

A

PREMESSE

In un'epoca come quella contemporanea segnata dalla scarsità delle materie prime e dall'aumento preoccupante delle emissioni inquinanti, di cui il settore edile è largamente responsabile, un'esigenza necessaria e obbligata che dovrebbe accumulare tutti gli interventi in edilizia, dovrebbe essere l'attenzione verso metodi costruttivi e materiali ecosostenibili. Come è stato definito da Ettore Zambelli la sostenibilità è diventata ormai una necessità nel campo della progettazione: "La sfida del recupero sostenibile sta divenendo dunque, non tanto la più importante, quanto la più necessaria, in considerazione del vastissimo patrimonio edilizio notoriamente caratterizzato da una voracità energivora responsabile di una elevata percentuale degli attuali consumi nell'ambito del patrimonio edilizio" (Zambelli E., cit in Grecchi M. e Malighetti L., 2008, p.8).

In questa prima parte della tesi prima di approcciare al nostro caso studio, si indaga su quale sia la condizione del settore dell'edilizia nei confronti della sostenibilità e le strategie da adottare.

Lo strumento di maggior impiego nella progettazione come negli altri settori è la Life Cycle Assessment (LCA) ovvero l'analisi del ciclo di vita, in cui si analizzano from cradle to grave gli impatti e i consumi di energia durante l'intero ciclo produttivo di un'opera o di un prodotto. L'utilizzo di materie prime in edilizia è elevatissimo, quindi non è possibile esentarsi da una scelta attenta e consapevole nei confronti dell'ambiente.

Se da un lato occorre operare un controllo dei flussi energetici e di materia che attraversano l'edificio, al fine di ridurre gli impatti in termini di consumi di risorse e di produzione di inquinamento e rifiuti, dall'altro occorre mantenere comunque al centro dell'attenzione l'obiettivo fondamentale di ogni processo edile che è quello di costruire uno spazio che garantisca un'adeguata qualità di vita agli abitanti che lo andranno ad occupare e che gli permetta di svolgere le funzioni ivi previste. Vengono individuati due soggetti di attenzione ambientale: l'edificio nel suo complesso, comprese le relazioni tra edificio e intorno, e i singoli componenti edilizi analizzati lungo il loro ciclo di vita.

Dall'analisi dei diversi materiali per le costruzioni sono emersi due risorse di particolare rilevanza per quanto riguarda le loro prestazioni ecologiche: il legno e la canapa.

1 La Progettazione Sostenibile

Il settore dell'edile si espande al ritmo di circa 1,8 miliardi di metri quadrati all'anno, producendo inquinamento e consumo di risorse per realizzare edifici che a loro volta richiedono energia, termica ed elettrica, per renderli abitabili. In un rapporto del 2008 dell'ENEA si calcola che gli impatti ambientali totali dell'edilizia in Europa superano il 50% mentre la richiesta di energia arriva al 40 %.

Questi dati dimostrano la necessità di azioni urgenti per ridurre il fabbisogno energetico non solo nella fase di utilizzo di un edificio, bensì nell'intero ciclo di vita. Il potenziale di risparmio più grande non è nel settore industriale, bensì in quello residenziale, la cui percentuale di consumo energetico ammonta al 26 %, percentuale che aumenta se si considera solo il quadro italiano: le statistiche riportano dati sconcertanti riguardo i consumi odierni del patrimonio edilizio esistente delle nostre città, dove il consumo energetico medio di un'abitazione tipo è circa pari a 150-200 kWh/m² anno, valore decisamente troppo elevato rispetto agli altri paesi europei; si pensi solo che in Germania gli edifici di nuova realizzazione garantiscono consumi inferiori a 70 kWh/m² anno per ottenere l'abitabilità, mentre le case passive presentano addirittura consumi inferiori a 15 kWh/m² anno.

Tabella 1.1 Consumo energetico Europeo diviso per settori (Rossetti M.)

SETTORE	%
Edilizia	40%
Trasporti	26%
Agricoltura	2%
Industria	32%

Tabella 1.2 Impatti ambientali dell'edilizia europea in rapporto agli altri settori (Rossetti M.)

IMPATTI AMBIENTALI	%
Fabbisogno energetico totale	40%
Produzione di rifiuti	30%
Produzione di acqua di scarico	20%
Emissione totale di gas serra	35%
Consumo di materie prime	30%
Utilizzo di acqua	20%
Utilizzo di terreno	8%

La soluzione è ricercare uno sviluppo sostenibile da tutti i punti di vista, s'intende quindi un progetto che ha obiettivi di miglioramento ambientale, economico, sociale rapporto di interdipendenza, la tutela e la valorizzazione delle risorse naturali alla dimensione economica, sociale ed istituzionale, al fine di soddisfare i bisogni delle attuali generazioni, evitando di compromettere la capacità delle future di soddisfare i propri.

Quasi 300 anni fa Carl von Carlowitz formulò il principio della sostenibilità nella "Sylvicultura economica", il primo trattato di scienze forestali. Parlava della necessità di un "utilizzo continuo, durevole e sostenibile" delle risorse forestali. Il concetto si è diffuso a livello mondiale solo molto più tardi, nel 1987, con il Rapporto Brundtland della Commissione Mondiale sull'Ambiente e lo Sviluppo. In questo rapporto si definisce sostenibile uno sviluppo che soddisfi le necessità della generazione attuale senza mettere in pericolo quelle della generazione successiva

Ricerca per uno sviluppo sostenibile come unica soluzione ai problemi ambientali.

In questo senso la sostenibilità dello sviluppo è incompatibile con il degrado del patrimonio e delle risorse naturali che di fatto sono esauribili.

Per tali motivi, la sostenibilità ruota attorno a quattro componenti fondamentali:

- *Sostenibilità economica*: intesa come capacità di generare reddito e lavoro per il sostentamento della popolazione.
- *Sostenibilità sociale*: intesa come capacità di garantire condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione) equamente distribuite per classi e genere.
- *Sostenibilità ambientale*: intesa come capacità di mantenere qualità e riproducibilità delle risorse naturali.
- *Sostenibilità istituzionale*: intesa come capacità di assicurare condizioni di stabilità, democrazia, partecipazione.

L'area risultante dall'intersezione delle quattro componenti, coincide idealmente con lo sviluppo sostenibile.

Le azioni da intraprendere per uno sviluppo sostenibile sono:

- eliminare il nostro contributo all'aumento progressivo di sostanze estratte dalla crosta terrestre
- eliminare il nostro contributo all'aumento progressivo di sostanze e composti chimici prodotti dalla società
- eliminare contributo umano al progressivo degrado e distruzione della natura e dei suoi processi
- eliminare il nostro contributo alle condizioni che minacciano la capacità delle persone di soddisfare i propri bisogni fondamentali

Il settore dell'edilizia è oggi oggetto di particolari attenzioni delle politiche ambientali dato che ad esso è imputabile la maggior parte degli impatti ambientali. Nel maggio del 2010, i paesi membri dell'UE hanno adottato una rifusione della direttiva sul rendimento energetico dell'edilizia (EPBD, 2002/91/CE), che stabilisce i requisiti per l'efficienza energetica in regolamenti edilizi, compresi gli standard minimi di rendimento energetico e certificazione energetica (2010/31/CE). La rifusione mira a rafforzare i requisiti di rendimento energetico e a chiarire e semplificare alcune disposizioni precedenti. Inoltre Sono stati sviluppati dei sistemi di valutazione definiti "a punteggio" che consistono in una serie di liste di requisiti ambientali inerenti la scala del rapporto tra edificio e ambiente esterno, la gestione energetica dell'edificio, le scelte dei materiali e tecnico costruttive, la manutenibilità e adattabilità dell'edificio, la salubrità dell'aria interna e il comfort. A ciascun requisito viene attribuito un punteggio e, in base alla somma pesata dei requisiti soddisfatti, l'edificio ottiene un punteggio complessivo. È un'analisi qualitativa del comportamento ambientale dell'edificio, tramite la verifica del rispetto di alcune strategie energetico-ambientali ormai consolidate. L'obiettivo è quello di progettare edifici a basso impatto ambientale e a basso consumo energetico.

Per perseguire questo obiettivo è necessario ridurre sensibilmente l'utilizzo di energia per procurare benessere termico all'interno degli edifici, tramite scelte da effettuarsi relativamente alla progettazione, ai metodi costruttivi, ai materiali utilizzati, alla corretta scelta delle soluzioni impiantistiche, tramite indicatori di impatto ambientale. I consumi incidono circa per il 70-80% sugli impatti ambientali generati dall'edificio nel suo ciclo di vita, a causa dell'energia consumata dagli utenti nelle loro attività, come il riscaldamento e la produzione di acqua calda, condizionamento, uso elettrodomestici, cottura cibi, illuminazione artificiale; alle strategie di risparmio energetico viene generalmente e giustamente attribuito un ruolo primario per la salvaguardia ambientale.

Sono molto più diffusi i sistemi e gli strumenti per l'individuazione della qualità energetica degli edifici in fase di utilizzo, mentre meno incidente appare il processo di analisi delle altre fasi di vita dell'edificio e degli aspetti ambientali globali. In altri paesi europei il recepimento delle certificazioni, prevede in alcuni modelli anche l'attenzione alle emissioni di CO₂. L'obiettivo di queste certificazioni è quello di evidenziare la possibilità di ridurre gli impatti ambientali, dati sia i consumi

energetici dell'edificio in fase d'utilizzo che gli impatti prodotti da elementi accessori e componenti impiantistici del sistema. Quindi nel conteggio finale, oltre all'energia utilizzata nella fase utile, anche quella consumata nella fase di estrazione, di lavorazione di materiali che andranno a costituire il prodotto finito, la sua gestione energetica considerandone la durata, la manutenzione e la sostituzione. Anche la fase di trasporto implica considerevoli impatti ambientali, quindi è importante non sottovalutare neanche l'importanza della reperibilità in loco dei diversi componenti; anche la definizione dello scenario di fine vita diventa fondamentale, in quanto incide in modo rilevante il suo smaltimento. Questi aspetti vengono spesso sottovalutati dal progettista, ma incidono ampiamente nel bilancio ambientale. Non è sufficiente quindi analizzare il componente impiantistico fino alla sua collocazione in cantiere, ma è necessario allargare i confini del sistema e provare ad ipotizzare per quanto possibile, le fasi di manutenzione e dismissione, che sommate andranno ad integrare il ciclo di vita completo del complesso edilizio e grazie alla metodologia LCA (Lyfe Cicle Assesment) permetteranno di ottenere un quadro degli impatti ambientali utile e veritiero. Questo strumento di analisi permetterà una valutazione degli impatti e sarà possibile confrontare diverse tipologie di impianti, analizzando il loro impatto ambientale riflesso nell'intero ciclo di vita e anche di valutare l'efficienza energetico-ambientale nell'utilizzo di fonti rinnovabili, al fine di poter scegliere la tecnologia impiantistica più vantaggiosa per lo specifico manufatto architettonico in oggetto. È tuttavia vero che non si possono fare delle generalizzazioni, in quanto l'edificio rappresenta un prodotto unico con specifiche peculiarità e ubicazione; quindi la valutazione delle prestazioni energetico ambientali del componente non potrà mai essere formulata con criteri di esaustività prescindendo dalle caratteristiche globali dello stesso. Effettuando uno studio LCA si ottiene un approccio completo della valutazione del danno ambientale relativo all'edificio, e permette di ottenere un quadro complessivo in cui il danno ambientale dovuto alla vita dei materiali da costruzione utilizzati viene sommato a quello dei consumi energetici in regime d'utilizzo e a quello del fine vita dell'intera opera. Questo tipo di approccio al settore edile permette di determinare il valore di ogni singolo edificio e di costruirne un complessivo profilo ambientale ed energetico. La novità in queste strategie è l'uso dell'LCA come processo iterativo tra analisi energetica ed analisi ambientale, al fine di una progettazione globale a minor impatto ambientale. Concentrando l'attenzione sul ciclo di vita complessivo di un edificio e nello specifico sulla fase di uso e gestione, è possibile ottenere i dati fondamentali in merito alle prestazioni energetiche degli edifici ottenendo la possibilità di ridurre i consumi di energia e delle emissioni inquinanti e verificando ed adottando le strategie da percorrere per realizzare edifici più sostenibili. Questi accorgimenti permettono di fare scelte applicative più indicate per una riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio relativo alla climatizzazione invernale ed estiva, per limitare le dispersioni termiche, per ridurre i consumi energetici, per un corretto utilizzo dei sistemi impiantistici a basso consumo e per l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili. Gli indici di prestazione energetica (suggeriti dalle normative vigenti D.Lgs. 192/05 e D.Lgs. 311/06) e gli indici di valutazione ambientale permettono di fare scelte vantaggiose dal punto di vista ambientale.

