone ad elevata umidità.



Figura 37 Struttura di una copertura con isolamento tra gli elementi dell'orditura;

2.3.6.3 PANNELLI DI FIBRA DI LEGNO DURI E MEDIO – DURI

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

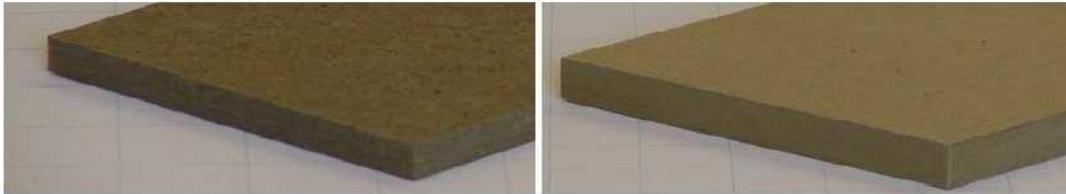


Figura 38 Pannello di fibra di legno duro (sinistra) e medio – duro (destra).

I pannelli MDF traspiranti (dalla dicitura inglese Medium Density Fiberboard) rappresentano l'evoluzione dei tradizionali pannelli MDF incollati con resine a base di formaldeide. Tale evoluzione si è resa necessaria, dalla metà degli anni '90, per la crescente richiesta di un materiale che permettesse la costruzione di pareti traspiranti. La massa volumica di questi pannelli è compresa, a seconda della ditta produttrice, tra 540 kg/m^3 e 650 kg/m^3 . Gli spessori sono compresi tra i 12 mm ed i 20 mm.

I pannelli MDF traspiranti si distinguono da quelli tradizionali per la maggiore presenza di paraffina, una distribuzione delle fibre diversa durante la produzione ed un processo di pressatura modificato, il quale rende possibile una minore massa volumica.

I pannelli di fibra di legno duri e medio - duri possono essere utilizzati per rivestimenti e/o tamponature con funzione portante (strutturale).

Attualmente, però, il loro impiego è limitato. Le limitazioni al loro impiego sono stabilite nella norma DIN 1052:2004. In generale, i pannelli di fibra di legno non possono essere utilizzati in solai e coperture come elementi con comportamento a lastra.

2.3.6.4 PANNELLI DI FIBRA DI LEGNO A MEDIA DENSITA'

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



Figura 39 Pannello di fibra di legno a media densità (MDF).

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

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

2.3.6.5 PANNELLI COMPOSTI DA TRUCIOLI

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

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

- in base alla struttura del pannello: monostrato; multistrato¹⁵; a separazione progressiva simmetrica; pannelli estrusi con tubi;
- in base alle dimensioni e alla forma delle particelle: pannelli di truciolini sminuzzati (pannelli truciolari); pannelli di truciolini grossi e ampi (Waferboard); pannelli di truciolini lunghi, stretti e orientati (OSB); pannelli di altri materiali (p. es. cascami di lino);
- in base all'impiego: pannelli per uso generico; pannelli per arredo d'interni in ambienti asciutti; pannelli per strutture portanti e di irrigidimento in edilizia in ambienti asciutti o umidi; pannelli per impieghi speciali (es. carichi elevati, resistenza al fuoco, isolamento acustico).

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

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

¹⁵ Può essere composto da diverse particelle orientate o non orientate all'interno dei diversi strati.

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



Figura 40 Pannello OSB.

2.3.6.6 PANNELLI PIANI PRESSATI INCOLLATI CON RESINE SINTETICHE

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



Figura 41 Pannello piano pressato incollato con resine sintetiche (sinistra) e pannello di trucioli a striatura (destra).

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

La geometria del truciolo (grado di snellezza), l'orientamento dei trucioli e la loro stratificazione influenzano considerevolmente (assieme alla colla e ad altri parametri di produzione quali il tipo di trucioli, la pressione e il tempo di pressatura) il profilo di massa volumica e con esso le caratteristiche del pannello piano pressato. Il pannello può avere le seguenti dimensioni: spessore da 8 mm a 50 mm (max. 80 mm) ad incrementi da 1 mm a 2 mm; formato 1250 x 2500 fino a 5000, 1850 x 4100, 2050 x 2750/5300 mm; lunghezza fino a 14 m.

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

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

2.3.6.7 PANNELLI OSB

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

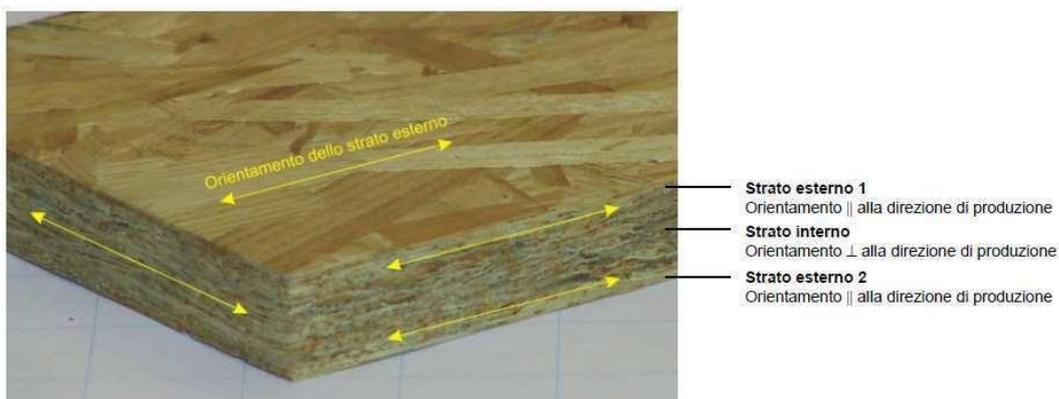


Figura 42 Orientamento degli strati in un pannello OSB.

Gli strand dell'OSB hanno una lunghezza compresa tra 60 mm e 150 mm, una larghezza tra 10 mm e 35 mm e uno spessore tra 0,4 mm e 0,6 mm (max. 1,0 mm), con orientamento della fibra in direzioni longitudinali. I trucioli degli strati esterni sono orientati parallelamente alla direzione di produzione e presentano in genere la migliore qualità in termini di geometria e precisione di orientamento. I trucioli dello strato interno vengono invece orientati a caso (random) o perpendicolarmente alla direzione di produzione. Lo strato interno dell'OSB presenta una massa volumica inferiore, poiché di norma è

caratterizzato da una maggiore percentuale di materiale fine e da una maggiore variabilità nella geometria degli strand. In genere vengono utilizzate colle diverse per gli strati esterni e per lo strato interno, soprattutto per ragioni tecniche di produzione ed economicità. I pannelli possono avere dimensioni fino a 2,8 m di larghezza e a 11,5 m di lunghezza, con spessore compreso tra 8 mm e 40 mm. Essi vengono ridotti a pannelli di dimensioni minori orientati al mercato.

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

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



Figura 43 Alcune fasi di un ciclo produttivo continuo per la produzione di pannelli OSB.

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

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

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

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

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

- OSB/1: Pannelli per impieghi generici e per arredo d'interni destinati ad ambienti asciutti (cioè non adatti per impieghi strutturali);
- OSB/2: Pannelli per impieghi strutturali in ambienti asciutti;
- OSB/3: Pannelli per impieghi strutturali in ambienti umidi;
- OSB/4: Pannelli ad elevata portata per impieghi strutturali in ambienti umidi.

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

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

2.3.6.8 PANNELLI COMPOSTI DA PIALLACCI

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

necessario, viene trattato preventivamente a vapore.

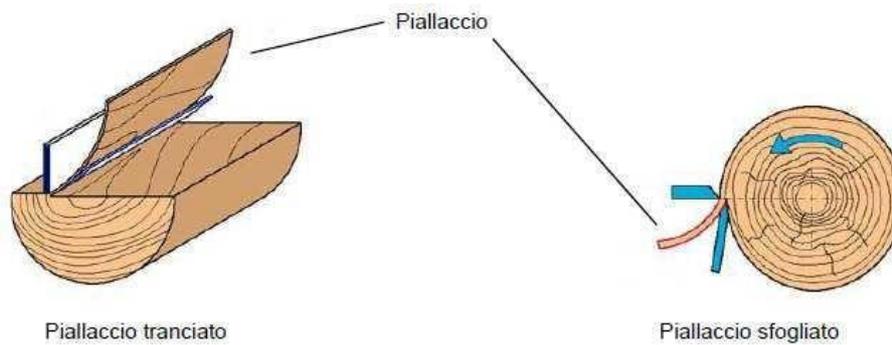


Figura 44 Classificazione dei piallacci in base al processo di produzione.

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

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

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

Con il piallaccio vengono realizzati diversi materiali a base legno le cui proprietà dipendono principalmente dall'orientamento della fibratura nei diversi strati.

Attualmente si distingue tra compensato, dove le fibre di due strati adiacenti sono orientate perpendicolarmente l'una all'altra, e stratificato, dove l'orientamento della fibra è parallelo per tutti gli strati. Oggi vengono prodotti anche compensati con strati di spessore differente ottenuti con piallacci di uguale spessore pressati a formare pannelli composti da due o più piallacci con fibratura parallela.

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

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

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

2.3.6.9 COMPENSATO

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

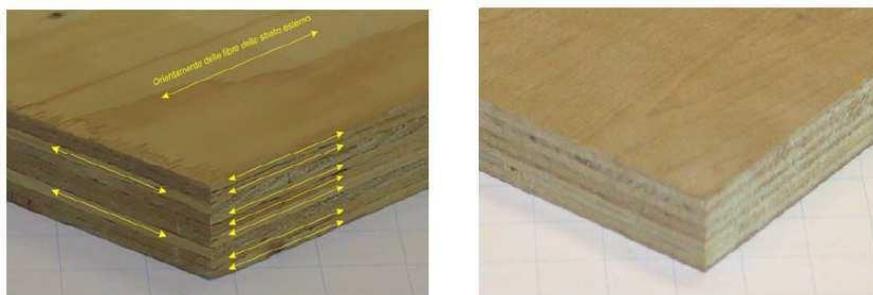


Figura 45 Orientamento dei singoli strati del piallaccio compensato (sinistra) e pannello di faggio (destra).

Le dimensioni abituali di 2,5 m dei compensati e del legno stratificato non rappresentano una misura significativa per il settore edilizio per cui, nel caso di produzione di elementi di dimensioni più grandi per usi costruttivi, è necessario realizzare una giunzione per il prolungamento dei piallacci all'interno di uno stesso strato. Questa giunzione può avvenire sotto forma di giunto piatto (senza continuità del piallaccio), tramite sovrapposizione o tramite giunto incollato longitudinale del piallaccio. Il tipo di connessione longitudinale dei singoli piallacci assume una rilevanza importante ai fini delle caratteristiche meccaniche del prodotto a base di piallacci. Le caratteristiche meccaniche migliori si ottengono con piallacci tagliati obliquamente in modo da formare un giunto a becco di flauto.

2.3.6.10 LEGNO STRATIFICATO

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

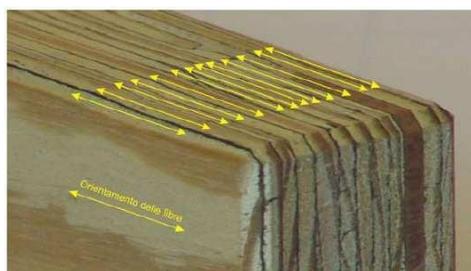


Figura 46 Orientamento dei singoli strati del piallaccio stratificato.

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

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

I legni stratificati vengono utilizzati principalmente come elementi costruttivi monodimensionali, anche in combinazione con altri materiali (ad es. travi a I con ali in legno stratificato ed anima in legno compensato). In virtù della struttura piana e delle buone proprietà di resistenza nella direzione di lavorazione, il legno stratificato è ideale per sezioni scatolari e solette nervate. Tuttavia bisogna prestare la giusta attenzione alle deformazioni da rigonfiamento e ritiro perpendicolarmente all'asse dell'elemento costruttivo, soprattutto perpendicolarmente al piano dell'elemento, poiché i relativi valori caratteristici trasversalmente alla fibra sono molti simili a quelli del legno massello.

2.3.6.11 PANNELLI COMPOSTI DA TAVOLE

Il prodotto di base tavola viene ricavato prevalentemente mediante segagione direttamente dalla materia prima tronco. Prima della lavorazione successiva, le tavole vengono classificate in base alla resistenza, prevalentemente con classificazione visiva. I prodotti compensati composti da tavole sono i pannelli di legno massiccio multistrato ed i pannelli di legno compensato di tavole. La struttura di questi pannelli è in linea di principio la stessa: singoli strati composti ciascuno da tavole dello stesso spessore vengono incollati uno sull'altro, generalmente sotto un angolo di 90°. Si ottiene così un elemento di forma piana compensato. Il numero di strati è dispari, in modo tale da avere una struttura simmetrica che garantisca la stabilità nella forma del prodotto.



Figura 47 Pannelli di legno massiccio a tre strati (sinistra) e pannello di legno compensato di tavole a cinque strati (destra).

2.3.6.12 PANNELLI DI LEGNO MASSICCIO MULTISTRATO

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



Figura 48 Pannelli di legno massiccio monostrato (sinistra) e a tre strati (destra).

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

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

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

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

I pannelli di legno massiccio multistrato vengono utilizzati soprattutto per elementi a vista con funzione portante e di irrigidimento (tamponature a vista per l'assorbimento dei carichi orizzontali, tetti a capriata semplice a vista, solai con trave inflessa a vista), in quanto il loro prezzo è sensibilmente superiore ai materiali a base di legno alternativi. Grazie alle loro caratteristiche di resistenza e rigidità simili a quelle dei segati, i pannelli di legno massiccio possono essere impiegati con funzione portante in collegamento con i prodotti di tipo lineare dei sistemi intelaiati. I valori di resistenza e rigidità simili al legno massiccio permettono di realizzare sezioni composite con prestazioni elevate sotto forma di solette nervate e strutture a cassone. In questo caso si creano elementi composti formati da pannelli multistrato e prodotti di legno massiccio.

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

2.3.6.13 LEGNO COMPENSATO DI TAVOLE

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

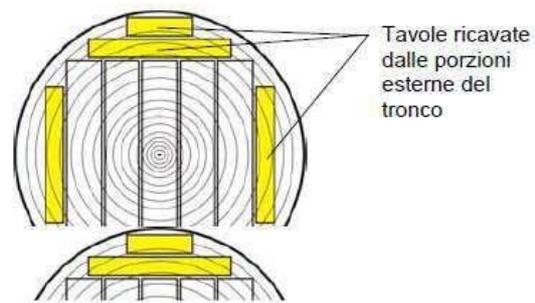
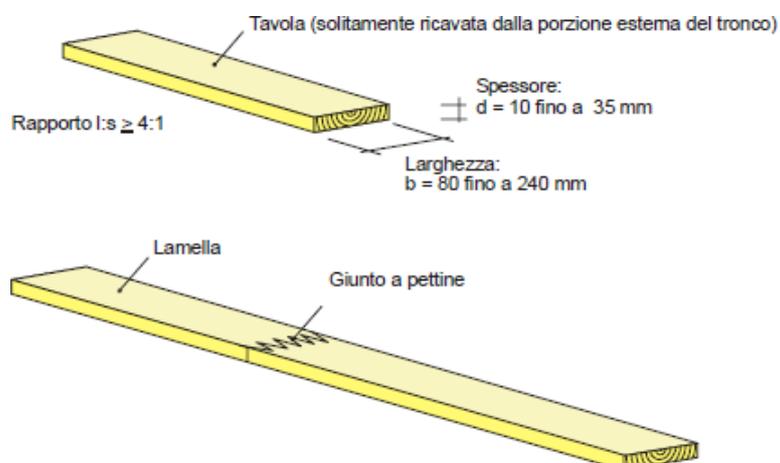


Figura 49 Posizione delle singole tavole all'interno del tronco.

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

Le grandezze caratteristiche delle singole tavole, importanti per la determinazione delle caratteristiche del prodotto finito, sono la resistenza a trazione, il modulo E a trazione nonché, in parte, la massa volumica. I singoli strati di un elemento di legno compensato di tavole particolarmente sollecitato dovrebbero essere di qualità adeguata e giuntati a pettine. È comunque preferibile che tutte le lamelle siano giuntate a pettine. Le lamelle, piallate su quattro lati, possono presentare un andamento dei bordi parallelo, profilato o conico. Con le lamelle prodotte in questo modo vengono realizzati pannelli monostrato, nei quali, in caso di particolari esigenze riguardo all'ermeticità nei confronti del vento, all'isolamento acustico, all'aspetto, le giunture delle singole lamelle possono essere eseguite mediante incollaggio laterale delle lamelle stesse. In questo modo è possibile ottenere una qualità elevata del compensato di tavole anche dal punto di vista estetico. La struttura tipica di un pannello di legno compensato di tavole è costituita da strati di tavole o pannelli monostrato sovrapposti, orientati alternativamente a 90° . È pensabile anche un orientamento degli strati di tavole per esempio sotto un angolo di 45° . Il collegamento rigido dei singoli pannelli monostrato si realizza mediante incollaggio omogeneo dell'intera superficie e con l'utilizzo di un idoneo sistema di applicazione dell'adesivo.



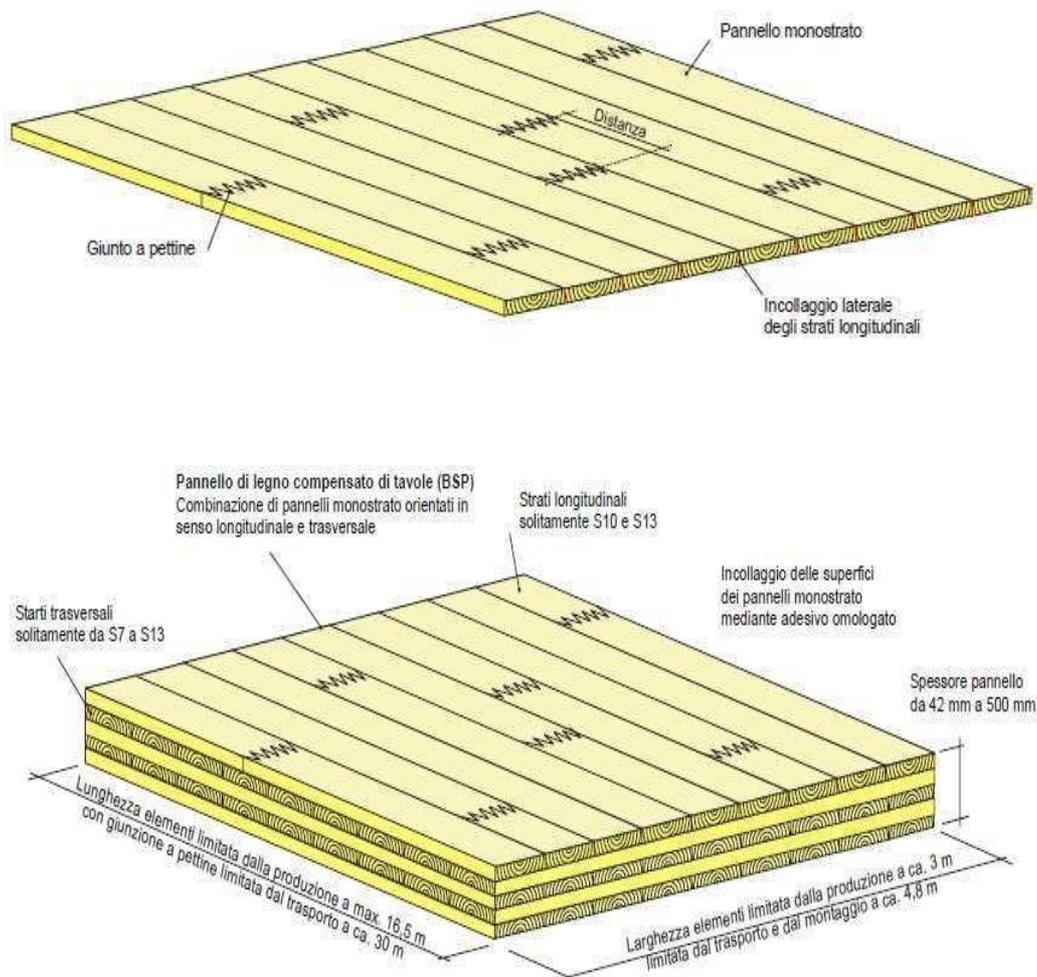


Figura 50 Struttura di un pannello di legno compensato di tavole a cinque strati, a partire dal materiale di base tavola.

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

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

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

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

Gli strati esterni in qualità a vista collaboranti alla funzione statica dovrebbero essere incollati, per motivi di simmetria della sezione, su entrambe le facce esterne del pannello di legno compensato di tavole. Questi strati esterni possono essere realizzati con pannelli monostrato a maschio-femmina, compensati di

piallacci a 3, 5 o più strati, nonché stratificati di piallacci e compensati truciolari come l'OSB.

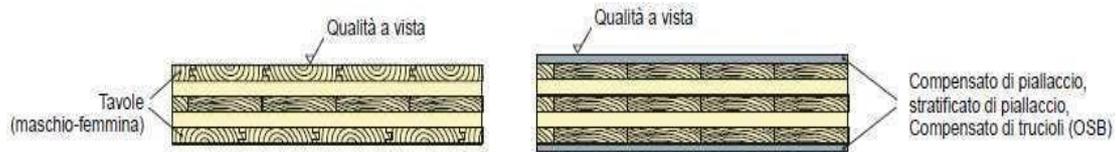


Figura 51 Esecuzione degli strati esterni in qualità a vista.

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

In virtù delle loro dimensioni, in modo particolare degli spessori, i pannelli di legno compensato di tavole possono essere impiegati per le costruzioni di tipo massiccio. La larghezza di questi pannelli consente, infatti, di realizzare elementi di altezza pari a quella di un piano di edificio e lo spessore garantisce la trasmissione dei carichi verticali e orizzontali sia nel piano del pannello che perpendicolarmente ad esso. Gli elementi piani portanti di compensato di tavole possono avere una funzione statica di lastra, di piastra o di entrambe contemporaneamente. La struttura della sezione trasversale del compensato di tavole (pannelli monostrato disposti di solito alternativamente ad angolo retto l'uno rispetto all'altro), permette di realizzare con un unico pannello un'adeguata capacità portante longitudinale e trasversale. Inoltre questi pannelli rendono possibile l'assorbimento di carichi concentrati.

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

Lo spessore di un elemento in compensato di tavole a 5 strati normalmente impiegato per un edificio multipiano (max. 3 piani) è di circa 95 mm (valore orientativo). Lo spessore minimo di elementi portanti massicci per pareti dipende inoltre dal tipo di prodotto e dalle relative grandezze caratteristiche, tuttavia generalmente non dovrebbe essere mai inferiore a 75 mm. Con pannelli di compensato di tavole a 5 strati di spessore compreso tra 125 mm e 160 mm, a seconda della struttura del pannello e del solaio come anche dell'entità delle sollecitazioni, si possono coprire luci di 4,0-5,0 m, in modo economico.

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

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

3. Sistemi costruttivi

In questo capitolo si descrivono i più diffusi sistemi costruttivi che si possono presentare per le strutture in legno.

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

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

Per la realizzazione della struttura portante vengono utilizzati nei due casi prodotti completamente diversi. Contrariamente alle costruzioni di tipo leggero, nelle quali gli elementi portanti sono i prodotti di tipo lineare provvisti di una pannellatura sottile, per quelle di tipo massiccio vengono impiegati elementi di tipo piano di grandi dimensioni. Inoltre, le costruzioni di legno di tipo massiccio, di regola, non necessitano di alcuna barriera al vapore e possiedono una massa più elevata e quindi anche un'alta capacità di immagazzinamento di energia. In entrambi i sistemi costruttivi è possibile concepire liberamente le facciate ed il rivestimento interno.

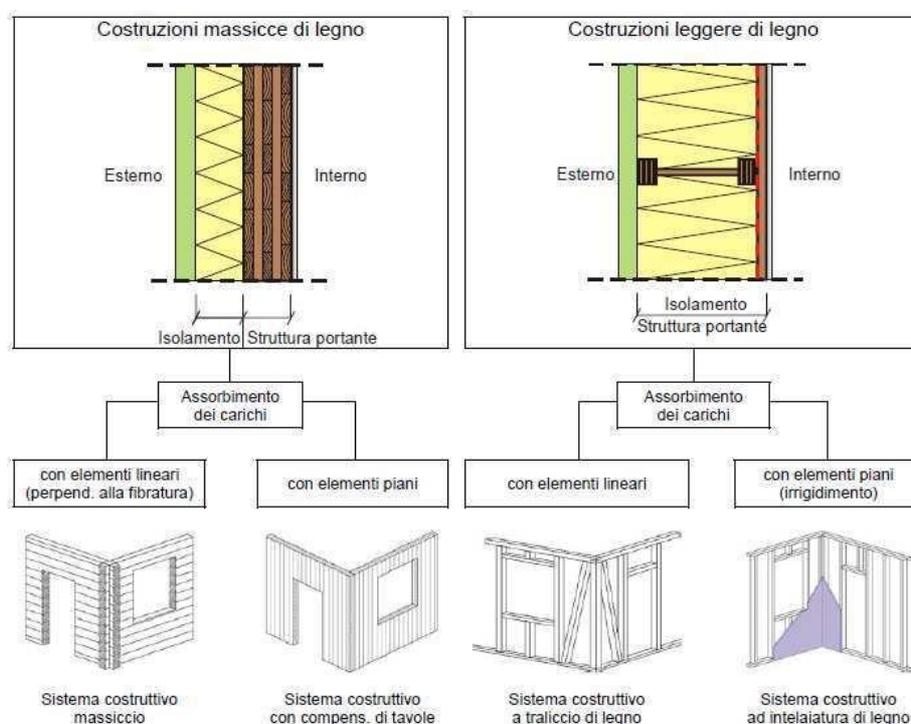


Figura 52 Suddivisione di base dei sistemi costruttivi di legno (sezione orizzontale ed assonometria).

I diversi sistemi costruttivi in legno sono:

- costruzioni a tronchi sovrapposti o blocchi massicci;



Figura 53 Sistema a blocchi massicci

- costruzioni a pannelli di legno;



Figura 54 Sistema a pannelli di legno massiccio.

- costruzioni ad ossatura portante;



Figura 55 Sistema ad ossatura.

- costruzioni a traliccio;



Figura 56 Sistema a traliccio.

- costruzioni intelaiate;



Figura 57 Sistema a telaio.

3.1. Sistema costruttivo massiccio

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

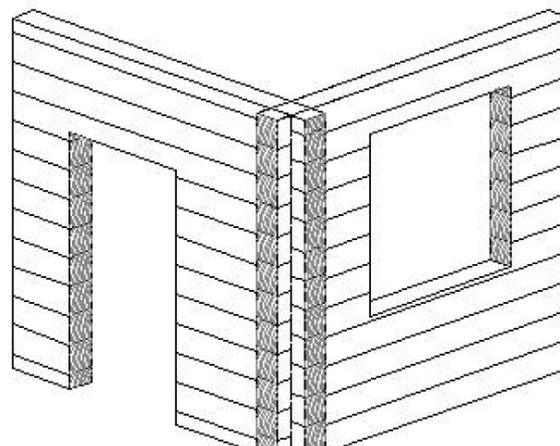


Figura 58 Sistema costruttivo massiccio.

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

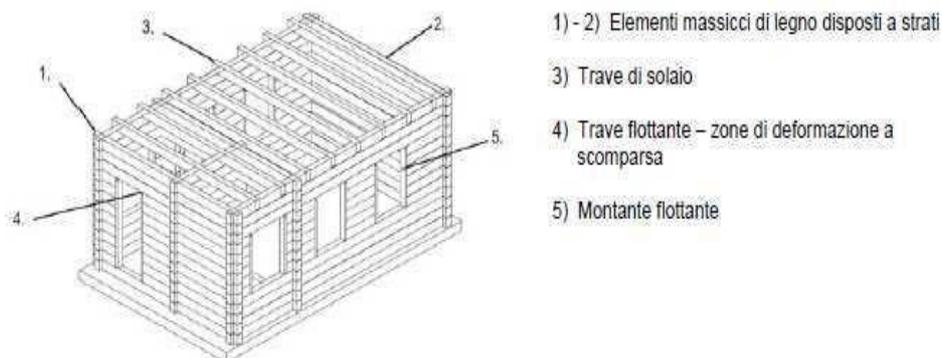


Figura 59 Terminologia adottata per il sistema costruttivo massiccio

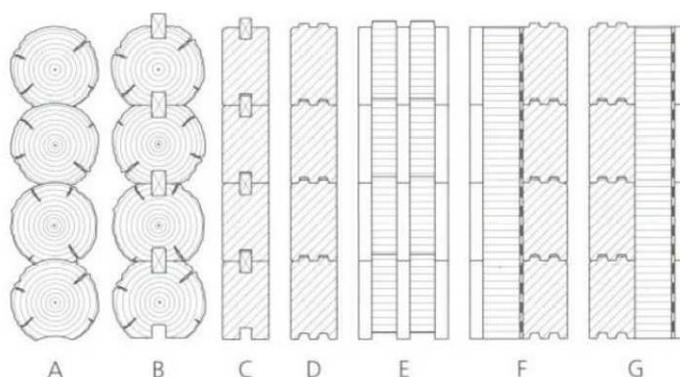


Figura 60 Schemi costruttivi delle pareti in tronchi.

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

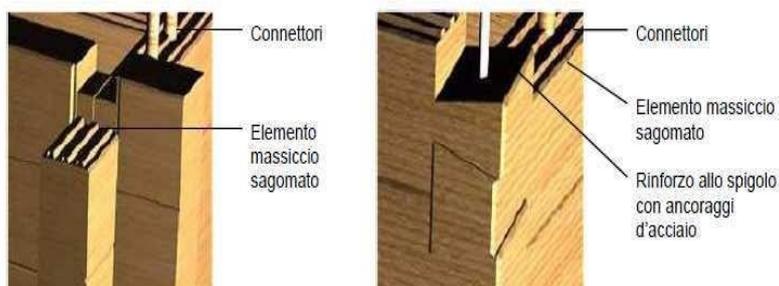


Figura 61 Collegamenti allo spigolo per il sistema costruttivo massiccio.

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

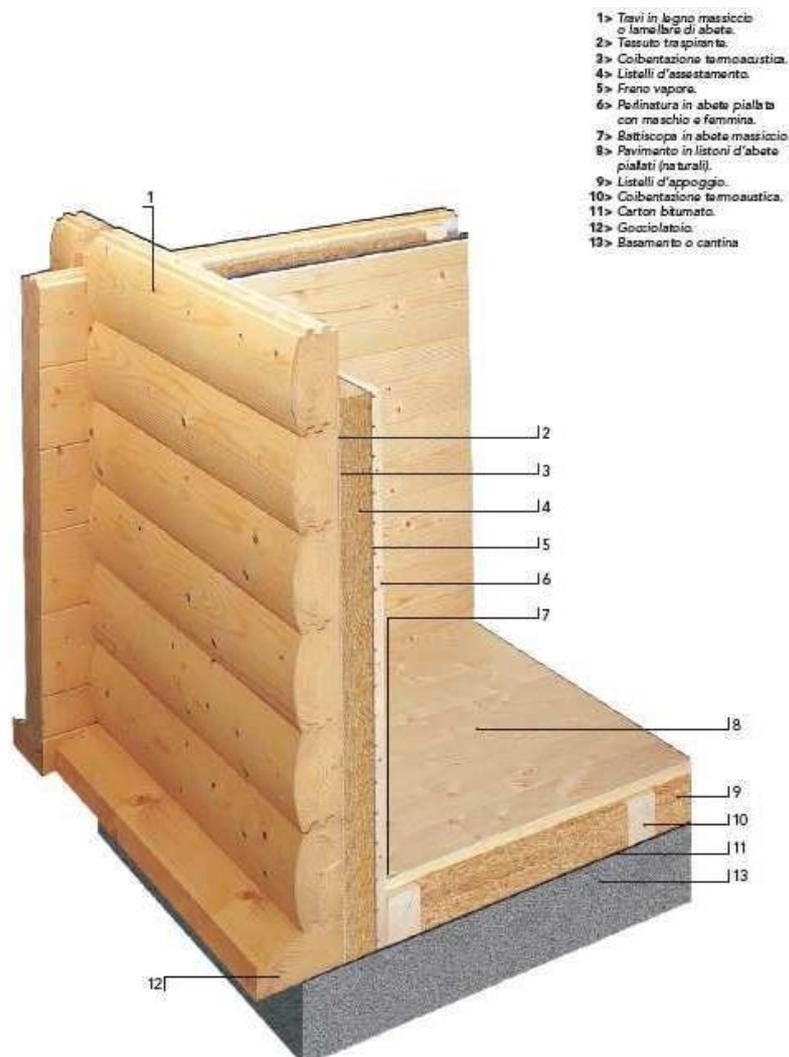


Figura 62 Dettaglio sistema blockbau.

Specialmente nella progettazione di costruzioni massicce, si deve tener conto, in modo adeguato, delle caratteristiche del materiale. Nella trasmissione dei carichi verticali, gli elementi massicci vengono sollecitati a compressione perpendicolare alla fibratura. Poiché il valore del modulo E perpendicolare alla fibratura è molto ridotto, si instaurano assestamenti importanti causati dalle deformazioni perpendicolari alla fibratura.

I problemi connessi agli assestamenti possono, tuttavia, essere ridotti o eliminati completamente mediante accorgimenti costruttivi, come per esempio:

- prevedere zone “cuscinetto” o meglio zone di deformazione a scomparsa (collocando una “trave flottante”) oppure una cavità d’aria di alcuni cm in prossimità di architravi ed elementi simili, che non possono adattarsi all'assestamento;
- realizzare il giunto con una struttura muraria (es. una canna fumaria) o con controventi a struttura reticolare relativamente rigidi in modo che la parete massiccia possa assestarsi liberamente;
- evitare colonne portanti collegate direttamente e rigidamente con le pareti;

- considerare l'assestamento della parete massiccia nella progettazione e nella posa in opera di impianti (condotte elettriche, tubazioni per il riscaldamento e per l'acqua);
- realizzare i piastrellamenti su rivestimenti liberi e non vincolati alla parete.

Tale tecnologia è un "sistema chiuso", in quanto ogni parete ha funzione portante; il legno utilizzato è quello di larice o di abete rosso. Questo metodo ha come svantaggio il fatto che richiede grandi quantità di tronchi lunghi e dritti, con conseguenti aumento dei costi.

3.2. Sistema costruttivo a pacchetti di tavole parallele

A partire dai pacchetti di tavole si realizzano elementi costruttivi di tipo piano massicci, costituiti da tavole o lamelle disposte di costa ("in piedi") l'una affianco all'altra. Lo spessore di questi elementi, coincidente con la larghezza delle tavole, è compreso di regola tra 8 cm e 12 cm per le pareti, e tra 12 cm e 20 cm per i solai a seconda delle luci e dei carichi.

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

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

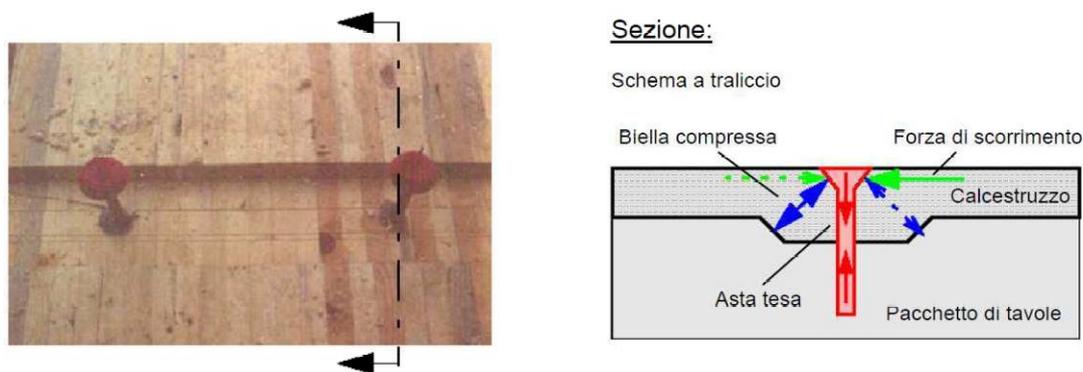


Figura 63 Connessione tra gli elementi di pacchetti di tavole e calcestruzzo.

3.3. Sistema costruttivo con legno compensato di tavole

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

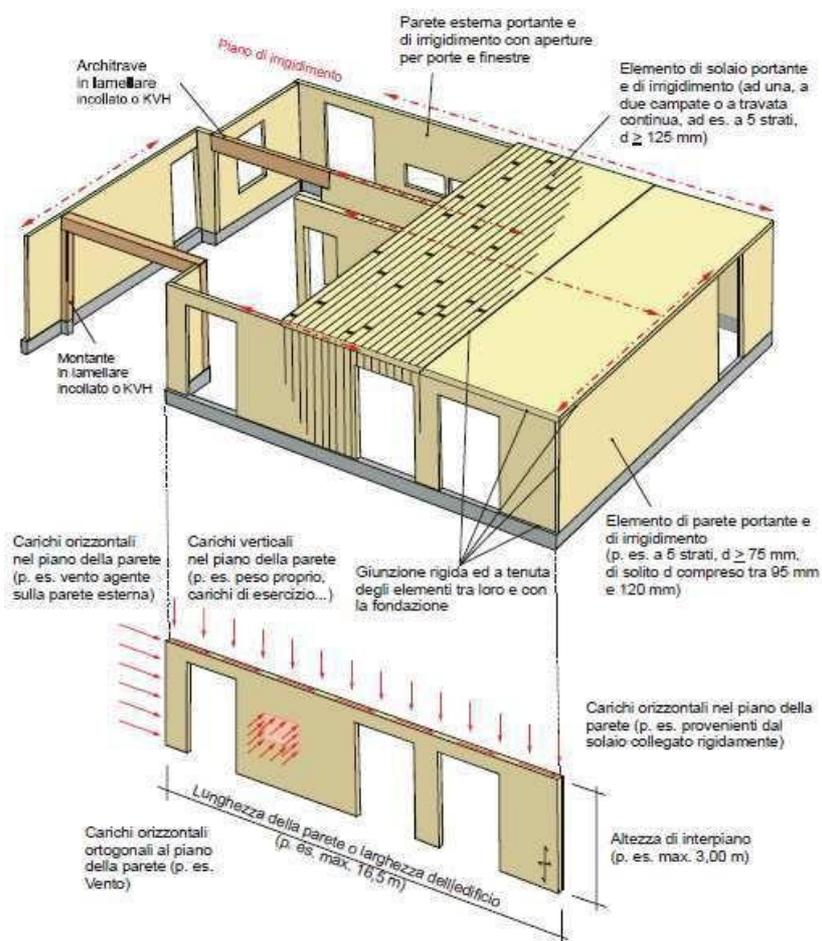


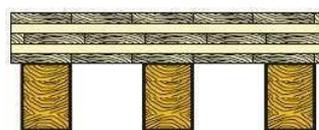
Figura 64 Impiego di elementi di legno compensato di tavole per solai e pareti in costruzioni di tipo massiccio.

La figura precedente mostra una delle molteplici possibilità di impiego del sistema costruttivo con legno compensato di tavole, che comprendono sia le case unifamiliari, che le abitazioni multipiano, come pure gli edifici pubblici, gli uffici ed i capannoni. Le possibilità di impiego del compensato di tavole in edilizia residenziale sono caratterizzate dalla varietà dei prodotti e degli elementi costruttivi. Infatti non solo possono essere realizzati solai, pareti interne ed esterne ed elementi di copertura di grandi dimensioni ma anche solette per scale e balconi, nonché elementi strutturali di tipo lineare come architravi e colonne. Lo spessore di un elemento di compensato di tavole a 5 strati solitamente utilizzato per un edificio multipiano (max. 3 piani) è di circa 95 mm. Lo spessore minimo di elementi portanti massicci dipende

inoltre dal tipo di prodotto e dalle relative grandezze caratteristiche, tuttavia generalmente non dovrebbe essere mai inferiore a 75 mm. Con pannelli di compensato di tavole a 5 strati di spessore compreso tra 125 mm e 160 mm, a seconda della struttura del pannello e del solaio nonché dell'entità delle sollecitazioni, si possono coprire luci di 4.0-5.0 m, in modo economico. Per luci maggiori ed elementi di parete di altezza maggiore privi di sostegni intermedi sono indicati pannelli nervati con travi incollate di lamellare o sezioni a cassone con montanti di lamellare.



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



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

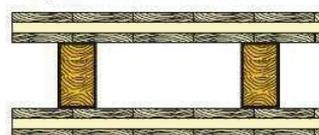


Figura 65 Pannello di compensato di tavole con nervature di lamellare incollato e variante a sezione a cassone.

Gli elementi massicci di parete, solaio e copertura possono essere prodotti esattamente e singolarmente in base alle indicazioni di progetto e possono essere collegati con sistemi di connessioni semplici e standardizzati. Vengono a mancare, quindi, quelle lunghe e complicate operazioni di finitura e di montaggio in cantiere. Isolamento, rivestimenti ed elementi di facciata possono essere facilmente fissati agli elementi in compensato di tavole (montaggio rapido).



Figura 66 Montaggio di un elemento preassemblato (sinistra) e fissaggio di elementi di isolamento e di facciata (destra).

L'irrigidimento di edifici ad uso abitativo realizzato con elementi di compensato di tavole avviene

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

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

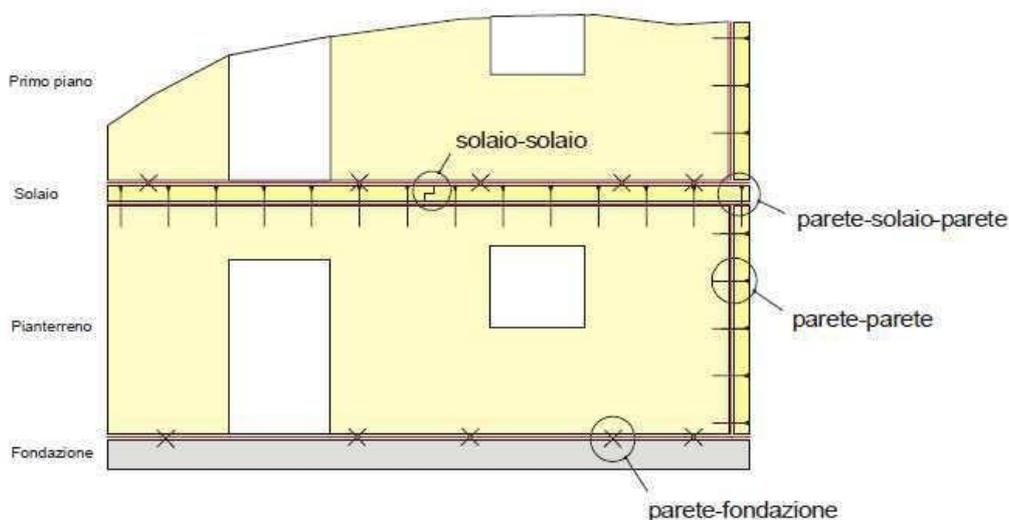


Figura 67 Posizione dei giunti degli elementi di parete di un edificio.

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

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

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

Giunzioni a contatto solaio-solaio (giunto trasversale)

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



Disponendo coprigiunti (ad esempio di legno compensato, pannelli a tre strati, Kerto), incassati nelle parti superiore ed inferiore degli elementi di legno compensato di tavole, può essere realizzata una connessione rigida a flessione. È possibile, inoltre, incollare questi elementi (la pressione necessaria è ottenuta con bulloni o chiodi); questa operazione di incollaggio è tuttavia da evitare in cantiere.



Giunzioni a contatto parete-solaio-parete

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

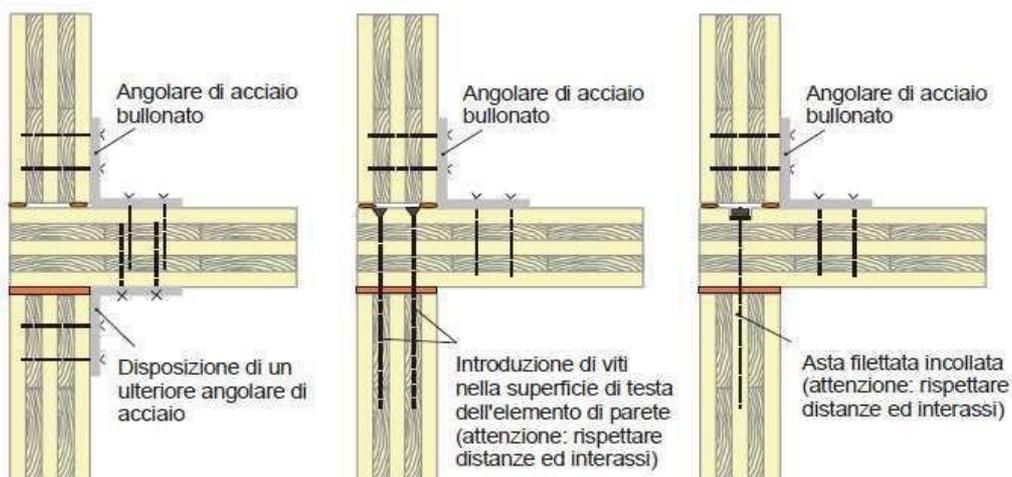


Figura 70 Giunzione parete-solaio-parete, esempi rappresentativi della realizzazione della connessione.

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

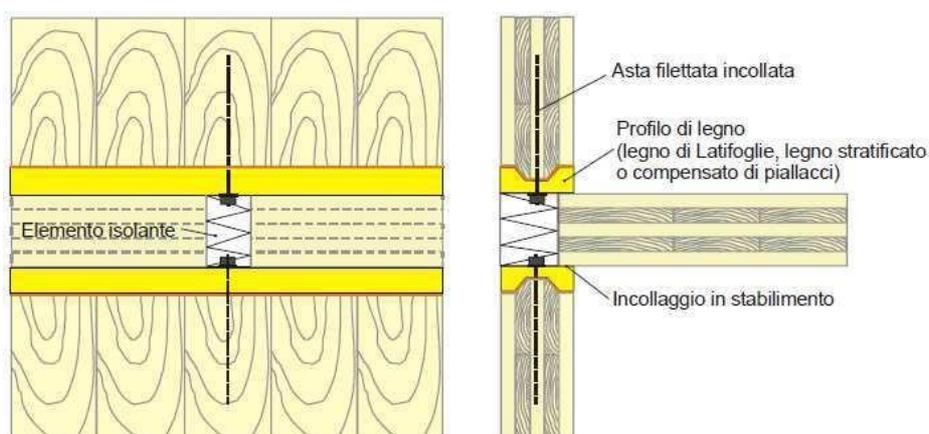


Figura 71 Giunzione parete-solaio-parete con profili di legno.

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

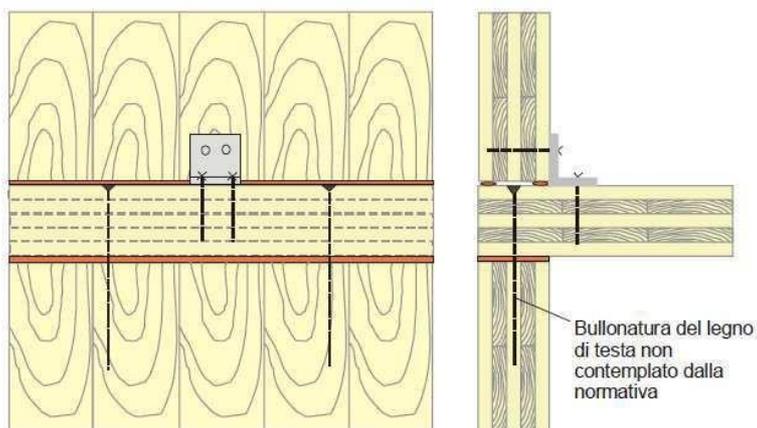


Figura 72 Giunzione parete-solaio-parete, bullonatura del legno di testa da evitare.

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

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

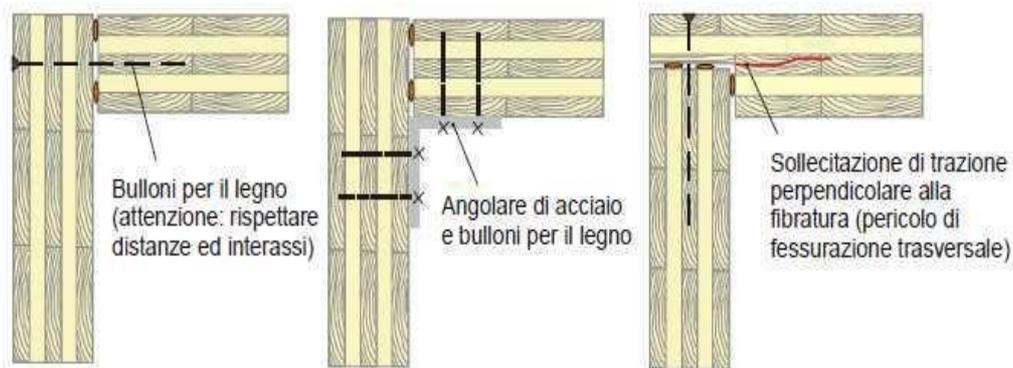


Figura 73 Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura.

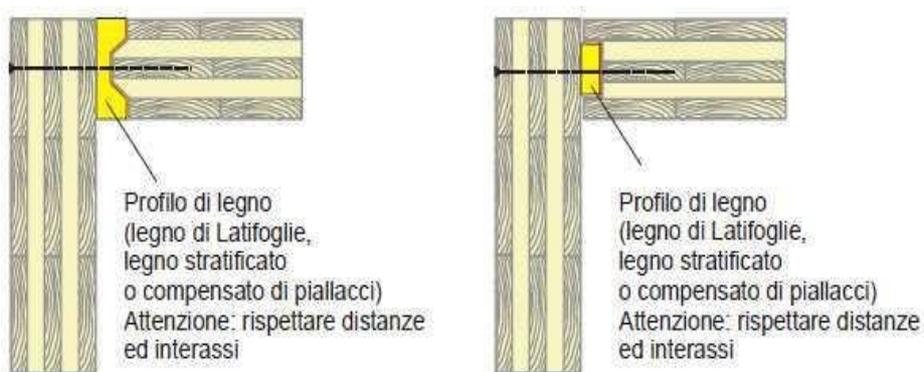


Figura 74 Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura e profili di legno.

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

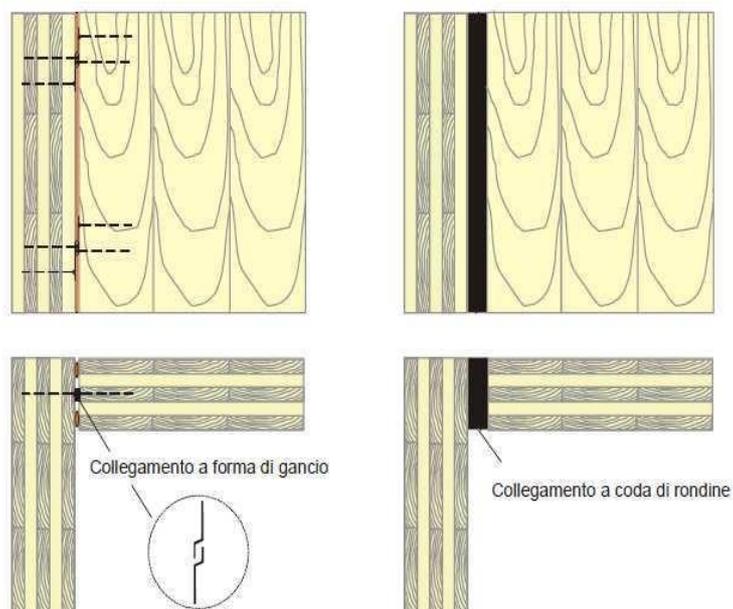


Figura 75 Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura e profili di legno.

Giunzioni a contatto parete-fondazione

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

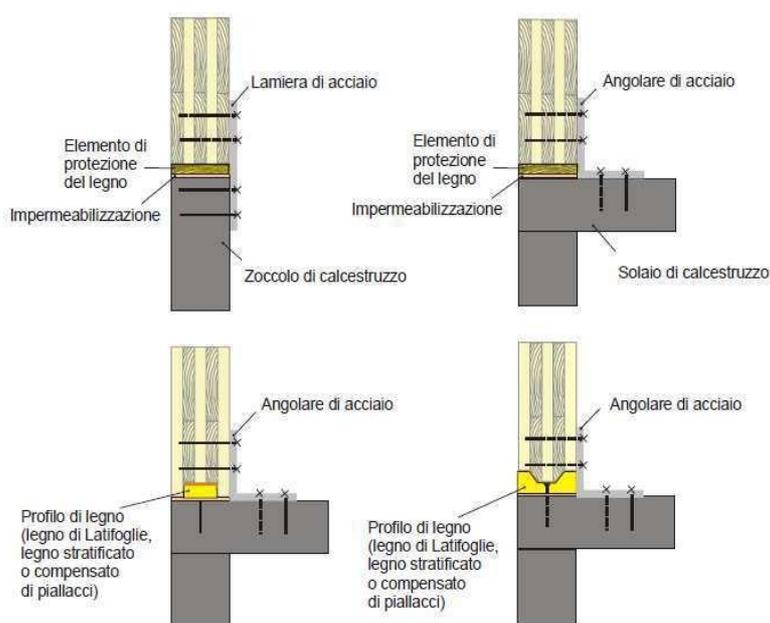


Figura 76 Giunzione parete fondazione, disposizione di lamiere e angolari d'acciaio come rinforzo ed ancoraggio per gli sforzi di trazione.

3.4. Sistema costruttivo ad ossatura portante in legno

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

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

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

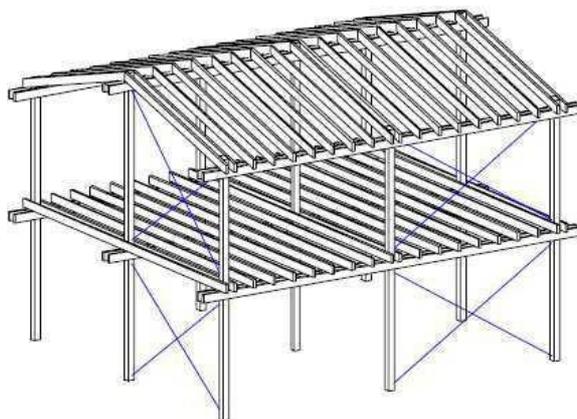


Figura 77 Costruzione ad ossatura portante di legno.

Facciate e pareti divisorie non assorbono di regola alcuna forza verticale nelle costruzioni ad ossatura portante di legno ma possono essere utilizzate come irrigidimento.

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

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

- distribuzione in pianta delle pareti intercambiabile e pareti facilmente spostabili;
- libertà di organizzazione sulla base di reticoli e moduli variabili;
- ossatura portante e pareti non portanti indipendenti da essa;
- struttura portante per lo più immediatamente riconoscibile;

- elementi costruttivi portanti per lo più di legno lamellare incollato;
- impiego di mezzi di collegamento d'acciaio;
- elevato grado di prefabbricazione;
- possibilità di "fai da te" per gli elementi costruttivi non portanti;
- irrigidimento per lo più mediante solai con comportamento a lastra, diagonali di acciaio o di legno oppure lastre di parete.

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

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

In fase progettuale si sceglie un modulo di base e quindi il reticolo ottenuto come multiplo di questo modulo. Tale reticolo viene fissato soprattutto in base all'utilizzazione degli spazi, alle dimensioni dell'edificio e dei locali, all'organizzazione architettonica e ai desideri del committente. Le dimensioni del modulo di base possono essere definite ex novo in base alle esigenze più varie legate al singolo fabbricato secondo le priorità che ci si è posti.

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

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

Di seguito sono rappresentati alcuni nodi e i tipi di costruzione ad ossatura portante:

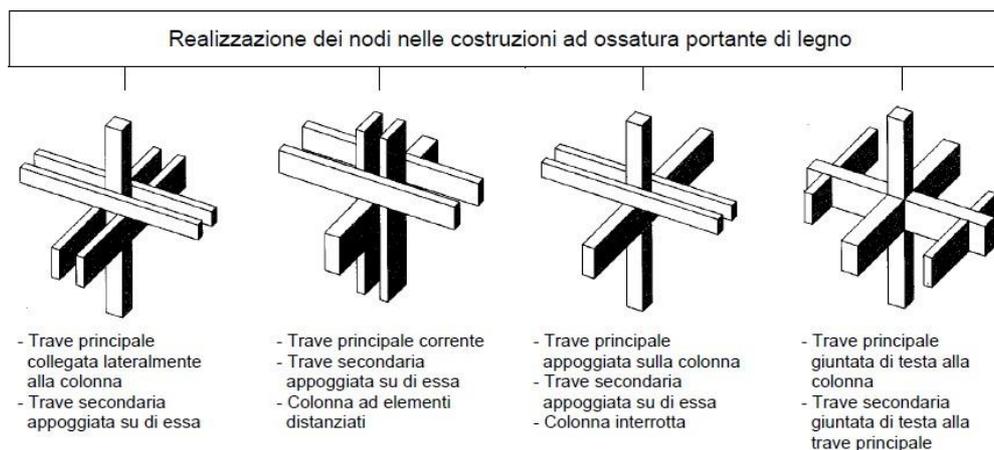


Figura 78 Realizzazione dei nodi nelle costruzioni ad ossatura portante in legno.

3.5. Sistema costruttivo a traliccio di legno

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

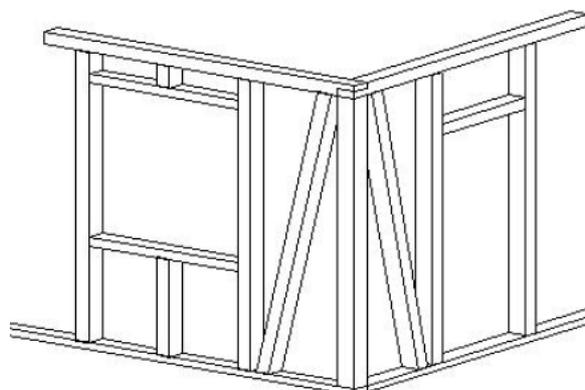


Figura 79 Costruzione a traliccio di legno.

Le peculiarità delle costruzioni a traliccio sono:

- libertà nell'organizzazione (architettonica): l'ossatura portante viene rivestita da entrambi i lati o rimane a vista da un lato solo;
- sono possibili edifici ad un piano o multipiano;
- disposizione fissa per tutti i piani in pianta;
- avanzamento della costruzione piano per piano;

- impiego prevalente di connessioni senza elementi meccanici di collegamento (connessioni di carpenteria) con incastri e sovrapposizioni;
- gli elementi portanti hanno sezioni di grande dimensione e di forma quadratica;
- tempi di realizzazione relativamente brevi;
- strutture relativamente facili da erigere.

Moderne e precise macchine a controllo numerico, insieme alle nuove conoscenze e metodologie riguardo l'essiccazione del legno, rendono le costruzioni a traliccio economicamente competitive. Gli incastri, in questo tipo di costruzione, sono collegamenti economicamente più vantaggiosi rispetto a lamiere o elementi di forma particolare in acciaio. Questo a causa del fatto che i collegamenti vengono sollecitati poco, in quanto gli elementi di legno sono ad interasse piccolo gli uni dagli altri. Inoltre nelle costruzioni a traliccio la trasmissione dei carichi verticali avviene direttamente mediante giunti a contatto.

3.6. Sistema costruttivo ad intelaiatura di legno

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

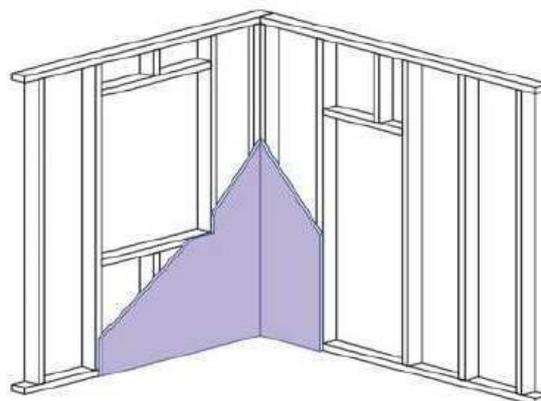


Figura 80 Costruzione intelaiata.

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

Le peculiarità delle costruzioni intelaiate di legno sono:

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

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



Figura 81 Sistemi costruttivi per strutture ad intelaiatura di legno.

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

Poiché le giunzioni dei pannelli devono essere realizzate sempre sui montanti, essi sono disposti ad interasse ridotto, di regola di 62,5 cm. Questa misura dipende dalle dimensioni dei materiali di rivestimento comuni sul mercato (larghezza pari a 125 cm), per minimizzare il loro scarto. Anche un gran numero di fabbricanti di materiali isolanti si sono adattati a questa misura nelle dimensioni dei loro prodotti. In caso di pannelli di altre dimensioni, il reticolo può essere variato. Le aperture possono essere

previste, in linea di principio, ovunque sull'elemento di parete. Un'apertura non allineata con il reticolo viene delimitata da ulteriori montanti e da un architrave disposto su di essi. Adattando la progettazione a questo reticolo è possibile collocare le aperture in modo tale da non necessitare l'impiego di montanti non strettamente necessari.



Figura 82 Assemblaggio di pannelli platform frame con predisposizioni impiantistiche.

4. Caso pratico

PROGETTAZIONE DI UN COMPLESSO RESIDENZIALE DI QUATTRO EDIFICI IN X-LAM

4.1. Descrizione generale del progetto

Il progetto prevede la realizzazione di quattro unità residenziali a pianta pressochè rettangolare, che si dispongono simmetricamente tra di loro dando vita ad un unico complesso abitativo.

Dal punto di vista delle tecnologie strutturali sono state adottate soluzioni che declinano in maniera differente, in modo da poter meglio rispondere alle diverse tipologie edilizie, l'utilizzo del legno. Per gli edifici si è ricorso all'utilizzo della tecnologia a pannelli di legno a tavole incrociati (XLAM), sia per le pareti portanti che per i solai di piano.

Per la copertura a falde inclinate si è previsto l'uso di travi di legno lamellare.

Le fondazioni dell'intero complesso, sono di tipo diretto e, in virtù dei modesti carichi trasmessi al terreno dalle strutture in elevazione, sono risultate sufficienti della tipologia a trave rovescia. Tutto il piano terra risulta inoltre isolato dal terreno dalla presenza di un vespaio areato con moduli in plastica riciclata.

Gli edifici si distribuiscono su due livelli fuori terra: il piano terra è costituito da ingresso, soggiorno, cucina, bagno e locale tecnico mentre il piano primo si compone di camera da letto doppia, camera da letto matrimoniale con annessa zona di ripostiglio e bagno con vasca e doccia.

Lateralmente all'edificio, lungo il lato est, si incontra un garage coperto con doppio posto auto connesso alla zona abitativa mediante apposito ingresso dotato di porta tagliafuoco REI 120.

Gli edifici si dispongono su un lotto di area complessiva pari a 4860 m² in cui sono previsti accessi di comunicazione e spazi adibiti a verde.

Le singole villette residenziali presentano zona di giardino privato lungo tutto il perimetro e occupano un'area di 326 m².

Nei capitoli successivi si riportano le misure relative alla superficie lorda, utile e le dimensioni dei vani componenti l'edificio. Si esporranno inoltre nel dettaglio le scelte progettuali adottate.

Si riportano in un fascicolo allegato a parte a questo lavoro di tesi gli elaborati grafici redatti per la realizzazione del progetto.

4.2. Contesto territoriale

Il progetto è ubicato nel comune di Biella, in corrispondenza della zona a sud-ovest rispetto al centro della città.

Biella è un comune italiano di 44 013 abitanti, capoluogo dell'omonima provincia nel Piemonte settentrionale.

La città è situata ai piedi delle Alpi Biellesi, e la sua esistenza è attestata sin dall'alto Medioevo. Dominata in seguito dai vescovi di Vercelli, nel 1379 passò ai Savoia. Nel corso dell'Ottocento Biella conobbe un grande sviluppo urbanistico e industriale, divenendo presto nota per le sue industrie tessili.

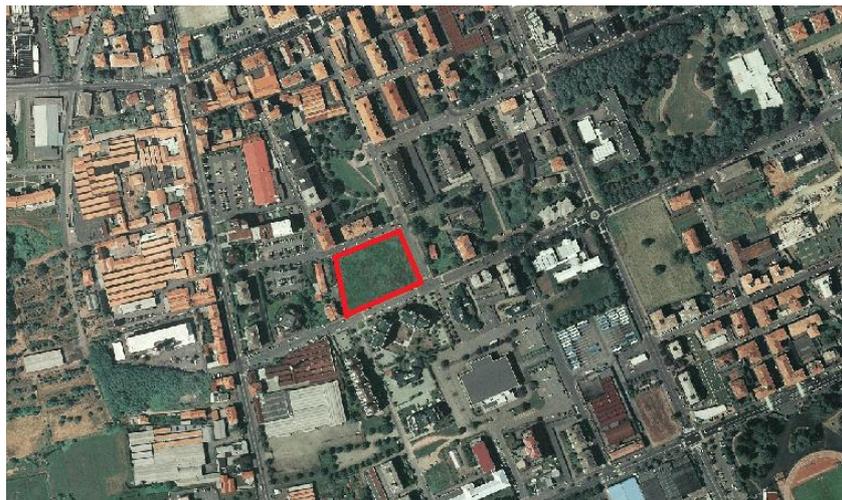


Figura 83 Determinazione lotto d'intervento. fonte: www.geoportale.piemonte.it

4.3. Inserimento nel contesto urbano

Tra i vari aspetti analizzati nel corso della progettazione, si è tenuto in considerazione anche l'inserimento del complesso nel contesto urbano pre-esistente.

La parcella si trova in una zona tranquilla, non troppo trafficata, limitrofa al centro della città. La maggior parte degli edifici circostanti sono di piccole e medie dimensioni: si trovano villette a schiera, case singole con giardino ed edifici residenziali di 4-5 piani.

Nelle vicinanze si incontra anche un centro polisportivo (campi da calcio, basket, piscina, bocciodromo) oltre che un piccolo parco, edifici scolastici, spazi adibiti a verde e zone di posteggio.

Sono inoltre presenti fabbricati un tempo ad uso industriale ed ora adibiti ad uso commerciale.

L'area di interesse è aperta verso lo scenario montagnoso delle prealpi biellesi, la posizione dell'area garantisce un elevato grado di connessione sia ambientale che infrastrutturale. La zona è infatti servita di una fitta maglia di percorsi ciclopedonali oltre che da un elevato grado di accessibilità veicolare.



Figura 84 Contesto urbano in cui si inserisce il lotto. Fonte: www.google.it/maps



Figura 85 Vista dall'alto del lotto d'interesse. Fonte: www.google.it/maps

GEOLOGIA

Da un punto di vista geologico l'area è impostata su depositi glaciali e fluvio-glaciali riferibili alla parte superiore del Pleistocene medio, Fluvioglaciale e Fluviale Riss.

In particolare il lotto è impostato su depositi ghiaiosi-sabbiosi con paleosuolo rosso-arancio.

I depositi assumono una granulometria a carattere prettamente fluviale, prevalentemente fine.

Questi depositi sono costituiti da granulometrie a ghiaia eterometrica, in matrice sabbiosa e limosa, di colore bruno rossastro in superficie.¹⁶

4.4. Idee progettuali

Il primo passo nell'approccio all'iter progettuale è consistito in una serie di operazioni di analisi e documentazioni volte al raggiungimento di una conoscenza generale sullo studio di tipologie di edifici e di costruzioni con struttura portante in legno.

Si sono analizzate le differenti soluzioni applicabili e si sono esaminati edifici esistenti in maniera tale da comprendere tutti i possibili vantaggi e inconvenienti possibili e trovare informazioni che potessero fornire un valido appoggio oltre che una possibile fonte di ispirazione per arrivare a possibili idee e forme da adottare.

Preso atto degli obiettivi da perseguire in fase di progettazione e di quanto emerso dall'analisi riguardante lo stato di fatto ed i vincoli che il territorio presenta, l'iter progettuale è proseguito con l'elaborazione del progetto.

¹⁶ Informazioni tratte da "Studio geologico a supporto della variante generale al PRGC" del Comune di Biella.

4.5. Caratteri funzionali distributivi

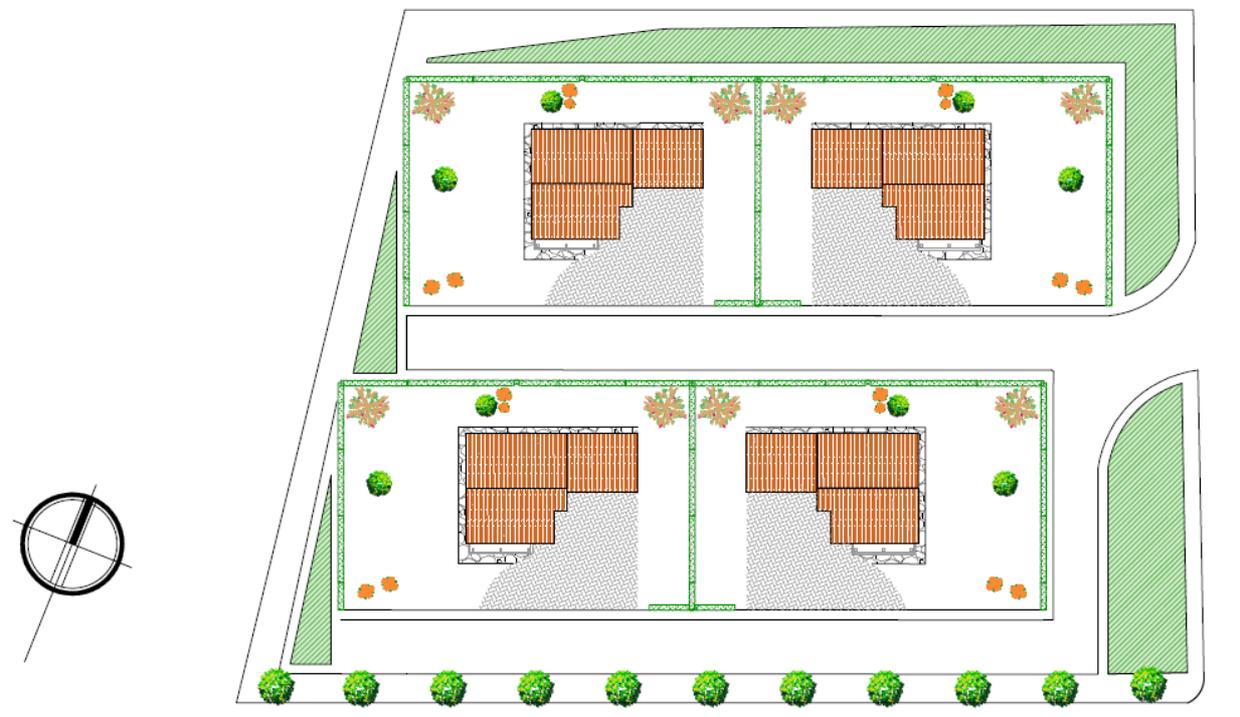


Figura 86 Planimetria generale

La planimetria generale del lotto oggetto di questo progetto si articola nella disposizione simmetrica delle quattro unità residenziali predisponendo di accessi veicolari e pedonali lungo il lato est e di zone verdi lungo i confini della parcella.

La disposizione degli edifici tiene conto dell'orientazione del lotto in maniera tale da ottimizzare la distribuzione funzionale dei vani.

Si riportano di seguito le piante del piano terra e del primo piano.

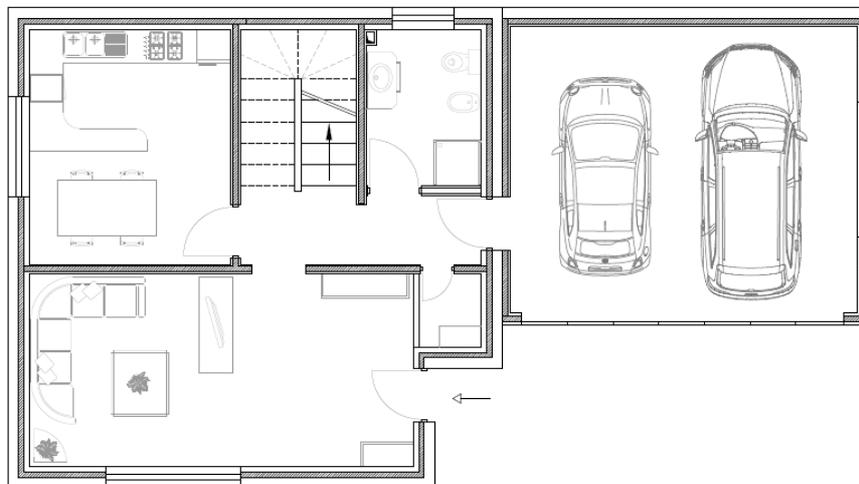


Figura 87 Pianta piano terra

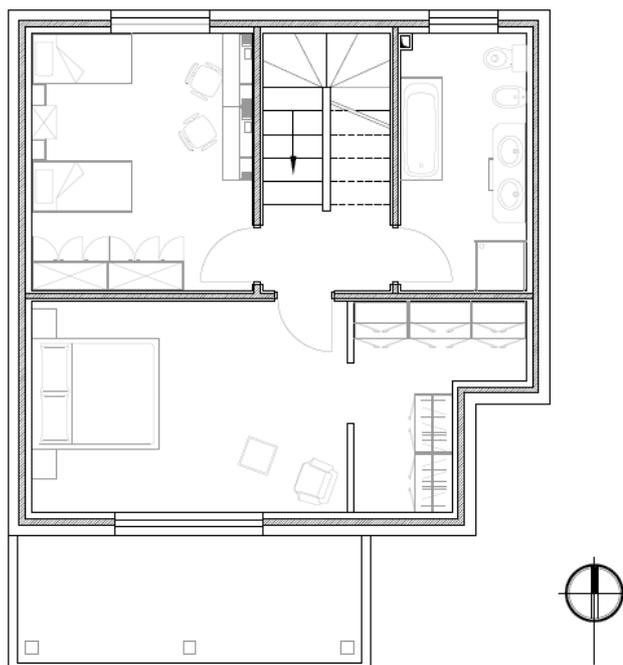


Figura 88 Pianta piano primo

Alla pianta del piano terra si accede dal lato sud-est, è composta da ampio salone, cucina e bagno. Nel lato est è previsto un accesso di comunicazione tra garage ed edificio.