Strategie da adottare nella progettazione

Per far sì che ci sia un'effettiva diminuzione degli impatti nel settore edilizio occorre agire in maniera sinergica sia sul fronte della produzione edilizia (e quindi sugli impatti dovuti all'approvvigionamento di materie prime, risorse energetiche, produzione, riciclaggio, dismissione di rifiuti da demolizione) sia sul fronte della progettazione dell'edificio (risparmio energetico, tecniche costruttive per la manutenzione e il disassemblaggio, flessibilità e adattabilità per prolungare la vita utile dell'edificio, riqualificazione).

Se da un lato occorre operare un controllo dei flussi energetici e di materia che attraversano l'edificio, al fine di ridurre gli impatti in termini di consumi di risorse e di produzione di inquinamento e rifiuti, dall'altro occorre mantenere comunque al centro dell'attenzione l'obiettivo fondamentale di ogni processo edilizio che è quello di costruire uno spazio che garantisca un'adeguata qualità di vita agli abitanti che lo andranno ad occupare e che gli permetta di svolgere le funzioni ivi previste. Vengono individuati due soggetti di attenzione ambientale: l'edificio nel suo complesso (comprese le relazioni tra edificio e intorno) e i singoli componenti edilizi analizzati lungo il loro ciclo di vita.

Nello sviluppo di una strategia di progettazione che risponda a queste esigenze si sono delineati diversi approcci: architettura bioclimatica, bioarchitettura, architettura ecologica, progettazione ambientale. Definire in realtà una distinzione tra le diverse categorie è difficile. In molti casi i termini sono utilizzati come sinonimi l'uno con l'altro. Diversi sono anche i risultati di questi approcci. Nella Tabella 1.3 si riportano le diverse soluzioni analizzandole in base agli aspetti di sostenibilità.

Nell'industria edilizia sostenibilità significa porsi obiettivi in tutte le fasi di vita di un edificio: progettazione, costruzione e gestione di edifici, in temi di ecologia, economia, società e cultura: le misure non si limitano ad un'efficienza energetica più alta, ma si estendono anche all'utilizzo di materiali da costruzione ecocompatibili, un isolamento termico migliorato e strategie avanzate di design. Accanto ai fattori puramente ecologici, vengono considerati anche altri aspetti, per esempio le spese nel ciclo di vita, aspetti per la salute o socioculturali.

Progettazione sostenibile significa ridurre al minimo l'impatto delle costruzioni sulla salute dell'uomo e sull'ambiente, attraverso un limitato consumo di risorse non rinnovabili e l'utilizzo di materiali non nocivi. È una scienza interdisciplinare che si occupa di tutto ciò che concerne il rapporto uomo-edificio-ambiente. Questo legame risale alla preistoria, quando l'uomo ha avvertito la necessità di costruirsi un riparo per proteggersi dagli agenti atmosferici (pioggia, vento, freddo ...) ed ha creato le prime architetture. Queste erano profondamente radicate nel territorio: sfruttavano le materie disponibili in loco e sviluppavano tecniche costruttive legate alla cultura materiale e alle tradizioni del luogo. Dunque l'ambiente, inteso come clima e come fonte di materie prime, condizionava profondamente l'architettura e determinava le sue caratteristiche. Con il passare del tempo gli edifici si sono evoluti e, dalla capanna primitiva, si è giunti ai grattacieli moderni. I nuovi materiali, l'ampia disponibilità di energia e la rapida evoluzione delle tecnologie hanno spezzato l'antico legame edificio-ambiente, che da sempre aveva detenuto un ruolo fondamentale nella progettazione. L'edificio ha così assunto il ruolo di contenitore, una sorta di barriera ermeticamente sigillata che separa l'interno dall'esterno. Il risultato di questa inversione di tendenza ha avuto ripercussioni negative sia sull'uomo che sull'ambiente: gli edifici moderni sono infatti causa di inquinamento sia dell'ambiente interno che di quello esterno. L'inquinamento indoor può essere ricondotto alle moderne tecniche di costruzione e alle emanazioni derivanti da alcuni materiali di comune impiego (vernici, laccature, rivestimenti sintetici ...).

Tabella 1.3 Architettura e sostenibilità, soluzioni a confronto (Binderholz Bausysteme GmbH)

ASPETTO	Soluzione/Definizione				
	Casa a basso consumo energetico	Casa a basso livello di emissioni	Green Building	High Performance Building	Edificio sostenibile
Funzionalità				+	+
Coefficiente energetico	+	(+)	+	+	+
Intensità delle risorse	(+)	(+)	+	(+)	+
Compatibilità ambientale	(+)	+	+		+
Salute	(+)	(+)	+	(+)	+
Aspetti socioculturali			(+)		+
Costi nel ciclo di vita					+
Valore / Utile					+
Qualità tecnica					+

La progettazione sostenibile si propone di risolvere questi problemi riallacciando l'antico legame tra uomo, edificio e ambiente, reciprocamente dipendenti l'uno dall'altro. Le mura degli edifici assumono il ruolo di "terza pelle" per l'uomo: la nostra prima pelle è il tessuto cutaneo, la seconda l'abbigliamento, la terza, appunto, l'edificio in cui viviamo. Ciò che accomuna questi tre "strati" è il fine, ovvero garantire protezione e benessere all'organismo, riparandolo dagli agenti esterni che potrebbero danneggiarlo, ma permettere allo stesso tempo uno scambio proficuo con esso.

The Natural Step, un'organizzazione fondata nel 1989 per sviluppare e diffondere il Framework di Sviluppo Sostenibile Strategico (FSSS), sintetizza in otto punti i principi di una progettazione sostenibile:

- Analizzare il sito dove sorge o sorgerà l'edificio, per sfruttarne le potenzialità e individuare gli elementi perturbatori ed inquinanti
- Analizzare le esigenze degli occupanti, in modo che il progetto sia a misura di chi vi abita
- Utilizzare materiali bio-ecocompatibili, cioè non devono danneggiare né l'uomo né l'ambiente, valutandoli in funzione al loro ciclo di vita, cioè devono essere a basso consumo energetico nella produzione, nel trasporto, nella messa in opera e nel caso di demolizione con prevenzione dei rifiuti
- Progettare l'edificio in modo da contenere il suo fabbisogno energetico in funzione delle condizioni climatiche locali: orientare correttamente l'edificio e i locali al suo interno, massimizzare i guadagni solari e minimizzare le dispersioni (in inverno), evitare fenomeni di surriscaldamento e favorire il raffrescamento passivo (in estate), valutare la collocazione più opportuna delle aperture
- Utilizzare impianti ad alta efficienza energetica che sfruttino fonti energetiche rinnovabili, come il sole, la biomassa, etc
- Garantire un alto comfort interno ed esterno all'edificio:
 - comfort termico
 - comfort luminoso
 - comfort acustico
- Rispettare l'ambiente integrandosi senza danneggiarlo, sfruttarne le potenzialità e limitare gli effetti negativi (p.es. emissioni ridotte, rumori, odori)
- Garantire una gestione e una manutenzione efficiente dell'edificio.

Anche dal punto di vista economico è sostenibile e appetibile un approccio di questo tipo. Un sondaggio di Ernst & Young Real Estate GmbH presso investitori, amministratori di fondi d'investimento e inquilini ha dato i seguenti risultati.

*I principi di
sostenibilità di
Natural Step*

*La sostenibilità è
convenienza
economica*

La convenienza degli investimenti in edifici sostenibili viene nel frattempo ampiamente riconosciuta da scienziati, ricercatori e persino dagli investitori. Secondo i dati esistenti, grazie a canoni di locazione più alti, meno locali vuoti, rapidità di cessione in affitto nonché a costi energetici e spese gestionali più basse, gli edifici sostenibili garantiscono entrate nette più alte degli edifici tradizionali. Negli studi è stata analizzata la performance degli edifici amministrativi sulla base della banca dati del gruppo US CoStar. A tal fine gli autori hanno confrontato gli edifici con buoni rating di sostenibilità e/o efficienza energetica con costruzioni tradizionali. Le analisi hanno dato un risultato simile: gli introiti degli affitti e i prezzi di vendita sono superiori almeno del 5 % rispetto agli edifici tradizionali, i canoni di locazioni sono più alti di 3 - 8 punti di percentuale. Che nella costruzione di edifici sostenibili anche le spese aggiuntive siano quantificabili con chiarezza, in particolare in considerazione delle agevolazioni statali, viene dimostrato da una serie di ulteriori studi.

Valutazione della sostenibilità

Nell'edilizia i bilanci ecologici esistono da anni. Essi consentono sia di considerare il ciclo di vita di un prodotto che di osservare diversi settori problematici dell'ambiente per impedire uno spostamento di danni ecologici. I metodi e gli strumenti di oggi permettono una panoramica completa del complesso sistema dell'opera ed aprono al progettista nuove vie e soluzioni in una delle questioni centrali dell'edilizia sostenibile. In futuro per gli operatori nel campo edile ci saranno a disposizione strumenti sempre più adeguati, pratici ed utili. La questione della considerazione del ciclo di vita ecologico nella progettazione di un'opera, con il requisito di realizzare costruzioni sostenibili, acquisterà sempre più importanza per gli investitori e i progettisti.

Sistemi di valutazione della sostenibilità dei manufatti edilizi che sfruttano l'analisi del ciclo di vita (LCA):

- Breeam: British Research Establishment Environmental Assessments Method. Messo a punto in Gran Bretagna nel 1990. Si tratta di un meccanismo a punteggio. È un sistema che si basa sull'attribuzione di un punteggio rispetto ad ognuno dei requisiti fondamentali: Management, Health and Wellbeing, Energy, Transport, Water, Material and Waste, Landuse and Ecology, Pollution.
- Leed: Leadership in Energy and Environmental Design. Il sistema è uno standard applicato in oltre 100 Paesi nel mondo, sviluppato dall'U.S. Green Building Council (USGBC), associazione no profit che promuove e fornisce un approccio globale alla sostenibilità. Gli standard LEED, elaborati dall'USGBC e presenti anche in Italia grazie al lavoro di GBC ITALIA, indicano i requisiti per costruire edifici ambientalmente sostenibili, sia dal punto di vista energetico che dal punto di vista del consumo di tutte le risorse ambientali coinvolte nel processo di realizzazione. LEED è un sistema volontario e basato sul consenso, per la progettazione, costruzione e gestione di edifici sostenibili ad alte prestazioni; può essere utilizzato su ogni tipologia di edificio e promuove un sistema di progettazione integrata che riguarda l'intero edificio. È un sistema flessibile e articolato che prevede formulazioni differenziate per le nuove costruzioni, edifici esistenti piccole abitazioni, pur mantenendo una impostazione di fondo coerente tra i vari ambiti.
- Protocollo ITACA: è stato sviluppato a partire dalla metodologia del GBC ed è indirizzato agli edifici residenziali di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazioni importanti. Le linee guida costituiscono lo strumento tecnico di valutazione valido per la certificazione Energetico - ambientale degli edifici. Lo strumento di valutazione permette di stimare il livello di sostenibilità ambientale di un edificio residenziali e misurando la sua prestazione rispetto a 49 criteri

raggruppati in 18 categorie a loro volta aggregate in 5 aree di valutazione: qualità del sito, consumo di risorse, carichi ambientali, qualità ambientale indoor, qualità del servizio. Per ogni criterio l'edificio riceve un punteggio che può variare da -1 a +5, assegnato confrontando l'indicatore calcolato con i valori della scala di prestazione (benchmark) precedentemente definiti. Lo zero rappresenta lo standard di riferimento riconducibile a quella che deve considerarsi come la pratica costruttiva corrente, nel rispetto delle leggi o dei regolamenti vigenti.

- HQE(Haute Qualité Environnementale) proposto da CSTB e utilizzato in Francia
- GBTool (Green Building Tool) realizzato da GBC utilizzato in Canada
- CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency) realizzato da JSBC utilizzato in Giappone.