La scala nel lato nord conduce al piano superiore dove si incontra una camera da letto doppia, bagno e camera da letto matrimoniale con zona di ripostiglio integrata e terrazza.

Si riportano di seguito le dimensioni delle superfici nette dei vani dell'edificio.



Figura 89 Dimensioni dei vani piano terra

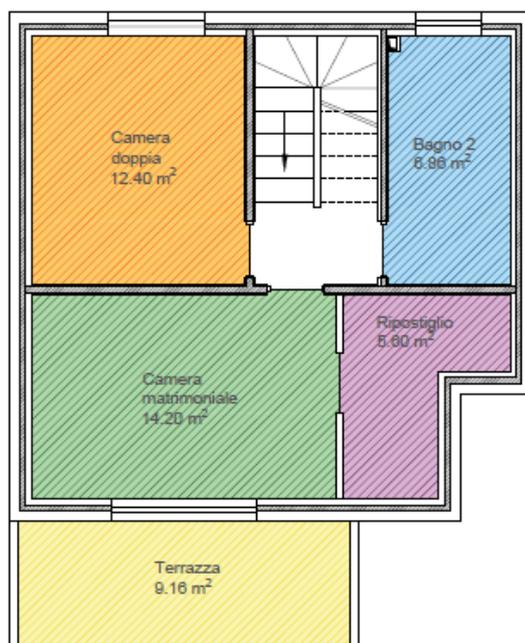


Figura 90 Dimensione vani piano primo

4.6. Particolari costruttivi

La struttura dell'edificio si sviluppa attraverso l'impiego di pareti portanti interne ed esterne X-LAM a 5 strati di 95 mm di spessore di cui vengono riportate le relative stratigrafie.

Si prevede isolamento termico esterno e un sistema di facciata ventilata con pannelli di rivestimento in legno e pietra per la zona di ingresso. Le pareti portanti interne, come il solaio prevedono opportuni spazi per il passaggio e la collocazione degli impianti.

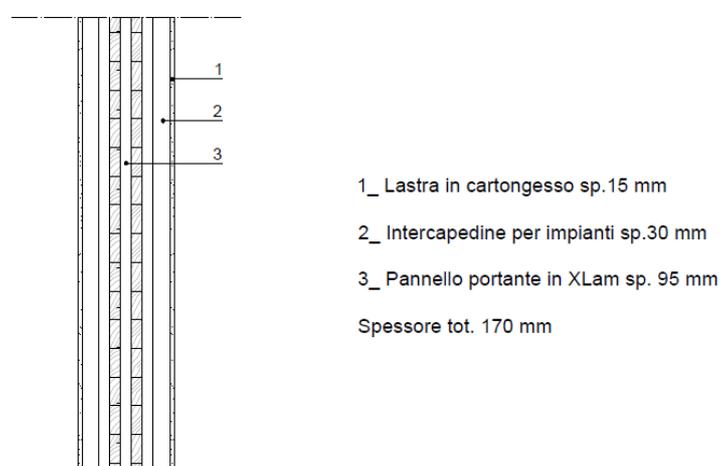


Figura 91 Parete interna - Stratigrafia

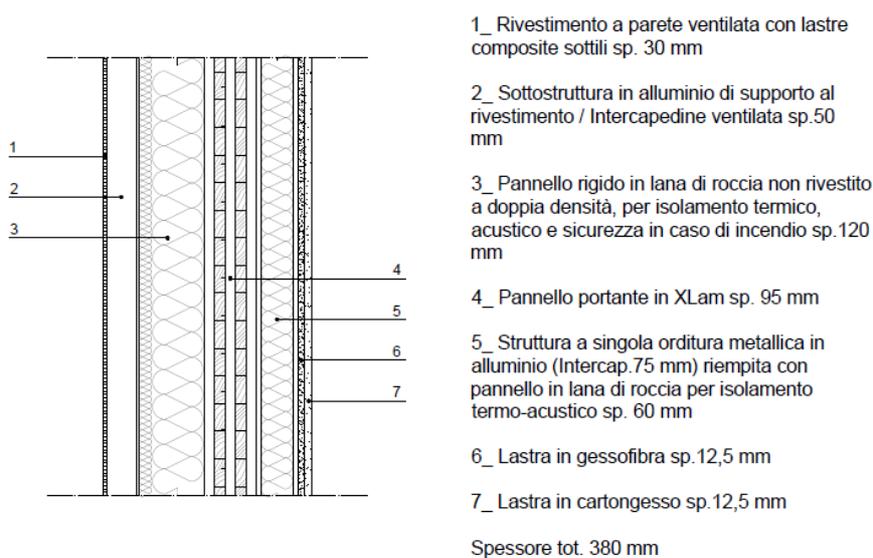
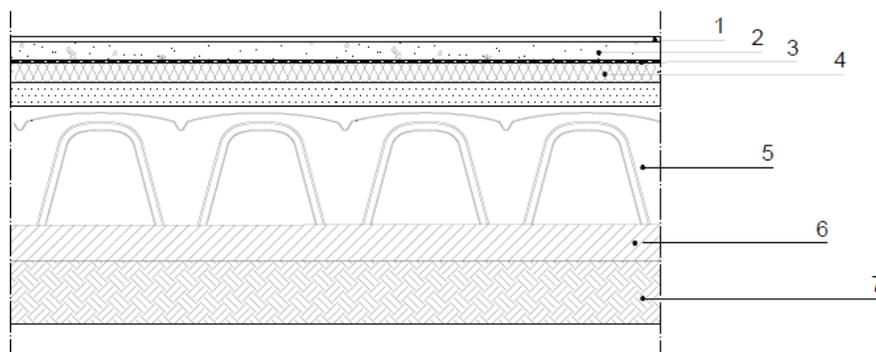


Figura 92 Parete esterna - stratigrafia

Si prevedono fondazioni superficiali dirette a travi rovesce in calcestruzzo armato che formano un reticolo su cui poggeranno le pareti portanti degli edifici. Gli spazi risultanti del reticolo verranno ospitati da vespaio areato.

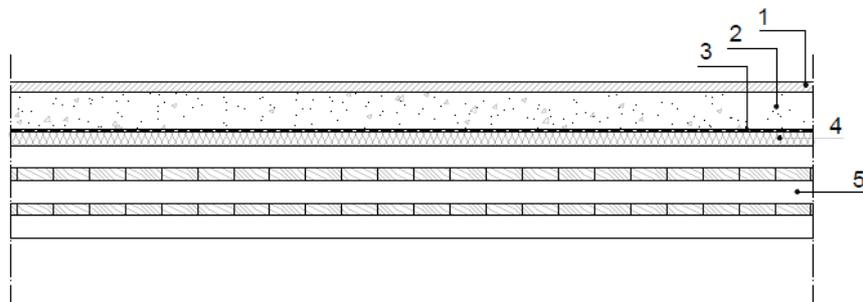


- 1_ Pavimento in legno duro sp. 15 mm
- 2_ Massetto alleggerito per impianti sp. 60 mm
- 3_ Guaina bituminosa e telo per il contenimento del getto del massetto
- 4_ Pannello di isolamento polistirene estruso sp. 60 mm
- 5_ Vespaio areato sp. 450 mm
- 6_ Magrone sp. 115 mm
- 7_ Terreno

Spessore tot. 700 mm

Figura 93 Solaio piano terra - stratigrafia

Per il solaio del piano primo si prevede l'utilizzo di pannelli X-LAM a 5 strati di 140 mm di spessore.

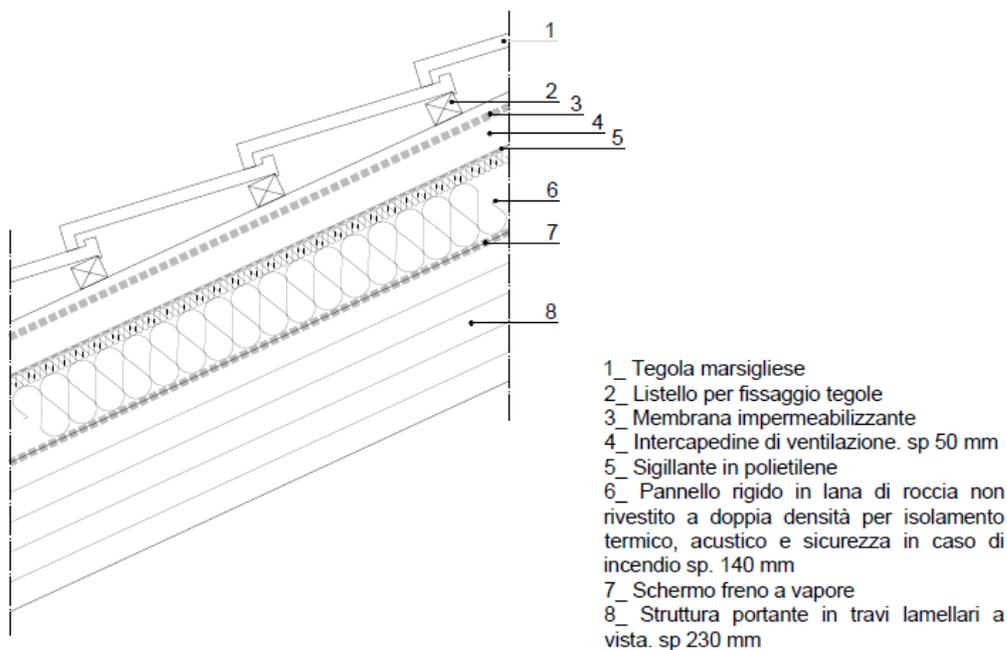


- 1_ Pavimento in legno duro sp. 15 mm
- 2_ Massetto alleggerito per impianti sp.60 mm
- 3_ Telo per il contenimento del getto del massetto
- 4_ Pannello per isolamento acustico anticalpestio sp.20 mm
- 5_ Pannello portante in XLam 5 strati sp. 140 mm con intradosso a vista

Spessore tot. 235 mm

Figura 94 Solaio piano primo - stratigrafia

La struttura portante della copertura è invece costituita da travi in legno lamellare di sezione 140 x 230 mm.



- 1_ Tegola marsigliese
- 2_ Listello per fissaggio tegole
- 3_ Membrana impermeabilizzante
- 4_ Intercapedine di ventilazione. sp 50 mm
- 5_ Sigillante in polietilene
- 6_ Pannello rigido in lana di roccia non rivestito a doppia densità per isolamento termico, acustico e sicurezza in caso di incendio sp. 140 mm
- 7_ Schermo freno a vapore
- 8_ Struttura portante in travi lamellari a vista. sp 230 mm

Figura 95 Copertura - stratigrafia



Figura 96 Pianta copertura in travi di legno lamellare

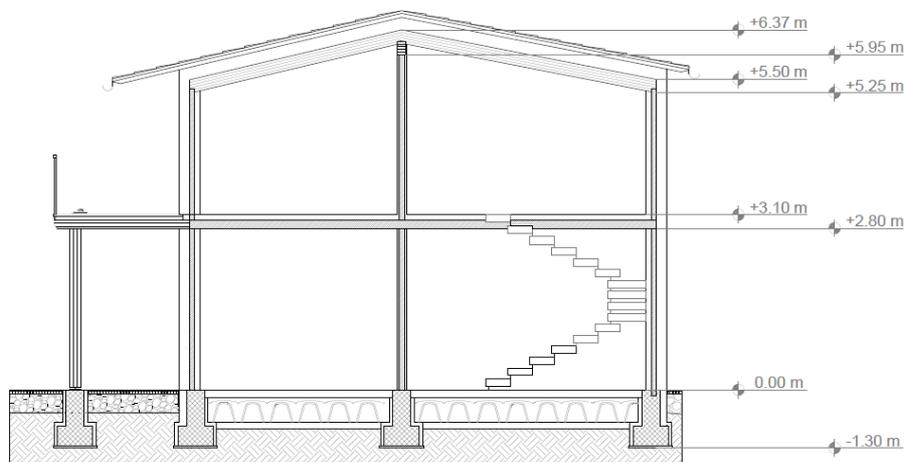
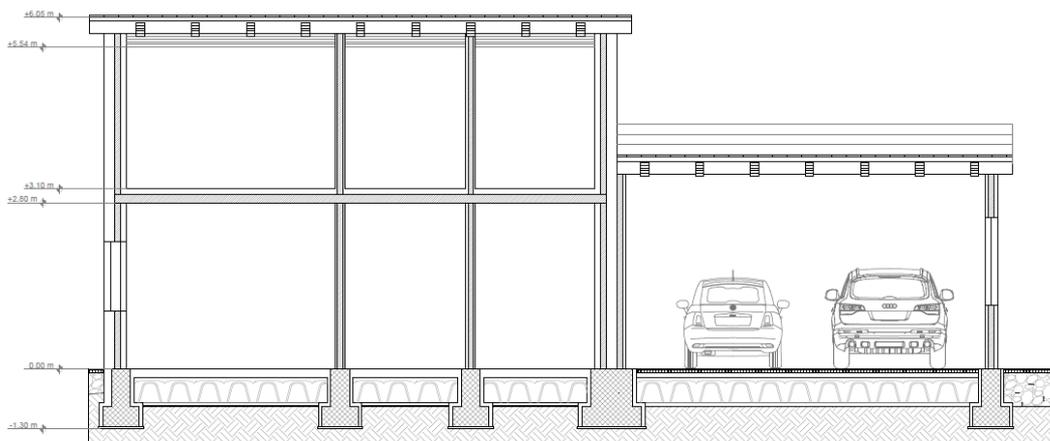


Figura 97 Sezione longitudinale e trasversale dell'edificio.

4.7. Rappresentazioni render







Figura 98 Raccolta immagini render. Software: Autodesk Revit 2016

4.8. Fasi costruttive

Per il corretto montaggio degli elementi strutturali di legno occorre garantire la planarità delle opere di fondazione (entro la tolleranza massima di $\pm 1,5\text{cm}$), per ridurre la necessità di spessori (se necessari meglio di acciaio) ed il raccordo di fessure e dislivelli con materiali adeguati all'omogenea distribuzione dei carichi sul perimetro dell'edificio. Un eventuale cordolo di rialzo deve avere la larghezza necessaria per ricevere gli elementi di ancoraggio. Il cordolo deve essere di opportuna altezza per staccare la struttura di legno rispetto alla quota esterna (minimo necessario 10 cm); ciò permette di aumentare lo spessore di coibentazione del solaio contro terra e di ottenere un vano di maggiori dimensioni per l'alloggio degli impianti elettrici.

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 e talvolta anche fino a 16 m), oppure mediante l'assemblaggio di più pannelli, (normalmente di larghezza uguale o inferiore ai 3 m) collegati tra loro sempre meccanicamente per mezzo di strisce di pannello multistrato o con giunti a mezzo-legno tra i pannelli e viti o chiodi.

Fondazione

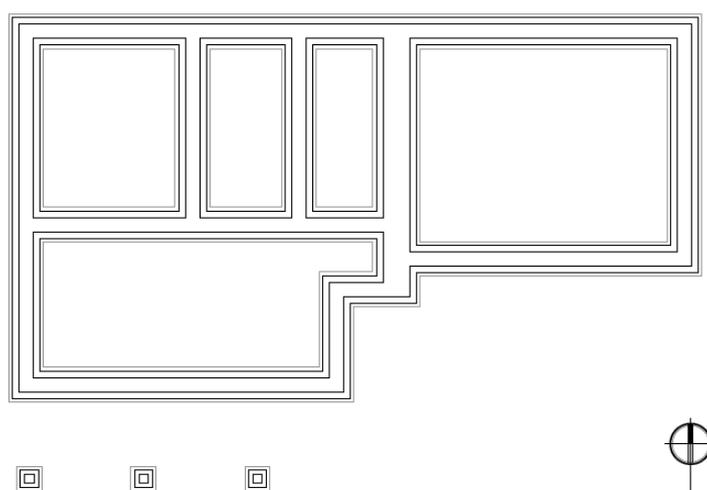


Figura 99 Fondazione a travi rovesce in calcestruzzo armato

La fondazione viene realizzata in opera, con travi rovesce in calcestruzzo armato. Tra la struttura di legno e la fondazione in c.a. va interposto uno strato di guaina bituminosa che deve risvoltare sulla struttura di fondazione (e non sulla parete di legno) per evitare le trappole di umidità.

E' necessario prevedere un cordolo di rialzo in cemento armato in tutto il perimetro di appoggio delle pareti in legno; detto cordolo deve essere impermeabilizzato per annullare punti di contatto e umidità di risalita; si deve installare un dormiente di larice alla base dell'appoggio delle pareti XLAM; all'esterno deve essere eseguita un'impermeabilizzazione di protezione.

Pareti esterne ed interne

La parete del piano superiore viene semplicemente appoggiata, con taglio dritto, sull'estremità dello sbalzo ed opportunamente ancorata. La velocità e la sicurezza nel montaggio vengono garantite dalla posa preventiva degli angolari d'acciaio sul solaio, in modo da consentire un riscontro preciso ed agevolare il bloccaggio delle pareti con le viti. Tutte le lavorazioni principali vengono effettuate mediante centri di taglio a controllo numerico che garantiscono estrema precisione e facilitano l'assemblaggio in cantiere. Per situazioni particolarmente complesse è comunque sempre necessaria l'esperienza e la capacità manuale degli operatori.

Per quanto riguarda le pareti interne, soprattutto per esigenze di trasporto, facilità di maneggevolezza e montaggio in cantiere, vengono suddivise in pannelli di larghezze variabili a seconda del produttore fino ad un massimo di 3 m e collegate fra loro con la realizzazione di giunti verticali.

Solaio

Una volta montate le pareti del piano terra è possibile posare il primo solaio. Quest'ultimo è formato da pannelli a strati incrociati di spessore 140 mm. Anche per il solaio, per esigenze di trasporto e montaggio, si preferisce il montaggio a pannelli di larghezza inferiore ai 3 metri, che vengono poi collegati tra loro mediante giunti orizzontali realizzati con le stesse tecniche utilizzate per la realizzazione dei giunti verticali fra pannelli parete e alle pareti sottostanti viene effettuato sempre mediante l'utilizzo di viti auto-foranti. Una volta realizzato il primo solaio il processo costruttivo si ripete: ossia il primo solaio fa da piattaforma per la realizzazione dei piani successivi.

Impianti

Viene predisposta apposita listellatura per il passaggio degli impianti. Il pannello viene infine completato con un rivestimento in pannelli di cartongesso o fibra di gesso. Si realizza pertanto una controparete che consente un'agevole eventuale modifica futura degli impianti senza danneggiare o compromettere la parte strutturale del pannello.

La realizzazione dell'impianto di riscaldamento, avviene in sequenza alla posa delle pareti, sfruttando gli spazi ricavati nel vano tecnico interno delle pareti e nel pacchetto di sottofondo e solaio. Per gli impianti di distribuzione idrica e di scarico, vengono utilizzate le medesime tecnologie applicate nei sistemi tradizionali, sfruttando gli spazi ed i passaggi ricavati nei vani tecnici delle pareti, dei sottofondi e attraverso la realizzazione di appositi cavedi. Un'attenzione particolare è riservata all'insonorizzazione delle tubazioni utilizzando adeguati sistemi di progettazione e specifici prodotti.

Isolamento e rivestimenti

L'isolamento termico è disposto all'esterno in modo continuo su tutta la facciata, a garanzia di un'ottima efficacia contro il raffreddamento delle pareti in inverno ed il surriscaldamento in estate. Per garantire perfetta tenuta al vento i punti di collegamento verso l'esterno saranno sigillati utilizzando apposito nastro detto di "tenuta all'aria".

E' presente inoltre una guaina termoadesiva, saldata per un'altezza complessiva di circa 100 cm ripartita in 50 cm nella struttura in legno e 50 cm nella struttura in calcestruzzo sottostante.

Alla base, per motivi di protezione dall'acqua sarà posato un pannello in estruso ad alta densità dello spessore uguale al cappotto esterno fino al raggiungimento di 60 cm d'altezza circa.

CONSIDERAZIONI TECNICHE:

TENUTA ALL'ARIA

Aspetto essenziale della progettazione è garantire la tenuta all'aria per evitare dispersioni termiche dell'edificio, la formazione di condensa localizzata nell'involucro, la presenza di spifferi ed eventuali ponti acustici.¹⁷

Per garantire una buona tenuta all'aria dell'involucro è opportuno garantire due strati di tenuta all'aria: uno strato interno che svolge anche la funzione di freno al vapore; uno strato esterno che garantisce l'impermeabilità al vento.

Nel caso di costruzioni in XLam, i pannelli multistrato in legno sono sufficientemente stagni e possono quindi essere considerati come strato ermetico evitando così, in alcuni casi, l'interposizione di un freno a vapore sul lato caldo. Particolare attenzione va posta alle giunzioni degli elementi, dove l'ermeticità viene garantita tramite una nastratura sigillante coprigiunto.

L'impermeabilità al vento è solitamente garantita dalla rasatura del cappotto per pareti intonacate e, per pareti rivestite, dall'utilizzo di un telo traspirante resistente agli UV da posizionare con appositi nastri di giunzione sul lato esterno di pareti e coperture.

PONTI TERMICI

Il ponte termico si determina nell'involucro edilizio quando non c'è continuità materica oppure si verifica una brusca variazione nella geometria. In ambedue le condizioni si determinano perdite di calore concentrate di cui ci si può rendere conto osservando le variazioni dell'andamento del flusso termico attraverso grafici specifici.

Negli involucri realizzati con elementi a secco, ad esempio legno, la continuità materica tra gli elementi isolanti non sempre può essere garantita, pertanto dovrà essere il più possibile ricercata.

Quando sono presenti delle interruzioni, gli strati isolanti dovranno essere posti in modo da determinare una barriera continua che racchiuda tutti gli ambienti riscaldati che confinano con l'esterno o con ambienti non riscaldati. I punti nodali più significativi, ai quali va prestata particolare attenzione, sono tutte le correlazioni fra elementi, come quella parete-solaio di fondazione, parete-solaio intermedio, balcone-involucro esterno, parete-copertura.

¹⁷ L'ermeticità all'aria di un elemento costruttivo o dell'intero edificio è una grandezza misurabile attraverso il tasso di ricambio d'aria, n50

4.9. Nodi costruttivi

COLLEGAMENTO DI PARETE XLAM CON FONDAZIONE IN CALCESTRUZZO ARMATO

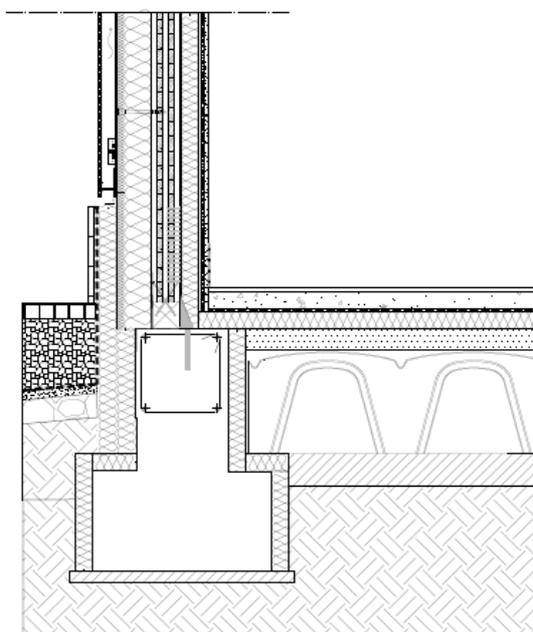


Figura 100 Collegamento parete-fondazione

Il collegamento delle pareti del piano terra alle fondazioni deve svolgere la duplice funzione di impedire il ribaltamento della parete per effetto delle azioni orizzontali agenti nel piano stesso ma anche lo scorrimento rispetto alle fondazioni.

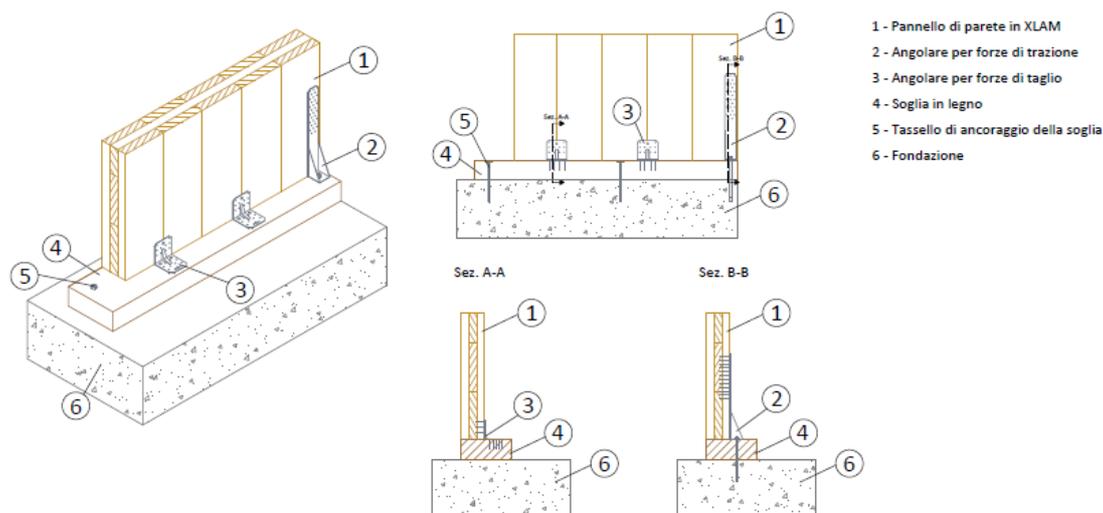
Il ribaltamento viene solitamente contrastato con delle piastre angolari allungate, dette comunemente hold-down.

Gli hold-down sono 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 ed in prossimità delle aperture. I chiodi (meglio se ad aderenza migliorata) e le viti di collegamento alla parete hanno diametri variabili dai 3 ai 6 mm e le barre filettate dai 12 ai 18 mm a seconda del tipo di hold-down e dei carichi in gioco.

Lo scorrimento invece può essere contrastato in vari modi, secondo il metodo di collegamento delle pareti alle fondazioni.

Data 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 in legno, garantito con viti auto-foranti, direttamente al cordolo di fondazione. Si prevedono delle staffe angolari di acciaio collegate con chiodi o viti alle pareti e sempre con tirafondi in acciaio alle fondazioni (diametro sempre 12-18 mm).



Nel collegamento fra parete XLam e fondazione in calcestruzzo armato assume particolare rilevanza la protezione dall'acqua, sia essa di risalita che meteorica, al fine di garantire la durabilità e, quindi, il mantenimento della prestazione dei materiali in rapporto all'isolamento termico. Al pari sarà necessario isolare termicamente il nodo in maniera da eliminare la possibilità di formazione di ponti termici. A tal fine, gli sporti sono dotati di rompigoccia, una guaina impermeabile è interposta tra il calcestruzzo armato e le parti lignee e l'isolante termico avvolge completamente il nodo.

Dati tecnici	Valore	Unità di misura
Trasmittanza termica	$U = 0,16$	W/m^2K
Massa superficiale	$M_s = 83,40$	kg/m^2
Costante di tempo	$\tau = 26,24$	h
Fattore di decremento (attenuazione)	$f_d = 0,108$	-
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	$\varphi = 11,04$	h
Trasmittanza termica periodica	$Y_{ie} = 0,017$	W/m^2K

CONSIDERAZIONI SUGLI ASPETTI TERMO-FISICI

In una parete realizzata con pannelli XLam ed un isolamento prestazionale, è possibile ottenere valori di trasmittanza termica piuttosto bassi, mantenendo un ingombro limitato.

Nel caso in esame, si raggiunge, con uno spessore totale di 38 cm, un valore di trasmittanza termica pari a $0,16 W/m^2K$ ¹⁸

Dal calcolo risulta che la stessa stratigrafia presenta una costante di tempo pari a 26,24 ore che porta lo sfasamento a superare le 11 ore. Tale valore riduce in maniera considerevole l'escursione termica sul lato interno della parete: il contributo allo smorzamento è dato soprattutto dagli strati esterni e dalle proprietà fisiche del pannello multistrato in legno, che abbattano ulteriormente il valore. La parete risulta sicuramente molto efficiente in regime estivo in quanto il picco di calore si manifesta nelle ore notturne quando un'opportuna ventilazione naturale può contribuire al raffreddamento dello spazio abitativo.

¹⁸ valore molto inferiore al valore limite definito dal D.P.R. 59/2009, per la zona climatica più restrittiva (zona F), pari a $0,33 W/m^2K$.

Dalla verifica di Glaser effettuata sulla parete nel mese con condizioni più restrittive, collocando l'edificio in zona F, non si rileva formazione di condensa interstiziale.

Come testimonia il grafico, si evidenzia infatti che la linea azzurra delle pressioni relative, date dalle condizioni climatiche reali, e la linea rossa delle pressioni di saturazione non s'intersecano in nessun punto interno alla parete.

L'andamento della pressione di saturazione è progressivo, senza zone critiche, ed inoltre, a partire dal pannello di legno, la sezione presenta un aumento graduale della permeabilità al vapore, cosa molto importante per garantire la traspirabilità e l'equilibrio igrometrico della struttura.

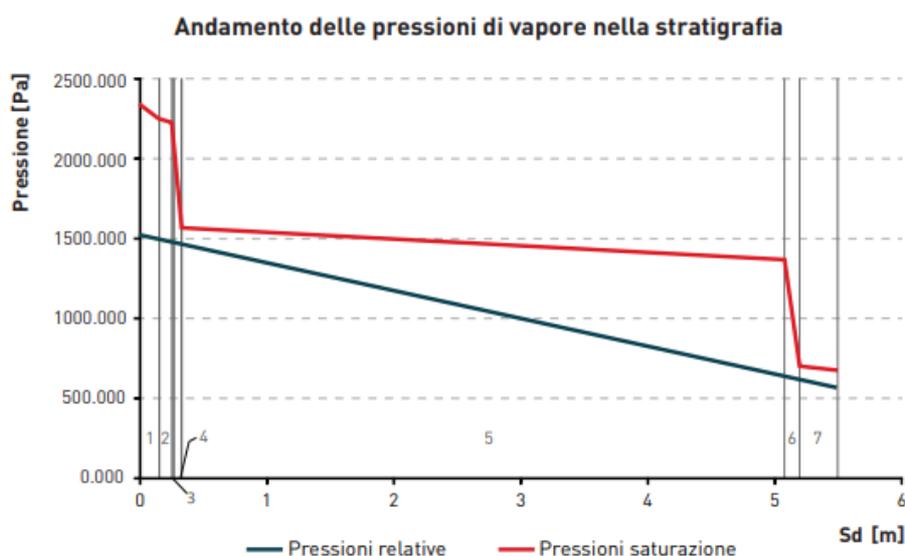


Figura 101 Verifica di Glaser

È necessario che l'ambiente abitato e riscaldato sia isolato da elementi disperdenti quali le fondazioni. Per risolvere il problema risulta importante sviluppare adeguatamente il dettaglio della giunzione tra esse e le pareti dell'edificio per limitare la dispersione di energia.

La regola principale è riuscire a dare continuità agli elementi con buone caratteristiche di isolamento termico ed ottenere quindi idealmente una superficie continua che racchiuda il volume riscaldato.

Minori sono le interruzioni di questa superficie, maggiore è il grado di isolamento delle fondazioni e maggiori sono le qualità prestazionali energetiche dell'edificio.

La continuità del materiale isolante all'interno della parete XLam e all'estradosso del solaio di base elimina completamente la formazione del ponte termico.

Come si vede dal grafico di flusso termico, l'andamento della temperatura all'interno degli strati è omogeneo ed equilibrato in tutte le direzioni, non presentando particolari dispersioni.

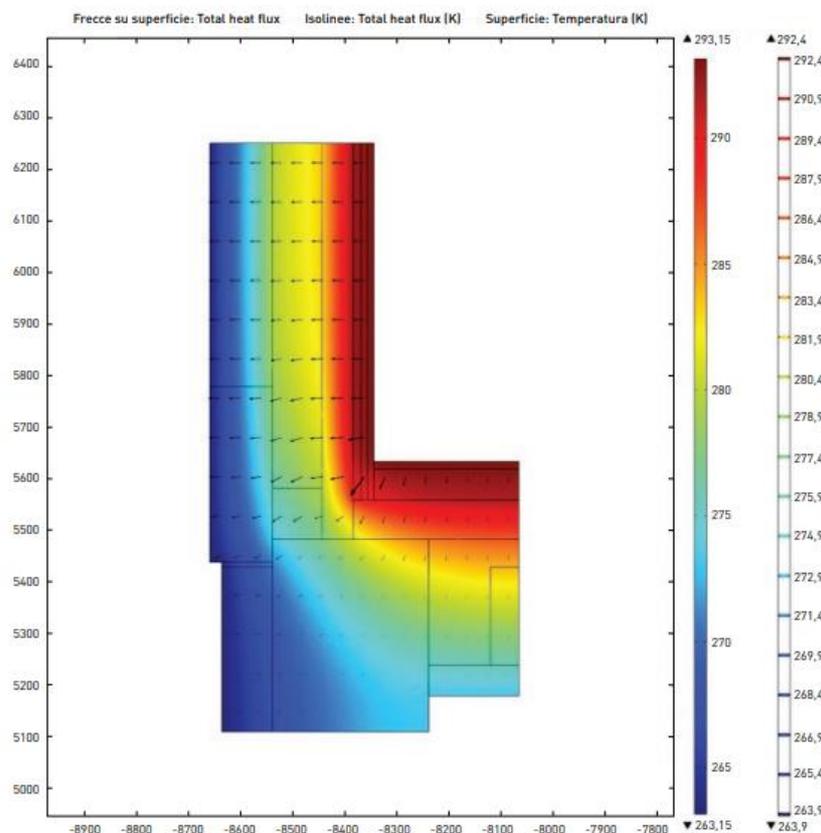


Figura 102 Grafico del flusso termico fondazione - parete

E' sottolineare inoltre che il collegamento tra due strutture di materiali diversi, quali il calcestruzzo armato e il legno, costituisce una zona sensibile dell'edificio. E' opportuno che gli elementi portanti in legno non siano mai posti a contatto diretto con il calcestruzzo, posizionando una guaina impermeabile per evitare la risalita capillare. La guaina va risvoltata anche sul lato esterno per circa 40-50 cm per evitare qualsiasi infiltrazione d'acqua.

La soluzione costruttiva con parete ventilata, inoltre, necessita di una particolare attenzione per quanto riguarda la tenuta all'aria e al vento. Le connessioni fra pannelli XLam sono realizzate, come già indicato precedentemente, a tenuta all'aria tramite nastri adesivi fissati manualmente. La protezione dal vento si ottiene rivestendo l'isolamento con appositi teli di tenuta al vento traspiranti.

L'isolamento esterno, realizzato con pannello rigido a doppia densità, è posto in opera a giunti sfalsati, tra loro ben aderenti, vincolati meccanicamente al pannello mediante specifiche viti da legno dotate di rondella di plastica di ripartizione del carico.

CONSIDERAZIONI SUGLI ASPETTI ACUSTICI

La soluzione costruttiva con pannelli XLam garantisce condizioni ottimali per quanto riguarda l'isolamento acustico relativamente alla composizione e alla stratificazione della parete che, costituendo un sistema massa-molla-massa, favorisce l'abbattimento del suono. Tale comportamento virtuoso ha però il suo punto debole nelle giunzioni, laddove elementi costruttivi rigidi vengono a contatto e conseguentemente possono determinare l'insorgenza di ponti acustici, la cui eliminazione è tuttavia realizzabile con l'introduzione di materiali morbidi espansivi. Nel caso particolare del collegamento legno-calcestruzzo una banda di materiale elastico deve essere interposta sotto al pannello ligneo.

COLLEGAMENTO PARETE SOLAIO

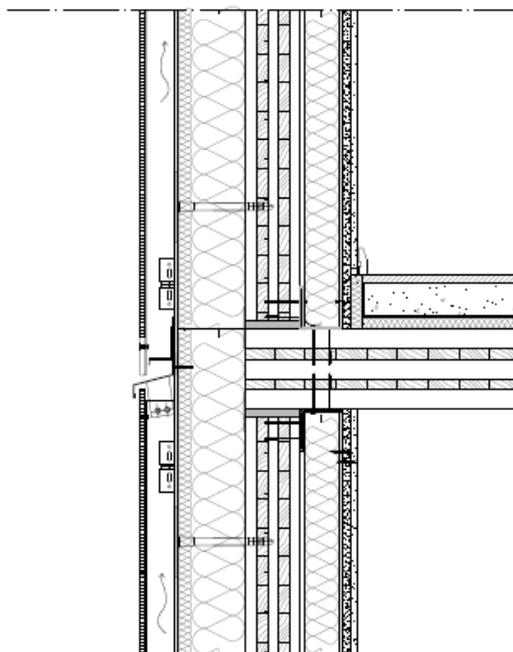
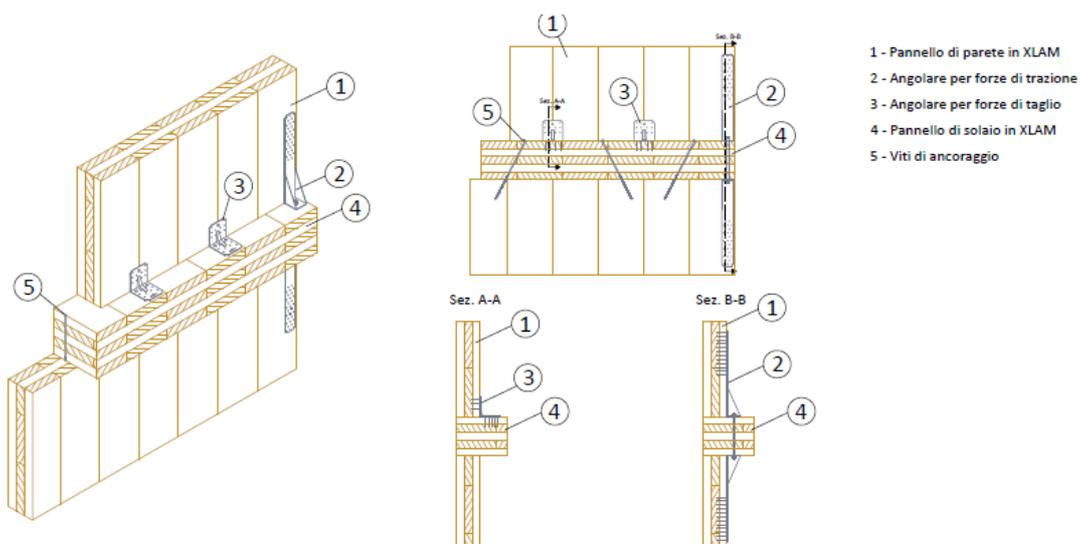


Figura 103 Collegamento parete - solaio intermedio

Per trasmettere gli sforzi di sollevamento tra pannello superiore e pannello inferiore si possono utilizzare gli stessi sistemi hold-down utilizzati in fondazione, in questo caso vanno accoppiati sopra e sotto il solaio e collegati tra di loro tramite bullonature. In alternativa possono utilizzarsi delle piastre passanti che collegano direttamente i due pannelli.



Il collegamento tra solaio intermedio e pareti in XLam presenta criticità in rapporto alla tenuta all'aria, all'isolamento termico e acustico. Come nel dettaglio riportato in figura, la tenuta all'aria è risolta con nastri adesivi di tenuta. L'isolamento termico e l'eliminazione dei ponti termici sono realizzati con la

continuità materica degli strati coibenti esterni. L'interposizione di nastri di tenuta morbidi e il risvolto dei pannelli isolanti risolvono la trasmissione dei rumori e l'isolamento acustico.

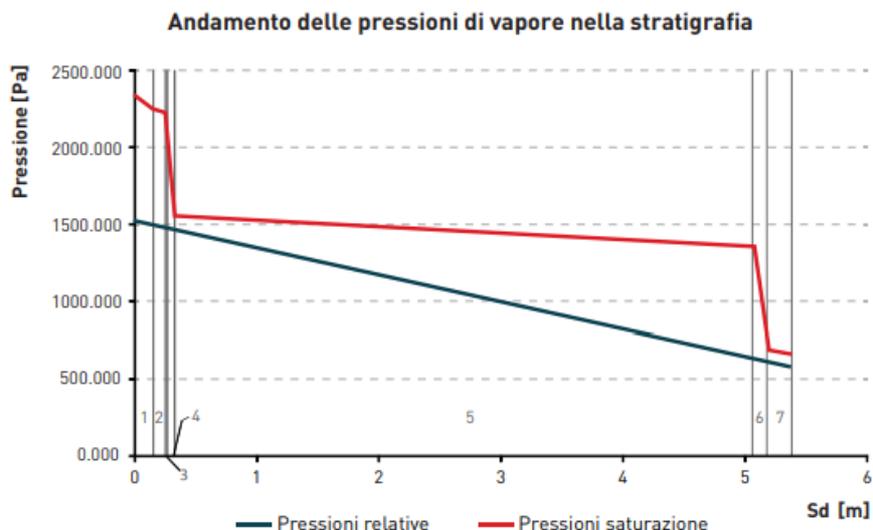
Dati tecnici	Valore	Unità di misura
Trasmittanza termica	$U = 0,16$	W/m^2K
Massa superficiale	$M_s = 121,02$	kg/m^2
Costante di tempo	$\tau = 28,53$	h
Fattore di decremento (attenuazione)	$f_d = 0,105$	-
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	$\varphi = 11,96$	h
Trasmittanza termica periodica	$Y_{ie} = 0,016$	W/m^2K

CONSIDERAZIONI SUGLI ASPETTI TERMO-FISICI

La realizzazione della parete esterna con pannelli XLam da 95 mm permette di ottenere alte prestazioni termiche con componenti di limitato spessore. Una chiusura verticale intonacata, isolata a cappotto con pannelli rigidi, presenta una trasmittanza di $0,16 W/m^2K$ con uno spessore complessivo di soli 38 cm.¹⁹ Nel caso della parete con finitura ad intonaco anche la costante di tempo risulta elevata ($\tau = 28,53$ h) poiché il pannello XLam possiede un alto valore di calore specifico ed una buona resistenza termica, che compensano la massa ridotta. Le ottime prestazioni della parete sono dimostrate anche dallo sfasamento raggiunto, circa 12 ore, valore ideale per il controllo dell'escursione termica sul lato interno della parete. Il contributo allo smorzamento è dato congiuntamente dagli strati esterni e dalle proprietà fisiche del pannello multistrato in legno.

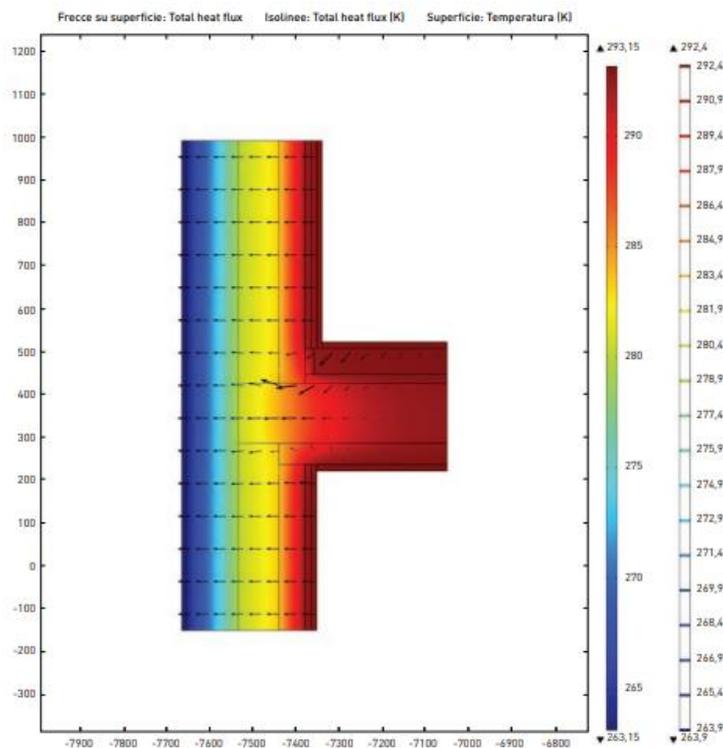
Dalla verifica di Glaser effettuata emerge che per la stratigrafia della parete intonacata, con un intonaco sufficientemente traspirante, l'andamento della pressione di vapore è graduale, senza zone critiche. Inoltre, a partire dal pannello di legno, la sezione presenta un aumento graduale della permeabilità al vapore, cosa molto importante per garantire la traspirazione e l'equilibrio igrometrico delle strutture. Con riferimento al grafico si evidenzia che la stratigrafia è disegnata in scala con il valore S_d , ovvero lo spessore equivalente d'aria, di ogni singolo materiale per rendere più evidente la valutazione dell'andamento della permeabilità dei vari strati e la loro corretta o meno disposizione.

¹⁹ Tale valore soddisfa ampiamente i requisiti richiesti dal D.P.R. 59/2009 che pone, ad esempio per la zona climatica F, caratterizzata dai valori più restrittivi, una trasmittanza limite pari a $0,33 W/m^2K$.



Nella correlazione parete-solaio-parete non vi sono difficili problematiche relative al ponte termico per quanto riguarda la parte esterna, non essendoci soluzione di continuità del materiale isolante. Eventuali criticità possono insorgere all'interno, se non si ha materiale isolante sia sulla parete che all'intradosso e all'estradosso del solaio. Nel caso in cui una di queste superfici non sia isolata, nascono squilibri nei flussi termici che si concretizzano come ponte termico.

Il grafico del flusso termico dimostra l'efficacia della soluzione: le isoterme rimangono omogenee e parallele nello strato isolante, non subendo particolari distorsioni.



Per garantire la tenuta all'aria nel punto di connessione fra parete e solaio è necessario sigillare la giunzione con nastri duttili applicati all'interno della parete ed eventualmente mediante l'introduzione di ulteriori speciali guarnizioni ad espansione, applicate nella zona di contatto, che spesso coincidono con gli

elementi preposti al taglio acustico. La nastratura può essere integrata da teli o membrane che consentano la tenuta all'aria e la traspirazione delle strutture nei confronti del vapore.

Il solaio intermedio è composto da un pannello multistrato in legno di 14 cm ed è isolato acusticamente con un pannello anticalpestio. Per evitare la trasmissione del suono per fiancheggiamento, questo ultimo va installato assieme ad una fascia perimetrale di taglio acustico o ad un risvolto del materassino stesso, che andrà poi rifilato una volta realizzato il pavimento.

L'utilizzo di un telo traspirante di separazione fra il massetto e il pannello portante ha una funzione protettiva contro la polvere e di tenuta in caso di perdite delle tubazioni.

COLLEGAMENTO PARETE-COPERTURA

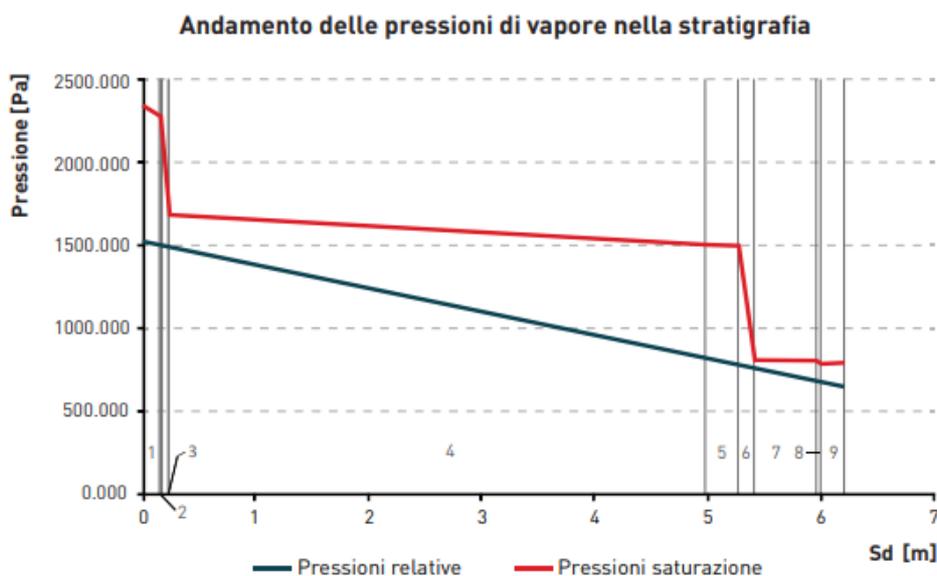
Il collegamento tra parete in XLam e solaio della copertura inclinata presenta criticità in rapporto all'isolamento termico e alla tenuta all'aria. Come nel dettaglio riportato in figura, la tenuta all'aria è risolta con nastri adesivi mentre la protezione dal vento è garantita da teli antivento. L'isolamento termico e l'eliminazione dei ponti termici sono realizzati con il mantenimento della continuità del materiale coibente esterno.

Dati tecnici	Valore	Unità di misura
Trasmittanza termica	$U = 0,16$	W/m^2K
Massa superficiale	$M_s = 105,01$	kg/m^2
Costante di tempo	$\tau = 33,80$	h
Fattore di decremento (attenuazione)	$f_d = 0,106$	-
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	$\varphi = 12,10$	h
Trasmittanza termica periodica	$Y_{ie} = 0,017$	W/m^2K

Il materiale isolante in copertura deve, ancor più che nella parete esterna, essere performante termicamente sia per le condizioni estive che per quelle invernali, in quanto la copertura è esposta a forte irraggiamento e ad ampie escursioni termiche. Il pacchetto di copertura adottato per il progetto oggetto di questa tesi, presenta uno sfasamento di 12 ore ed una costante di tempo τ elevata, determinando una situazione ottimale per la riduzione dell'ampiezza della sollecitazione termica, che subisce un forte smorzamento all'interno del pannello multistrato in legno.

La verifica di Glaser in un pacchetto di copertura è influenzata fortemente dalla necessità di inserire una guaina sottomanto, resistente agli agenti atmosferici, che può rallentare la traspirazione del vapore verso l'esterno.

Come si vede dal grafico, le linee della pressione di saturazione e delle pressioni relative si avvicinano, senza incrociarsi, sullo strato esterno del telo isolante laddove la ventilazione sottomanto comunque smaltirebbe ed eviterebbe il ristagno di umidità.



Il giunto tra la copertura e la parete esterna rappresenta uno dei punti critici della struttura per via delle problematiche legate alla continuità dell'isolamento e alla tenuta all'aria.

Particolare attenzione richiede la verifica dei ponti termici per geometria degli spigoli.

CONSIDERAZIONI SUGLI ASPETTI ACUSTICI

L'isolamento acustico di un edificio in pannelli XLam presenta il suo punto debole nelle giunzioni strutturali, come quella fra il pannello di parete e quello di copertura. Nel dettaglio in figura l'eliminazione del ponte acustico è stato ottenuto con l'interposizione di materiali morbidi espansivi fra i due elementi rigidi. In questo modo si potrebbero anche soddisfare le esigenze di tenuta all'aria ed ermeticità dell'involucro, che vengono garantite con l'aggiunta di una nastratura interna.

Nel raccordo inoltre si deve prestare particolare attenzione alla realizzazione della finitura esterna, poiché in queste zone potrebbe accadere che la membrana di tenuta al vento non sia risvoltata opportunamente. Tale situazione potrebbe portare ad eventuali discontinuità che conducono a consistenti perdite di calore e a infiltrazioni d'acqua.

COLLEGAMENTO TRA PANNELLI DI PARETE

Le dimensioni laterali dei pannelli sono limitate per ragioni costruttive e di trasporto. Solitamente la larghezza standard è di 125 cm, pertanto è necessario collegare i vari pannelli fra loro mediante giunti verticali realizzati tramite tavole di giunzione, viti o chiodi. Le tavole faranno lavorare a taglio i vari connettori.

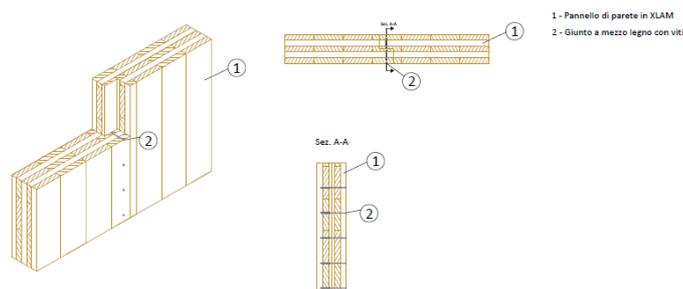


Figura 104 Collegamento tra pannelli di parete

COLLEGAMENTI TRA PARETI AD INCROCIO

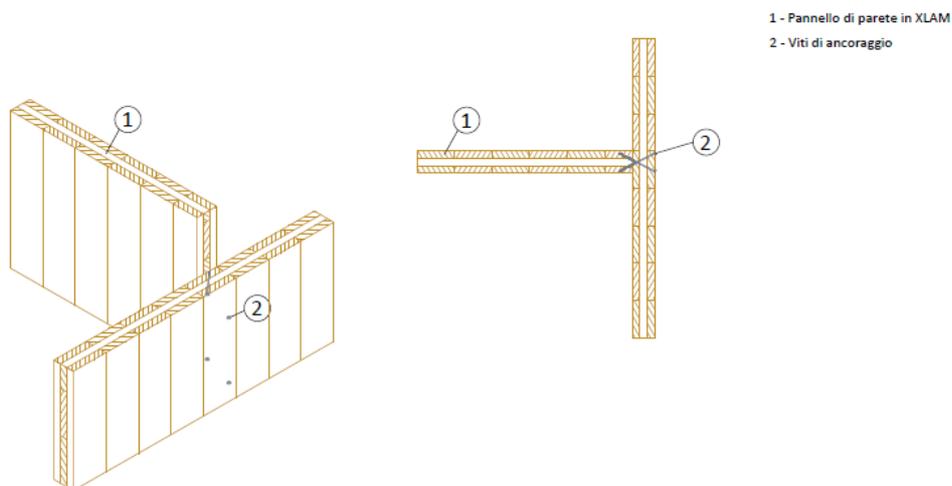


Figura 105 Collegamento parete-parete d'incrocio tramite viti di ancoraggio

COLLEGAMENTI TRA PARETI D'ANGOLO

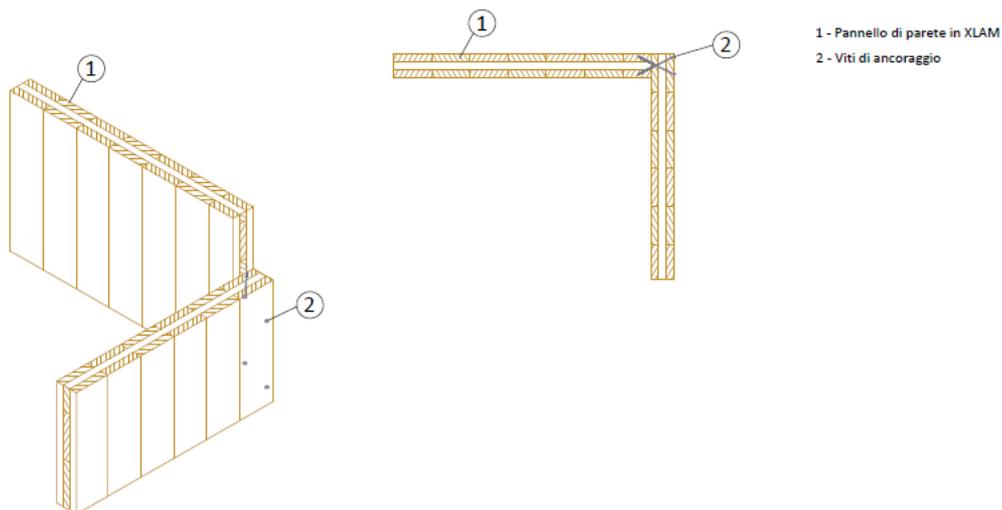


Figura 106 Collegamento parete-parete d'angolo tramite viti di ancoraggio

COLLEGAMENTI TRA PANNELLI DI SOLAIO

Anche in questo caso ci si avvale delle tavole di giunzione fissate con viti o chiodi ad aderenza migliorata. Si tratta di collegamenti a "cerniera" in cui non si trasmette flessione fra una striscia e l'altra, ma solo sforzo di taglio. La direzione del giunto è ovviamente parallela alla direzione di orditura del solaio. Lo spessore si predimensiona a circa $L/35$ o $L/40$. L'effetto portante è solo in una direzione pertanto si possono calcolare come travi in legno sollecitate a flessione e taglio.

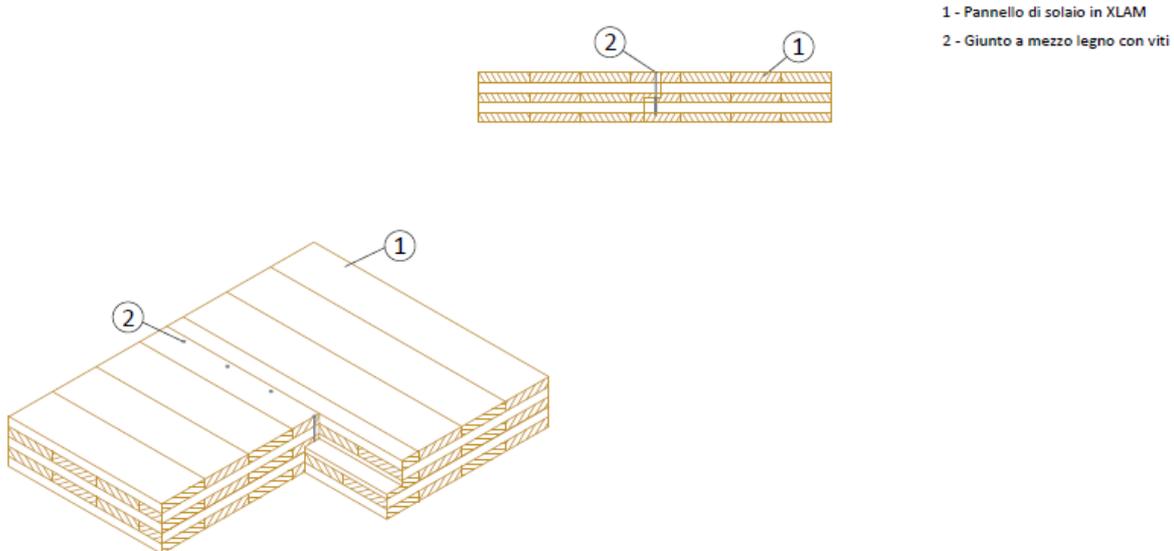


Figura 107 Collegamento solaio-solaio tramite giunto a mezzo legno con viti di ancoraggio

COLLEGAMENTO SCALA – PARETE

La realizzazione della scala in legno si effettua mediante collegamento dei gradini alla parete portante tramite l'ancoraggio di angolari metallici di appoggio

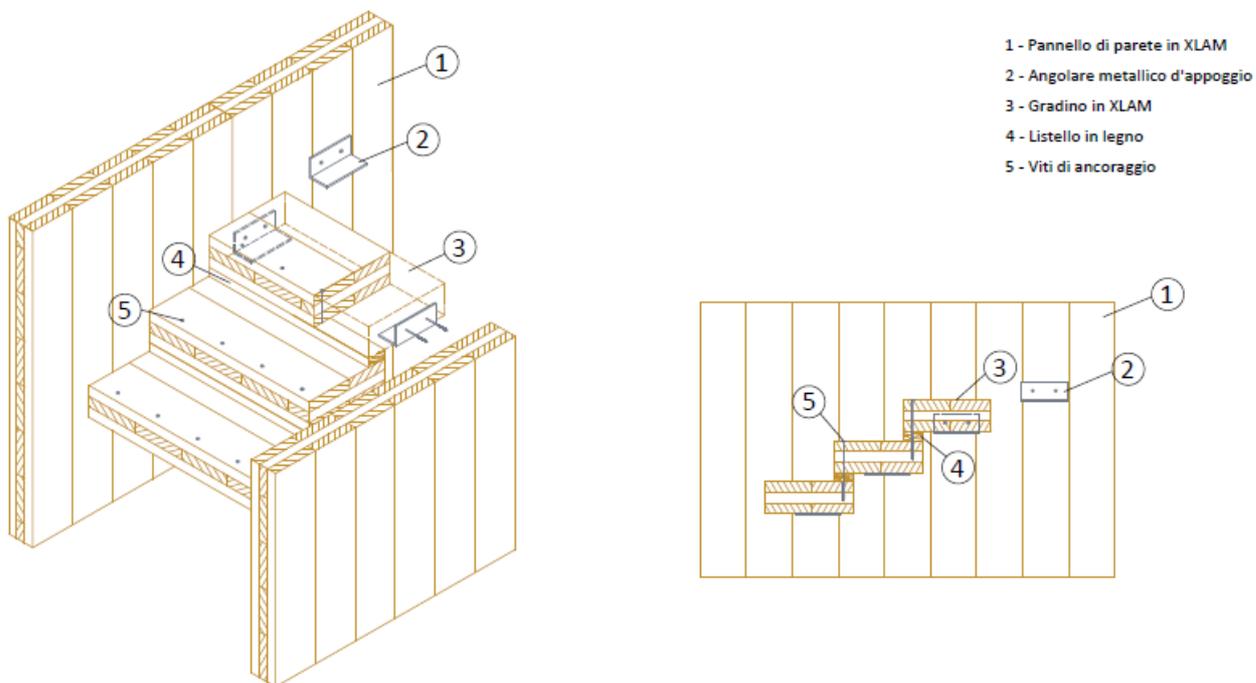


Figura 108 Fissaggio dei gradini per mezzo di angolari avvitati ai pannelli di parete

4.10. Materiali utilizzati

SPINOTTI

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

VITI

Nella realizzazione delle connessioni tra i pannelli Xlam si sono considerate le seguenti tipologie di viti strutturali.

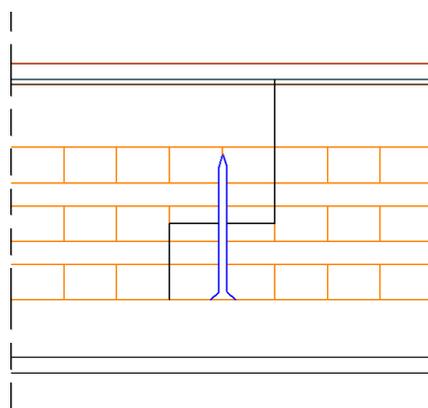
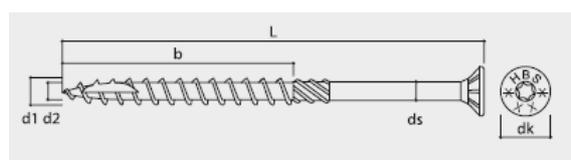
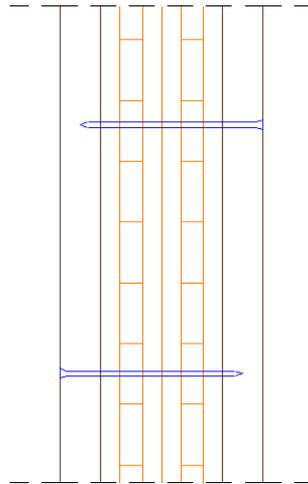


Figura 109 Vite per legno $d=6\text{ mm}$, $h=180\text{ mm}$, per connessione parete-parete, disposte con maglia $500\text{ x }500\text{ mm}$



*Figura 110 Vite per legno $d=6$ mm,
 $h=180$ mm, per connessione
parete-parete, disposte con maglia
 500×500 mm*

Strutture in calcestruzzo per travi rovesce di fondazione

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

- Resistenza cubica caratteristica: $R_{ck} = 30$ MPa
- Resistenza cilindrica caratteristica: $f_{ck} = 25$ MPa
- Resistenza cilindrica media: $f_{cm} = 33$ MPa
- Resistenza a trazione media: $f_{ctm} = 2,56$ MPa
- Resistenza a flessione media: $f_{cfm} = 3,07$ MPa
- Modulo elastico: $E_{cm} = 30472$ MPa
- Modulo elastico fessurato: $E_c = 15236$ MPa
- Verifica agli SLU: $\gamma_c = 1,5$
- Resistenza cilindrica di progetto: $f_{cd} = 14,2$ MPa
- Resistenza a trazione di progetto: $f_{ctd} = 1,7$ MPa
- Deformazione ultima di progetto: $\epsilon_{cu} = -3,5$ ‰
- Verifica agli SLE: $\gamma_c = 1$

Controsoffitti e contropareti

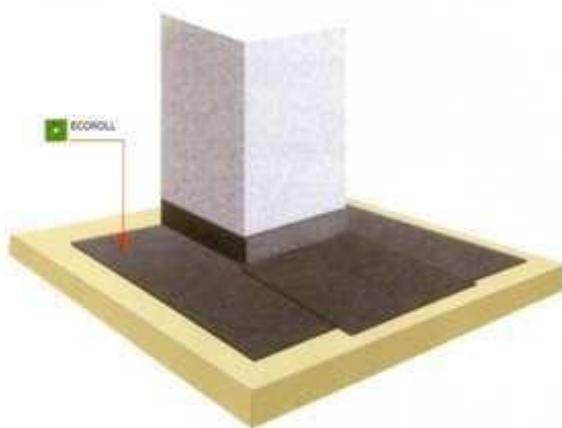
Si è deciso di non effettuare controsoffittature in quanto si è preferita la opzione di lasciare il legno a vista nell'intradosso del pannello XLam. Questo da un lato comporta complicazioni con il passaggio degli impianti però dall'altro rappresenta un'ottima soluzione estetica dell'ambiente interno.

D'altra parte le pareti interne sono dotate di contropareti per agevolare e mascherare la presenza degli impianti. Si sono utilizzati pannelli in cartongesso di spessore 12,5 mm, sostenuti tramite profili a C chiodati alla parete o al solaio. Si riportano di seguito delle immagini relative a questi elementi.

Tappeto rigido anticalpestio

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

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



Le caratteristiche di tale materiale sono:

Stabilità termica: da -30°C a +80°C

Densità: 750/800 kg/mc

Resistenza alla trazione: DIN 53455 >0,4

Conduktività termica: DIN 52612 0,14 W/mK

Reazione al fuoco: DIN 4102 Part.1 B2

Permeabilità al vapore: permeabile

Miglioramento dell'isolamento al calpestio: L_{nw}: 48,5 dB; ΔL: 24,5 dB

4.11. Pannelli X-LAM

I pannelli a strati incrociati di legno massiccio sono già stati descritti in precedenza. Si riportano in questo paragrafo alcuni approfondimenti trattandosi del materiale che è ampiamente stato utilizzato nel progetto degli edifici oggetto di questa tesi.

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

I pannelli di legno massiccio a strati incrociati XLAM sono pannelli di grandi dimensioni, formati da più

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

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

LO STRATO DI TAVOLE

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

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

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

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

DIMENSIONI E FORMATI DELL'XLAM

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

In modo generale si può affermare che i pannelli XLam sono disponibili in dimensioni che possono raggiungere i 24 m in una direzione, i 4.8 m nell'altra, e uno spessore di 0.5 m. Entro questi limiti, le dimensioni massime della produzione del singolo pannello variano in modo notevole. In modo altrettanto notevole variano le dimensioni dello spessore dei singoli strati e della composizione del pannello.²⁰

²⁰ in alcuni casi si producono pannelli con strati doppi, in modo da ottenere una prevalenza delle caratteristiche meccaniche in una delle due direzioni del piano del pannello.

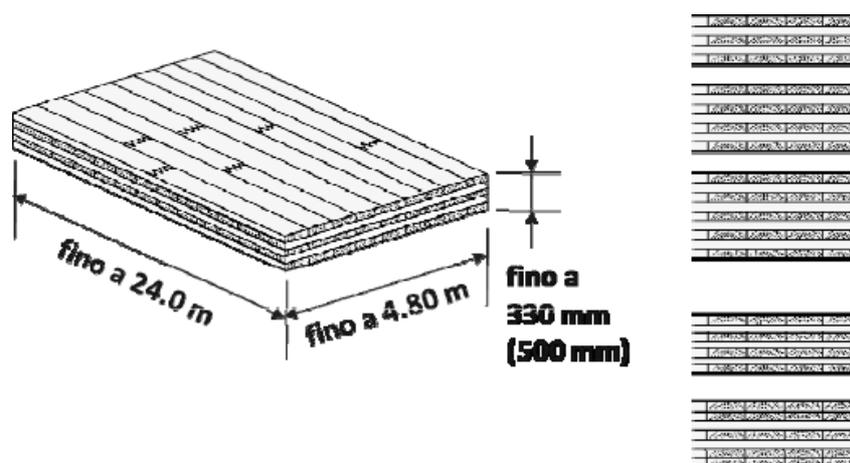


Figura 111 Dimensioni massime ed esempi della composizione della stratigrafia dei pannelli XLAM.

CARATTERISTICHE FISICHE

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

I pannelli XLAM sono ammessi all'uso nelle classi di servizio 1 e 2²¹: il loro uso è quindi limitato alle situazioni che non ne compromettono la durabilità, o in condizioni da escludere ogni fenomeno di degrado biologico. Le variazioni attendibili delle dimensioni di un pannello XLAM,

nel suo piano, sono quindi teoricamente al massimo dello 0,1%, cioè di meno di 1 mm per metro lineare. Si può quindi affermare che i pannelli XLAM presentano una stabilità dimensionale praticamente completa e totale per quanto concerne le dimensioni nel loro piano.

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

SOLETTE DI LEGNO MASSICCIO XLAM

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

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

²¹ La classe di servizio 1 corrisponde agli ambienti interni e riscaldati, mentre la classe di servizio 2 corrisponde agli ambienti esterni, ma escludendo sia il contatto diretto con l'acqua che l'esposizione diretta alle intemperie.

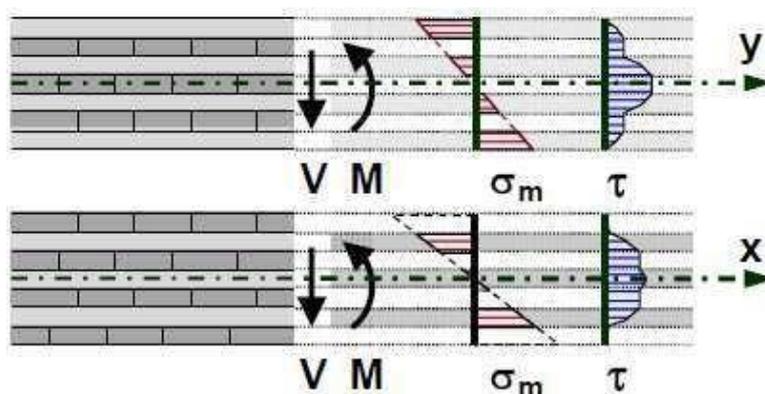


Figura 112 Distribuzione delle tensioni di flessione e di taglio sulla sezione.

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

PARETI DI LEGNO MASSICCIO XLAM

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

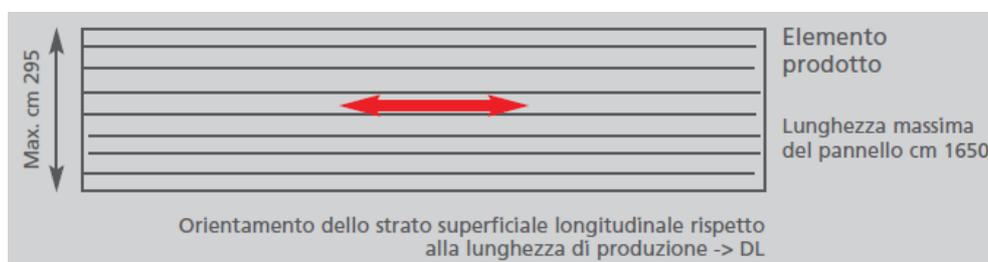
In questo caso quindi la parete viene calcolata come elemento inflesso da carichi perpendicolari al proprio piano, per cui di preferenza gli strati esterni del pannello saranno orientati nella direzione verticale.

SCELTE PROGETTUALI

Per la realizzazione di solai si sono utilizzati pannelli DL di spessore 140 mm a cinque strati, per le pareti portanti interne ed esterne pannelli a cinque strati di spessore 95 mm.

Essendo le solette prevalentemente sollecitate a flessione, i pannelli sono messi in opera con gli strati esterni e lo strato centrale disposti in direzione dell'orditura e con i restanti due strati disposti ortogonalmente ad essi.