1.1 Analisi del ciclo di vita - LCA

“From cradle to grave” ovvero “dalla culla alla tomba”. È questo lo slogan che prende piede per illustrare in maniera sintetica ed efficace i contenuti della metodologia LCA. Le sue origini si collocano verso la fine degli anni 60, quando alcuni ricercatori cominciarono ad occuparsi con approccio scientifico al problema del consumo delle risorse, con particolare riferimento a quelle non rinnovabili. Apparve evidente, già dai primi tempi, il tentativo di spostare l'attenzione e cambiare il punto di vista con il quale si affrontava il problema; cambiare cioè radicalmente la prospettiva con la quale veniva analizzato l'impatto dell'oggetto sull'ambiente. Si guardava al prodotto con un'ottica totalmente nuova e divenne evidente come l'unica strada efficace per studiare in maniera completa i sistemi produttivi da un punto di vista ambientale era quello di ampliare il sistema di riferimento esaminando le prestazioni e seguendo passo per passo il cammino delle materie prime, a partire dalla loro estrazione, attraverso tutti i processi di trasformazione e di trasporto, fino al loro ritorno alla terra sotto forma di rifiuti. La metodologia viene applicata con lo scopo di confrontare diversi tipi di soluzioni alternative, siano esse materiali che tecniche, per arrivare ad una scelta ottima dal punto di vista del comportamento ambientale e per minimizzare quelli che sono gli impatti all'interno di una determinata filiera. Si cerca di individuare le fasi più problematiche nel processo per poter intervenire e migliorare l'intero ciclo. Cercare di migliorare le prestazioni energetiche ed ambientali di un processo nella sua totalità. Questa è di fatto la novità assoluta per quei tempi, visto che fino ad allora si cercava l'efficienza nella singola unità operativa, non guardando al suo inserimento in un contesto decisamente più ampio e non curanti del fatto che i miglioramenti di una singola operazione potessero essere solo apparenti o temporanei, o peggio ancora potessero trasferire il problema in un altro comparto. La LCA ha un approccio globale, che ha come obiettivo quello di evitare il problema dello spostamento degli impatti da una fase del ciclo di vita ad un'altra, da un problema ambientale all'altro, da una regione ad un'altra. La valutazione di sostenibilità di prodotti e tecnologie considera normalmente gli impatti su tre dimensioni: sociale, ambientale ed economica. Una prospettiva di ciclo di vita su tutte e tre le dimensioni consente di evitare il fatto che gli impatti evitati su uno dei tre ambiti abbiano ripercussioni negative sulle altre due dimensioni (Finnveden et al, 2009). L'approccio LCA è concentrato sull'analisi del soddisfacimento delle funzioni proprie di ogni settore produttivo o dei servizi e dunque per definizione trasversale (Baldo et al, 2008).

Sviluppo dell'LCA

Risalgono agli anni '70 le prime concrete applicazioni di questa metodologia che veniva definita “Life Cycle Thinking”, utilizzata come supporto alle decisioni da parte di alcune grandi aziende statunitensi e dall'Agenzia per la protezione dell'ambiente americana. In questo caso si parlava di studi svolti sotto il nome di REPA, Resource and Environmental Profile Analysis, che avevano come obiettivo la caratterizzazione del ciclo di vita di alcuni materiali impiegati in importanti produzioni industriali. Lo scopo era quello di confrontare diversi materiali per medesime applicazioni ed è certamente questa l'opportunità che ha fatto crescere il numero di applicazioni di LCA ai sistemi produttivi: confrontare dal punto di vista ambientale funzioni equivalenti con l'utilizzo di soluzioni e materiali diversi (Baldo et al, 2008). Solo diversi anni dopo, venne coniato il termine LCA, durante il congresso SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) del 1990, proprio per uniformare e caratterizzare al meglio l'obiettivo delle analisi svolte fino ad allora sotto altri nomi:

“La valutazione del ciclo di vita è il processo per identificare i carichi ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, identificando e quantificando energia e materiali utilizzati ed emissioni rilasciate nell'ambiente, per valutarne l'impatto e per identificare e valutare le opportunità di miglioramento. La valutazione

comprende l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, passando dalla estrazione e trasformazione delle materie prime, fabbricazione del prodotto, trasporto e distribuzione, utilizzo, riuso, stoccaggio, riciclaggio, fino alla dismissione”.

L'organizzazione originaria di una LCA prevedeva tre fasi principali da attuare successivamente e ciclicamente, così come rappresentato in Figura 1.1. Tale organizzazione, che costituisce ancora la struttura fondamentale del metodo attuale, è composta da una fase iniziale di inventario, in cui vengono organizzati i dati raccolti e convertiti in forma standard per fornire una descrizione completa delle caratteristiche fisiche del sistema produttivo oggetto di studio. La fase successiva di interpretazione prevede la correlazione dei dati fisici dell'inventario con i problemi di carattere ambientale ed in ultimo una fase di miglioramento in cui il sistema produttivo è oggetto di campagne di simulazione per cercare di migliorare la sua efficienza complessiva.

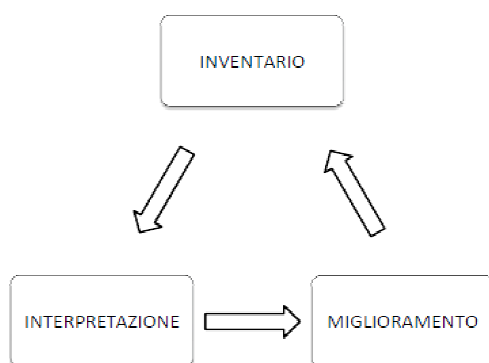


Figura 1.1 Fasi LCA secondo la struttura originaria SETAC

La LCA sta riscuotendo un consenso sempre maggiore negli ultimi anni e si sta decisamente affermando come strumento oggettivo di calcolo e valutazione dei carichi energetici ed ambientali causati da un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali utilizzati e dei rifiuti. L'analisi del ciclo di vita può essere considerata come l'evoluzione della tecnica di analisi energetica, ed è accompagnata da altri strumenti di valutazione come :

- Valutazione del rischio ambientale;
- Analisi Costi/ Benefici;
- Analisi comparativa del Rischio;
- Analisi dell'Impatto Socio-economico.

La LCA è uno strumento essenziale per la minimizzazione degli impatti ambientali coordinata ad una simultanea azione di spinta verso uno sviluppo o sostenibile della società. La valutazione del ciclo di vita come significativo strumento per la gestione ambientale è diventata un criterio riconosciuto a livello internazionale: è la base per stabilire le politiche ambientali e viene generalmente usata per guidare la produzione pulita, lo sviluppo della produzione "green" e il design in armonia con l'ambiente. Proprio in quest'ottica vanno affermandosi nuove misure normative che cercano di inserire il "life cycle thinking" nei meccanismi del commercio (Junnila, 2008).

Inserito nel più ampio contesto dello sviluppo ambientale sostenibile, la metodologia LCA, viene standardizzata ad opera dell'ISO, International Organization for Standardization, che ne permette il diffondersi dell'utilizzo e le applicazioni ai diversi settori. Il metodo LCA necessario alla quantificazione degli

Teoria e norme ISO

impatti ambientali, viene presentato e standardizzato nella serie ISO 14040. Nella prima versione ogni fase veniva affidata ad una norma specifica, così come raffigurato in Tabella:

Tabella 1.4 Norme ISO della serie 14040

Norma ISO	Descrizione
UNI EN 14040	Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita Principi e quadri di riferimento (1998)
UNI EN 14041	Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita - Definizione obiettivo e del campo di applicazione e analisi dell'inventario (1999)
UNI EN 14042	Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (2001)
UNI EN 14043	Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Interpretazione del ciclo di vita (2001)

Nel più recente aggiornamento del 2006, vi è l'introduzione della norma ISO 14044 che va ad accorpate le ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043, snellendo la normativa. Il recepimento da parte del Comitato di Normazione Europeo è mostrato dal suffisso EN, mentre il recepimento e traduzione a livello nazionale per mezzo dell'Ente Italiano di Unificazione è indicato dalla sigla UNI.

Tabella 1.5 Norme ISO dopo l'aggiornamento del 2006

Norma ISO	Descrizione
UNI EN 14040	Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita Principi e quadro di riferimento (2006)
UNI EN 14044	Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita Requisiti e linee guida (2006)

Oggi la norma ISO 14040 descrive la LCA come una tecnica che studia e valuta gli aspetti ambientali e o i potenziali impatti ambientali associati ad un prodotto durante tutta la sua vita, attraverso:

- la compilazione di un inventario di ciò che di rilevante entra o esce dal sistema
- la valutazione dei potenziali impatti ambientali associati ad input e output
- l'interpretazione dei risultati riguardanti le fasi di analisi dell'inventario e di stima degli impatti in relazione agli obiettivi dello studio.

Le principali categorie di impatto ambientale che vengono indicate riguardano l'utilizzo di risorse, la salute dell'uomo e le conseguenze ecologiche. Uno degli obiettivi prioritari di una LCA è quello di provvedere ad un inquadramento il più completo possibile delle interazioni fra un'attività e l'ambiente; inoltre è importante permettere la comprensione di conseguenze ambientali dovute ad un'attività antropica. Per fare ciò bisogna fornire strumenti per definire gli effetti di tali attività e identificare strategie per la mitigazione e il miglioramento, offrendo un valido metro di confronto tra possibili produzioni alternative. Per ogni LCA devono essere seguiti principi e quadro di riferimento esposti, anche se campo di applicazione, limiti, livello e dettagli dipendono dal soggetto e dall'utilizzazione prevista. Risulta inoltre uno strumento molto efficace in quanto permette di visualizzare in maniera immediata gli impatti causati nei vari comparti, e di rispondere prontamente

programmando un intervento scegliendo fra le diverse possibilità e scartando l'alternativa meno efficiente.

1.1.1 Struttura LCA

Come già detto la struttura moderna di una LCA viene sintetizzata dalle norme UNI EN ISO 14040, nella quale si identificano quattro momenti principali, così come rappresentati in figura:



Figura 1.2 Struttura LCA proposta dalla ISO 14040:2006

1. Definizione scopi e obiettivi (Goal and Scope Definition): è la fase preliminare in cui vengono definiti obiettivi e finalità dello studio, l'unità funzionale, l'ambito di applicazione, i confini del sistema, assunzioni e limiti
2. Analisi di inventario (Life Cycle Inventory-LCI): in questa fase si ricostruisce il vero e proprio ciclo di vita del processo o attività, la via attraverso cui fluiscono l'energia e i materiali e permette il funzionamento del sistema. Stilare quindi l'inventario di ciclo vita significa costruire il modello analogico del sistema reale che si intende studiare, individuando e quantificando i flussi di materia ed energia in ingresso e in uscita
3. Analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment-LCIA): si cerca di evidenziare le modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e al consumo di risorse, ovvero si studia l'impatto ambientale provocato dall'attività o processo; in questa fase si ha il passaggio dal dato effettivo calcolato durante la fase di inventario al giudizio di pericolosità ambientale
4. Interpretazione e miglioramento (Life Cycle Interpretation): ultimo step della LCA, che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati.

L'approccio metodologico di una LCA è per sua natura di tipo dinamico e iterativo e, come si intuisce, la parte fondamentale è quella di disponibilità dei dati e delle informazioni necessarie allo sviluppo dei calcoli (Baldo et al, 2008).

Da un punto di vista normativo, la ISO 14040 introduce così l'argomento:

"Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l'applicazione prevista. L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio".

Appare quindi evidente come le finalità dello studio influenzino notevolmente le scelte e le ipotesi di lavoro, in quanto queste possono cambiare sensibilmente e presentare scenari completamente diversi. Dalle finalità ed esigenze

Definizione scopi e obiettivi

dell'utilizzatore discendono quindi alcune caratteristiche fondamentali dello studio: l'ampiezza del ciclo di vita, le eventuali alternative da considerare, l'integrazione con aspetti non ambientali, la qualità dei dati e la scelta dei parametri, l'estensione della fase di valutazione e miglioramento, il livello di dettaglio a cui arrivare. Prima di procedere con l'analisi dei dati bisogna quindi definire il sistema che si vuole analizzare e l'unità con cui normalizzare le informazioni raccolte.