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



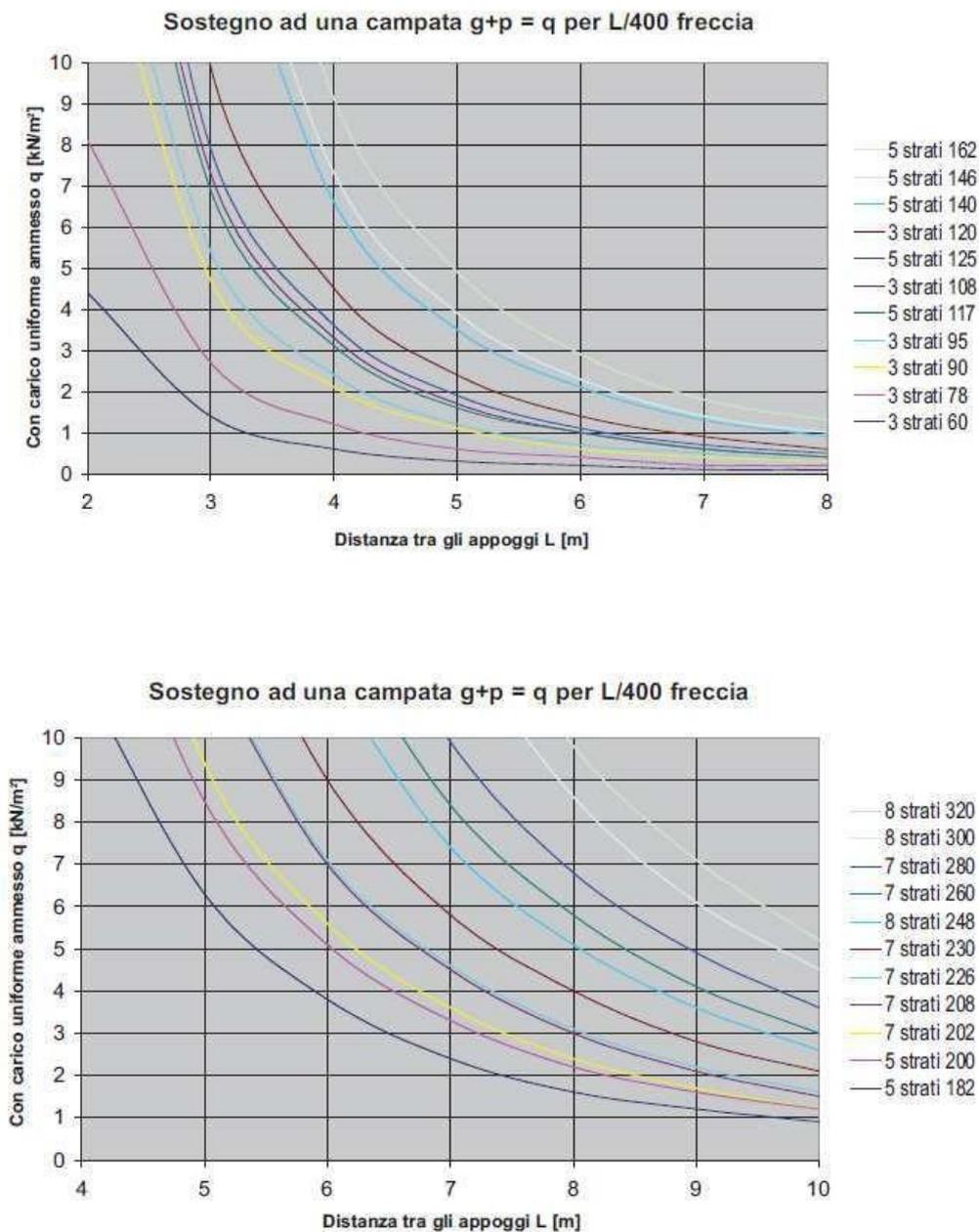


Figura 113 Diagrammi per il predimensionamento

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

Per il solaio si è scelto un pannello XLAM di 140 mm di spessore; si è utilizzato il primo grafico tra i due riportati sopra, e si sono considerati appoggi distanti 4m e un carico totale di circa 7 kN/mq.

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

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



SOLLECITAZIONE COME DISCO			
Modulo E – parallelo alle fibre		12000 N/mm ²	parallelo alle fibre per gli strati in direzione di carico
Modulo E – verticale alle fibre		370 N/mm ²	
Modulo G degli strati in direzione di carico		250 N/mm ²	per deformazione da spinta
Curvatura	ammessa σ B	10 N/mm ²	
Trazione	ammessa σ Z	8.5 N/mm ²	
Pressione	ammessa σ D II	10 N/mm ²	parallela alle fibre per gli strati in direzione di carico
Pressione	ammessa σ D II, locale	14 N/mm ²	locale per punti di inizio carico
Pressione	ammessa σ D normale	2.5 N/mm ²	verticale alle fibre
Pressione	ammessa σ D normale	3 N/mm ²	verticale alle fibre – piccole ammaccature trascurabili
Cesoioamento	ammessa τ a	2.0 N/mm ²	per gli strati riferiti alla direzione di carico
Spinta (inf Q)	ammessa τ q	2.2 N/mm ²	per gli strati riferiti alla direzione di carico

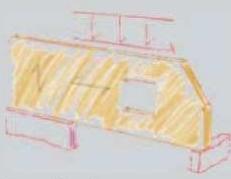


Figura 114 Caratteristiche pannelli XLAM

4.12. Criteri di progettazione antisismica

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

Nel calcestruzzo armato invece, tale comportamento si ottiene progettando le sezioni con una opportuna staffatura, in modo tale da evitare la rottura a taglio che è sempre una rottura fragile.

Nel caso delle strutture in legno tale criterio viene perseguito progettando adeguatamente i giunti con connettori meccanici, avendo ovviamente cura nel rendere gli elementi di legno più resistenti dei giunti (esattamente l'opposto quindi del criterio seguito nella progettazione delle strutture in acciaio).

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

elastico:

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

In pratica attraverso l'introduzione del fattore di struttura q , che tiene conto della capacità di dissipazione di energia della struttura attraverso un comportamento duttile, si consente al progettista di progettare la struttura in campo lineare tenendo conto dell'effettivo comportamento non lineare, semplicemente dividendo le ordinate dello spettro di risposta per il valore di questo coefficiente. I valori del fattore di struttura sono ovviamente diversi in funzione del tipo di materiale utilizzato, delle caratteristiche dei giunti e del tipo di struttura. Ovviamente nel caso di strutture poco dissipative tale valore è pari a 1,5.

L'introduzione del fattore di struttura ci consente pertanto di calcolare agevolmente le forze sismiche di progetto agenti sulla struttura:²²

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

L'Eurocodice 8 al Cap. 8 e le NTC al paragrafo 7.7 definiscono le tipologie strutturali ammesse in zona sismica ed i corrispondenti valori del fattore di struttura q , dividendo, come per gli altri materiali, le tipologie strutturali ammesse in due classi di duttilità, le strutture aventi una bassa capacità di dissipazione energetica (Classe B e valori di q compresi fra 2 e 2,5) e le strutture aventi una alta capacità di dissipazione energetica (Classe A e valori di q compresi fra 3 e 5).

Le Norme Tecniche ammettono anche la progettazione delle strutture nell'ipotesi di comportamento scarsamente dissipativo, per le quali il fattore di struttura q assumerà il valore 1,5.

Nelle strutture di legno in generale la configurazione dei giunti e le loro modalità realizzative hanno notevole influenza sul comportamento sismico, anche nell'ambito dello stesso sistema costruttivo. A differenza delle azioni verticali che possono interessare solamente una porzione della struttura e alcuni elementi costruttivi, l'azione sismica è un'azione orizzontale che coinvolge la struttura nel suo insieme e pertanto la continuità dei collegamenti fra le diverse porzioni di struttura, in tutte le posizioni, è particolarmente importante e deve essere effettiva sia a trazione che a compressione.

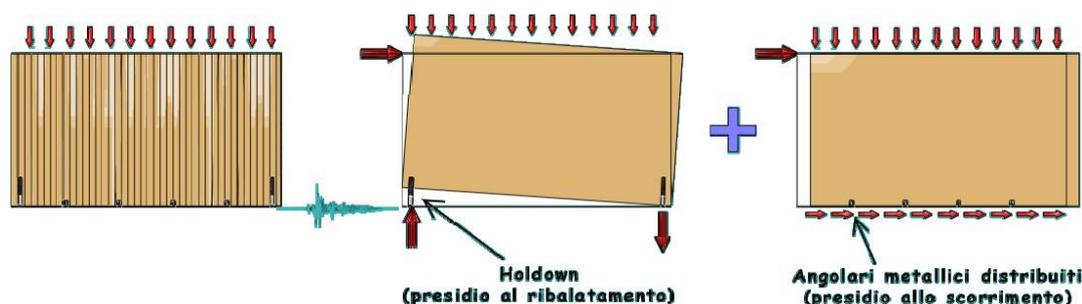


Figura 115 Effetti dell'azione sismica agente su una parete e diversa funzione degli elementi di collegamento

²² tanto maggiore sarà il valore del fattore di struttura, tanto minore sarà il valore delle forze sismiche da considerare nella progettazione, perché si terrà conto della maggiore capacità della struttura di dissipare energia attraverso lo sviluppo di un comportamento duttile.

Il comportamento degli edifici a pannelli portanti X-Lam nei confronti delle azioni sismiche è di tipo scatolare. L'azione sismica viene trasferita dai solai (considerati rigidi nel loro piano) alle pareti di piano in funzione della propria rigidezza e da queste ai piani sottostanti fino alle fondazioni.

Gli elementi verticali devono essere progettati principalmente per resistere ad azioni nel piano (verticali e orizzontali, comportamento a lastra), mentre gli elementi orizzontali devono essere progettati per resistere ad azioni nel piano e fuori dal piano (comportamento a piastra per i carichi verticali, a lastra per trasmettere le azioni orizzontali). La rigidezza dei pannelli di parete ortogonali alla direzione della forza, come normalmente si fa anche per altre tipologie costruttive, è considerata trascurabile.

Per garantire il corretto comportamento della scatola strutturale occorre dotare alcune connessioni di adeguate riserve di sovrarigidità, mantenendo un comportamento elastico.

Queste sono:

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

I collegamenti progettati per resistere all'azione sismica ma non dotati di sovrarigidità in quanto destinati a dissipare l'energia attraverso un comportamento duttile sono:

- i collegamenti verticali fra pannelli di una stessa parete;
- le connessioni a taglio alla base delle pareti;
- le connessioni a sollevamento (hold-down) all'inizio e alla fine di ciascuna parete.

Una parete realizzata con un unico grande pannello X-Lam presenta minori capacità dissipative, e quindi minore duttilità, rispetto alla stessa parete realizzata con più pannelli di piccole dimensioni giuntati fra loro mediante collegamenti verticali.

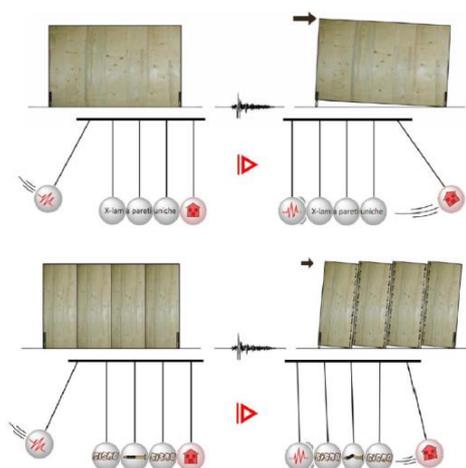


Figura 116 Schematizzazione differente risposta all'azione sismica delle pareti

4.13. Comportamento al fuoco

È noto che il legno è un materiale combustibile, questo però non significa che le strutture di legno non possiedano resistenza al fuoco e che siano più vulnerabili rispetto alle strutture di acciaio o di calcestruzzo armato specie se precompresso.

Raramente le strutture di legno contribuiscono in modo sostanziale ad alimentare un incendio ma anzi ne subiscono più spesso le conseguenze, manifestando al riguardo un comportamento almeno non peggiore se non addirittura migliore rispetto a strutture realizzate con altri materiali. A riprova di quanto detto si analizzano gli aspetti salienti del comportamento di un elemento strutturale di legno soggetto ad incendio:

il legno brucia lentamente, la carbonizzazione procede dall'esterno verso l'interno della sezione;

il legno non ancora carbonizzato rimane efficiente dal punto di vista meccanico anche se la sua temperatura è aumentata;

la rottura meccanica dell'elemento avviene quando la parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente ridotta da non riuscire più ad assolvere alla sua funzione portante.

Pertanto la perdita di efficienza di una struttura di legno avviene per riduzione della sezione e non per decadimento delle caratteristiche meccaniche.

Il processo di carbonizzazione può portare alla rottura dell'elemento strutturale in un tempo compreso fra alcuni minuti primi e alcune ore, ciò in dipendenza della specie legnosa ma soprattutto delle dimensioni originarie della sezione.

Se poi si confronta il comportamento del legno con quello di altri materiali da costruzione più tradizionalmente utilizzati nel nostro paese, verso i quali normalmente non c'è alcun pregiudizio rispetto alla loro resistenza nei confronti dell'incendio non essendo materiali combustibili, si capisce ancora meglio perché il legno non parta svantaggiato, ma anzi al contrario dell'opinione comunemente diffusa possa essere considerato addirittura preferibile:

- gli elementi strutturali di acciaio non bruciano ma il materiale subisce un rapido decadimento delle caratteristiche meccaniche in funzione della temperatura;
- nelle costruzioni di calcestruzzo armato la resistenza al fuoco è determinata dallo spessore del rivestimento delle armature metalliche (copriferro);
- nelle strutture di legno i punti deboli sono le unioni che presentano elementi metallici a vista come scarpe, piastre, ecc.; queste, se non protette, sono le prime a cedere durante l'incendio.

La resistenza al fuoco di un elemento strutturale di legno può essere valutata in tre modi (D.M.Int. 09/03/2007):

- prove (metodo sperimentale)
- calcoli (metodo analitico)
- confronti con tabelle (metodo tabellare)

Il metodo sperimentale prevede le prove in forno su elementi di caratteristiche equivalenti agli elementi di effettivo impiego nella costruzione dello stesso tipo e dimensioni e soggetti agli stessi carichi di progetto. Il metodo analitico si basa su valori di calcolo noti; tali valori sono la velocità di carbonizzazione e la resistenza meccanica, essendo il calcolo da eseguirsi allo stato limite ultimo di collasso.

Nel calcolo analitico della resistenza al fuoco le ipotesi di base sono (per EN 1995-1-2 le ipotesi sono leggermente diverse):

la carbonizzazione procede perpendicolarmente alle superfici esposte con velocità costante;

il legno conserva inalterate le proprie caratteristiche di resistenza e rigidezza nella parte non ancora combusta;

la valutazione della capacità portante viene fatta sulla sezione resistente residua trascurando l'arrotondamento degli spigoli;

il calcolo viene eseguito allo stato limite ultimo di collasso utilizzando quindi le tensioni di rottura.

I valori da assumersi nel calcolo analitico sono espressi in vari documenti (L.C.M.Int. 26/11/90 per la resistenza meccanica e D.M.Int. 8/3/85 per la velocità di carbonizzazione; norma UNI 9504 "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno"), tuttavia i documenti citati devono considerarsi superati in quanto il DM Int. 16/02/2007 nell'allegato C prescrive l'utilizzo degli Eurocodici, in particolare le norme EN 1991-1-2 (Eurocodice 5) "Azioni generali – Azioni sulle strutture esposte al fuoco" e EN 1995-1-2 "Progettazione delle strutture di legno – Progettazione strutturale contro l'incendio".

L'Eurocodice 5 è il miglior documento dal punto di vista scientifico; questo documento fornisce tre metodi di calcolo, il primo dei quali (metodo della sezione efficace) è il più semplice ma anche il più cautelativo; contiene indicazioni esaustive per la protezione dei giunti.

Per il metodo tabellare il D.M.Int. 09/03/2007 fornisce tabelle solo per:

- murature non portanti
- calcestruzzo armato e precompresso (solette, solai alleggeriti, travi, pilastri e pareti)
- acciaio (travi, tiranti e pilastri)

In generale i metodi tabellari si basano su alcune prescrizioni dimensionali generalmente riferite agli spessori delle protezioni.

Tuttavia nel caso del legno, in virtù delle L.C. 07/12/87 e L.C. 26/11/90, è ammissibile la protezione dei solai con controsoffitti e degli elementi strutturali con legno.

I trattamenti ignifughi e le protezioni

I prodotti ignifughi sono delle vernici trasparenti o meno che, applicate sul legno, ritardano l'ignizione, cioè rendono il legno meno facilmente infiammabile e quindi lo abbassano di classe di reazione al fuoco, fino a portarlo in classe 1; per tale motivo sarebbe più opportuno parlare di prodotti igniritardanti. Al momento non esistono in commercio prodotti che rendono il legno non combustibile.

Tali prodotti devono essere omologati, l'omologazione è possibile solo nei confronti della reazione al fuoco.

Il periodo di efficacia del prodotto non può essere superiore a 5 anni, pertanto dopo tale periodo il prodotto deve essere rimosso e riapplicato.

Ritardando l'ignizione in realtà tali prodotti aumentano anche la resistenza al fuoco, tale aumento è però

generalmente non superiore ai 10 minuti e pertanto poco utile.

I prodotti ignifughi rivestono il legno limitandone fortemente la traspirazione, per tale motivo non possono essere applicati su legno massiccio non sufficientemente stagionato altrimenti, non permettendo la rapida stagionatura del legno, ne provocano la marcescenza.

Ai fini della resistenza al fuoco le protezioni di elementi strutturali di legno con legno sono ammesse (L.C. Min. Int. 26/11/1990 “Resistenza di strutture portanti in legno”), in tal caso la resistenza al fuoco è aumentata del tempo occorrente alla combustione delle tavole di protezione.

Anche le protezioni con controsoffitti e cartongesso sono ammesse (L.C. 07/12/87 “Strutture in legno-Controsoffitti”), in questo caso è però necessario che le protezioni siano classificate per conferire alle strutture di acciaio una resistenza uguale o superiore a 45 minuti.

L’Eurocodice 5 tratta in maniera esaustiva il calcolo della resistenza al fuoco in presenza di protezioni.

Il carico di incendio per i locali a struttura di legno

Anche la struttura di legno, essendo combustibile, partecipa all’incendio e pertanto costituisce carico di incendio.

Tuttavia nel calcolo del carico di incendio andrà considerata la sola parte di legno che, in base alla velocità di carbonizzazione, si presume venga bruciata nel tempo corrispondente alla classe richiesta. Questo concetto è chiarito nella Lettera Circolare del Ministero dell’Interno del 28 Marzo 2008 “DM 9 Marzo 2007 – Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del CNVFF. Chiarimenti ed indirizzi applicativi”.

Essendo però la classe richiesta funzione del carico di incendio, è necessario che il progettista faccia almeno una iterazione: si calcola il carico di incendio prescindendo dalla presenza della struttura di legno, in funzione del carico di incendio si calcola la classe richiesta dell’edificio, si calcola la quantità di legno della struttura che si carbonizza in tale tempo, si ricalcola il carico di incendio e quindi la classe dell’edificio comprendendo anche il legno della struttura che si carbonizza.

Dall’esame della normativa antincendio si evince che non esiste alcun divieto all’utilizzo del legno per le strutture portanti; per le nuove strutture la possibilità di aumentare la resistenza al fuoco semplicemente aumentando la sezione o proteggendo l’elemento strutturale con legno o altri materiali consente di usare con fiducia il legno anche negli edifici soggetti a prevenzione incendi.

Comportamento al fuoco di edifici X-Lam

Tenendo conto di quanto detto finora è possibile trarre alcune regole generali sulla progettazione al fuoco di edifici a pannelli portanti a strati incrociati.

Esistono delle limitazioni in particolar modo sulla resistenza minima al fuoco delle strutture portanti e separanti che prescindono dal materiale con il quale la struttura è realizzata e che per un elevato numero di piani (oltre i 50 m di altezza) rendono di fatto più difficile l’utilizzo di strutture portanti in legno.

Resta aperta la discussione se per i pannelli a strati incrociati lasciati a vista debba essere richiesto il requisito di reazione al fuoco, oltre a quello di resistenza. Non c’è una indicazione precisa nella normativa a riguardo, ma occorre considerare che, costituendo i pannelli delle pareti o solai una importante frazione della superficie totale del compartimento, è opportuno che vengano trattati sia come struttura (resistenza) che come rivestimento (reazione).

Per quel che riguarda la velocità di carbonizzazione non esistono ancora valori di riferimento in normativa. L’unico riferimento applicabile parrebbe essere quello della tabella 3.1 dell’Eurocodice 5 parte 1-2, nella quale per i “pannelli a base di legno diversi dal compensato”, viene dato un valore di 0,9 mm/min. Tuttavia tale valore è riferito unicamente a pannelli di spessore uguale o inferiore a 20 mm e pertanto non

certamente ai pannelli a strati incrociati. Dalle prove sperimentali finora effettuate si è osservato che in realtà i valori della velocità di carbonizzazione dei pannelli sono più simili a quelli del legno massiccio (0,65 mm/min) che appare l'unico applicabile.

In ogni caso, considerando i pacchetti costruttivi usualmente utilizzati per solai e pareti, le strutture portanti di legno sono generalmente protette dai materiali di rivestimento interni ed esterni, che forniscono un ulteriore grado di protezione al fuoco alle strutture portanti.

Ad esempio secondo la EN 1995-1-2 un rivestimento della parete o di un solaio con un pannello di cartongesso standard da 15 mm di spessore fornisce un'ulteriore resistenza al fuoco di 19 min se posato con un'intercapedine vuota superiore ai 2 mm di spessore; se l'intercapedine è ad es. di 4 cm ed è riempita con lana di roccia tale valore aumenta fino a 35 min (occorre considerare poi che dopo il collasso del pannello di rivestimento si ha un transitorio, corrispondente alla carbonizzazione di uno strato del pannello di 25 mm, in cui va considerata una velocità di carbonizzazione del pannello doppia, dopo il quale possono essere considerati i valori standard). Anche la protezione data dal rivestimento esterno dell'edificio ha la sua importanza per impedire che l'incendio che eventualmente si verifichi ad un piano dell'edificio si possa propagare, per combustione dei listelli di supporto del cappotto isolante esterno o dello stesso materiale isolante combustibili, ai piani superiori. Da questo punto di vista l'applicazione di un rivestimento esterno aderente al cappotto è sicuramente da preferire, come è da preferire un rivestimento continuo come l'intonaco rispetto a uno discontinuo come un rivestimento con pannelli di legno-cemento o ceramica o con doghe di legno.

Casi di incendio recenti occorsi per cause di varia natura in edifici a struttura di legno a pannelli a strati incrociati hanno dimostrato come in edifici nei quali le strutture portanti non erano lasciate a vista, anche per incendi di durata prolungata, il danno strutturale sia stato molto limitato.

Pertanto, nell'ottica di operare una buona progettazione occorre comunque valutare il comportamento al fuoco non solo delle strutture portanti ma anche dei materiali di finitura, comunque computate nel calcolo del carico d'incendio se di legno e isolanti.

Si riportano di seguito alcuni brevi cenni circa il comportamento al fuoco di alcuni materiali di isolamento e finitura.

5. Sostenibilità

PREMESSA

La sostenibilità si fonda su tre pilastri: uno economico, uno ecologico e uno sociale. Affinché si possa parlare di sostenibilità è necessario che vi sia armonia fra tutti e tre questi pilastri. Costruire con il legno soddisfa tutte queste esigenze. Costruire con il legno è economico. Costruire con il legno è ecologico perché il legno è una materia prima sostenibile. E costruire con il legno ha un valore sociale perché le strutture in legno sono ottimizzate dal punto di vista energetico e pertanto sono convenienti anche sul lungo periodo. Il legno è una materia prima rinnovabile e ha un influsso positivo sul clima e sull'ambiente. Mentre crescono, gli alberi trasformano la CO₂ e l'acqua in ossigeno. Quando il legno viene utilizzato come materiale da costruzione, esso funge per molti anni come un sicuro accumulatore di CO₂. Ogni metro cubo di legno che viene impiegato in sostituzione di altri materiali da costruzione riduce le emissioni di CO₂ nell'atmosfera in media di 1,1 tonnellate.

5.1. Il metodo LCA (Life Cycle Assessment – analisi del ciclo di vita)

Il metodo scientifico dell'analisi del ciclo di vita (LCA) consente di quantificare i danni ambientali causati da prodotti, procedure o servizi. "Tale procedura serve per la comparazione degli effetti ambientali di due o più prodotti diversi, di gruppi di prodotti, di sistemi, di procedure o di comportamenti, aiuta nell'individuazione dei punti deboli e nel miglioramento delle proprietà ambientali dei prodotti, nel confronto tra diverse modalità di comportamento, nonché fornisce le motivazioni alla base di svariate raccomandazioni che vengono normalmente fatte" (Agenzia Ambientale Tedesca - German Federal Environment Agency, 1992).

In origine, lo strumento LCA è stato sviluppato con lo scopo di determinare la durata massima della vita di un prodotto. I primi sistemi di analisi comparativa di prodotti hanno fatto il loro debutto attorno agli anni '70 negli Stati Uniti e in Germania. Tematiche come le materie prime, la richiesta di energia, il problema delle emissioni e lo smaltimento dei rifiuti erano già allora molto importanti e sono state quindi introdotte all'interno del bilancio complessivo. A quel tempo, erano già stati intrapresi i primi passi per valutare determinati flussi di materiale con un occhio di riguardo ai loro effetti ambientali: il profondo significato di queste procedure, tuttavia, non è stato subito colto e non c'è stato alcuno sviluppo in questo senso prima degli anni '80. Dopo anni di progressi, dal 1997 è disponibile un protocollo molto dettagliato e largamente riconosciuto per LCA e, allo stesso tempo, è stato raggiunto un ampio consenso circa la definizione precisa delle parti individuali del metodo grazie a notevoli sforzi volti alla standardizzazione a livello internazionale. Altre parti, come la stima dell'impatto e la valutazione ambientale invece, sono tuttora al centro di numerose discussioni.

Il metodo LCA può essere usato, almeno in linea di principio, per svariati processi e non solo per i prodotti di una certa reazione, anche se in questo settore non c'è alcuna linea-guida standardizzata. Le diverse sezioni di LCA sono discusse in dettaglio nei seguenti capitoli. Prima, in ogni caso, viene fornito un rapido accenno all'idea generale che anima l'intero metodo.

Considerazione generale

L'idea di base del metodo LCA è la registrazione di tutti i flussi di materiale ed energia connessi con un prodotto, un processo o un servizio.



L'intera vita di un composto o di un sistema viene considerata "dalla culla fino alla tomba". Questo significa che non vengono presi in considerazione solo gli effetti ambientali a livello dell'impianto di produzione, bensì l'intero processo che porta ad un prodotto, a partire dall'approvvigionamento delle materie prime, fino allo smaltimento, passando attraverso l'utilizzo e il consumo. Questo approccio di tipo estensivo è molto importante in quanto, se si considerasse un panorama troppo ristretto, si potrebbe arrivare a delle conclusioni distorte a proposito di vantaggi o svantaggi; in questo modo, invece, è possibile spingere l'ottimizzazione fino a raggiungere il reale minimo scientifico del soggetto dell'indagine.

La struttura e le richieste di LCA sono fissate nelle normative DIN/ISO 14040 –14043. In accordo con queste regolamentazioni, il metodo si divide in 4 parti:

- Definizione di ambito ed obiettivo
- Analisi dell'inventario
- Stima dell'impatto
- Interpretazione

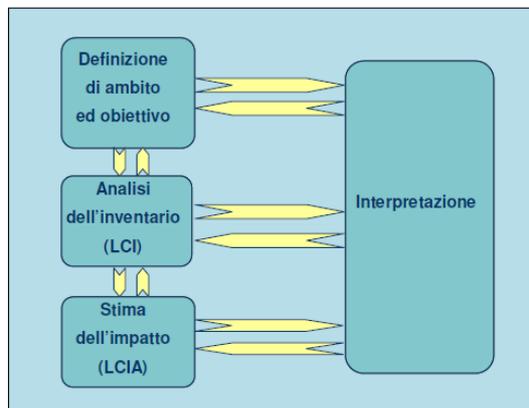


Figura 117 Figura 117componenti di LCA

Definizione di ambito ed obiettivo:

la definizione di ambito ed obiettivo di uno studio LCA è un passaggio cruciale, in quanto è la fase in cui vengono prese le decisioni più importanti. In accordo con le intenzioni e gli interessi specifici, viene definito il contesto dell'indagine e vengono fissate le richieste per le fasi successive.

Definizione dell'obiettivo:

i fini concreti e gli interessi specifici di uno studio LCA devono essere fissati durante la fase di definizione dell'obiettivo; allo stesso modo, anche i gruppi a cui è indirizzata l'indagine devono essere indicati chiaramente.

Definire i confini del Sistema:

i confini del sistema devono essere definiti in accordo con quelli che sono gli obiettivi di LCA. Innanzitutto, è necessario vagliare attentamente i mezzi utilizzabili, il contesto temporale e la disponibilità o meno di tutti i dati necessari; entrando più nel dettaglio, bisogna determinare tutti gli aspetti temporali, spaziali, pratici e tecnici (cioè la scala del bilancio) relativi allo studio. I confini del sistema costituiscono l'interfaccia con l'ambiente e con gli altri sistemi di prodotti; essi definiscono anche quali procedure vadano incluse e quali escluse dall'indagine. Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, è necessario determinarne la scala, il tipo e la qualità.

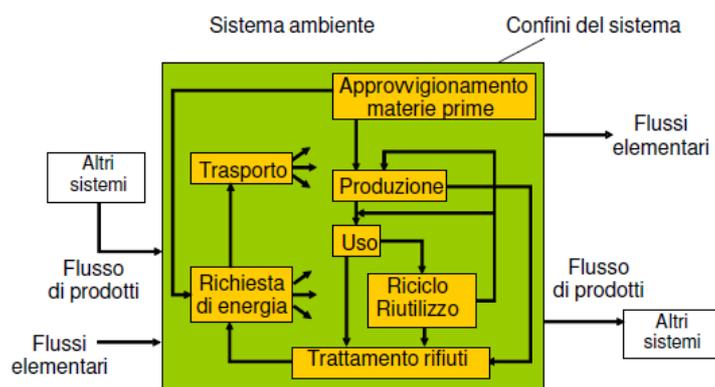


Figura 118 Illustrazione idealizzata del sistema di un certo prodotto per LCA

Emergono due problemi quando si stabilisce l'estensione del bilancio; per prima cosa, è necessario definire i criteri limite e le procedure di allocazione dei prodotti accoppiati (cioè coinvolti in più fasi dell'analisi) per ciascuno dei singoli processi considerati nel bilancio.

Benefici e unità funzionali

I benefici (o le funzioni) dei sistemi di prodotti analizzati devono essere determinati chiaramente. Per quantificare un certo beneficio, è necessario definire un'unità funzionale (ad esempio: una tonnellata di prodotto), che serva da riferimento per tutti i flussi in entrata e in uscita rispetto al sistema e per i potenziali effetti ambientali.

Analisi dell'inventario

Nell'analisi dell'inventario, i flussi di materiale ed energia vengono annotati minuziosamente, prendendo in considerazione l'intera vita del prodotto in esame. In un primo momento, vengono modellate le strutture del processo complessivo, così da avere un supporto per assemblare tutti i dati. I flussi di materiale ed energia vengono quindi determinati sulla base delle entrate e delle uscite di ciascun processo parziale, in relazione ai confini del sistema. Successivamente, connettendo tra loro i vari passaggi

analizzati, si riesce a simulare la rete di connessioni che intercorrono tra i moduli e l'ambiente: in questo modo si possono tracciare i bilanci di massa e di energia, che diventano l'inventario vero e proprio del sistema complessivo. Per finire, tutti i flussi di materiale ed energia che passano i confini precedentemente fissati vengono annotati quantitativamente (come unità di misura si usano quelle normalmente impiegate in fisica), facendo sempre riferimento all'unità funzionale.

Stima dell'impatto ambientale

L'obiettivo della stima dell'impatto ambientale è la valutazione (secondo precisi parametri ambientali) dei flussi di materiale e di energia calcolati durante l'analisi dell'inventario: tale stima, quindi, serve per riconoscere, riassumere e quantificare i possibili effetti ambientali dei sistemi esaminati, nonché per fornire informazioni essenziali intese alla loro valutazione.

Nel contesto della "Classificazione", i flussi di materiale ed energia, esaminati nell'analisi dell'inventario, vengono assegnati alle categorie ambientali (assimilabili a veri e propri effetti ambientali), che sono state fissate in precedenza. In LCA vengono normalmente impiegate le seguenti categorie di impatto:

- Riscaldamento globale (GWP)
- Riduzione dell'ozono presente nella stratosfera (ODP)
- Formazione fotochimica dell'ozono nella troposfera (POCP)
- Eutrofizzazione (NP)
- Acidificazione (AP)
- Tossicità per l'uomo (HTP)
- Eco-tossicità (ETP)
- Utilizzo del territorio

Le categorie di impatto descrivono i potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente; tra le altre cose, esse differiscono in relazione alla loro collocazione spaziale (effetti globali, regionali e locali). In linea di principio, ciascun effetto ambientale potrebbe essere incluso all'interno di un'indagine, a patto che i dati necessari all'analisi e un modello adatto per la descrizione e parametrizzazione dell'effetto stesso siano disponibili. Per finire, occorre ricordare che un flusso di materiale può essere assegnato a diversi effetti ambientali.

Interpretazione

L'obiettivo della fase di interpretazione è l'analisi dei risultati ottenuti, nonché la spiegazione del significato che essi assumono e delle restrizioni che pongono. I fatti essenziali, basati sui risultati dell'analisi dell'inventario e sulla stima dell'impatto ambientale, devono essere determinati e verificati in merito alla loro completezza, sensibilità e consistenza. Le assunzioni fatte nella fase di definizione dell'obiettivo e dell'ambito dell'analisi devono essere richiamate in questo passaggio: solo sulla base di questi presupposti, infatti, è possibile trarre delle conclusioni e fornire delle raccomandazioni.

5.2. Analisi LCA della sola struttura portante

Per i calcoli relativi all'analisi del ciclo di vita è stato utilizzato il software "One Click LCA" che si basa su un modello che fa riferimento alla "Life Cycle Assessment".

L'obiettivo principale che si vuole sviluppare attraverso questa analisi è quello di effettuare considerazioni in merito alla sostenibilità correlata al legno effettuando una comparazione con una analoga struttura in calcestruzzo armato.

Il software permette di effettuare l'analisi del ciclo di vita di un edificio e si organizza in fasi:

- materiali da costruzione;
- consumo di energia;
- consumo di acqua;
- aspetti relativi al cantiere;
- emissioni e superficie.

L'analisi degli edifici oggetto di questa tesi è stata svolta in più fasi andando a considerare dapprima solo le componenti strutturali e in seguito andando a definire più nel dettaglio la maggior parte degli elementi presenti nel progetto.

Il software dispone di un database che comprende la maggior parte delle componenti utili a definire la struttura e la composizione dell'edificio.

Per effettuare la analisi si sono calcolate la quantità dei materiali impiegati secondo quanto previsto nelle scelte progettuali esposte nei capitoli precedenti.

Un problema che si è riscontrato nell'utilizzo del programma è che la maggior parte degli elementi presenti nel database non fa riferimento a prodotti italiani e questo va a influenzare il calcolo relativo al trasporto in cantiere dei materiali. Per ovviare a questa problematica (soprattutto nel momento in cui si sono scelti componenti prodotti in paesi molto lontani dall'Italia) si sono eseguite analisi opportunamente modificate per tenere conto di questo inconveniente.

Si riporta in seguito la prima analisi svolta considerando la sola struttura in legno dell'edificio:

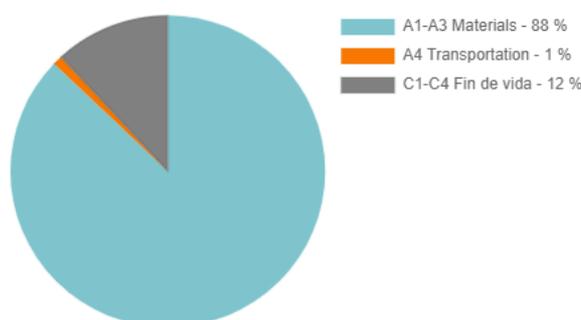


Figura 119 Rappresentazione relativa al riscaldamento globale

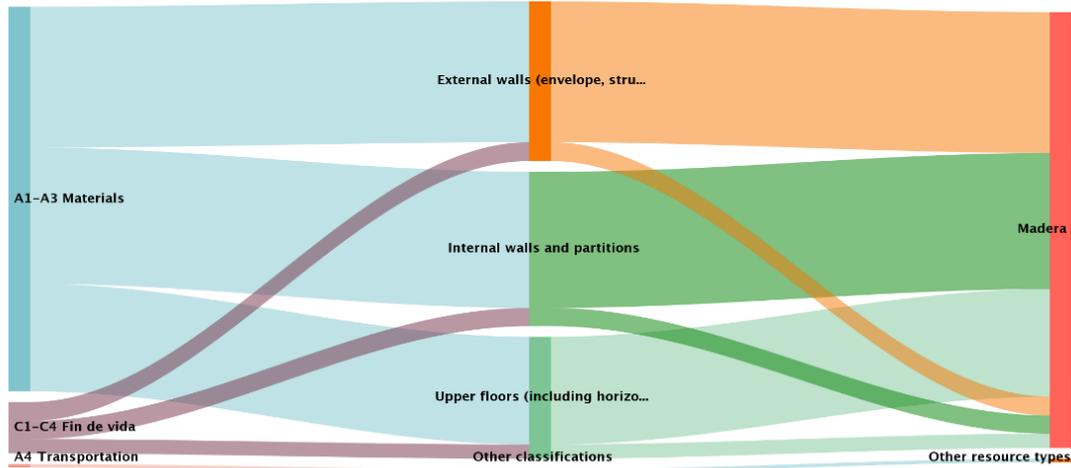


Figura 120 Figura 120 Diagramma Sankey - Riscaldamento globale

Resultados de Análisis de Ciclo de Vida para BREEAM Internacional según EN-15978

Módulo		Calentamiento Global kg CO2e	Acidification kg SO2e	Eutrophication kg PO4e	Ozone depletion potential kg CFC11e	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee	Residuos no peligrosos kg	Almacenamiento de carbono biogénico kg CO2e bio
A1-A3	Producto de construcción	2,15E4	4,53E1	9,05E0	TRIAL	TRIAL	2,2E2	4,59E4
A4	Transporte a la construcción	1,92E2	8,86E-1	1,93E-1	TRIAL	TRIAL	5,86E-1	
A5	Proceso de instalación/construcción				TRIAL	TRIAL		
B1	Use Phase				TRIAL	TRIAL		
B4-B5	Sustitución y rehabilitación de materiales				TRIAL	TRIAL		
B6	Uso de energía en servicio				TRIAL	TRIAL		
B7	Uso de agua en servicio				TRIAL	TRIAL		
C1-C4	Etapa de fin de vida	2,87E3	3,89E0	8,51E-1	TRIAL	TRIAL	8,32E1	
D	External impacts (not included in totals)	-1,37E4	-1,45E1	-2,32E0	TRIAL	TRIAL	-9,91E1	
	Total	2,46E4	5E1	1,01E1	TRIAL	TRIAL	3,04E2	4,59E4
		Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico
Resultados por denominador								
	Por área de superficie interna bruta (IPMS/RICS) 126.0 m2	1,95E2	3,97E-1	8,01E-2			2,41E0	3,64E2

Assessment period fixed to 60 years.