- "Sistema": un qualsiasi insieme di dispositivi che realizzano una o più precise operazioni industriali aventi la medesima funzione; delimitato da appropriati confini fisici sia geografici che tecnologici rispetto al sistema ambiente con cui ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input output. Tali sistemi hanno un gran numero di operazioni collegate fra di loro, anche in modo molto complesso, dai flussi di materiali, di energia e di prodotti finali.
- "Unità Funzionale": misura della prestazione del flusso in uscita funzionale del sistema prodotto. Il suo scopo principale è fornire un riferimento a cui legare i flussi in ingresso e in uscita, fondamentale per la comparabilità dei risultati di una LCA. La scelta di tale unità è arbitraria e dipende essenzialmente dallo scopo per cui i sottosistemi e il sistema globale sono stati creati. La sua definizione è fondamentale per la buona riuscita dello studio, ma anche per una migliore comprensione delle informazioni. Per una maggiore chiarezza, la norma ISO 14040 introduce anche il concetto di "Flusso di Riferimento", che altro non è che la quantità di bene o di servizio necessario per ottenere l'unità funzionale.
- "Confini del Sistema": determinano le unità di processo che devono essere incluse nell'LCA e dipendono da fattori come le applicazioni previste dello studio, le ipotesi assunte, i criteri di esclusione, le costrizioni prodotte dai dati e dai costi, il pubblico destinatario. Possono essere determinati, inizialmente, con criteri geografici, tecnologici e temporali; poi sarà compito del richiedente lo studio, escludere determinate fasi dell'intero ciclo produttivo. Anche in questo caso però, giustificando ogni singola scelta, visto che la cancellazione di fase del ciclo di vita, processi, input o output è consentita solo nel caso in cui ciò non modifichi in modo significativo le conclusioni globali dello studio.
- "Requisiti di qualità dei dati": indicano in termini generali le caratteristiche dei dati necessari per lo studio. Dovrebbero comprendere fattori relativi al tempo, fattori geografici e riproducibilità dei metodi utilizzati nell'analisi, fonti dei dati e loro rappresentatività, incertezza dell'informazione.

Analisi d'inventario

L'analisi di inventario è sicuramente il momento più importante di una LCA; il suo compito è quello di fornire dati oggettivi, che solo successivamente verranno elaborati e commentati con lo scopo di trarne delle indicazioni e valutazioni utili. La ISO 14040 provvede a definire quello che è una sorta di codice, che garantisce l'affidabilità dell'inventario, e lo rende meno soggettivo e più standardizzato. La stesura dell'inventario, e quindi l'accertamento dell'affidabilità dei dati raccolti costituisce un'importante fase. Per prima cosa è importante costruire un diagramma di flusso, opportunamente dettagliato, con le operazioni che concorrono a formare il sistema in esame. La distinzione dei dati utilizzati nella fase di inventario li classifica come "primary data" nel caso vengano raccolti direttamente sul campo; "secondary data" nel caso invece questo non sia possibile e si effettui la raccolta in letteratura o da banche dati appositamente predisposte. Dati generalmente derivati sono quelli relativi all'industria energetica del Paese in cui viene effettuata l'analisi, oppure quelli relativi alle emissioni dei trasporti. Nel caso di indisponibilità delle prime due categorie, allora si fa riferimento ai dati terziari, cioè provenienti da stime e valori medi. Quando si usano dati derivati è importante controllare la fonte, la data di pubblicazione e in ogni caso confrontarli, se possibile, con altre pubblicazioni. Operazioni fondamentali nella fase di inventario diventano quindi la raccolta dati, che va ad individuare per ogni singola unità di processo compresa nei confini del sistema, gli input energetici e ausiliari, le materie prime, i prodotti, i coprodotti e i rifiuti, le emissioni in aria, gli scarichi in

acqua e nel suolo e gli aspetti ambientali coinvolti. Vi sono poi le procedure di calcolo per quantificare gli input e gli output rilevanti di un sistema di prodotto, ovvero la validazione dei dati raccolti, collegare i dati alle unità di processo e all'unità funzionale e affinare i confini del sistema. Il calcolo dei flussi energetici dovrebbe considerare le diverse fonti elettriche e combustibili utilizzati, l'efficienza di conversione e distribuzione del flusso energetico, così come gli input e gli output associati alla generazione e all'uso dello stesso. L'ultimo aspetto da considerare in questa fase è il problema dell'allocazione. Infatti la maggioranza di sistemi industriali produce, oltre a quelli principali, anche diversi altri prodotti che vengono definiti coprodotti o sottoprodotti e quindi sorge il problema di suddividere i dati di consumi ed emissioni per ciascuno di essi. L'operazione di allocazione consiste quindi proprio nell'associare i carichi energetici ed ambientali ai vari prodotti dei singoli processi. Di conseguenza, una delle prime operazioni da svolgere è quella di suddividere il sistema in oggetto in sottosistemi ognuno dei quali produce o utilizza un singolo prodotto e che, una volta riaggregati, riportino al sistema di partenza. La via più comunemente utilizzata prevede l'utilizzo, come termine di riferimento, delle caratteristiche fisiche dei prodotti, come ad esempio massa, volume, energia o exergia. Affinché sia effettuata la scelta del parametro più adatto, è necessario conoscere in maniera dettagliata il funzionamento del sistema e dei vari sottosistemi identificati. Qualora non sia possibile utilizzare una relazione fisica per allocare i vari carichi, si può procedere ad un'allocazione basata su altre relazioni, come ad esempio il valore economico del prodotto; nonostante risulti molto interessante questa scelta a volte non viene considerata molto corretta a causa dell'enorme variabilità del mercato e può portare a risultati privi di significato. I risultati di un inventario di ciclo vita sono generalmente presentati in sei principali categorie di parametri:

1. materie prime;
2. combustibili primari;
3. feedstock;
4. rifiuti solidi;
5. emissioni in aria;
6. emissioni in acqua;

Essi vengono raggruppati per comodità e per semplificare le successive operazioni di valutazione degli impatti in "risultati energetici" (2,3) e "risultati ambientali" (1,4,5 e 6). All'interno dei risultati energetici è importante considerare sia l'energia diretta che quella indiretta, ovvero quella richiesta per la produzione e il trasporto di combustibili che forniscono l'energia diretta. Si deve inoltre tener conto anche dell'energia di feedstock, cioè di quella parte di energia intrinsecamente contenuta nelle materie prime e della gross energy, ovvero della totalità dell'energia estratta dalla terra per consentire il funzionamento del sistema produttivo. Fondamentale è anche esplicitare la provenienza dell'energia e suddividerla in rinnovabile o non rinnovabile.

LCIA: "Life Cycle Impact Assessment" è la terza fase di uno studio LCA, regolata dalla norma ISO 14044, consiste nel quantificare e valutare i risultati dell'inventario e quindi comprendere gli effetti ambientali, definiti come categorie d'impatto, associati al sistema. L'analisi degli impatti ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente (emissioni o reflui) e del consumo di risorse provocati dall'attività produttiva. La soggettività sottostante una valutazione di questo tipo richiede la massima trasparenza nell'esposizione delle assunzioni effettuate. Un impatto è una qualsiasi modificazione causata da un certo aspetto ambientale, ossia da un elemento che può interagire con l'ambiente; ogni impatto è associato a uno o più effetti ambientali. Questa fase ha come fine ultimo quello di ottenere un valore numerico

Analisi degli impatti

che caratterizzi gli effetti ambientali su base di ipotesi o convenzioni stabilite, suddividendoli in base alla scala di azione in effetti globali, regionali o locali. Questo aspetto dipende fondamentalmente dalle caratteristiche fisiche e chimiche dell'emissione che genera l'effetto e dalle condizioni ambientali. L'obiettivo fondamentale sarà quindi l'imputazione di consumi ed emissioni, ottenuti in fase d'inventario, a specifiche categorie d'impatto riferibili a effetti ambientali conosciuti. La struttura di una LCIA è composta da una serie di elementi obbligatori, i cosiddetti "mandatory elements" che convertono i risultati della fase di inventario, LCI, in opportuni indicatori che possono essere utilizzati direttamente o come base per le successive valutazioni opzionali. Importante è poi definire il criterio di valutazione da adottare, e cioè il criterio in base al quale collegare i valori ai corrispondenti giudizi sulla maggior o minor gravità dell'impatto; questo viene effettuato nella seconda fase della LCIA, che viene indicata come opzionale ed ha l'obiettivo di normalizzare i vari indicatori calcolati ed ottenere degli indici sintetici con cui valutare complessivamente il sistema.

Per costruire le categorie di impatto sono utilizzati i seguenti aspetti principali:

- Ecologia: effetti su popolazione ed ecosistema (ecological effects);
- Salute: effetti su salute e sicurezza dell'uomo (human health and safety effects);
- Risorse: esaurimento di risorse di energia e di materiali (resource depletion);
- Riflessi sociali i: impatto su tutte le attività umane che interagiscono con il sistema considerato e degrado dell'habitat (habitat degradation).
-

Su questa base vengono scelti gli specifici effetti caratterizzanti le varie categorie d'impatto:

- effetto serra (scala globale)
- assottigliamento fascia d'ozono (scala globale)
- acidificazione (scala regionale)
- eutrofizzazione (scala regionale/locale)
- formazione smog fotochimico (scala regionale)
- tossicità per uomo e ambiente (scala regionale/locale)
- consumo delle risorse non rinnovabili (scala globale)

Le fasi obbligatorie del LCIA sono:

1. Definizione delle categorie di impatto, degli indicatori di categoria e dei modelli di caratterizzazione
2. Attribuzione dei risultati LCI alle categorie di impatto selezionate (classificazione): La classificazione prevede di distribuire i valori di tutte le emissioni provocate direttamente e indirettamente dalle operazioni considerate, ovvero i risultati della fase di analisi di inventario, nelle categorie di effetti ambientali;
3. Calcolo degli indicatori di categoria (caratterizzazione): questa fase permette di determinare in modo omogeneo il contributo delle singole emissioni; così facendo risulta possibile esprimere quantitativamente, in un'opportuna unità di misura, il contributo che a ogni categoria fornisce l'operazione in esame. Si determinano quindi, tramite delle operazioni di standardizzazione basate sui potenziali (fattori di caratterizzazione) adottati dall'IPCC, i valori degli indicatori di categoria precedentemente definiti per ogni effetto ambientale considerato. Operativamente, la caratterizzazione consiste nella conversione, tramite i fattori di caratterizzazione, dei risultati dell'LCI in unità comuni, e l'aggregazione di questi all'interno delle diverse categorie di impatto.

Le fasi opzionali della LCIA sono:

4. Confronto degli indicatori ambientali calcolati con dei valori di riferimento (normalizzazione): La normalizzazione mette in luce l'importanza relativa di

ogni indicatore del sistema di prodotto in studio rispetto ad alcuni valori di riferimento. Alcuni esempi di valori di riferimento sono gli input ed output totali per una data area, gli input ed output totali per una data area a livello procapite, gli input ed output totali su uno scenario di riferimento. La normalizzazione può modificare le conclusioni tracciate durante le fasi obbligatorie dell'analisi degli impatti;

5. Raggruppamento: Il raggruppamento è l'assegnazione delle categorie di impatto in uno o più gruppi;
6. Pesatura: Tale fase è il processo di conversione e aggregazione degli indicatori delle diverse categorie di impatto usando fattori numerici a scelta, non scientificamente fondati.

Nell'ultima parte di un LCA vengono analizzate le fasi precedenti, allo scopo di stabilire se i risultati ottenuti sono coerenti con gli obiettivi prefissati; determinante è anche la coerenza del sistema di riferimento, dei confini del sistema, delle unità di processo e dell'unità funzionale. Nella norma ISO14040 la "Life Cycle Interpretation" è definita come il momento in cui realizzare una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e quella degli impatti, per proporre utili raccomandazioni in conformità con gli scopi e gli obiettivi dello studio.