Figura 121 Figura 121 Risultati analisi LCA per la sola struttura in legno

Visualización de resultados Calentamiento Global (GWP)

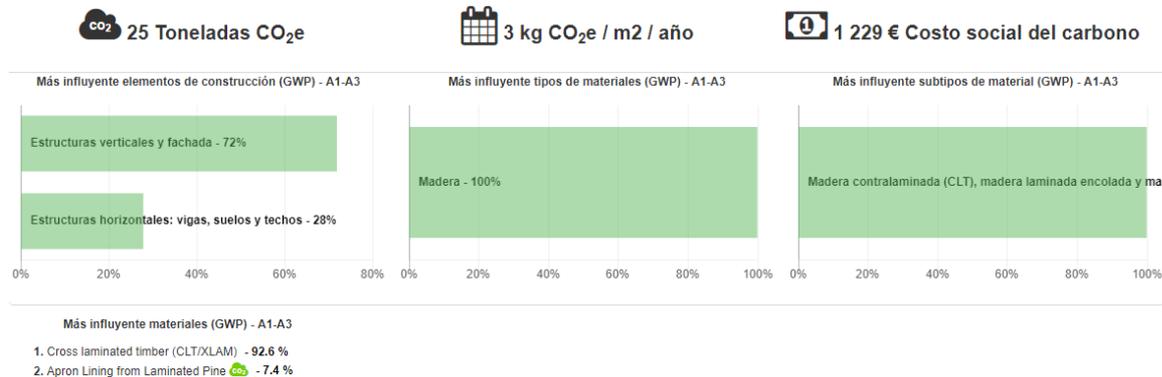


Figura 122 Riassunto risultati relativi al riscaldamento globale

Nei grafici vengono riportate le tonnellate di CO₂ prodotte per le fasi relative al ciclo di vita delle strutture portanti verticali ed orizzontali.

Il software permette anche il calcolo del costo sociale del carbone, ovvero un parametro che tiene conto dei costi sostenuti per “ripagare” una Nazione dei vari danni ambientali provocati dalle emissioni di CO₂

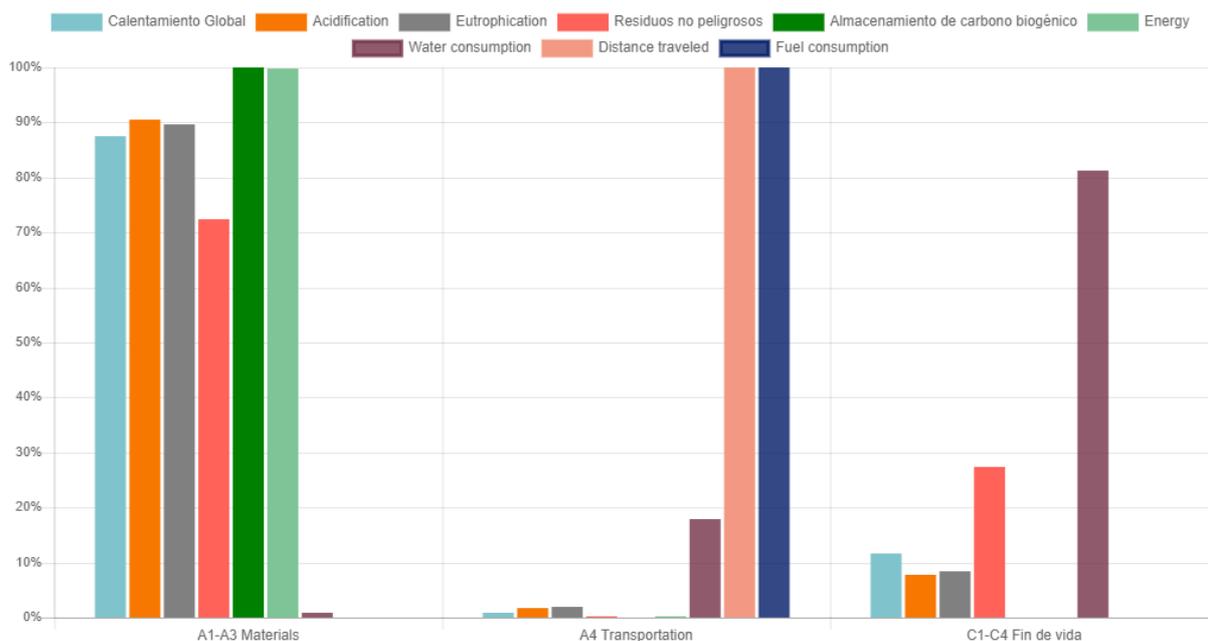


Figura 123 Distribuzione dei risultati secondo le fasi del ciclo di vita

Performance metric Carbon Heroes Benchmark (A1-A4, B4-B5, C1-C4)

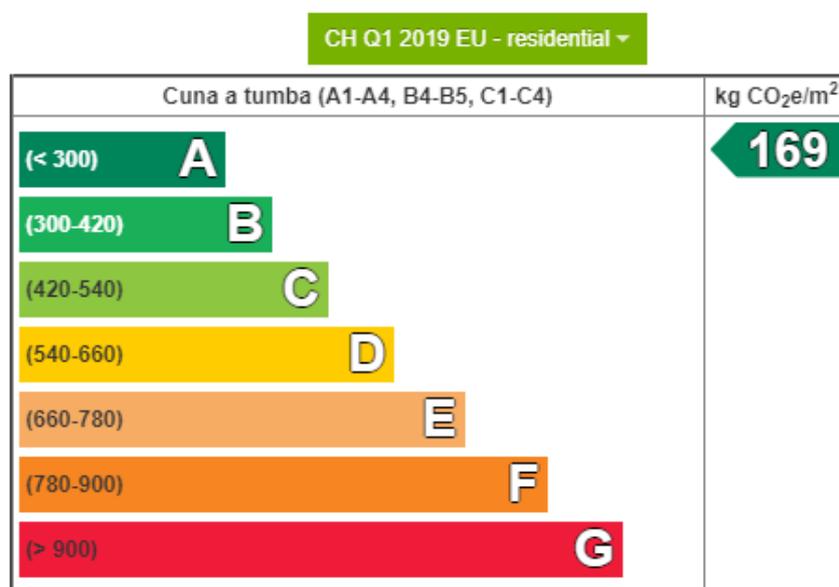


Figura 124 Livello di riferimento in base alla superficie utile lorda dell'edificio oggetto di analisi

Come si può evincere dal grafico, il livello di riferimento calcolato in base alla superficie lorda dell'edificio è ottimale. Tuttavia questo risultato era abbastanza prevedibile dal momento che in questa prima analisi si è fatto riferimento solo alla struttura portante dell'edificio.

Tuttavia i risultati ottenuti danno già importanti indicazioni che confermano le ottime caratteristiche del legno nel campo della sostenibilità.

Effettuata questa prima analisi riguardante la sola struttura in legno si è in seguito sviluppata un'altra analisi più dettagliata considerando tutte le componenti previste per la realizzazione dell'edificio.

5.3. Analisi LCA intero edificio

Attraverso questa analisi sono stati presi in considerazione molti più elementi rispetto all'analisi precedente per avere una idea, seppur approssimata, dei risultati riferiti all'edificio nella sua globalità. Le varie componenti si sono definite in base alle stratigrafie delle pareti e dei solai e si sono inoltre ipotizzate tutti gli altri elementi che non sono stati definiti nel progetto in maniera tale da considerare nella valutazione la quasi globalità degli elementi che definiscono l'edificio per avere una stima approssimativa globale.

Introdotti i dati e definiti i vari prodotti si sono ottenuti i seguenti risultati:

1. Cimentaciones y estructuras subterráneas 🌫️ 2 Toneladas CO₂e - 3 %

Los materiales de la fundación nunca serán reemplazados, independientemente de la duración del periodo de evaluación.

Fundaciones, estructuras subterráneas [Mostrar otras respuestas](#)

Recurso	Cantidad	CO ₂ e	Comentarios	Mat 01 Elementos	Transporte, kilómetros	Vida de servicio
Basic foundation up to 5m of sand/ silt?	35.28 m ²	1.1t	Fondazioni	Foundations (including	Datos por constituyente	Datos por constituyente
Insulation system, rockwool (San Marco)?	20.08 m ²	0.6t	Isolamento	Foundations (including	430 Trailer combination, 40	Permanente

Figura 125 Definizione fondazioni

2. Estructuras verticales y fachada 🌫️ 21 Toneladas CO₂e - 44 %

Muros exteriores y fachada [Mostrar otras respuestas](#)

Recurso	Cantidad	CO ₂ e	Comentarios	Mat 01 Elementos	Transporte, kilómetros	Vida de servicio
Rock wool insulation panels, unfaced, ge?	185.55 m ² x 120 mm	1.4t	Isolamento termico	External walls	60 Trailer combination, 40	As building
Insulation, mineral wool, 35 kg/m3, Acus?	178.6 m ² x 60 mm	0.41t	Isolamento acustico	External walls	60 Trailer combination, 40	As building
Interior paint, 1370 kg/m3, 0.186 kg/m2, ?	6.5 kg	0.05t	Tinteggiatura	External walls	470 Large delivery truck, 9	10
Membranes, FPO/PVC-P waterproofing rein?	185.55 m ²	1.4t	Membrana impermeabilizza	External walls	430 Trailer combination, 40	30
2 Way Inward Opening Window, Frame: 105?	2.28 m ²	0.25t	Infissi	External windows and	380 Trailer combination, 40	40

Columnas y estructuras verticales portantes [Mostrar otras respuestas](#)

Recurso	Cantidad	CO ₂ e	Comentarios	Mat 01 Elementos	Transporte, kilómetros	Vida de servicio
Cross laminated timber (CLT/XLAM), 470.8?	17.8 m ³	9.0t	Parete esterna XLAM 95 mm	External walls	220 Trailer combination, 40	As building

Muros interiores y estructuras no portantes [Mostrar otras respuestas](#)

Recurso	Cantidad	CO ₂ e	Comentarios	Mat 01 Elementos	Transporte, kilómetros	Vida de servicio
Cross laminated timber (CLT/XLAM), 470.8?	17.2 m ³	8.7t	Parete interna XLAM 95 mm	Internal walls and	220 Trailer combination, 40	As building

Figura 126 Definizione strutture verticali ed elementi di facciata

3. Strutture orizzontali: vigas, suelos y techos 16 Toneladas CO₂e - 34 %

Losas, techos, cubiertas, vigas y tejado [Mostrar otras respuestas](#)

Buscar por nombre, fabricante, Nr.DAP

Recurso	Cantidad	CO ₂ e	Comentarios	Mat 01 Elementos	Transporte, kilómetros	Vida de servicio
Cross laminated timber (CLT/XLAM), 470.8	10 m3	5.1t	Solaio 1p XLAM 140 mm	Upper floors (including	220 Trailer combination, 40	As building
Hollow core concrete slabs, generic, C30	13.10 m3	2.7t	Vespaio piano fondazione	Upper floors (including	60 Trailer combination, 40	As building
EPS insulation panel, L: 0.036 W/mK, R:	43.7 m2 x 60 mm	0.12t	Isolamento polistirene estrus	Upper floors (including	430 Trailer combination, 40	As building
Parquet, multilayered, biogenic CO2 not	126 m2	0.94t	Pavimentazioni	Upper floors (including	220 Trailer combination, 40	As building
Insulation, mineral wool, 35 kg/m3, Acus	64 m2 x 20 mm	0.05t	Isolamento acustico pavime	Upper floors (including	60 Trailer combination, 40	As building
Floor screed mortar, cement screed, 1500	138 m2 x 15 mm	0.5t	Rivestimenti e massetti	Upper floors (including	110 Trailer combination, 40	As building
Apron Lining from Laminated Pine, 18mm w	3.15 m3	1.8t	Travi legno lammellare cope	Upper floors (including	220 Trailer combination, 40	As building
Rock wool insulation panels, unfaced, ge	81.5 m2 x 140 mm	0.74t	Isolamento termico copertur	Upper floors (including	60 Truck, small, 12-14 ton	As building
Bitumen-polymer membrane roofing, 1 laye	82 m2 x 4,4 mm	0.99t	Guaina bituminosa copertur	Upper floors (including	90 transport, van 3,5/AU U	20
Membranes, FPO/PVC-P waterproofing rein	82 m2	0.76t	Impermeabilizzante	Upper floors (including	430 transport, van 3,5/AU U	30
Roof tiles, clay, French average, ép. 10	90.33 m2	2.4t	Tegole tetto	Upper floors (including	60 Trailer combination, 40	As building

Figura 127 Definizione elementi orizzontali e copertura

4. Otras estructuras y materiales 9 Toneladas CO₂e - 19 %

Otras estructuras y materiales [Mostrar otras respuestas](#)

Buscar por nombre, fabricante, Nr.DAP

Recurso	Cantidad	CO ₂ e	Comentarios	Mat 01 Elementos	Transporte, kilómetros	Vida de servicio
Solar panel photovoltaic system, EU aver	18 m2	6.5t	Pannelli fotovoltaici	Heat Source, Space	320 Large delivery truck, 9	45
Waterproofing sealant for roofs, French	5 kg	0.13t	Membrane	Stairs and ramps	470 Large delivery truck, 9	20
Silicone sealing compound	5 kg	0.12t	Membrane	Stairs and ramps	470 Large delivery truck, 9	20
Screed, self-levelling, 1-10 mm, 1300 kg	20 kg	~0t		Stairs and ramps	110 Trailer combination, 40	As building

Puertas y ventanas [Mostrar otras respuestas](#)
Las puertas y las ventanas solo se pueden añadir a través de esta sección.

Buscar por nombre, fabricante, Nr.DAP

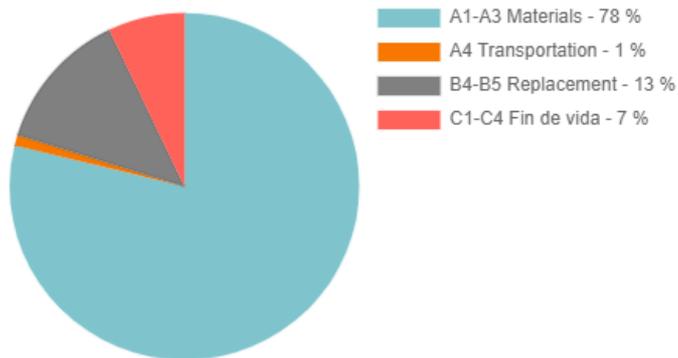
Recurso	Cantidad	CO ₂ e	Comentarios	Mat 01 Elementos	Transporte, kilómetros	Vida de servicio
Interior doors with wooden frame, Donnee	9.45 m2	0.48t	Porte interne	Internal doors	350 Trailer combination, 40	40
External wood door	4.2 m2	0.16t	Porte esterne	External windows and	350 Trailer combination, 40	40
Door and windows handles, European avera	7 unit	0.05t	Infissi	Internal doors	320 Trailer combination, 40	As building
Window, triple glazed, wood-alu frame, U	4.56 m2	0.74t	Infissi	External windows and	380 Trailer combination, 40	40
Terrace glass door, double glazed, wood-	2.3 m2	0.38t	Infissi	External windows and	380 Trailer combination, 40	40

Acabados y revestimientos [Mostrar otras respuestas](#)

Buscar por nombre, fabricante, Nr.DAP

Recurso	Cantidad	CO ₂ e	Comentarios	Mat 01 Elementos	Transporte, kilómetros	Vida de servicio
Cementitious mortar for bonding and leve	48.5 kg	0.09t	Rivestimenti	Internal floor finishes	470 Large delivery truck, 9	10
Wood paint, 12 m2/l, 0.98 kg/m2, PEINTUR	15 kg	0.06t	Rifiniture	Internal floor finishes	470 Large delivery truck, 9	10
Interior wall paint, 1400 kg/m3, Indeko-	20 kg	0.17t	Rifiniture	Internal floor finishes	470 Large delivery truck, 9	10

Figura 128 Definizione materiali vari (porte, finestre, membrane, pannelli fotovoltaici, finiture e rivestimenti)



Di seguito si riportano i diagrammi Sankey relative alle varie categorie di analisi. Si ricorda che un diagramma Sankey è un particolare tipo di diagramma di flusso in cui l'ampiezza delle frecce è disegnata in maniera proporzionale alla quantità di flusso.

Diagrama Sankey, Calentamiento Global

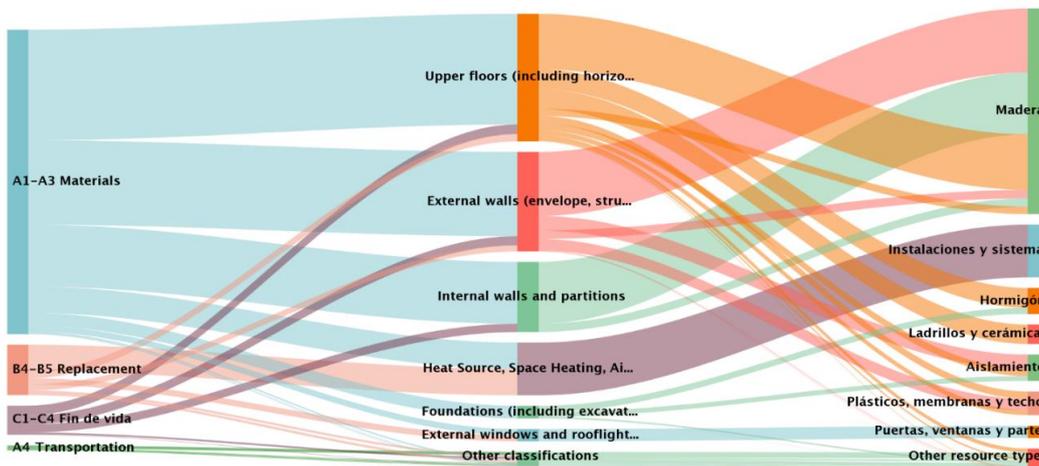


Diagrama Sankey, Acidification

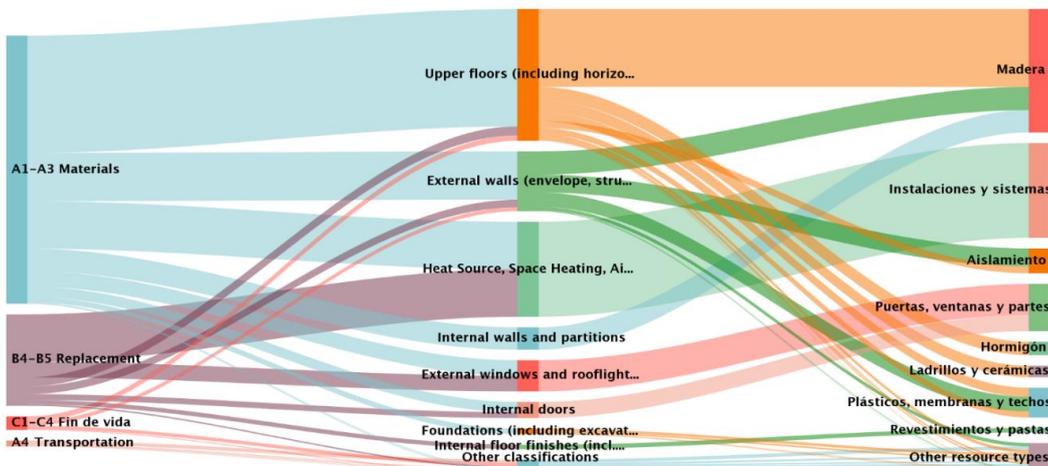


Diagrama Sankey, Eutrophication

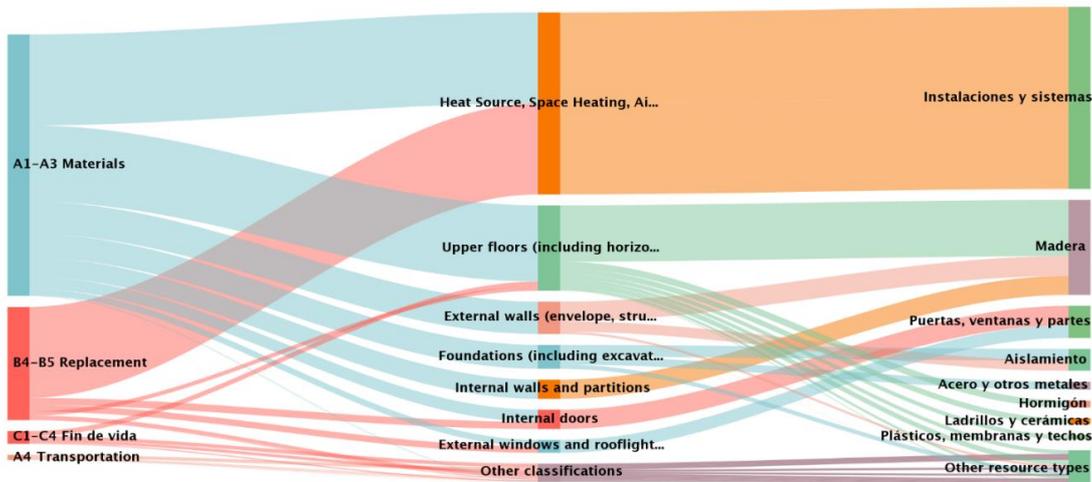


Diagrama Sankey, Residuos no peligrosos

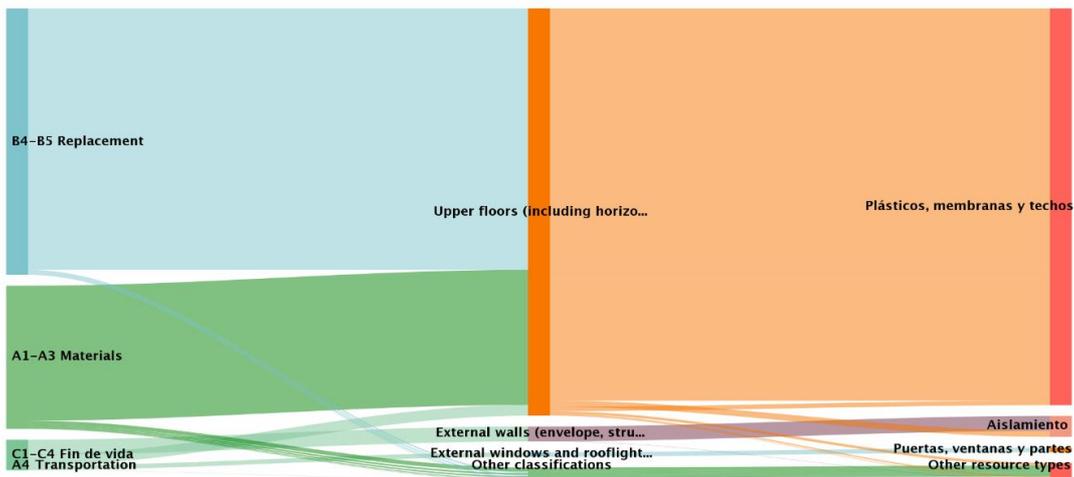


Diagrama Sankey, Almacenamiento de carbono biogénico

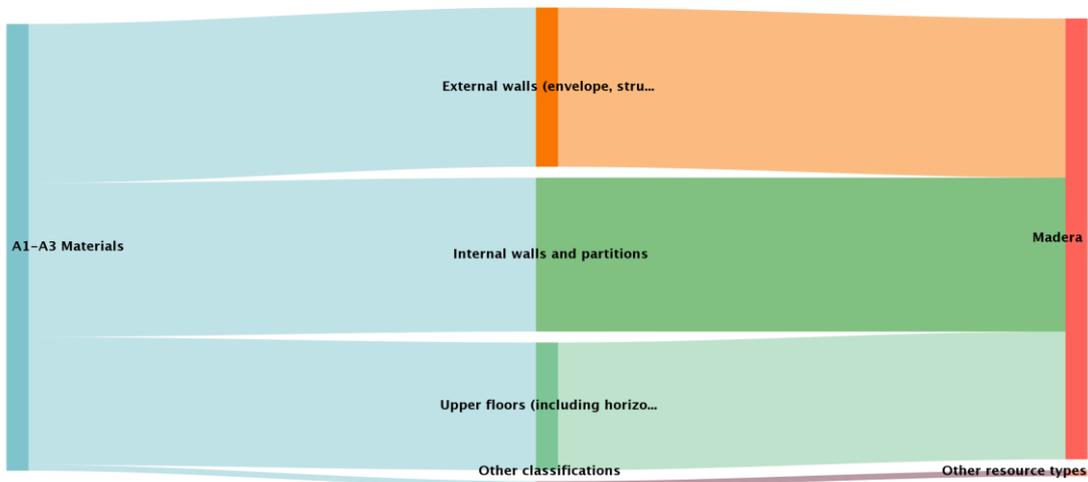


Diagrama Sankey, Distance traveled

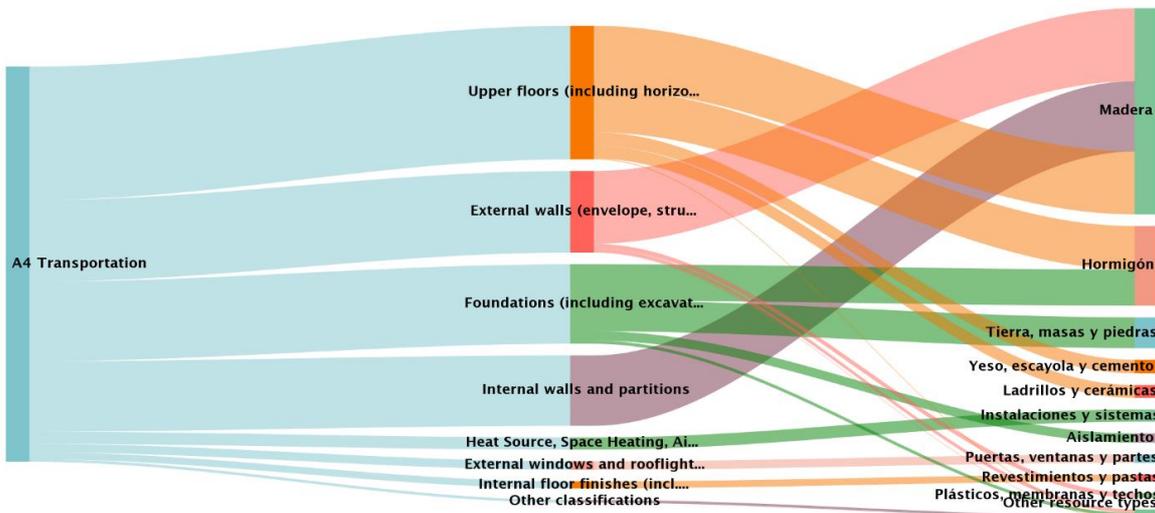
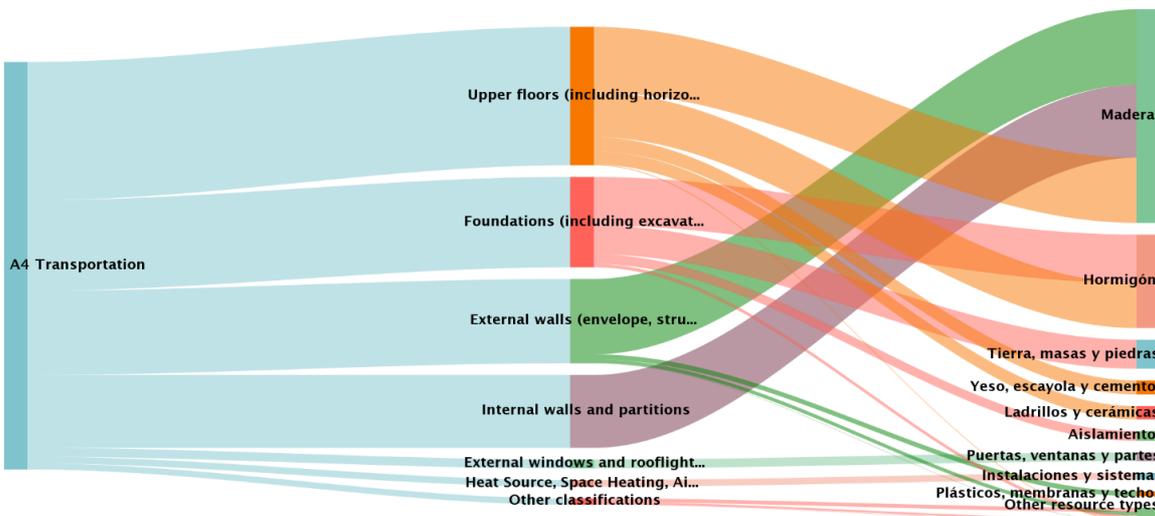


Diagrama Sankey, Fuel consumption



Resultados de Análisis de Ciclo de Vida para BREEAM Internacional según EN-15978

Módulo	Calentamiento Global kg CO2e	Acidification kg SO2e	Eutrophication kg PO4e	Ozone depletion potential kg CFC11e	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee	Residuos no peligrosos kg	Almacenamiento de carbono biogénico kg CO2e bio
A1-A3 [?] Producto de construcción	3,75E4	1,08E2	2,7E1	TRIAL	TRIAL	2,24E4	4,8E4
A4 [?] Transporte a la construcción	6,18E2	2,41E0	5,51E-1	TRIAL	TRIAL	1,31E0	
B4-B5 Sustitución y rehabilitación de materiales	6,2E3	3,69E1	1,17E1	TRIAL	TRIAL	4,16E4	
C1-C4 Etapa de fin de vida	3,59E3	5,46E0	1,31E0	TRIAL	TRIAL	4,76E3	
D External impacts (not included in totals)	-1,52E4	-1,67E1	-2,88E0	TRIAL	TRIAL	-1,36E2	
Total	4,79E4	1,53E2	4,05E1	TRIAL	TRIAL	6,87E4	4,8E4
	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico	Mostrar gráfico
Resultados por denominador							
Por área de superficie interna bruta (IPMS/RICS) 145.16 m2	3,3E2	1,05E0	2,79E-1			4,74E2	3,31E2

Assessment period fixed to 60 years.

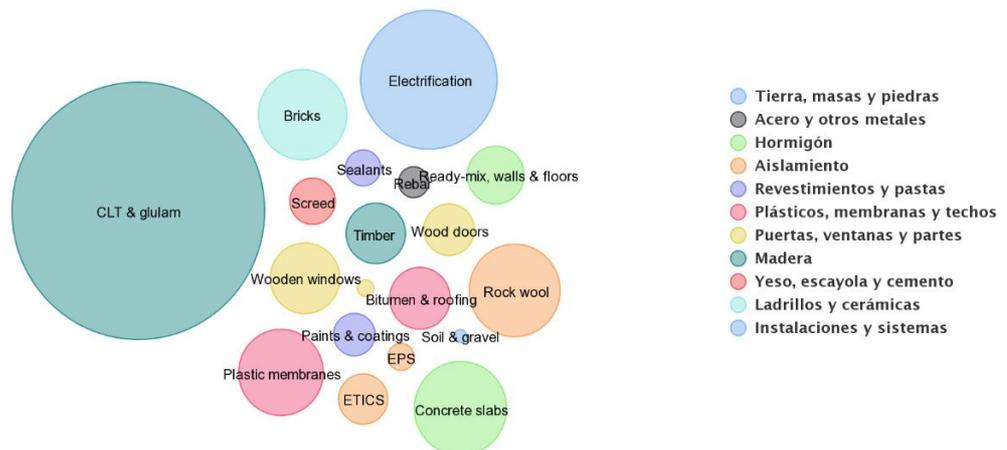
Metodología consistente y representatividad regional de los datos del ACV

	Respuesta
Región para todos los datos de LCA utilizados	Italy
Método de compensación local	v1.0 Recomendado
Metodología para todos los datos de LCA utilizados	BRE - Global Methodology for Environmental Profiles of Construction Products
Durabilidad de materiales	Vida de servicio técnico (lo mismo para el mismo material)
Región objetivo de compensación local	Italy
Valores de distancia de transporte para materiales	European

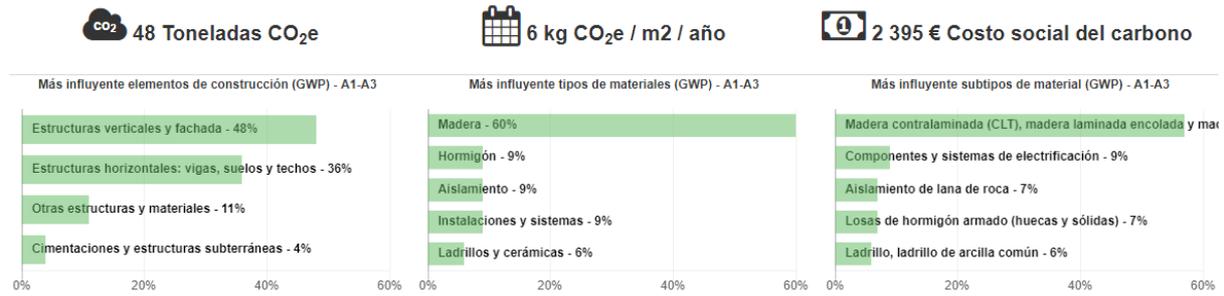
Compensación a condiciones locales, si aplicada por el usuario, es implementada según CEN/TR 15941 y la metodología de One Click LCA aprobada por BRE.

Gráfica de burbujas, impactos de ciclo de vida totales por tipo y sub-tipo de recurso., Calentamiento Global

Coloque la flecha del cursor sobre las leyendas o la gráfica para resaltar los impactos

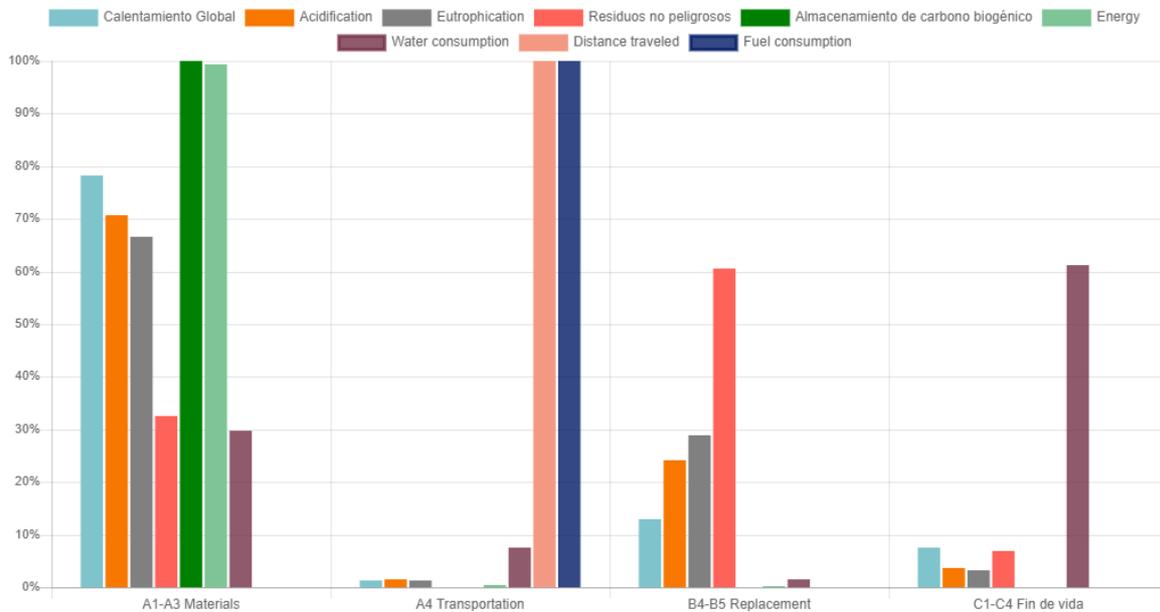


Visualización de resultados Calentamiento Global (GWP)



Más influyente materiales (GWP) - A1-A3

1. Cross laminated timber (CLT/XLAM) - **53.1 %**
2. Solar panel photovoltaic system, EU average - **8.7 %**
3. Hollow core concrete slabs, generic **CO₂** - **6.5 %**
4. Roof tiles, clay, French average **CO₂** - **6.4 %**
5. Rock wool insulation panels, unfaced, generic **CO₂** - **5.6 %**
6. Apron Lining from Laminated Pine **CO₂** - **4.2 %**
7. Membranes, FPO/PVC-P waterproofing reinforced with polyester net **CO₂** - **2.7 %**
8. Parquet, multilayered - **2.2 %**
9. Ready-mix concrete **CO₂** - **2.1 %**
10. Insulation system, rockwool - **1.6 %**



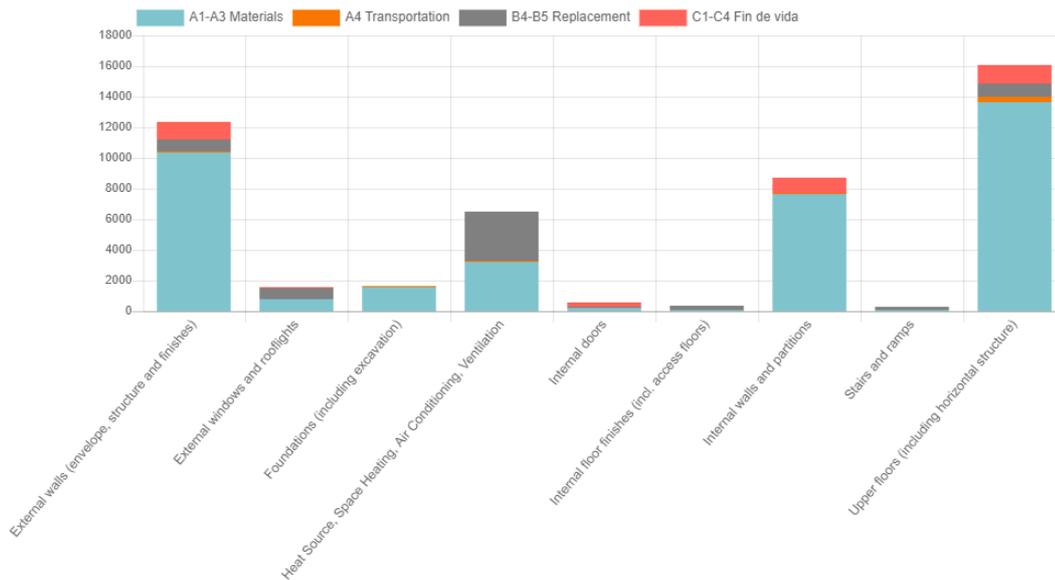


Figura 129 Indice di riscaldamento globale per element

Performance metric Carbon Heroes Benchmark (A1-A4, B4-B5, C1-C4)

CH Q1 2019 EU - residential

Cuna a tumba (A1-A4, B4-B5, C1-C4)	kg CO ₂ e/m ²
(< 300) A	330
(300-420) B	
(420-540) C	
(540-660) D	
(660-780) E	
(780-900) F	
(> 900) G	

OSSERVAZIONI SUI RISULTATI

Il livello finale conseguito è molto buono tuttavia il programma fornisce alcune strategie per migliorare ulteriormente il risultato proponendo l'utilizzo di materiali o prodotti con certificazioni eco-sostenibili di livello più alto.

Il passo successivo pertanto è stato quello di apportare scelte differenti dei prodotti impiegati preferendo quelli con etichettature sostenibili che garantiscono un impatto eco-ambientale ridotto.

Alternativas sostenibles en Italy y países vecinos



para referencia CO2 CML

No.	Nombre completo		Clasificación de rendimiento:	GWP CO ₂ / KG
Current	Hollow core concrete slabs, generic, C30/37 (4400/5400 PSI), 0% (typical) recycled binders in cement (300 kg/m3), incl. reinf	?	24 / 69 Ver el ranking completo:	0.128
1.	Precast solid concrete slab, incl. reinforcement, ép: 0.20 m, Béton/Cement: C25/30 XC1 CEM II/A-S (SNBPE)	?	1 / 69 Ver el ranking completo:	0.079
2.	Small concrete slab elements for floor application, Donnee par default (MDEGD)	?	15 / 69 Ver el ranking completo:	0.115

Alternativas sostenibles en Italy y países vecinos



para referencia CO2 CML

No.	Nombre completo		Clasificación de rendimiento:	GWP CO ₂ / KG
Current	Roof tiles, clay, French average, ép. 10mm, Donnee par default (MDEGD)	?	55 / 60 Ver el ranking completo:	0.44
1.	Hollow bricks, for walls, 126.3 kg/m2, Porotherm GFR 20 base Wienerberger (WIENERBERGER)	?	1 / 60 Ver el ranking completo:	0.072
2.	Hollow bricks, for walls, 127.7 kg/m2, Porotherm GFR 20 Th+ Wienerberger (WIENERBERGER)	?	2 / 60 Ver el ranking completo:	0.078
3.	Brick wall from small compressed or extruded earth bricks per m2, mortar included, ép. 30cm, Donnee par default (MDEGD)	?	4 / 60 Ver el ranking completo:	0.117

Si ricorda che le analisi sono influenzate anche dalle valutazioni sul tipo di trasporto dei materiali e sulla distanza dal luogo di produzione al cantiere. In alternativa quindi si potrebbero effettuare modifiche su questi parametri.

Apportando queste modifiche si è potuto incrementare il livello finale fino a raggiungere questo risultato:

Performance metric Carbon Heroes Benchmark (A1-A4, B4-B5, C1-C4)

CH Q1 2019 EU - residential ▾

Cuna a tumba (A1-A4, B4-B5, C1-C4)	kg CO ₂ e/m ²
< 300 A	296
(300-420) B	
(420-540) C	
(540-660) D	
(660-780) E	
(780-900) F	
> 900 G	

5.4. Confronto di analisi con edificio in calcestruzzo armato

Uno degli obiettivi della tesi non risiede tanto nel fatto di cercare di migliorare la sostenibilità modificando opportuni parametri e scelte come indicato anteriormente, quanto nell'analizzare la sostenibilità del materiale legno utilizzato come elemento strutturale.

Pertanto a questo punto risulta imprescindibile effettuare un paragone dei risultati ottenuti precedentemente con i risultanti derivanti dall'analisi dello stesso identico edificio oggetto di questa tesi ipoteticamente considerato con struttura in calcestruzzo armato anziché in legno.

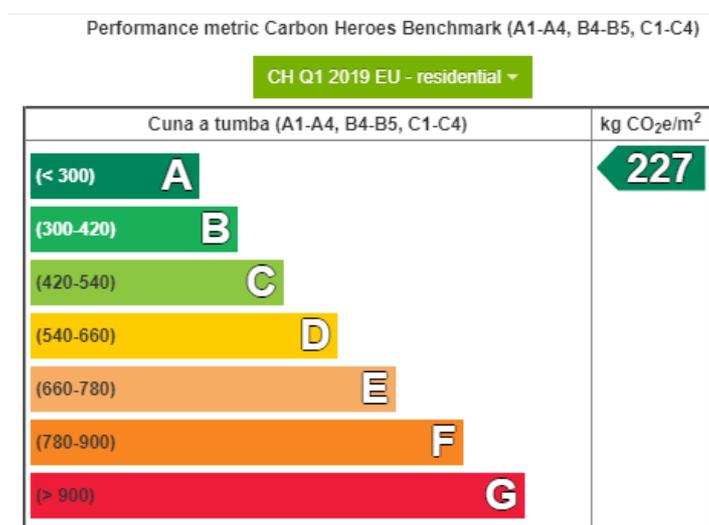
Per fare ciò si è pensato di adottare una classica struttura in ca (mantenendo la stessa tipologia di fondazione impiegata in precedenza) con travi di 25 x 25 cm e pilastri di 30 x 30 cm.

Si è quindi calcolato in maniera approssima la quantità di calcestruzzo e di acciaio per le armature da impiegare.

Per quanto riguarda gli altri materiali, si sono considerati gli stessi utilizzati per l'analisi precedente. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

ANALISI EDIFICIO CALCESTRUZZO ARMATO

In un primo momento, si è svolta l'analisi sulla sola struttura portante e si è ottenuto:



Si è in seguito effettuata un'ultima analisi considerando anche gli elementi non strutturali:

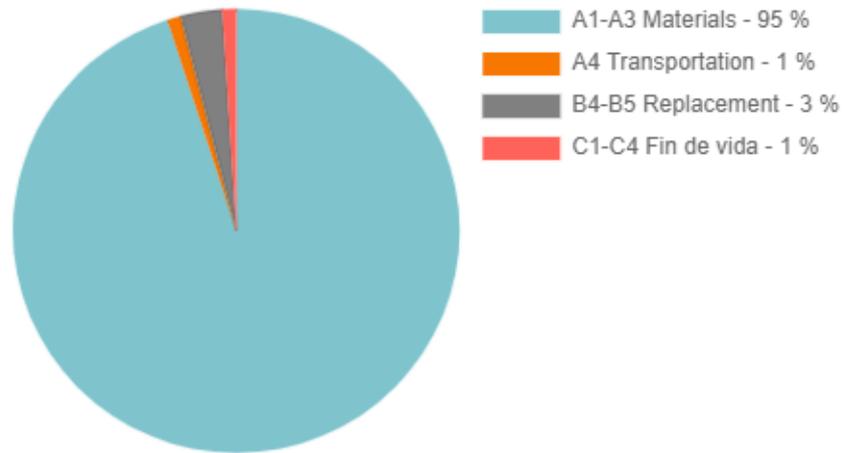
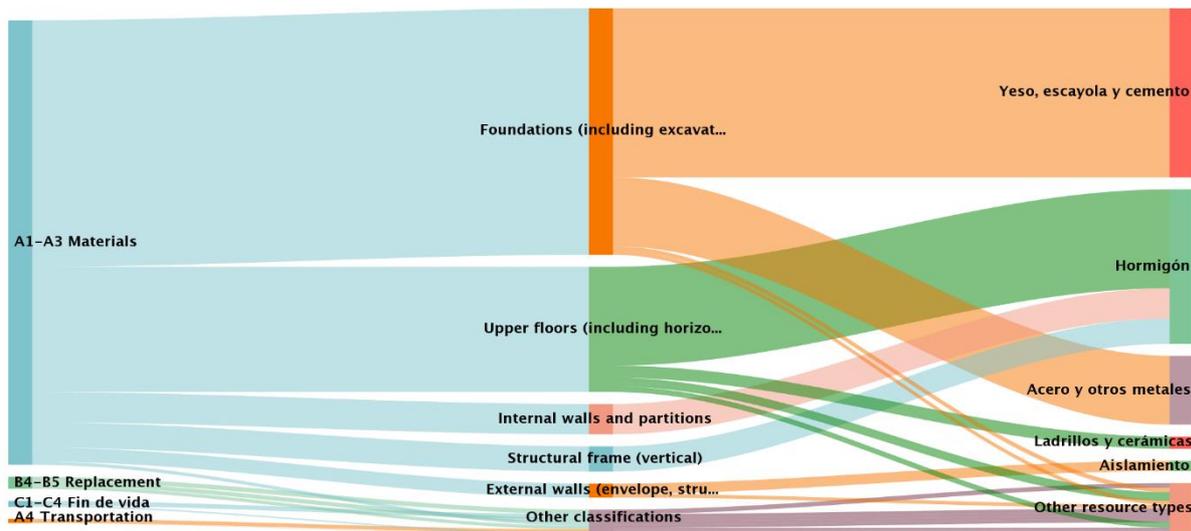


Diagrama Sankey, Calentamiento Global



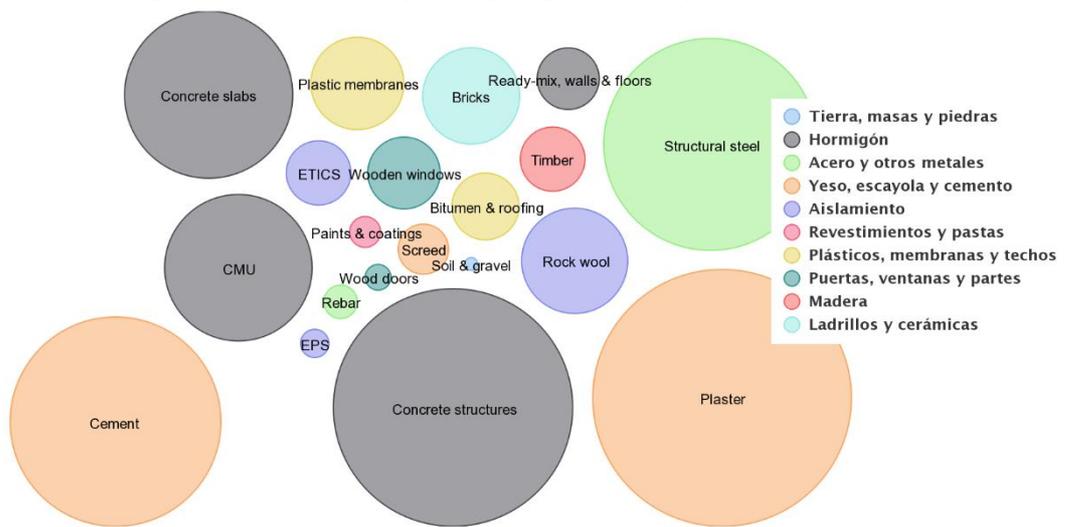
Módulo	Calentamiento Global kg CO2e	Acidification kg SO2e	Eutrophication kg PO4e	Ozone depletion potential kg CFC11e	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee	Residuos no peligrosos kg	Almacenamiento de carbono biogénico kg CO2e bio
A1-A3 Producto de construcción	8,73E4 +170 %	2,18E2 +120 %	3,9E1 +58 %			2,85E4 +30 %	1,71E3 -98 %
A4 Transporte a la construcción	8,23E2 -35 %	3,36E0 -27 %	7,57E-1 -32 %			1,94E0 +38 %	
A5 Proceso de instalación/construcción							
B1 Use Phase							
B4-B5 Sustitución y rehabilitación de materiales	2,37E3 -57 %	1,31E1 -80 %	1,69E0 -85 %			4,11E4 -1.1 %	
B6 Uso de energía en servicio							
B7 Uso de agua en servicio							
C1-C4 Etapa de fin de vida	1,16E3 -84 %	4,57E0 -4.8 %	1,1E0 -2.1 %			4,72E3 +53 %	
D External impacts (not included in totals)	-1,01E4 -32 %	-2,83E1 +74 %	-9,38E0 +240 %			-5,18E2 +320 %	
Total	9,17E4	2,39E2	4,25E1	TRIAL	TRIAL	7,42E4	1,71E3

Comparando los resultados totales con: 2 Singolo edificio in legno						
2 Singolo edificio in legno Total	4,3E4	1,41E2	3,84E1	6,64E4	4,79E4	
2 Singolo edificio cls comparado con 2 Singolo edificio in legno	+110 %	+70 %	+11 %	0 %	0 %	+12 % -96 %
	Mostrar gráfico					
Resultados por denominador						
Por área de superficie interna bruta (IPMS/RICS) 145.16 m2	6,31E2	1,64E0	2,93E-1	5,11E2	1,18E1	

In colore rosso si riporta la differenza percentuale rispetto all’edificio in struttura portante di legno.

Gráfica de burbujas, impactos de ciclo de vida totales por tipo y sub-tipo de recurso., Calentamiento Global

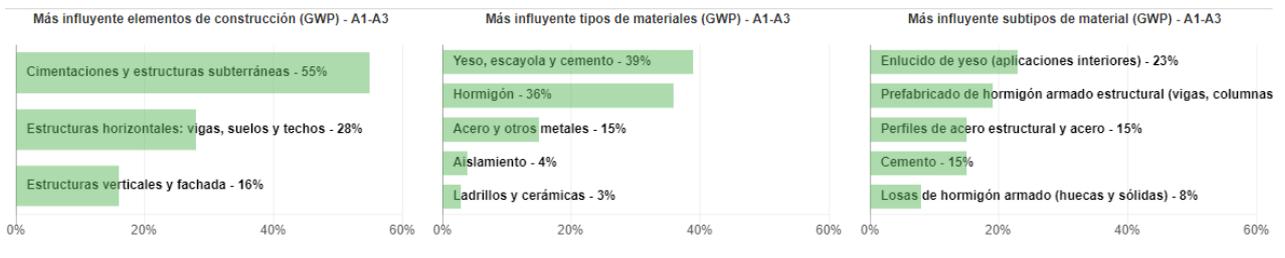
Coloque la flecha del cursor sobre las leyendas o la gráfica para resaltar los impactos



92 Toneladas CO₂e

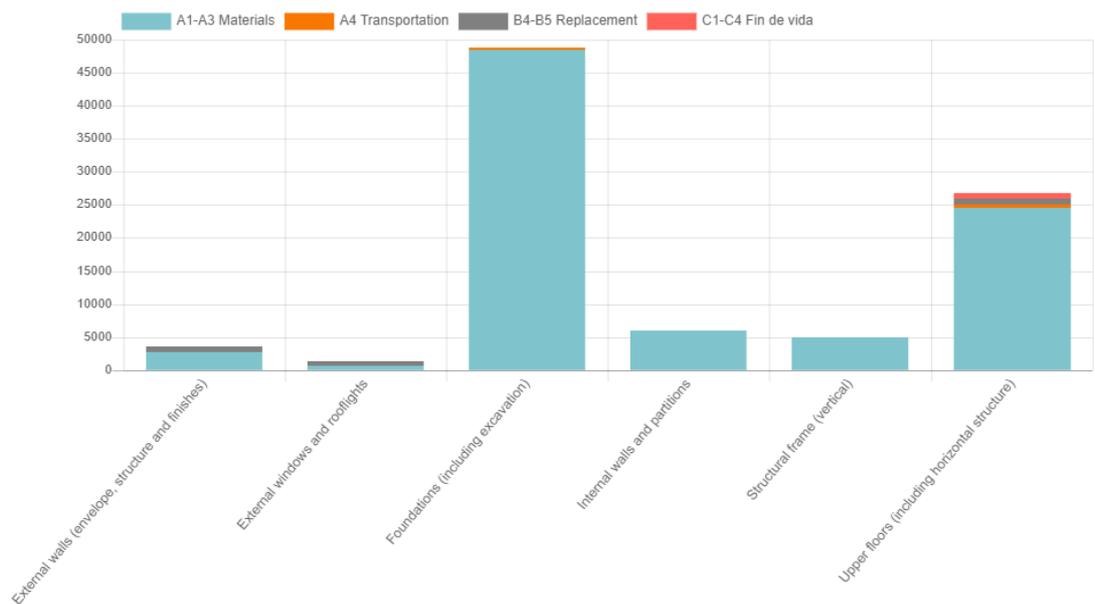
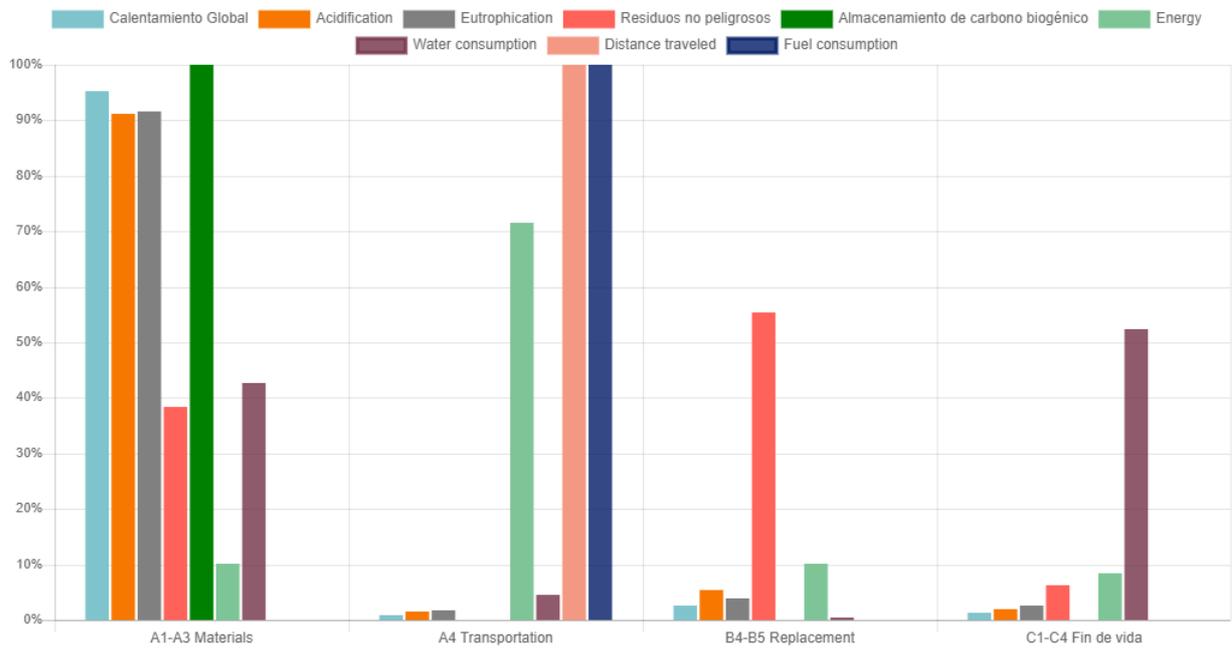
11 kg CO₂e / m² / año

4 583 € Costo social del carbono

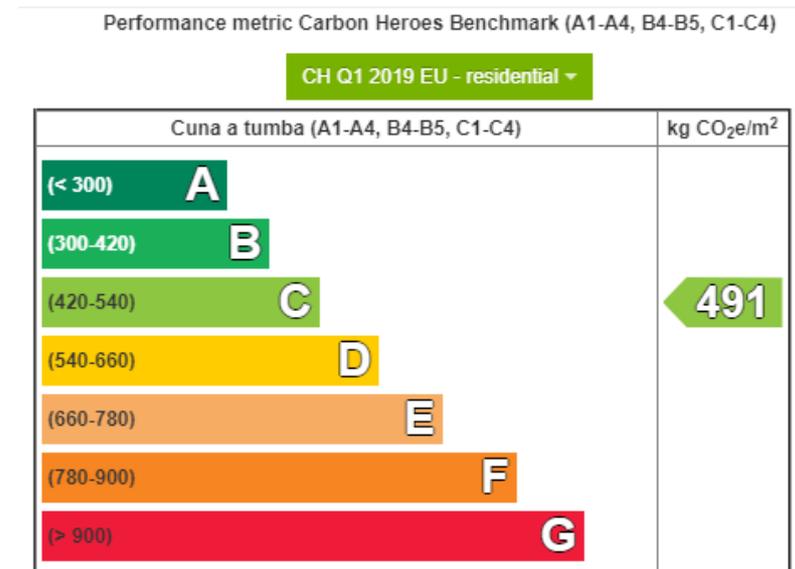
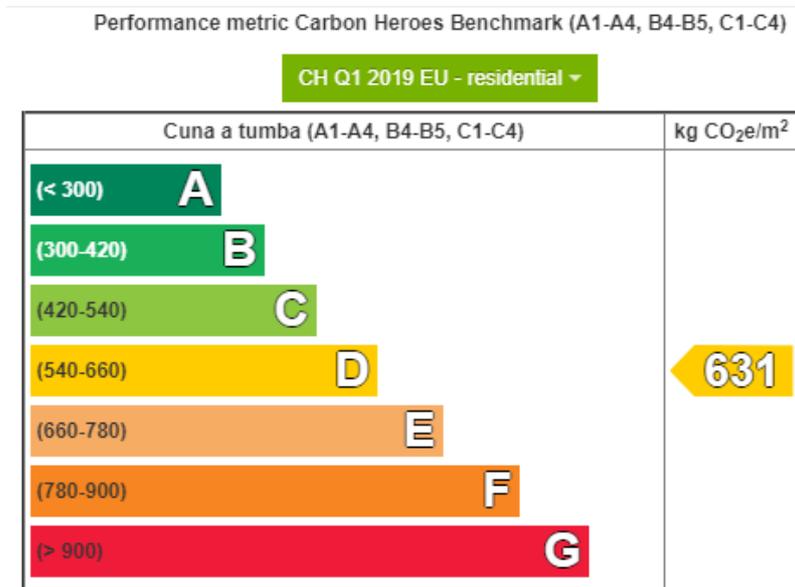


Más influyente materiales (GWP) - A1-A3

1. Lime (CaO; finelime)  - 23.2 %
2. Structural steel profiles, generic  - 15.3 %
3. Cement  - 14.9 %
4. Concrete beam  - 13.8 %
5. Hollow core concrete slabs, generic  - 8.5 %
6. Concrete block, masonry  - 6.8 %
7. Concrete frame, French average  - 5.7 %
8. Rock wool insulation panels, unfaced, generic  - 2.7 %
9. Roof tiles, clay, French average  - 2.7 %
10. Membranes, FPO/PVC-P waterproofing reinforced with polyester net  - 1.2 % -



Modificando alcuni parametri si è potuto arrivare a questo risultato:



Considerazioni generali

Il calcolo dell'incidenza ambientale, come si è visto, presenta difficoltà relative alla ricerca e alla definizione di tutti gli aspetti che entrano in gioco nel momento di effettuare una analisi corretta.

Tuttavia sarebbe fondamentale porre attenzione a pochi ed essenziali requisiti nell'uso di prodotti per l'edilizia:

- le materie da cui è derivato (vegetale, minerale, sintetico);
- la tipologia dei processi produttivi (consumo di suolo, acqua, energia, e produzione di scarti solidi, liquidi o gassosi pericolosi);
- la provenienza e tipologie di trasporto nella distribuzione;
- il consumo di altre risorse naturali o emissioni di sostanze tossiche in fase di montaggio e di gestione;
- il valore del prodotto a fine vita funzionale.

L'uso di materiali naturali non comporta alcuna rinuncia dal punto dell'efficienza e delle prestazioni, nella maggior parte dei casi l'ostacolo che incontrano i più è di natura informativa, economica e di accessibilità al mercato.

È bene chiarire che le analisi economiche dei prodotti edili (e non solo) riferite ai solo prezzi di mercato sono per lo più fallaci in quanto non contengono costi ambientali e consumo di risorse naturali, nè una corretta valutazione dei costi in fase di gestione, per non parlare dell'analisi di fine vita (possibilità di recupero e riciclaggio o facile smaltimento).

Per le verifiche economiche delle soluzioni adottate diffusamente nelle strutture in legno (molte utilizzate generalmente nelle strutture a secco) occorre tenere presente che:

- la documentazione ufficiale (in particolare i prezzi di molte regioni) di buona parte delle opere concernenti strutture in legno, componenti in bioarchitettura ed impianti ad alta efficienza e relative integrazioni, è scarsa e non sempre affidabile visto che sino ad oggi la maggior parte della produzione di edifici in legno è prevalentemente prefabbricata o gestita dai grossi gruppi del settore;
- non è possibile adottare un confronto comparativo con le voci di costo abituali in quanto buona parte degli elementi strutturali sono contemporaneamente facile supporto di componenti tecnologici oppure già elementi divisorii interni su cui non potrebbero servire profili per fissaggio di elementi di finiture o potrebbero non servire finiture;
- andrebbe valutata l'economia prodotta dalla riduzione dei tempi di cantieri;
- struttura e tamponamento ligneo hanno un costo inferiore agli stessi componenti in latero-cemento con il vantaggio ulteriore nella semplicità, per l'assemblaggio di cappotto e intercapedini porta impianti;
- le case di legno se realizzate con materiali edili convenzionali (non bioecologici) risultano, a parità di efficienza meccanica ed energetica, concorrenziali agli edifici in laterizio portante (o altra tipologia di blocchi) e in latero-cemento. Nel caso in cui, cosa auspicabile, venga completato con

componenti in bioedilizia il costo può aumentare mediamente del 10%, constatando che il costo del materiale in se (es. fibra di legno rispetto al polistirene, o calce idraulica rispetto al cemento) può essere maggiore anche fino al 40%, ma il materiale incide per meno di un terzo sul costo complessivo dell'opera oltre al fatto che spesso il maggior costo di alcuni materiali porta con se un minor costo della posa;

- dal punto di vista tecnologico, gli impianti ad alta efficienza, comprensibilmente, hanno costi maggiori degli impianti convenzionali ma in questi casi il maggior costo è di fatto un'anticipazione di capitale facilmente ammortizzabili con i successivi mancati costi di gestione (non solo energetici);
- la realizzazione di intercapedini porta impianti all'interno e all'esterno della struttura portante lignea permette una facile integrazione e assemblaggio e conseguente riduzione di tempi e costi di posa.

6. Stima^s dei costi

A conclusione del lavoro di tesi esposto, si è considerato opportuno analizzare anche gli aspetti economici relativi alla realizzazione del progetto che si è sviluppato.

Si riportano di seguito i calcoli per la stima dei costi di realizzazione relativi ad una singola unità residenziale.²³

FASE 1	ALLESTIMENTO CANTIERE
UFFICIO-BARACCA DI CANTIERE	Fornitura, trasporto, posa in opera e smobilizzo finale di ufficio-baracca di cantiere, (dimensione metri 3 x 2).
SOLLEVAMENTI CON GRU DI CANTIERE (TRASPORTO-MONTAGGIO-SMONTAGGIO)	Fornitura, trasporto, stazionamento in opera e smobilizzo finale di gru fissa automontante a rotazione bassa, con sbraccio di 20/25 metri, comprensiva di radiocomando, forca, benna, completa di documentazione di sicurezza a norma.
PONTEGGIO TUBOLARE DI FACCIATA	Fornitura, trasporto, posa in opera e smobilizzo finale di ponteggio tubolare di facciata, (a norma di legge) di difficoltà e locazione normale, incluso l'approntamento di un piano di lavoro e di un sottopiano di protezione, completo di scala di risalita con botole, controventi e ancoraggi, distanziatori, basette, impianto di massa a terra. (completo di documentazione di sicurezza e P.I.M.U.S.).
IMPORTO UNITARIO FASE 1	
9.500 €	

FASE 2	FOGNATURE
TUBAZIONI IN CLORURO DI POLIVINILE	Fornitura e posa in opera di tubazioni in PVC diametro interno mm. 80/125/160, del tipo ad elevata resistenza termica (tipo 303 – colore arancio – per scarichi acque bianche, gialle o nere) interrati con giunto ad anello elastomerico, escluso, scavo rinfianco e rinterro.
POZZETTI PREFABBRICATI IN C.L.S	Fornitura e posa in opera di pozzetti di ispezione e raccordo in conglomerato cementizio, da cm. 40x40x40 completi di coperchio, compreso allacciamento alle tubazioni confluenti e sigillature con malta di cemento. Escluso lo scavo ed il rinterro.
POZZETTO DEGRASSATORE IN C.L.S	Fornitura e posa in opera di pozzetto degrassatore per decantazione di acque saponate di bagni e cucina in conglomerato cementizio, con diam. cm. 100 altezza cm. 90 completo di coperchio, compreso allacciamento alle tubazioni confluenti e sigillature con malta di cemento. Escluso lo scavo ed il rinterro.
POZZETTO DI ISPEZIONE SIFONATO	Fornitura e posa in opera di pozzetto sifonato, di ispezione pre innesto degli scarichi in fognatura comunale, (eseguito secondo le istruzioni del gestore del servizio) completo di due chiusini di ispezione di cemento, in opera compresa fornitura, scarico trasporto, allacciamento alle tubazioni confluenti e sigillatura, compresa la posa in opera del manufatto di ispezione in cloruro di polivinile del tipo pesante
IMPORTO UNITARIO FASE 2	
2.700 €	

²³ Per la determinazione delle lavorazioni e dei relativi costi si è fatto riferimento a “Prezzario Regione Piemonte” – edizione 2019

FASE 3	CEMENTI ARMATI - IMPERMEABILIZZAZIONI
STAZIONAMENTO BETON-POMPA	per getti di calcestruzzo, calcolato a numero di stazionamenti in base alla mole di lavoro da eseguire.
GETTO DI MAGRONE DI SOTTOFONDAZIONE	fornitura e getto in opera di magrone di sottofondazione in calcestruzzo, dello spessore di cm. 10, a resistenza caratteristica Rck > 20 N/mm ² , compreso, picchettamento ogni 4 mq. per il livellamento, compresa cassetatura di bordo se necessaria
FONDAZIONI CONTINUE IN C.A	fornitura e posa in opera di fondazioni continue in calcestruzzo a resistenza caratteristica Rck > 25/30 N/mm ² . opportunamente vibrato, comprensive di ferro tondo ad aderenza migliorata FeB44k (fondazione tipo da 40 x 80 con 6 + 6 barre Ø12 longitudinali e staffe Ø8 ogni 20 cm.) con incidenza media di 60 kg/mc, completo di armo e disarmo delle casseforme lignee in pannelli gialli.
VESPAIO AERATO TIPO IGLOO	- fornitura e posa in opera di vespaio aerato tipo "igloo" costituito da elementi in plastica riciclata altezza cm. 35, con sovrastante rete elettrosaldata tipo 620 con incidenza di 6 kg/mq, getto di completamento di cappa superiore in calcestruzzo Rck > 30/35 N/mm ² . opportunamente vibrato
MARCIAPIEDI E CAMMINAMENTI ESTERNI IN GETTO DI C.A. SPESSORE CM. 15	fornitura e posa in opera di marciapiedi e camminamenti esterni in getto di calcestruzzo Rck > 25/30 N/mm ² ., armati con rete elettrosaldata e tondo di ferro FeB44K, gettati in opera comprese eventuali casseforme di pannelli di legno
IMPERMEABILIZZAZIONI DI MURATURE E FONDAZIONI CONTROTERRA	fornitura e posa in opera di monostrato di guaina bitume polimero plastomerica armata con "non tessuto" di poliestere spess. 4 mm, sviluppo m. H=0,80. (in alternativa stesa a due mani di guaina liquida tipo Unolastik Index), completa in opera a regola d'arte
IMPORTO UNITARIO FASE 3	
11.500 €	

FASE 4	STRUTTURA IN LEGNO X-LAM - LAMELLARE
PARETI PORTANTI X-LAM IN LEGNO DI ABETE	fornitura e posa in opera di pareti portanti, perimetrali e interne in legno di abete X-LAM a 5 strati incrociati spess. cm. 9,5, assemblate tra loro con piastre metalliche, viti, chiodi anker, fissate a terra con ancoranti meccanici e chimici e staffe Hold Down, complete di nastrature sulle giunzioni, di guaina bituminosa alla base delle pareti, e quant'altro per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte
SOLAIO ORIZZONTALE IN X-LAM	Fornitura e posa in opera di pannelli strutturali in legno multistrato XLAM in tavole di legno di abete (Picea abies, Abies alba) o di larice (Larix decidua) a 3, 5 e 7 strati incrociati. Il prodotto dovrà avere marcatura CE per i prodotti da costruzione e relativa dichiarazione di Prestazione (DoP) come previsto dal regolamento UE n. 305/2011 o, qualora non sussista l'obbligo di marcatura CE, qualificati secondo le NTC in vigore.
COPERTURA IN LEGNO LAMELLARE GL24	fornitura e posa in opera di solai di copertura, costituiti da travi in abete lamellare GL24=BS11 marcate CE, principali e secondari, trattate con una mano preliminare di impregnante, con prodotti fungobattericida-antimuffa in soluzione acquosa
IMPORTO UNITARIO FASE 4	
48.000 €	

FASE 5	FINITURE COPERTURA - PACCHETTO TERMICO - CAPPOTTO
PACCHETTO TERMOACUSTICO DEL SOLAIO DI COPERTURA	fornitura e posa in opera di pacchetto termoacustico di copertura, costituito da, tre strati sovrapposti in lana di roccia minerale tipo Knauf DDP-RT da 135 kg./mc. con spessore di cm. 6 + 6 + 6, interposti morali grezzi in abete da cm. 6 x 4 con passo di cm. 120, chiusura del pacchetto con membrana traspirante tipo Rivega USB Classic graffata e nastrata sui bordi, compreso viti, chiodi, nastri, e quant'altro per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte.
MANTO DI COPERTURA DEL TETTO	fornitura e posa in opera di manto di copertura del tetto, costituito da, posa superiore di pannello di OSB da cm. 1,5 chiodato ai moraletti sottostanti, impermeabilizzazione con guaina bituminosa ardesiata adesiva tipo Index Mineral Seltene He Poliestere da 4 Kg/mq (- 15), posa di ultimo assito di tavole di abete spess. cm. 2,0 chiodate al sottostante OSB e ai sottostanti moraletti, completa della lavorazione di sormonto, di quintane, di colmo e comunque di ogni opera necessaria alla tenuta delle acque meteoriche, spessore cm. 8/10, compresi colmi, sfiati, e quant'altro per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte.
CAMINI INOX COMPLETI DI CANNA FUMARIA E CAPPELLO	fornitura e posa in opera di camino in acciaio inox AISI doppia parete, con diametro interno cm. 15 ed esterno cm. 21/25 ed interposti cm.3/5 di lana di roccia minerale, della lunghezza di circa 4/5 metri lineari, completi cappello acciaio inox AISI.
LINEA VITA - ANCORAGGI PER COLMI	fornitura e posa in opera di linea vita puntiforme tipo "Wurth" certificata, costituita da terminali di ancoraggio per fissaggi su solaio in legno, tipo WA1CTV48 in acciaio inox.
LINEA VITA - ANCORAGGI PER ANGOLI	fornitura e posa in opera di linea vita puntiforme tipo "Wurth" certificata, costituita da terminali di ancoraggio e deviazione caduta per fissaggi su solaio in legno, tipo WDC48T in acciaio inox.
LINEA VITA - PROGETTAZIONE E CALCOLO STRUTTURALE	fornitura di progettazione e calcolo strutturale, per il posizionamento di linea vita sul tetto, completo indicazioni dei punti di ancoraggio e dei percorsi di accesso, redatto e certificato da professionista abilitato
LATTONERIE IN LAMIERA PREVERNICIATA	- fornitura e posa in opera di: canali di gronda spessore 6/10 sviluppo cm. 50, a sagoma corrente, chiodati con ribattini in rame e saldati, compresi i bracciali di sostegno in ferro (1 x metro - per ogni angolo aumento di 1 ml), scossaline di ventilazione spessore 6/10 sviluppo da cm. 20, chiodate con ribattini di rame e saldate, in opera, tubi pluviali di scarico spessore 6/10 diametro cm. 10, compreso i bracciali di sostegno in ferro (1 ogni 2 m - per ogni curva valutazione 0.50 di ml), scossaline per bordi e compluvi spessore 6/10 sviluppo cm. 67, chiodate con ribattini di rame e saldate, in opera, converse per camini in piombo.