L'esperienza del progettista unita alla competenza del life cycle engineer diventano quindi la base per impostare gli studi di fattibilità di eventuali cambiamenti. L'approccio è di tipo iterativo, nel senso che ogni passo sviluppato in questa fase deve essere riesaminato in un'ottica di LCA: in questo modo lo spettro di tutte le possibili soluzioni viene valutato e classificato a seconda dei rendimenti energetici e ambientali di ciclo di vita e correlato ai classici indici economici e prestazionali. La norma ISO 14044 sottolinea come solo una chiara e comprensibile, completa e consistente presentazione dei risultati delle fasi precedenti è in grado di fornire quelle indicazioni utili a impostare i possibili miglioramenti del sistema in esame. In particolare nella norma vengono specificate le seguenti fasi operative:

- identificazione degli aspetti principali evidenziati dai risultati delle fasi precedenti
- valutazione
- conclusione

1.1.2 Gli indicatori

Ogni singolo LCA rappresenta uno studio a sé stante e quindi necessita la giusta valutazione per le categorie di impatto da prendere in considerazione, che sono espresse mediante indicatori, indici che consentono di valutare gli impatti ambientali connessi al ciclo di vita di un determinato materiale. Il metodo degli indicatori si definisce un metodo di pesatura e valutazione degli effetti ambientali che danneggiano gli ecosistemi o la salute umana su scala europea, proponendosi come strumento di semplice utilizzo per la valutazione, in fase di progetto, delle diverse opzioni che possono presentarsi durante l'analisi di prodotto definito. Il passaggio ad un'aggregazione di indicatori avviene attraverso metodi che portano al calcolo di indici che forniscono una sintesi ulteriore dell'impatto ambientale.

Il tipo di approccio utilizzato è definito bottom-up, che dal livello più basso, cioè l'inventario con i dati disaggregati e senza la stessa unità di misura e si cerca di aggregare in categorie e di valutarne le importanze relative per giungere ad un valore finale che definisca l'impatto. Il criterio con cui vengono scelte le possibili metodologie fa riferimento alle procedure di scelta, di aggregazione e di ponderazione dei diversi indicatori che determinano l'indice finale. La scelta dell'indicatore migliore dipende dal contesto in cui viene effettuata l'analisi LCA e dal singolo operatore.

*Interpretazione e
miglioramento*

In generale quindi si distinguono diversi impatti associati al prodotto e ciascuno di essi è riconducibile a molteplici cause; pertanto, per determinare gli indicatori, i dati sugli specifici consumi (di energia e di materia prima) e sulle singole emissioni devono essere rielaborati.

Gli indicatori di impatto, distinguibili in semplici e complessi.

Gli indicatori semplici più comuni sono:

- Effetto serra potenziale (GWP - Global Warming Potential) [KgCO₂ eq.]
- Ossidazione fotochimica [kg C₂H₂]
- Acidificazione potenziale (AP) - [KgSO₂-eq]
- Eutrofizzazione [kg PO₄ eq]
- Contenuto di energia primaria (fonti rinnovabili e non) (PEC r, PEC nr) [MJ]

L'energia, rinnovabile e non, non è considerata propriamente un impatto ambientale ma viene considerata comunque come indicatore.

Il pedice eq (equivalente) indica, appunto, che in quella determinata categoria sono inclusi gli effetti di tutte le emissioni o tutti i consumi, che concorrono a determinare l'impatto in esame, esprimendoli con un'unica unità di misura.

Gli indicatori complessi sono elaborati, invece, sulla base di quelli semplici. Per una corretta comprensione del valore è quindi necessario conoscere le metodologie di calcolo adoperate per il calcolo dell'indice. Ad esempio per l'indice OI₃, sono utilizzati, attribuendovi identico peso, tre indicatori semplici: PEC nr, GWP e AP. L'indice adimensionale ricavato consente di paragonare agevolmente più materiali, ma trascura alcuni impatti ambientali che in particolari contesti possono essere rilevanti. Gli indicatori complessi più comuni sono: OI₃, Eco-Indicator99, Ecological Footprint.

In generale i vari impatti, per potere essere confrontati e sommati, devono essere trasformati in un numero adimensionale.

$$\text{Impatto/coeff. normalizzazione impatto} = x_1$$

- Impatto: che indica l'impatto associato a una determinata quantità (l'impatto può essere GWP, acidificazione o qualsiasi altro impatto)
- coeff. normalizzazione impatto: che indica il coefficiente di normalizzazione associato a un determinato impatto (l'impatto può essere GWP, acidificazione o qualsiasi altro impatto)
- x₁ numero adimensionale = impatto normalizzato

Se io effettuo la sommatoria degli x_i dei vari impatti dei materiali in gioco nel mio caso studio ottengo un numero puro. Questa sommatoria conferisce uguale importanza a tutti gli impatti che sto considerando e può essere un indice di impatto ambientale.

Tuttavia, una volta ottenuto il numero puro associato ai diversi impatti in gioco (x_i), può essere che non sia vero che tutti gli impatti abbiano lo stesso peso. Il peso dell'impatto dipende dall'effetto che devo considerare.

$$\sum x_i \cdot \omega_i = \text{indicatore finale} = \text{ecopunto} \quad \text{con} \quad \sum \omega_i = 1$$

Dato che il peso di ciascun impatto è qualcosa di soggettivo noi poniamo che tutti gli impatti abbiano lo stesso peso. Quindi, se io ho a che fare con 5 impatti: 100%/5=20%, allora l'ω_i associato a ciascun impatto varrà 0,20.

L'ecopunto sarà il parametro di confronto tra i diversi prodotti studiati. All'ecopunto è bene associare l'impatto di energia rinnovabile e non.

La normalizzazione e la pesatura degli indicatori

OI_{3 Kon}

L'indice ecologico OI₃ è utilizzato per le costruzioni edilizie. Viene ricavato dai tre indicatori ecologici: PEC nr (consumo di risorse energetiche non rinnovabili), GWP (potenziale di riscaldamento globale) e AP (potenziale di acidificazione). L'intervallo di valori dell'indice OI_{3 Kon} varia per le costruzioni abituali da -30 a 120 punti circa. Maggiore è il valore OI_{3 Kon}, maggiore è il costo ecologico della costruzione. I punteggi negativi si ottengono solo con costruzioni particolarmente ottimizzate sotto il profilo ecologico.

Uno degli indicatori presenti nel software Simapro è l'Eco-Indicator 99, sviluppato dalla Pré Consultant per conto del Ministero dell'Ambiente Olandese e che presenta un aspetto interessante rispetto ad altri indicatori. Infatti, questa tipologia di indicatore tratta la delicata fase della valutazione degli impatti e di pesatura, in modo più specifico, attribuendo un punteggio in base all'entità per ogni categoria di impatto. Valuta le emissioni in aria, acqua e suolo in base a 3 macrocategorie di danno.

Le 3 macrocategorie di danno ambientale sono :

1. Salute umana (Human Health): che a sua volta comprende diverse categorie d'impatto :
 - Danni causati da sostanze cancerogene;
 - Danni causati da sostanze organiche alle vie respiratorie;
 - Danni causati da sostanze inorganiche alle vie respiratorie;
 - Danni causati dai cambiamenti climatici;
 - Danni causati dalle radiazioni ionizzanti;
 - Danni causati dall'assottigliamento dello strato d'ozono.

L'unità di misura utilizzata per quantificare il danno è il DALY (Disabled Adjusted Life Years), una scala sviluppata dalla World Health Organization e dalla World Bank che attribuisce un valore tra 0 (perfetta salute) e 1 (morte). Il DALY distingue anche gli anni trascorsi da ammalato (YLD) da quelli persi per morte prematura (YLL).

2. Qualità dell'Ecosistema valutato in base alle seguenti categorie d'impatto:
 - ecotossicità;
 - eutrofizzazione e acidificazione;
 - uso del suolo, inteso come sfruttamento.

In questo caso avremo come unità di misura il PAF (Potentially Affected Fraction) espresso in m^2 anno per la categoria d'impatto "ecotossicità", mentre il PDF (Potentially Disappeared Fraction) espresso sempre in m^2 anno per le categorie di impatto Eutrofizzazione/Acidificazione e Uso del suolo. Le due unità di misura rappresentano la variazione del numero di specie vegetali presenti in un territorio come indicatore biologico della salute dell'ecosistema e quindi la diminuzione relativa, disappeared, o il danneggiamento relativo, affected, del numero di specie espresso sotto forma di frazione moltiplicati per l'area sulla quale questi sono rilevati ed al periodo di misurazione. La diminuzione del numero di specie è rappresentata dal PDF e può essere interpretato come la frazione di specie che hanno un'alta probabilità di non sopravvivere nell'area considerata, a causa delle condizioni di vita sfavorevoli.

3. Risorse (Resources) vengono considerati gli impatti dovuti all'estrazione e allo sfruttamento delle risorse minerali e dei combustibili fossili.

In questo caso l'unità di misura è il MJ Surplus, che rappresenta la differenza fra l'energia necessaria attualmente e quella necessaria nel futuro all'estrazione di un'unità di risorsa e quella indispensabile in un istante futuro. Viene quindi calcolato il surplus di energia, in MJ, che sarà necessario all'estrazione di un kg di materiale nel momento in cui il consumo di quel materiale sarà cinque volte quello estratto dall'umanità prima del 1990. La scelta di un fattore $N=5$ è totalmente arbitraria, ma valida perché comunque l'obiettivo è quello di misurazioni relative. Stabilito il fattore di danno associato a ogni risorsa utilizzata o sostanza emessa, questo viene moltiplicato per la quantità di sostanza per ottenere un valore di danno complessivo relativo ad una certa categoria d'impatto. Poiché ciascun danno è espresso mediante diverse unità di misura (DALY, PDF; MJ Surplus) si procede con una fase di "normalizzazione" che permette di rendere omogenei e confrontabili i danni calcolati nella fase di caratterizzazione. Successivamente la fase di valutazione permette di esprimere l'impatto associato al prodotto attraverso

un indice ambientale finale. I danni normalizzati vengono moltiplicati per opportuni fattori di peso che indicano l'importanza relativa delle diverse categorie di danno e sommati restituiscono un unico valore l'Ecoindicatore appunto (espresso in eco-punti) che quantifica l'impatto complessivo associato al prodotto. Sono presenti tre diverse versioni dell'Ecoindicator 99, ognuna delle quali consente valutazioni di sfumature diverse, caratterizzate da ipotesi e assunzioni diverse, a seconda delle caratteristiche della LCA, dei suoi obiettivi e delle convinzioni dell'utente che la realizza. Per definire questa "soggettività" si è fatto uso della "Cultural Theory" (Thompson M. et al., 1990), che prende in considerazione i comportamenti delle persone rispetto a due dimensioni dell'esistenza umana: l'attaccamento al gruppo e il grado di indipendenza nei confronti di imposizioni esterne. Da questo tipo di analisi e dalla differente combinazione di valori delle due dimensioni nasce un certo stile di vita, che influisce sulle scelte e sul sistema di valori di ciascun individuo e del gruppo a cui appartiene. Sulla base di questa teoria sono stati ricavati 5 archetipi: Individualista, Gerarchico, Egualitario, Fatalista e Autonomo. Poiché però il "fatalista" tende a non avere opinioni proprie e ad uniformarsi alla massa e "l'autonomo" ha un pensiero completamente sfuggente a qualsiasi tipo di modellizzazione nell'Eco-Indicator 99 sono stati considerati 3 profili culturali:

- Individualista (Individualist): è una persona libera da qualsiasi legame; nella sua visione, tutto è provvisorio e soggetto a negoziazione. Vengono incluse solo relazioni causa-effetto provate e si utilizza una prospettiva temporale a breve termine. La preferenza accordata alle situazioni sperimentate rispecchia l'atteggiamento dell'individualista di considerare discutibile tutto ciò che non gli trasmette certezza, così come il fatto che non possa essere provato che gli effetti a lungo termine potranno essere annullati dal progresso della scienza e della società. Nella categoria di danno Human Health viene effettuata una pesatura sulla base dell'età, in quanto si considerano più significativi i danni potenziali sulle persone di età compresa tra i 20 ed i 40 anni.
- Gerarchico (Hierarchist): è un soggetto che possiede forti legami sia con il gruppo sia con le sue regole; crea una forte stabilità, favorendo azioni di controllo su di sé e sugli altri; Vengono incluse teorie e risultati che sono riconosciute da enti politici scientifici con sufficiente sicurezza. L'orizzonte temporale è a medio termine.
- Egualitario (Egalitarian): possiede un forte attaccamento al gruppo, ma non alle sue imposizioni; non riconoscendo differenze di ruolo, rende ambigue le relazioni all'interno del gruppo scatenando spesso conflitti. Si utilizza il principio di precauzione e, in presenza di dubbio sulla pericolosità di un'operazione o di una sostanza, la si include. La prospettiva temporale considerata è a lungo termine. Questa versione è la più estesa, ma di conseguenza è anche quella che contiene le maggiori incertezze ed errori nei dati.