BANCALI E SOGLIE ESTERNE IN PIETRA O MARMO -	fornitura e posa in opera di bancali esterni delle finestre e soglie esterne di porte e portefinestre, realizzate in pietra o marmo bianco locale, con lavorazione delle superfici a taglio sega con levigatura grossa, con costa anteriore leggermente smussata, sporto dal filo muro di cm. 5, profilo quadro, sezione max cm. 35 spessore cm. 4/5. I bancali esterni delle finestre con gocciolatoi. Bancali esterni e soglie esterne montati in leggera pendenza per deflusso delle acque meteoriche, tutto compreso per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte.
CAPPOTTO TERMOACUSTICO - RASATURE E INTONACHINO	fornitura e posa in opera di cappotto termoacustico in lana minerale di roccia per le pareti perimetrali esterne, composto da pannelli tipo Knauf FKD-S C1 da 115 Kg./mc. e 0,036 W/mK, con spessore di cm. 10, fissato sulle pareti lignee con platorelli in PVC e vite, queste incluse, in numero di 6 a pannello; compresi i primi 60 cm. da terra con pannello di polistirene espanso estruso XPS (da 0,037 W/mK e spess. cm. 10), successivo ciclo completo di rasature e intonachino, costituito da prima mano di rasatura con applicazione di rete plastificata, e angolari, seconda ed eventuale terza mano di rasatura, a finire applicazione di intonachino bianco a grana media, dato a frattazzo per ciclo completo di cappotto tipo Rofix, il tutto per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte.
ASSISTENZE MURARIE DI CARPENTIERE DEL LEGNO	assistenze murarie di carpentiere del legno, per predisposizioni di passaggi condotte idrauliche ed elettriche, scatole, lampade, radiatori e quant'altro per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte.
CALCOLO STRUTTURALE - INGEGNERE STRUTTURISTA	redazione di calcoli strutturali, presentazione pratica agli organi competenti, direzione lavori strutturale
DISEGNI ESECUTIVI - PARTICOLARI COSTRUTTIVI	redazione di disegni esecutivi per il cantiere, redazione di particolari costruttivi per il cantiere, redazione di disegni in autocad e liste di materiali per l'ordine del legname e della ferramenta.
TRASPORTO MATERIALI	trasporto materiali ed attrezzature, trasporto di attrezzature varie, legname acquistato, fibra di legno o lana di roccia, ecc.
DIREZIONE TECNICA DI CANTIERE	mantenere i rapporti con la committenza e la Direzione Lavori, seguire fisicamente il cantiere, eseguire tracciamenti, coordinare le maestranze ecc
IMPORTO UNITARIO FASE 5	
54.000 €	

FASE 6	STRUTTURE IN CARTONGESSO E PITTURE
CONTROPARETI PERIMETRALI IN CARTONGESSO	fornitura e posa in opera di contropareti perimetrali composte da: doppia lastra di cartongesso da mm. 12,5+12,5, da montare su struttura metallica di guide e montanti in lamiera zincata da mm. 50x40, con guide fissate a pavimento e a soffitto con gomma in neoprene per l'interruzione di frequenze acustiche, completo di fissaggio con viti autoperforanti fosfate dei montanti ad interasse cm. 60 alla parete lignea, applicazione di rete tessile adesiva tra pannelli, successiva stuccatura delle teste delle viti e delle giunzioni tra i pannelli, e carteggiatura dello stucco per dare la finitura pronta per la pittura, compreso riempimento dell'intercapedine con pannello di lana di roccia minerale tipo Knauf DP4 densità 40 Kg/mc. spess. cm. 5, compresa apposizione di tutti gli angolari e spigoli ovunque sia necessario, la sigillatura tra cartongesso e legno con silicone acrilico verniciabile, tutto compreso per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte. (incluso esecuzione di fori a misura per gli accessori degli impianti elettrico ed idraulico e, pittura finale su ambo i lati con idropittura traspirante semilavabile)
CONTROPARETI INTERNE IN CARTONGESSO	fornitura e posa in opera di contropareti interne in cartongesso, composte da: due + due lastre di cartongesso normale da mm. 12,5+12,5, da montare su di un lato su struttura metallica di guide e montanti in lamiera zincata da mm. 50x40, con guide fissate a pavimento e a soffitto con gomma in neoprene per l'interruzione di frequenze acustiche, completo di fissaggio con viti autoperforanti fosfate dei montanti alla parete lignea, e dall'altro lato con fissaggio delle due lastre direttamente sulla parete lignea, applicazione di rete tessile adesiva tra pannelli, successiva stuccatura delle teste delle viti e delle giunzioni tra i pannelli, e carteggiatura dello stucco per dare la finitura pronta per la pittura, compresa apposizione di tutti gli angolari e spigoli ovunque sia necessario, tutto compreso per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte. (incluso esecuzione di fori a misura per gli accessori degli impianti elettrico ed idraulico e, pittura finale su ambo i lati con idropittura traspirante semilavabile).
PARETE COMPLETA IN CARTONGESSO 4 LASTRE	fornitura e posa in opera di parete in cartongesso, costituita da: due + due lastre di cartongesso normale da mm. 12,5 da montare su struttura metallica di guide e montanti in lamiera zincata da mm. 50/75x40, con guide fissate a pavimento e a soffitto con gomma in neoprene per l'interruzione di frequenze acustiche, completo di fissaggio con tasselli dei montanti al pavimento e soffitto in legno, applicazione di rete tessile adesiva tra pannelli, successiva stuccatura delle teste delle viti e delle giunzioni tra i pannelli, e carteggiatura dello stucco per dare la finitura pronta per la pittura, compresa apposizione di tutti gli angolari e spigoli ovunque sia necessario, tutto compreso per dare il lavoro finito a regola d'arte. (incluso esecuzione di fori a misura per gli accessori degli impianti elettrico ed idraulico e, pittura finale su ambo i lati con idropittura traspirante semilavabile).
IMPORTO UNITARIO FASE 6	
12.500 €	

FASE 7	STRUTTURE IN CARTONGESSO E PITTURE
MASSETTO ALLEGGERITO TIPO "FOAMCEM"	fornitura e posa in opera di primo massetto alleggerito tipo "Foamcem" a copertura degli impianti elettrico ed idraulico, con spessore di cm. 10/12 confezionato con additivo areante per calcestruzzo cellulare, densità di 480 Kg./mc., dosato a 330 kg./mc. di cemento R 325, completo di tiratura con staggia a livello, con conduttività termica di circa Kcal/hm°C 0,085, fonoassorbente, termoisolante, non combustibil e, completo di ogni accessorio e quant'altro per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte
MEMBRANA PER ISOLAMENTO ACUSTICO DA CALPESTIO	fornitura e posa in opera di membrana per isolamento acustico da calpestio tipo FONOSTOPDuo, completa di apposizione di guaina antirumore perimetrale tipo FONOCELL ROLL su tutti i lati delle stanze, e quant'altro per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte
MASSETTO INTERNO AUTOLIVELLANTE	fornitura e posa in opera massetto interno galleggiante autolivellante a sèstante, a base cementizia tipo AR97 Grigolin (dosato a Kg. 330/mc.), additivato con fibre sintetiche, spessore cm. 5 circa (minimo cm. 3 sopra i tubi dell'impianto di riscaldamento a pavimento se presente), perfettamente autolivellato con aiuto di staggia, per successiva posa di pavimenti in gres o parquet, completo di giunti di dilatazione all'ingresso di ogni stanza, guaina antirumore perimetrale tipo FONOCELL ROLL su tutti i lati delle stanze, e quant'altro per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte.
MASSETTO ESTERNO TRADIZIONALE SABBIA-CEMENTO + GUAINA LIQUIDA	- fornitura e posa in opera di massetto esterno tradizionale in sabbia-cemento (dosato a Kg. 300 di cemento R 325 a mc. di sabbia) additivato con fluidificante, spessore cm. 15/18 medi, tirato a frattazzo fino, perfettamente livellato, (anche in leggera pendenza), compreso guaina liquida impermeabile tipo Mapelastic data a due mani a spatola con interposta rete plastificata, completo di risvolti di cm. 10 sulle pareti verticali, e di cm. 20 a scendere verso i giardini, per la copertura completa del massetto sabbia cemento, completo di giunti di dilatazione se necessari, e quant'altro per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte.
PAVIMENTO INTERNO IN GRES PORCELLANATO	fornitura e posa in opera di pavimento in mattonelle di gres porcellanato monocottura smaltata di primissima scelta commerciale, lisce, con colori vari, dimensioni cm. 20x20 o 30x30 o 15x60, spessore mm. 8/9; con prezzo di listino di € 25.00 (€ Venticinque/00), da posare con colla da interni tipo MapeiFlex, compresa la stuccatura con boiaccia di cemento e la pulizia. Zoccolino battiscopa in legno di ramin dell'altezza di cm. 8/10.
PAVIMENTAZIONE DI MARCIAPIEDE ESTERNO IN GRES PORCELLANATO	fornitura e posa in opera di pavimento esterno anticivolo antigelivo in mattonelle di gres porcellanato monocottura smaltata di primissima scelta commerciale, dimensioni cm. 17X35 o 15x60, spessore mm. 8/9; con prezzo di listino di € 25.00 (€ Venticinque/00), da posare con colla da esterni tipo MapeiFlex, compresa la stuccatura con boiaccia di cemento e la pulizia. Compreso battiscopa in gres porcellanato dell'altezza di cm. 15/17.
RIVESTIMENTI INTERNI DI BAGNI E CUCINE IN GRES BICOTTURA	- fornitura e posa in opera di rivestimenti interni di mattonelle di gres porcellanato bicottura smaltata di primissima scelta commerciale, lisce, con colori vari, dimensioni cm. 20x20 o 20x30, spessore mm. 8/9; con prezzo di listino di € 25.00 (€ Venticinque/00), da posare con colla bianca da interni tipo MapeiFlex, compresa la fornitura di stucco bianco.
IMPORTO UNITARIO FASE 7	15.000 €

FASE 8	SERRAMENTI - MARMI - OPERA DA FABBRO	
SERRAMENTI IN LEGNO PER FINESTRE	fornitura e posa in opera di finestre in legno essiccato a 13% in pino plus tipo monoblocco composto da: telaio maestro di sezione mm. 68x80, ante apribili da mm. 68x85 a triplice battuta, con profilo interno ed esterno stondato, doppia guarnizione in gomma EPDM resistente a sbalzi di temperatura, gocciolatoio in alluminio anodizzato bronzo, cerniere tipo anuba in numero di 3 per finestre, maniglia cromo satinata, verniciati a più mani con prodotti all'acqua certificati tinta noce chiaro, completi di vetrocamera 4/20/4 basso emissivi (Ug=1,4 W/mqK e Uw=1,66 W/mqK). (comprensivi di apertura anta-ribalta per i bagni e la cucina)	
SERRAMENTI IN LEGNO PER PORTEFINESTRE	fornitura e posa in opera di portefinestre in legno essiccato a 13% in pino plus tipo monoblocco composto da: telaio maestro di sezione mm. 68x80, ante apribili da mm. 68x85 a triplice battuta, con profilo interno ed esterno stondato, doppia guarnizione in gomma EPDM resistente a sbalzi di temperatura, gocciolatoio in alluminio anodizzato bronzo, cerniere tipo anuba in numero di 4 per portefinestre, maniglia cromo satinata, verniciati a più mani con prodotti all'acqua certificati tinta noce chiaro, completi di vetrocamera antinfortuno 3+3 - PBV 0,38-18 - 3+3 (Ug=1,4 MqK e Uw=1,66 W/mqK) basso emissivi.	
PORTE INTERNE TAMBURATE IMPIALLACCiate IN LEGNO	fornitura e posa in opera di porte interne cieche lisce tamburate ed impiallacciate in vero legno di noce tanganka naturale, complete di stipiti realizzati in listellare di abete a tre strati spessore mm. 40 con profilo raggio 10 impiallacciati in vero legno, con cornici coprifilo telescopiche piane impiallacciate in vero legno, guarnizioni in gomma sulla battuta dello stipite, serratura con chiave, tre cerniere anuba bronzate, maniglie finitura cromo-satinata, con verniciatura a più mani semilucida tinta noce/naturale. Dimensioni standard da cm. 70/80 x 210.	
SCALA AUTOPORTANTE A GIORNO IN LEGNO E METALLO	fornitura e posa in opera di scala autoportante a giorno in legno di rovere o faggio, con struttura portante metallica o lignea, completo di parapetto in legno/metallo, e di ogni accessorio per dare il lavoro finito in opera a regola d'arte	
PARAPETTI IN FERRO PER BALCONI E SCALE ZINCATI E VERNICIATI FERROMICACEO	fornitura e posa in opera di parapetti in ferro tubolare quadro o tondo di semplice disegno (base di calcolo: alt. minima mm. 1000 e peso max kg./mq. 20) zincati a caldo e verniciati ferromicaceo, con fissaggio a tasselli, completi in opera a regola d'arte.	
IMPORTO UNITARIO FASE 8		23.000 €

FASE 9	IMPIANTI ELETTRICI - IDRO-TERMO-SANITARI E GAS
IMPIANTO ELETTRICO LIVELLO 1	<p>fornitura e posa in opera di impianto elettrico di tipo tradizionale, (secondo normativa 64-8 V3, in vigore dal 01-09-2011, livello n° 1), po sto in tubi sfilabili sotto cartongesso e sotto pavimento, con tubazioni in pvc flessibile, scatole di derivazione, rettangolari, in pvc rigido con coperchio in resina a marchio IMQ ed i conduttori del tipo N07VK con sezione a norma di legge. L'alloggio è dotato di impianto citofonico con ronzatore e pulsante di comando per elettro serratura del cancello pedonale principale. Caldaia alimentata da apposita centralina. Sono compresi gli impianti di antenna (antenna esclusa) (dimensionati per alimentare n° 8 prese TV), atti alla ricezione delle reti nazionali e delle televisioni locali. La componentistica dell'impianto è (interruttori, deviatori, prese, placche, ecc.) tipo bTicino Living International con placche in termoplastico. La posizione delle prese e dei punti luce viene valutata congiuntamente con il committente direttamente in cantiere con il nostro elettricista. L'impianto di messa a terra è rispondente alle norme di legge. La dotazione di capitolato di ogni appartamento è così composta: - 2 Cronotermostati ambiente, - Cucina: 3 prese, 2 prese schuco, interruttore o deviatore, presa tv, punto cappa, punto luce, - Soggiorno: 3 prese, interruttore o deviatore, presa tv, presa telefono, punto luce, - Corridoi Scala: 1 presa, interruttore o deviatore, punto luce, - Bagni: 2 prese, 2 interruttore o deviatore, punto luce aggiuntivo, punto luce, - Camere: 3 prese, 3 interruttori o deviatori, presa tv, presa telefono, punto luce. Su richiesta della committenza, possono essere realizzate, adeguando i compensi, integrazione per domotica, impianto videocitofonico, installazione di antenna e antenna satellitare, punti luce, spine, interruttori, e frutti aggiuntivi</p>
IMPIANTO IDRICO E SANITARIO	<p>fornitura e posa in opera di impianto idro-sanitario comprendente tutte le tubazioni ed accessori per la realizzazione di bagni e cucine. Impianto realizzato con tubazioni in multistrato opportunamente rivestite e coibentate, poste nelle pareti lignee o sotto pavimento. Per ogni bagno una scatola di derivazione completa di rubinetti d'intercettazione per ogni singolo apparecchio. Gli scarichi che dai singoli accessori vanno alle colonne montanti di scarico sono in ABS ad alta densità, collegate a valle alle condotte comunali o secondo ordini impartiti dalla D.L. Gli accessori del tipo Villeroy Boch serie D – Codesedra, colore bianco, le vasche da bagno in acciaio porcellanato tipo Ariston cm. 170*70, piatto doccia in fire-clay 80x80 o 90x75, miscelatori tipo Grohe Eurostyle Cosmopolitan cromati. Un rubinetto esterno in pozzetto predisposto, per il giardino. In particolare sono posti in opera i seguenti accessori: Bagno principale: n° 1 lavandino con colonna, n° 1 water, n° 1 bidet , n° 1 vasca da bagno, n° 1 attacco per lavatrice; Bagno secondario: n°1 lavandino con colonna, n°1 water, n°1 bidet , n°1 piatto doccia, n°1 attacco per lavatrice; Cucina: n°1 attacco per lavello e lavastoviglie. Su richiesta della committenza, può essere realizzate, adeguando i compensi, l'installazione di vasca idromassaggio, (prezzo in base al modello scelto), sanitari sospesi, ecc.</p>
IMPIANTO DI GAS METANO	<p>fornitura e posa in opera di impianto del gas, eseguito con tubazioni di rame ricotto, in opera secondo le norme UNI-GIG, rivestito e coibentato, completo di rubinetto maschio da 3/4" e rubinetto da 1/2" con volantino e porta gomma per la cucina. Completo di N. 2 attacchi gas cucina e caldaia, e n. 1 Linea di distribuzione + collettore del gas con cassetta e allacciamento al contatore generale.</p>

<p>IMPIANTO DI RISCALDAMENTO A PAVIMENTO CON CALDAIA A CONDENSAZIONE</p>	<p>fornitura e posa in opera di impianto di riscaldamento con caldaia murale tipo Immergas Victrix Intra a Gas Metano o a GPL da incasso tipo stagna a tiraggio forzato a condensazione, per riscaldamento con acqua in bassa temperatura e produzione istantanea di acqua calda sanitaria da 26,2 KW, con accensione elettronica, posta all'esterno dell'appartamento in apposita nicchia interna ai muri perimetrali, completa di caminella in acciaio con diam. interna di 80 mm. intubato su caminella da cm. 15x15, con arrivo sulla copertura del tetto, completa di camera di raccolta e scarico della condensa. Caldaia composta da: - bruciatore principale multigas a 13 rampe ad aria aspirata, in acciaio inox completo di elettrodi d'accensione e sonda di controllo a ionizzazione, valvola gas elettrica a doppio otturatore, - scambiatore primario gas/acqua ad alto rendimento, in rame e costituito da quattro tubi collegati in serie inseriti in una batteria lamellare protetta da una lega anticorrosiva, - camera di combustione in lamiera d'acciaio isolata internamente con pannelli ceramici, - camera stagna in lamiera d'acciaio con ventilatore per l'evacuazione dei fumi a velocità fissa, pressostato differenziale a verifica del corretto funzionamento del ventilatore e del circuito scarico fumi/aspirazione aria, - gruppo idraulico composto da valvola 3 vie idraulica, valvola di precedenza sanitario, pressostato differenziale per circuito primario, pompa di circolazione a 4 velocità, dispositivo di riempimento impianto, - vaso d'espansione a membrana da 8 litri con precarica a 0,8 bar, valvola di sicurezza impianto a 3 bar, termometro e manometro, - termostato di sicurezza sovratemperatura, selettore di regolazione temperatura impianto di riscaldamento, selettore di regolazione temperatura acqua calda sanitaria, selettore di funzione (spento, estate, inverno), - cruscotto con comandi a vista dotato di scheda elettronica di modulazione continua di fiamma per circuito sanitario e riscaldamento. Riscaldamento dato da sistema a pannelli radianti a pavimento idoneo al funzionamento con acqua a bassa temperatura, composto dai seguenti componenti, pannelli radianti Chemidro Sistema Master da 23 mm. 30 Kg/m, conforme alla normativa UNI 1264, con resistenza a compressione 150 kPa. Tubazioni in multistrato reticolato di 17 mm. posati ad interasse di 10/15 cm. Collettori di tipo "Sunwood" completi di attacchi per gli anelli dell'impianto, attacchi per i radiatori dei bagni tipo "Termoarredo", testine elettriche, accessori e regolazioni dichiarate compatibili con il sistema. Tutta la distribuzione dall'impianto predisposta al funzionamento a zone. La potenzialità verrà calcolata a 80 Watt/mq. con salto termico di 6°C temperatura di mandata 39°C, con funzionamento continuo dell'impianto con temperatura superficiale di 27°C per una temperatura ambiente di 20°C. E' compreso nel prezzo a corpo anche la predisposizione per l'impianto di condizionamento, costituita da collegamento di sole tubature tra la futura macchina del condizionamento e due split a muro. Su richiesta della committenza, può essere realizzate, adeguando i compensi, l'installazione delle macchine di condizionamento e climatizzazione.</p>
	<p>IMPORTO UNITARIO FASE 9 18.000 €</p>

Conclusioni

I nuovi sistemi costruttivi esaminati nel corso di questa tesi, come si è visto, permettono nuove possibilità, con architetture formali e linguistiche, raffinate nei dettagli ed una particolare attenzione ai consumi energetici e dell'ecosostenibilità.

Una crescente sensibilizzazione nei confronti di queste tematiche ha sviluppato una nuova concezione del progettare e le scelte architettoniche sono più legate all'uso di risorse rinnovabili piuttosto che a scelte estetiche ed il materiale legno ritorna come innovazione tecnologica della tradizione costruttiva.

Vanno congiuntamente lo sviluppo tecnologico ed il controllo di qualità: le strutture preassemblate in stabilimento assicurano l'affidabilità del sistema e la qualità dei componenti, le lavorazioni in cantiere sono ridotte al minimo, le macchine a controllo numerico permettono lavorazioni complesse ed accurate, la perfezione delle connessioni, la realizzazione di manufatti un tempo tecnicamente impensabili od estremamente costosi.

L'industria ha risolto molti aspetti che costituivano un limite per l'applicazione di questo materiale nel campo delle costruzioni, come il comportamento al fuoco e le problematiche connesse alla durabilità e alla manutenzione.

Indice delle figure

Figura 1 Rappresentazione schematica dei vari livelli a cui può essere esaminato il legno.....	7
Figura 2 Sezioni anatomiche fondamentali.	7
Figura 3 Curve di adsorbimento e desorbimento d'acqua nel legno.....	8
Figura 4 Deformazioni del legno in seguito a fenomeni di ritiro nelle direzioni tangenziale e radiale	9
Figura 5 Valori massimi del rigonfiamento, coefficiente di rigonfiamento e rigonfiamento differenziale di alcune specie legnose.	10
Figura 6 Densità anidra e massa volumica (per u=15%) delle più importanti specie legnose appartenenti alle Conifere e alle Latifoglie.	11
Figura 7 Confronto tra i tipici valori nominali dell'abete rosso, determinati su provini di legno netto ed in dimensione strutturale.....	15
Figura 8 Diagramma costitutivo del legno nella direzione della fibratura: sinistra: provino di legno di piccole dimensioni (privo di difetti);	15
Figura 9 Dilatazioni lineari e scorrimenti mutui.....	16
Figura 10 Grandezze caratteristiche di resistenza del legno in dimensione strutturale in relazione al tipo di sollecitazione.....	18
Figura 11 Superficie di contatto fra due elementi strutturali: malgrado l'inclinazione della diagonale, l'elemento orizzontale evidenzia macchie dovute all'assorbimento di acqua proveniente dalla superficie.....	23
Figura 12 Assorbimento di acqua causato dal contatto con un altro materiale contenente acqua; contatto con il terreno causato da distanza insufficiente o da fondazione diretta.....	23
Figura 13 Classi di resistenza ed "aspettativa di vita" di alcune specie legnose.	25
Figura 14 Classi di impregnabilità di alcune specie legnose usate nella costruzione (EN 350).	27
Figura 15 L'orientazione della superficie fessurata può favorire l'assorbimento d'acqua o ritardarlo.....	29
Figura 16 Effetto dell'orientazione di una trave in legno lamellare sulla possibilità di assorbimento di acqua.	30
Figura 17 Ristagno o deflusso dell'acqua provocati dalla deformazione delle sezioni di una tavola, con problemi aggravati dalla posizione delle fessure.....	30
Figura 18 Modalità costruttive che possono favorire o sfavorire la penetrazione dell'acqua, o il deflusso rapido della stessa.	30
Figura 19 Riduzione del rischio di assorbimento di acqua nella zona di estremità di una trave mediante lavorazioni della testata e/o sistemi di protezione.	31
Figura 20 Problema posto dalle viti e possibile soluzione.	32
Figura 21 Estremità di trave inserita in una muratura, con misure di protezione costruttiva.	33
Figura 22 Possibili tipi di taglio del legno.	35
Figura 23 Lavorazioni del legno dall'elemento iniziale al prodotto finito.	36
Figura 24 Classificazione del legno massiccio in base alle dimensioni.	37
Figura 25 Giunto a pettine.....	38
Figura 26 Trave DUO (sinistra) e TRIO (destra).....	39
Figura 27 Sezioni standard disponibili per le travi DUO.....	39
Figura 28 Sezioni standard disponibili per le travi TRIO.....	40
Figura 29 Legno lamellare incollato.....	40
Figura 30 Posizione delle lamelle normale (sinistra) e per la classe di servizio 3 (destra).	41
Figura 31 Legno lamellare incollato laminato in orizzontale (sinistra) e in verticale (destra).	41
Figura 32 Sezioni omogenee e sezioni combinate.....	42
Figura 33 Possibile orientamento degli strati all'interno di un prodotto di tipo piano.	43
Figura 34 Fasi produttive delle fibre di legno.	44
Figura 35 Classificazione e denominazione dei pannelli di fibra di legno secondo DIN EN 316:1999.	45
Figura 36 Pannello di fibra di legno poroso.	45

Figura 37 Struttura di una copertura con isolamento tra gli elementi dell'orditura;.....	46
Figura 38 Pannello di fibra di legno duro (sinistra) e medio – duro (destra).	46
Figura 39 Pannello di fibra di legno a media densità (MDF).	47
Figura 40 Pannello OSB.....	48
Figura 41 Pannello piano pressato incollato con resine sintetiche (sinistra) e pannello di trucioli a striatura (destra).....	48
Figura 42 Orientamento degli strati in un pannello OSB.	49
Figura 43 Alcune fasi di un ciclo produttivo continuo per la produzione di pannelli OSB.	50
Figura 44 Classificazione dei piallacci in base al processo di produzione.	52
Figura 45 Orientamento dei singoli strati del piallaccio compensato (sinistra) e pannello di faggio (destra).	53
Figura 46 Orientamento dei singoli strati del piallaccio stratificato.	53
Figura 47 Pannelli di legno massiccio a tre strati (sinistra) e pannello di legno compensato di tavole a cinque strati (destra).	54
Figura 48 Pannelli di legno massiccio monostrato (sinistra) e a tre strati (destra).	55
Figura 49 Posizione delle singole tavole all'interno del tronco.....	56
Figura 50 Struttura di un pannello di legno compensato di tavole a cinque strati, a partire dal materiale di base tavola.....	57
Figura 51 Esecuzione degli strati esterni in qualità a vista.....	58
Figura 52 Suddivisione di base dei sistemi costruttivi di legno (sezione orizzontale ed assonometria). ...	59
Figura 53 Sistema a blocchi massicci	60
Figura 54 Sistema a pannelli di legno massiccio.	60
Figura 55 Sistema ad ossatura.....	60
Figura 56 Sistema a traliccio.	61
Figura 57 Sistema a telaio.....	61
Figura 58 Sistema costruttivo massiccio.....	61
Figura 59 Terminologia adottata per il sistema costruttivo massiccio.....	62
Figura 60 Schemi costruttivi delle pareti in tronchi.	62
Figura 61 Collegamenti allo spigolo per il sistema costruttivo massiccio.	62
Figura 62 Dettaglio sistema blockbau.....	63
Figura 63 Connessione tra gli elementi di pacchetti di tavole e calcestruzzo.....	64
Figura 64 Impiego di elementi di legno compensato di tavole per solai e pareti in costruzioni di tipo massiccio.	65
Figura 65 Pannello di compensato di tavole con nervature di lamellare incollato e variante a sezione a cassone.	66
Figura 66 Montaggio di un elemento preassemblato (sinistra) e fissaggio di elementi di isolamento e di facciata (destra).	66
Figura 67 Posizione dei giunti degli elementi di parete di un edificio.....	67
Figura 68 Giunto longitudinale a cerniera tra due elementi di solaio.....	68
Figura 69 Giunto longitudinale rigido fra due elementi di solaio.....	68
Figura 70 Giunzione parete-solaio-parete, esempi rappresentativi della realizzazione della connessione.	69
Figura 71 Giunzione parete-solaio-parete con profili di legno.	69
Figura 72 Giunzione parete-solaio-parete, bullonatura del legno di testa da evitare.	70
Figura 73 Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura.	70
Figura 74 Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura e profili di legno.	70
Figura 75 Giunzione parete-parete, possibilità di realizzazione del collegamento d'angolo mediante bullonatura e profili di legno.	71
Figura 76 Giunzione parete fondazione, disposizione di lamiere e angolari d'acciaio come rinforzo ed ancoraggio per gli sforzi di trazione.....	71
Figura 77 Costruzione ad ossatura portante di legno.....	72

Figura 78 Realizzazione dei nodi nelle costruzioni ad ossatura portante in legno.....	74
Figura 79 Costruzione a traliccio di legno.....	74
Figura 80 Costruzione intelaiata.....	75
Figura 81 Sistemi costruttivi per strutture ad intelaiatura di legno.....	76
Figura 82 Assemblaggio di pannelli platform frame con predisposizioni impiantistiche.....	77
Figura 83 Determinazione lotto d'intervento. fonte: www.geoportale.piemonte.it.....	79
Figura 84 Contesto urbano in cui si inserisce il lotto. Fonte: www.google.it/maps.....	79
Figura 85 Vista dall'alto del lotto d'interesse. Fonte: www.google.it/maps.....	80
Figura 86 Planimetria generale.....	81
Figura 87 Pianta piano terra.....	81
Figura 88 Pianta piano primo.....	82
Figura 89 Dimensioni dei vani piano terra.....	82
Figura 90 Dimensione vani piano primo.....	83
Figura 91 Parete interna - Stratigrafia.....	83
Figura 92 Parete esterna - stratigrafia.....	84
Figura 93 Solaio piano terra - stratigrafia.....	84
Figura 94 Solaio piano primo - stratigrafia.....	85
Figura 95 Copertura - stratigrafia.....	85
Figura 96 Pianta copertura in travi di legno lamellare.....	86
Figura 97 Sezione longitudinale e trasversale dell'edificio.....	86
Figura 98 Raccolta immagini render. Software: Autodesk Revit 2016.....	89
Figura 99 Fondazione a travi rovesce in calcestruzzo armato.....	90
Figura 100 Collegamento parete-fondazione.....	93
Figura 101 Verifica di Glaser.....	95
Figura 102 Grafico del flusso termico fondazione - parete.....	96
Figura 103 Collegamento parete - solaio intermedio.....	97
Figura 104 Collegamento tra pannelli di parete.....	101
Figura 105 Collegamento parete-parete d'incrocio tramite viti di ancoraggio.....	102
Figura 106 Collegamento parete-parete d'angolo tramite viti di ancoraggio.....	102
Figura 107 Collegamento solaio-solaio tramite giunto a mezzo legno con viti di ancoraggio.....	103
Figura 108 Fissaggio dei gradini per mezzo di angolari avvitati ai pannelli di parete.....	103
Figura 109 Vite per legno d=6 mm, h=180 mm, per connessione parete-parete, disposte con maglia 500 x 500 mm.....	104
Figura 110 Vite per legno d=6 mm, h=180 mm, per connessione parete-parete, disposte con maglia 500 x 500 mm.....	105
Figura 111 Dimensioni massime ed esempi della composizione della stratigrafia dei pannelli XLAM.....	108
Figura 112 Distribuzione delle tensioni di flessione e di taglio sulla sezione.....	109
Figura 113 Diagrammi per il predimensionamento.....	110
Figura 114 Caratteristiche pannelli XLAM.....	111
Figura 115 Effetti dell'azione sismica agente su una parete e diversa funzione degli elementi di collegamento.....	112
Figura 116 Schematizzazione differente risposta all'azione sismica delle pareti.....	113
Figura 117 Componenti di LCA.....	119
Figura 118 Illustrazione idealizzata del sistema di un certo prodotto per LCA.....	120
Figura 119 Rappresentazione relativa al riscaldamento globale.....	122
Figura 120 Diagramma Sankey - Riscaldamento globale.....	123
Figura 121 Risultati analisi LCA per la sola struttura in legno.....	123
Figura 122 Riassunto risultati relativi al riscaldamento globale.....	124
Figura 123 Distribuzione dei risultati secondo le fasi del ciclo di vita.....	124
Figura 124 Livello di riferimento in base alla superficie utile lorda dell'edificio oggetto di analisi.....	125
Figura 125 Definizione fondazioni.....	126
Figura 126 Definizione strutture verticali ed elementi di facciata.....	126
Figura 127 Definizione elementi orizzontali e copertura.....	127

Figura 128 Definizione materiali vari (porte, finestre, membrane, pannelli fotovoltaici, finiture e rivestimenti)	127
Figura 129 Indice di riscaldamento globale per element.....	133

Riferimenti normativi

- EC 5 – “Progettazione delle strutture di legno”.
- CNR DT 206/2007 "Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno".
- UNI EN 1990: Eurocodice. "Criteri generali di progettazione strutturale".
- UNI EN 1995-1-1: Eurocodice 5 - "Progettazione delle strutture di legno - Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici".
- UNI EN 1995-1-2: Eurocodice 5 - "Progettazione delle strutture di legno - Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio."
- UNI EN 338 - "Legno strutturale - Classi di resistenza".
- UNI EN 1912 - "Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie visuali e delle specie".
- UNI EN 1194 - "Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici".
- UNI 11035 - "Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale".
- DM 16 Febbraio 2007 "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione
- D.M. 14-01-08 – “Norme tecniche per le costruzioni”
- D.M. 17-01-18 – “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”
- UNI EN ISO 13788:2003 – “Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l’umidità superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo”
- UNI EN ISO 13786:2008 - “Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche -Metodi di calcolo”.

Bibliografia

- M.Fellin - Costruire in legno- Edifici in XLAM.
- Burgess, A.A. und Brennan, D.J. (2001). "Application of life cycle assessment".
- Curran, M.A. (2000). Life Cycle Assessment: "An International Experience. Environmental Progress."
- G. Giordano – "Tecnologia del legno". UTET, 1981
- AA.VV "Il Manuale del legno strutturale". Mancosu editore, 2003
- A. Ceccotti, M. Follesa, M.P. Lauriola (Torino, 2006) – "Le strutture di legno in zona sismica: criteri per la progettazione e il restauro" II Ed. – C.L.U.T. Editrice – Torino, 2006
- Thoma E. – "La natura del legno" - Edicom Edizioni, Monfalcone, 2009
- Nutsch W. – "Finiture e interni in legno"- Sistemi Editoriali, Napoli, 2010
- Braungart M., McDonough W., - "Dalla culla alla culla" – Blu Edizioni, Torino, 2003
- Hugues T., Steiger L., Weber J. - "Timber Construction" – Birkhauser Edition Detail, Munich, 2004
- BELLICINI L. "Il legno e le costruzioni negli anno ' 90" - Osservatori CRESME, 1994
- NERI P. "Verso la valutazione ambientale degli edifice", Firenze 2008

Sitografia

- <http://www.eurolegnoclima.com/>
- <http://www.xlamitalia.com/>
- <http://subissati.it/it/tecnologia-di-costruzione-delle-case-in-legno-sistema-x-lam.html>
- <http://www.geoxlam.com>
- http://www.casabioedile.it/pareti_esterne_xlam
- <http://www.biostylehouse.com/>
- <http://arealegno.com/index.php/>
- <http://www.centrolegnorossini.it/il-sistema>
- <http://www.promolegno.com/>