La classificazione e la valutazione dei tre archetipi hanno forti implicazioni sulla metodologia; l'effetto più evidente è che non si ha un unico modello, ma tre distinte versioni dello stesso modello: Eco-indicator 99 (E), Eco-indicator 99 (I) ed Eco-indicator 99(H). All'interno dei codici di calcolo viene raccomandato l'utilizzo della versione gerarchica, in quanto tale prospettiva risulta essere in maggior accordo con gli altri metodi di valutazione. Le altre due prospettive possono essere comunque utilizzate per rafforzare l'analisi.

IPCC 2007 GWP 100 a

Il metodo IPCC 2007 è un aggiornamento del precedente metodo del 2001. I quantitativi di gas serra vengono normalmente espressi in kgCO_2eq , attraverso un'operazione di standardizzazione basata sui potenziali di riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential). Questi potenziali, adottati dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) sono calcolati per ciascun gas serra tenendo conto della sua capacità di assorbimento delle radiazioni e del tempo della

sua permanenza nell'atmosfera. Infatti il potenziale di riscaldamento globale (GWP) è la misura di quanto un dato gas serra contribuisce all'effetto serra. Questo indice è basato su una scala relativa, che esprime il gas considerato con un'equivalente massa di CO₂, il cui GWP è per definizione pari a 1. Ogni valore di GWP è calcolato per uno specifico intervallo di tempo. Il quantitativo di CO₂ equivalente viene calcolato come:

$$CO_{2\ eq} = \sum_i GWP_i * E_i$$

Con

- CO₂ equivalente= emissioni di CO₂ equivalente in kt/anno;
- GWP_i= "Global Warming Potential", coefficienti IPCC pari a 1, 0,021 e 0,31 rispettivamente per CO₂, CH₄ e N₂O (IPCC,2001);
- E_i= emissioni di CO₂(in kt/anno), CH₄ e N₂O (in t/anno).

Il protossido di azoto ha un elevato effetto negativo rispetto alla CO₂, ma si deve anche aggiungere che tale composto è prodotto in quantità minime rispetto al biossido di carbonio. Anche il metano ha un potenziale d'impatto 25 volte superiore a quello della CO₂, ma si deve sempre considerare che anch'esso è normalmente prodotto in piccole quantità. Il GWP di una sostanza che abbia le caratteristiche di un gas serra è in pratica misurato rispetto il rapporto tra il rilascio istantaneo di 1 kg di tale sostanza, causato dall'assorbimento della radiazione termica, e il rilascio fornito dall'emissione di 1 kg di CO₂ essendo entrambi contributi valutati per un periodo di tempo T, corrispondente agli anni di permanenza dei gas nell'atmosfera. L'assorbimento del calore di una qualsiasi sostanza è governato dalla radioactive forcing, una misura dell'influenza che un fattore ha, sull'alterazione del bilancio tra l'energia in entrata e in uscita nel sistema terra-atmosfera; un valore positivo di questa misura indica che la terra sta trattenendo calore e questo fa alzare la temperatura media globale. I GWP sono calcolati per diversi periodi di esposizione, chiamati "tempi orizzonte", questi sono di solito uguali a 20, 100 o 500 anni. È consuetudine fare riferimento ai GWP a 100 anni, anche perché al crescere del tempo di integrazione crescono le incertezze dei calcoli. Il GWP di un gas è definito come :

$$GWP_{(x)} = \frac{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_i(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [C_r(t)] dt}$$

Con

- α_i = Efficienza radiativa, rappresenta la variazione del forzante radiativo per ogni incremento unitario della concentrazione dell'agente "i" in atmosfera come gas serra;
- C_i(t) = Concentrazione dell'agente, funzione del tempo;
- a_r = Efficienza radiativa della sostanza riferimento (CO₂);
- C_r(t) = Concentrazione della sostanza di riferimento
- TH= Time Horizont, orizzonte temporale sul quale si fonda l'analisi del GWP

Dove al numeratore viene espressa la misura dell'impatto del gas che stiamo analizzando e al denominatore la misura dell'impatto di un gas di riferimento. Il gas di riferimento normalmente utilizzato è il biossido di carbonio (CO₂) cosicché tutti i GWP sono espressi in kg di CO₂ equivalente.

La Cumulative Energy Demand quantifica la parte di energia sottratta alla natura e immagazzinata nella formazione di un prodotto espressa in MJ equivalenti. Sviluppata da Boustead & Hancock nel 1979, la Cumulative Energy Demand Analysis è un metodo di analisi che permette di poter valutare i consumi energetici legati ad un sistema produttivo; è un sistema di valutazione di tipo midpoint

Cumulative Energy Demand

approach, che si focalizza sull'analisi dell'impiego delle risorse energetiche, suddivise in cinque categorie d'impatto:

- energia non rinnovabile, fossile;
- energia non rinnovabile, nucleare;
- energia rinnovabile, biomasse;
- energia rinnovabile, eolica, solare, geotermica;
- energia rinnovabile, idroelettrica.

Grazie a questo metodo si può calcolare sia l'energia diretta, impiegata in un processo produttivo, che quella indiretta, cioè la quota parte di energia stoccata nel prodotto e pronta per essere consumata. Il metodo si focalizza solo sui carichi energetici legati alle diverse operazioni coinvolte in un sistema produttivo, che sebbene costituiscano un elemento importante per la valutazione della prestazione ambientale di un sistema, da solo non può fornire un quadro esaustivo dell'effettivo carico ambientale di un sistema produttivo. Il metodo va quindi affiancato ad altri sistemi di valutazione, che comprendono le categorie d'impatto relative ad altri effetti ambientali e relativi fattori di caratterizzazione.

Ecological Footprint

L'impronta ecologica è definita come la misura di superficie biologicamente produttiva di mare e di terra richiesta per produrre le risorse consumate e per assorbire parte dei rifiuti generati dal consumo di combustibili fossili di una popolazione (Wackernagel & Rees, 1996). Confrontando dunque l'impronta di un individuo (o regione, o stato) con la quantità di terra disponibile pro-capite (cioè il rapporto tra superficie totale e popolazione mondiale) si può capire se il livello di consumi del campione è sostenibile o meno. Huijbregts ha approfondito l'impronta ecologica utilizzando dalla banca dati Ecoinvent come ecoindicatore di valutazione delle LCA (Huijbregts et al. 2008).

L'impronta ecologica di un prodotto, in questo contesto, è definita come la somma integrata nel tempo di ogni occupazione del suolo, diretta (EF_d) ed indiretta (EF_n), e della superficie necessaria all'assorbimento delle emissioni legate ai combustibili fossili ed al cemento utilizzati dal processo di produzione (EF_{CO2}):

$$EF = EF_{CO_2} + EF_d + EF_n$$

La EF_{CO2} rappresenta l'area biologicamente produttiva aggiuntiva richiesta per sequestrare, attraverso la riforestazione, la CO₂ atmosferica legata all'utilizzo dei combustibili fossili e quella proveniente dalla produzione del cemento:

$$EF_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot \frac{1 - F_{CO_2}}{S_{CO_2}} \cdot EqF_f$$

Dove:

- M_{CO_2} = emissione specifica di CO₂ in kg per unità di prodotto
- F_{CO_2} = frazione di CO₂ assorbita dagli oceani
- S_{CO_2} = frazione rimossa dalla biomassa (kgCO₂m⁻²a⁻¹)
- EqF = fattore di equivalenza per la tipologia di uso del suolo "foresta".
- Considerati i valori dei parametri di Tabella 8, il risultato è di circa 2,7 m² a per
- ogni kg di CO₂ emessa.

Tabella 1.6 Parametri per il calcolo dell'impronta ecologica (Wackernagel et al., 2005)

Parametro	Abbreviaz.	Unità	Valore
Frazione di CO ₂ assorbita dagli oceani	FCO2	-	0,3
Tasso di sequestro di CO ₂	SCO2	Kg CO ₂ m ⁻² a ⁻¹	0,4
Intensità di emissioni di CO ₂ da combustibili fossili	ICO2	Kg CO ₂ MJ ⁻¹	0,07

Nei prodotti del database Ecoinvent, l'occupazione di suolo diretta, è definita dall'area edificata, di foresta, di coltivazione, di pascolo e di destinazione idroelettrica e viene espressa in $m^2 a$.

L'impronta ecologica diretta, destinata a queste cinque tipologie di destinazione, è calcolata come segue:

$$EF_{diretta} = \sum_i A_i \cdot EqF_i$$

Dove:

- A_i = occupazione di area a destinazione d'uso i [$m^2 a$]
- EqF_i = fattore di equivalenza relativo alla destinazione d'uso i esima.

I fattori di equivalenza normalizzano ciascun tipo di occupazione del suolo del database Ecoinvent secondo la sua bioproduttività, come mostrato in Tabella, che riporta anche la tipologia d'area e la sua classificazione secondo i criteri di CORINE. Il programma CORINE (Coordinated Information on the European Environment) è stato istituito, a livello comunitario, nel 1985 allo scopo di raccogliere, coordinare e garantire l'uniformità dei dati sullo stato dell'ambiente e le destinazioni d'uso nell'intera Europa. Il programma ha realizzato un riferimento cartografico comune (Land Cover Map) basato sull'interpretazione di immagini da satellite Landsat

Si può notare dalla Tabella che le terre molto produttive come le coltivazioni, ma anche il costruito, sono caratterizzate da un elevato fattore EqF , al contrario di quanto avviene per le terre destinate al pascolo, considerate poco produttive.

Tabella 1.7 Fattori di equivalenza globale delle destinazioni d'uso Ecoinvent .

Ecoinvent classification	CORINE classification	Footprint classification	EqF (-)	Ecoinvent classification	CORINE classification	Footprint classification	EqF (-)
Occupation, arable, non-irrigated	CORINE 211	Cropland	2.2	Occupation, pasture and meadow, intensive	CORINE 231a	Pasture	0.5
Occupation, construction site	CORINE 133	Built-up area	2.2	Occupation, permanent crop, fruit, intensive	CORINE 222a	Cropland	2.2
Occupation, dump site	CORINE 132	Built-up area	2.2	Occupation, shrub land, sclerophyllous	CORINE 323	Forest	1.4
Occupation, dump site, benthos	CORINE 132a	Fisheries	0.4	Occupation, traffic area, rail embankment	CORINE 122d	Built-up area	2.2
Occupation, forest, intensive	CORINE 31b	Forest	1.4	Occupation, traffic area, rail network	CORINE 122c	Built-up area	2.2
Occupation, forest, intensive, normal	CORINE 31b1	Forest	1.4	Occupation, traffic area, road embankment	CORINE 122b	Built-up area	2.2
Occupation, industrial area	CORINE 121	Built-up area	2.2	Occupation, traffic area, road network	CORINE 122a	Built-up area	2.2
Occupation, industrial area, benthos	CORINE 121c	Fisheries	0.4	Occupation, urban, discontinuously built	CORINE 112	Built-up area	2.2
Occupation, industrial area, built up	CORINE 121a	Built-up area	2.2	Occupation, water bodies, artificial	CORINE 512a	Hydropower	1
Occupation, industrial area, vegetation	CORINE 121b	Built-up area	2.2	Occupation, water courses, artificial	CORINE 511a	Hydropower	1
Occupation, mineral extraction site	CORINE 131	Built-up area	2.2				
Occupation, pasture and meadow, extensive	CORINE 231b	Pasture	0.5				

Ed infine viene calcolata la $EF_{nucleare}$ come fosse una forma di energia fossile:

$$EF_n = E_n \cdot I_{CO_2} \cdot \left| \frac{1 - F_{CO_2}}{S_{CO_2}} \right| \cdot EqF_f$$

Dove:

- E_n = utilizzo specifico di energia derivata da fonti nucleari spesa per una unità di prodotto [MJ]
- I_{CO_2} = intensità di emissione di CO_2 media per unità di combustibile fossile [$kgCO_2MJ^{-1}$]

1.1.3 LCA nel settore dell'edilizia

LCA è uno strumento oggettivo e scientifico che permette al progettista di scegliere, durante la fase di progettazione (sia che si tratti di nuova costruzione che di ristrutturazione) la soluzione meno impattante a livello ambientale per ogni elemento tecnico e sub-sistema tecnologico, tra quelli esaminati. Inoltre, sia i costi esterni (ambientali) che quelli interni (economici) possono essere un importante parametro decisionale per l'utente dell'edificio.

*LCA dei materiali
isolanti*

Conoscere l'impatto ambientale del ciclo di vita dei materiali è fondamentale per scegliere in modo corretto; purtroppo però, soprattutto in Italia, non sono molti i produttori che hanno scelto di adottare una politica di trasparenza nei confronti del mercato comunicando natura, tipo di processo industriale e relativi costi ambientali. A questa difficoltà oggettiva di reperire i dati si somma inoltre la scarsa diffusione del concetto di confronto a parità di funzione e qualità/durata del servizio.

Nel caso dei materiali isolanti la funzione e l'affidabilità nel tempo possono essere ben rappresentate dalla prestazione di trasmittanza (U) o resistenza termica (R) che il prodotto garantisce in modo efficace per l'intera durata in vita dell'edificio. La base di qualsiasi scelta è un confronto tra diverse opzioni che consentono di svolgere la stessa funzione.

Confrontare i dati di impatto ambientale dei prodotti isolanti, a parità di funzione svolta, presenta sicuramente alcune difficoltà ma è oggi possibile adottando l'approccio delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) - Environmental Product Declarations che prevedono, per ogni gruppo di prodotti, l'elaborazione di una specifica tecnica, le Product Category Rules (PCR), specificatamente redatte per permettere confronti equifunzionali. Al di là della scarsità di informazioni numeriche e attendibili, anche il confronto tra i pochi studi di LCA disponibili presenta molti aspetti critici. Tra i più importanti segnaliamo:

- il settore degli isolanti termici non ha ancora sviluppato un PCR (Product Category Rules) comune. In assenza di questo documento non si ha la certezza che l'analisi del ciclo di vita sia stata condotta con gli stessi obiettivi, le stesse regole e gli stessi confini del sistema preso in esame. Il confronto tra LCA e EPD (Environment Product Declaration) sviluppate con diversi criteri può risultare falsato.
- in assenza di un PCR comune non è disponibile un'unità funzionale per l'analisi comparativa di LCA di diversi prodotti. Nel caso degli isolanti termici l'unità funzionale da adottare dovrebbe essere o la trasmittanza (U) o la resistenza termica (R). In realtà le poche LCA disponibili esprimono spesso i dati in costo energetico per chilogrammo di prodotto, a volte senza specificare ne' la densità del materiale esaminato ne' la sua prestazione funzionale.

LCA di un edificio

Oltre che sui materiali è possibile svolgere un'analisi LCA sull'intero edificio.

LCA di un edificio è definita come "from cradle to grave" perché tiene conto della vita dei materiali dalla loro produzione fino al loro smaltimento.

Per fare una valutazione LCA di un edificio occorre anzitutto definire la durata della vita utile dell'edificio stesso (in relazione alla funzione a cui è destinato) e del sistema impiantistico da cui dipendono infatti i cicli manutentivi e la quantità di energia complessiva derivante dall'uso dell'edificio.

Successivamente si definiscono i flussi ambientali in entrata e in uscita delle seguenti fasi di vita dell'edificio:

1. Fase di costruzione dell'edificio (analisi LCA dei materiali e dei componenti di tutti i sistemi costruttivi). Questa fase racchiude le quantità di materiali e componenti edili impiegati vengono definite sulla base del computo metrico estimativo. Questo passaggio rappresenta la fase di inventario da cui partire per effettuare l'analisi degli impatti ambientali della fase di costruzione dell'edificio. Per ogni materiale e componente occorre associare alle quantità computate i flussi in entrata ed in uscita relativi a:
 - Estrazione/coltivazione delle materie prime e trasporto;
 - produzione dei materiali edili;

- produzione vera e propria;
- trasporto in cantiere;
- messa in opera.

A questi vanno sommati i flussi relativi ai processi di produzione dei macchinari da cantiere (scavatori, montacarichi, gru) e le durate di utilizzo stabilite dal crono programma.

In questa fase si calcolano quindi anche gli impatti “from cradle to gate” dei materiali

2.a *Fase d'uso e gestione* (analisi LCA dei consumi idrici ed energetici) occorre quantificare i fabbisogni annuali richiesti in termini di:

- consumi idrici;
 - consumi elettrici per illuminazione;
 - energia primaria per la climatizzazione invernale;
 - energia primaria per la climatizzazione estiva;
 - energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria ACS
- Dati di consumo sono forniti dalla certificazione energetica.

2.b *Fase di gestione* (analisi LCA degli impatti relativi alle opere di manutenzione): i cicli manutentivi di materiali e componenti dell'edificio e del sistema impiantistico, necessari per il perdurare nel tempo delle prestazioni loro richieste in fase progettuale, sono definiti in relazione alla durata di vita utile ipotizzata dell'edificio. Si definiscono i materiali e componenti da sostituire perché obsoleti o usurati e i relativi flussi ambientali per:

- nuova produzione;
- trasporto al sito;
- messa in opera;

Dati riguardanti la fase di manutenzione sono forniti dal libretto d'uso e manutenzione dell'edificio realizzato dal progettista.

3. *Fase di fine vita dei materiali edili e Fase di fine vita dell'impianto*: per ogni tipo di materiale e componente impiegati, in relazione a come questi sono stati messi in opera e connessi con gli altri materiali, si deve definire lo scenario di fine vita a minor impatto ambientale. Occorre analizzare il cantiere di demolizione e stabilire dal cronoprogramma le durate d'uso dei macchinari, quindi analizzare lo smaltimento e/o il riciclaggio dei materiali.

Il passo conclusivo di tale procedura è la somma delle fasi di valutazione sopra enunciate: $LCA_{tot} = LCA_{materiali} + LCA_{componenti} + LCA_{sistemi\ costruttivi} + LCA_{materiali\ e\ componenti\ del\ sistema\ impiantistico} + LCA_{fase\ di\ fine\ vita\ dei\ materiali\ edili\ e\ dell'impianto} + LCA_{impatti\ relativi\ alle\ opere\ di\ manutenzione} + LCA_{consumi\ idrici\ ed\ energetici}$.

In un'ottica di sostenibilità vanno computati parallelamente all'LCA va redatta un LCC dove si computano i costi, tenendo presente anche i costi indiretti sull'ambiente.

Per quanto riguarda la normativa specifica se le ISO 14040 forniscono i principi e il quadro di riferimento per effettuare e diffondere mediante relazione gli studi LCA, stabilendo certi requisiti minimi, per l'applicazione al settore edilizio, nello specifico alla scala di edificio, si fa riferimento alle norme ISO: ISO/CD 21930. Environmental declaration of building products; ISO/CD 21931. Framework for assessment of environmental performance of buildings and constructed assets; ISO/CD 21932. Terminology; ISO/CD 21929. Sustainability indicators; ISO/AWI 15392. General Principles ISO/DIS 15686-6. Buildings and construction assets – Service life planning – Part 6: Guidelines for considering environmental impacts.

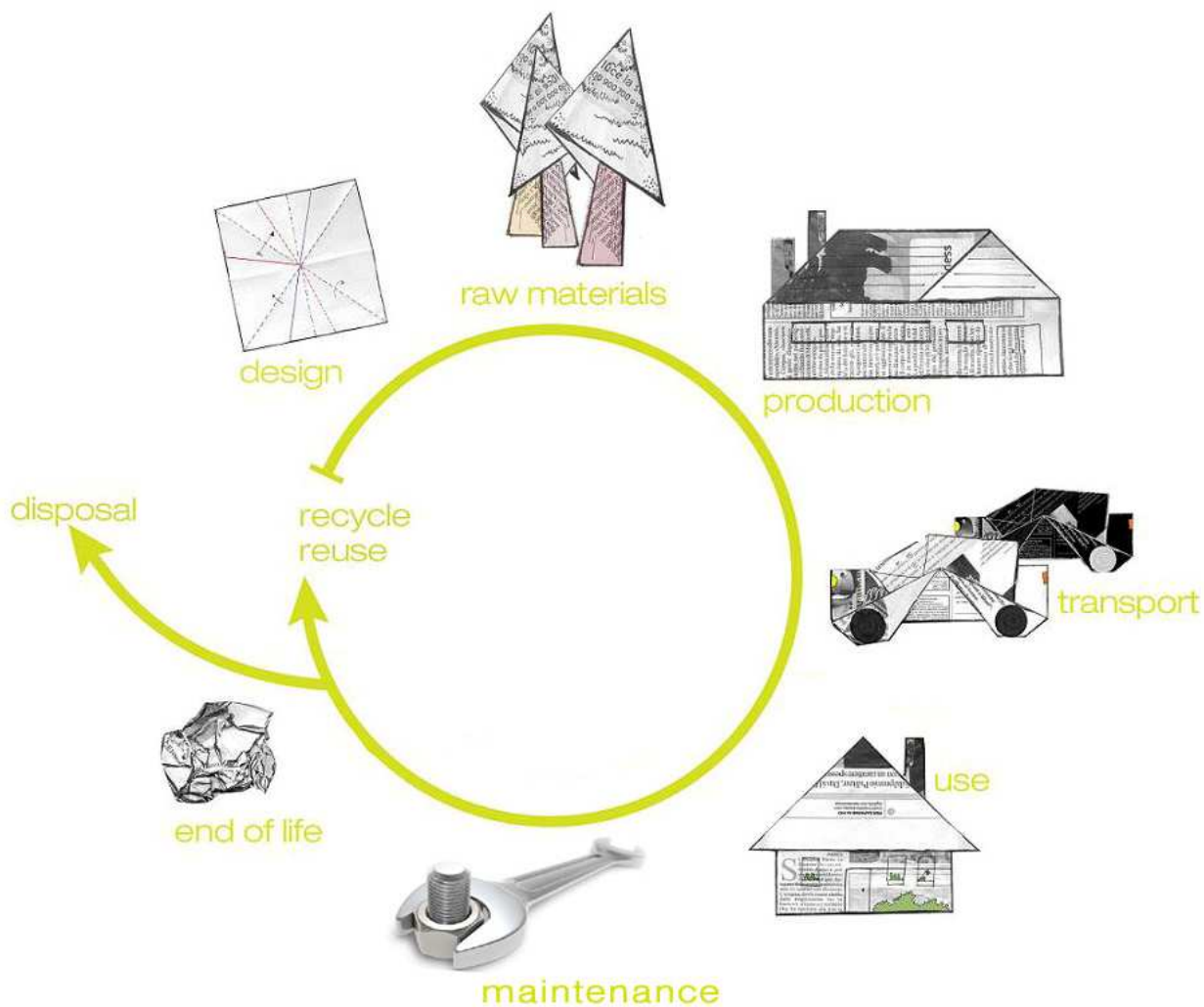


Figura 1.3 Schema del ciclo di vita di un edificio (La LCA in 5 domande)

Considerazioni

I limiti di questa tecnica di valutazione, che possono mettere in dubbio la scientificità del risultato, stanno nella disponibilità e accessibilità dei dati iniziali. Nel contesto italiano, dove non esiste una banca dati ufficiale, diventa necessario far riferimento a banche dati straniere con inevitabili approssimazioni dovute alla verifica di trasferibilità dei dati nel nostro contesto. Ciò, unitamente alla spesso scarsa disponibilità delle aziende a diffondere dati diretti su consumo e produzione di rifiuti, può rendere molto faticosa la fase di Life Cycle Inventory. Ad oggi la scarsità dei dati e la possibile disomogeneità delle valutazioni alla base dell'LCA rende difficili le comparazioni. Ciò non toglie che, almeno per i prodotti che hanno reso nota la loro analisi del ciclo di vita, siano possibili alcune riflessioni indicative.

Nelle analisi che verranno condotte nei prossimi capitoli si riporterà sempre la fonte e l'unità funzionale di paragone. Gli indicatori a cui faremo riferimento sono essenzialmente : energia consumata, e produzione di CO₂. In alcuni casi si farà riferimento anche a rifiuti solidi, inquinamento atmosferico e inquinamento idrico, GWP100, e consumo di risorse.

1.2 Materiali Ecofriendly: analisi della sostenibilità dei materiali edili

In estrema sintesi la sostenibilità di un materiale si definisce in relazione alla riduzione ai minimi termini del suo impatto ambientale riferito all'intero ciclo della sua vita. In altre parole, un materiale è tanto più sostenibile quanto minore è l'energia, da un lato, e la produzione di rifiuti, dall'altro, necessarie per l'estrazione delle materie prime di cui è fatto, per i cicli intermedi di lavorazione per l'imballaggio, il trasporto e la distribuzione, per l'applicazione, l'uso e il consumo e per l'eventuale riutilizzo o riciclo, ed infine per la sua dismissione o smaltimento finale. La sostenibilità di un materiale va valutata quindi "dalla culla alla tomba" attraverso un'attenta analisi della sua biografia. La complessità e la grande articolazione del settore produttivo rendono particolarmente arduo il compito di valutare la qualità ecologica dei materiali edili e la stesura quindi di corretti bilanci.

E' stato tracciato uno schematico elenco di materiali "consigliabili" per la realizzazione di edifici che rispondano a requisiti di sostenibilità. Occorre poi accompagnare i materiali individuati con indicazioni sulla scelta corretta e sui criteri di applicazione (Bioedilizia - prodotti e materiali per l'edilizia ecologica, bioedilizia e bioarchitettura).

Individuazione di alcuni materiali sostenibili in edilizia

- Materiali per fondazioni in cemento armato:
In bioedilizia si consiglia l'utilizzo di cemento puro, in cui sia certificata l'assenza di radioattività e la non additivazione in fase di produzione con materie seconde spesso provenienti da scarti di altre lavorazioni industriali, requisiti che si trovano più facilmente nel cemento bianco.
L' acciaio austenico e' un acciaio inossidabile che presenta una particolare microstruttura con bassi valori di permabilità magnetica. Queste proprietà paramagnetiche, annullano il fenomeno delle correnti indotte ed evitano possibili distorsioni del campo magnetico naturale.
- I materiali per le finiture superficiali:
La calce possiede ottime qualità biologiche, diffusa reperibilità, basso contenuto energetico in fase produttiva. Viene usata come legante per malte e intonaci e come componente per pitture. La calce idraulica (silicato di calcio, silicato bicalcico) può molto spesso sostituire il cemento nei massetti, nei sottofondi, negli intonaci rustici garantendo a queste opere maggiore traspirabilità, assorbenza, coibenza, doti fondamentali soprattutto negli intonaci per garantire regolazione termoigrometrica e quindi condizioni microclimatiche interne positive ed equilibrate. Il grassello di calce o calce spenta (idrato di calcio) è invece il materiale base per i lavori di finitura e soprattutto per gli intonaci.
- Pitture vernici e collanti
Resine vegetali, oli vegetali, cere vegetali, gomme e colle vegetali, spiriti vegetali, coloranti vegetali, prodotti di origine animale, sostanze minerali naturali elaborate
- I materiali per l'impermeabilizzazione
Con la bentonite, si possono realizzare strati impermeabili per proteggere fondazioni e murature contro terra in presenza di acqua. Con le cere e con gli oli si possono impregnare particolari carte di cellulosa o fibre riciclate, che si trasformano in guaine idrorepellenti per l'impermeabilizzazione sottotegola di copertura falda
- Materiali per materassini
Feltri di Juta, in canapa o lana di pecora possono essere utilizzati come materassini anticalpestio.

Per quanto riguarda i materiali per opere strutturali e isolamento ne tratteremo in maniera più approfondita successivamente.



Tipologie d'isolanti

1.2.1 I materiali isolanti

I materiali isolanti costituiscono una componente fondamentale nel sistema stratigrafico: è fondamentale il loro apporto da punto di vista dell'abbattimento dei consumi energetici. Paradossalmente qualsiasi isolante termico si utilizzi all'ambiente non può che fare bene: la loro funzione di prodotti per il risparmio energetico garantisce agli isolanti una patente ecologica che ben poche altre famiglie di prodotti possono vantare. Tuttavia da un'analisi di LCA from cradle to gate si evince che non tutti sono sostenibili.

L'Italia è uno dei paesi europei con il più basso utilizzo di materiali coibenti in edilizia; per cui oltre a capire quali materiali potrebbero essere usati in alternativa a quelli petrolchimici, sarebbe per prima cosa necessaria la formazione di una coscienza che prenda atto dell'utilità, anzi della necessità, in termini ambientali di isolare termicamente un edificio. Manca in Italia la cultura dell'isolamento termico che potrebbe limitare il fabbisogno di energia.

I materiali termoisolanti sono caratterizzati da una conduttività termica λ inferiore a $0,1 \text{ W/mK}$ e sono principalmente porosi e fibrosi. Vanno protetti dall'umidità con barriere impermeabili o tenuti ben ventilati poiché, in presenza di umidità, perdono rapidamente le loro proprietà termoisolanti in quanto l'aria viene espulsa dall'acqua. A seconda che si intervenga in luoghi umidi o asciutti è necessario utilizzare materiali con caratteristiche differenti.

La qualità di un isolante dipende dalla sua adattabilità ai modi e tradizioni nazionali, regionali e locali oltre che alle specifiche di mercato; materiali che sono ampiamente diffusi in alcune regioni, sono rari in altre, sebbene da un punto di vista scientifico sia giustificabile l'impiego di un qualsiasi materiale isolante. Le performance degli isolanti prodotti negli ultimi decenni si sono mantenute piuttosto invariate e possono essere considerate molto soddisfacenti dal punto di vista del trasferimento termico. Questo non deve portare alla conclusione sbagliata che i materiali attuali siano allo stesso livello di quelli utilizzati nel 1990; c'è stato un significativo miglioramento delle prestazioni ambientali e della tutela della salute dell'uomo durante questo periodo, scaturito dalla ricerca congiunta a livello accademico ed industriale.

Gli isolanti termici sono materiali di origine vegetale, animale, minerale o sintetica e a seconda dei casi sono adoperati sfusi o sotto forma di schiume, pannelli rigidi o materassini e feltri. La maggior parte del freddo o del caldo passa attraverso i muri perimetrali, ed è per questo che il loro isolamento può essere effettuato dall'interno, dall'esterno o a intercapedine.

Per effettuare un confronto corretto tra gli isolanti va utilizzata come unità funzionale la trasmittanza. In un certo senso vanno normalizzati a livello di prestazione. Solo se le prestazioni sono le stesse possiamo effettivamente confrontare gli impatti. In taluni casi però è conveniente confrontarli utilizzando come base lo spessore.

La prestazione di una parete è data dalla trasmittanza e dallo sfasamento termico. Questi due parametri dipendono dalle caratteristiche dei materiali che la compongono:

- la conduttività termica λ [W/mK]
 - densità o massa volumica ρ [kg/m^3]
 - coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore μ [-]
 - capacità termica specifica c [J/kgK]
 - diffusività termica [m^2/s]
- La conduttività termica è una proprietà fisica dei materiali, dipende dalla natura e dallo stato fisico degli stessi, ma non dalla forma. Indica la quantità di calore che attraversa un metro quadrato di materiale avente lo spessore di un metro, in presenza di una differenza di temperatura tra esterno e interno di un grado Kelvin. Ovviamente, quanto minore è la conduttività termica, tanto migliori

La trasmittanza come unità funzionale

saranno le proprietà termoisolanti del materiale. Dalla conduttività termica si ricava la resistenza termica R [$m^2 K/W$], calcolata come rapporto fra lo spessore dello strato e la conduttività termica del materiale di cui è composto lo strato; essa descrive la capacità isolante di un elemento lungo una direzione di dispersione rappresentando la capacità del materiale di opporsi al passaggio di calore.

- Il coefficiente μ di un materiale è un parametro, senza dimensione, che indica quante volte il materiale è più isolante al vapore rispetto ad uno strato d'aria ferma dello stesso spessore. Più è grande è il parametro maggiore sarà l'impermeabilità al vapore.
- La capacità termica di un materiale descrive la sua attitudine ad accumulare calore che successivamente viene riceduto all'ambiente. Tanto più la capacità termica è elevata tanto meno cambiano le temperature dell'ambiente interno al variare delle temperature esterne. In termini di grandezze termofisiche essa è rappresentata dal calore specifico che indica la quantità di calore che 1 metro cubo di materiale può accumulare aumentando di un grado la sua temperatura. Dato che è direttamente proporzionale alla sua massa viene definita anche inerzia termica
- La diffusività termica è il rapporto fra la conducibilità termica e il prodotto fra densità e calore specifico della data sostanza e misura l'attitudine di una sostanza a trasmettere, non il calore, bensì una variazione di temperatura. In particolare definisce l'intervallo di tempo impiegato da un generico punto, all'interno del materiale, per cambiare la sua temperatura: $d = \lambda/\rho c$



Figura 1.4 Sughero espanso

Di seguito si riporta una breve descrizione dei più diffusi materiali isolanti naturali (Bioedilizia - prodotti e materiali per l'edilizia ecologica, bioedilizia e bioarchitettura).

- Sughero
Si ottiene dalla quercia da sughero che ha la particolarità di ricoprirsi di una doppia corteccia e dopo ogni asportazione della corteccia matura è in grado di riprodurre ancora un'altra e così via.
- Fibra di cellulosa riciclata
Ottenuto mediante una speciale tecnica di trasformazione della carta dei quotidiani che, grazie all'utilizzo di componenti minerali naturali in genere sali di boro, la rende non infiammabile, inattaccabile.
- Legno mineralizzato
Sono scarti della lavorazione del legno o lana di legno, generalmente pioppo o abete, impastate con cemento bianco o cemento Portland
- Fibra di Cocco, Fibra di juta, Fibra di Cotone, Fibra di Lino, Fibra di Canapa, Fibra di Mais
- Derivati da altre fibre vegetali come il cocco, la iuta, il cotone, il lino, la canapa, il mais.
- Fibra di legno
Sono scarti delle segherie, riciclaggio di cortecce e rami di conifere, le fibre di legno vengono aggregate per effetto del potere collante della lignina resina naturale presente nella fibra stessa.
- Canna palustre

I materiali isolanti naturali più diffusi



Figura 1.5 Canna palustre

E' una delle più comuni graminacee, che cresce in modo spontaneo nelle zone paludose e lungo le rive dei fiumi, dei canali e dei laghi.

- Lana di pecora

Grazie alla sua particolare microstruttura la lana di pecora si propone come ottima e naturale alternativa alle fibre minerali per l'isolamento termico ed acustico. Oltre alle doti di coibenza e traspirabilità la lana ha grandi doti di igroscopicità, è cioè in grado di assorbire acqua fino ai 33% del suo peso senza apparire umida e di cedere lentamente l'acqua assorbita svolgendo quindi in modo ottimale il compito di equilibrare l'umidità relativa dell'aria.

- Calcio silicato

Prodotto in autoclave partendo da sabbie silicee, calce idraulica e una piccola percentuale di fibre di cellulosa con funzione di rinforzo, e' molto resistente al fuoco.

- Vermiculite e Perlite

Si ottengono attraverso la frantumazione e la successiva espansione per effetto di alte temperature di minerali micacei per la vermiculite e di una roccia vulcanica per la perlite.

- Fibre minerali Lana di roccia

La lana di roccia prodotta dopo il 2001 rispetta i parametri della nota Q della direttiva europea 97/69/CE e soddisfa i criteri di biosolubilità da essa stabiliti, pertanto non risulta classificata come sostanza cancerogena. Anche l'Agenzia Internazionale della Ricerca sul Cancro (IARC), il 16 Ottobre 2001, ha stabilito che le lane minerali, di cui fa parte la lana di roccia, non possono essere considerate cancerogene per l'uomo.

- Argilla espansa

Si ottiene dalla cottura di argilla a temperatura elevata fino a 1200°, tale cottura fa aumentare il volume del prodotto naturale fino a sei volte rendendolo estremamente leggero, resistente al fuoco, termoisolante e non assorbente.

- Vetro cellulare espanso

E' un materiale alveolare, leggero, composto dalle stesse materie prime del vetro, quali silice, quarzo, carbonato di calcio o potassio, acido borico e altri minerali borici ed eventualmente con scarti del vetro, con l'aggiunta del carbonio. Materiale termoisolante ad alta resistenza chimica, meccanica ed al vapore.



Figura 1.6 Vermiculite



Figura 1.7 Argilla espansa



Figura 1.8 Vetro cellulare espanso

1.2.1.1 Impatto ambientale

Sono stato effettuati diverse analisi e confronti. In generale le analisi LCA sono del tipo "from candle to gate".

- Scheda 1.01 Analisi prestazioni, impatti e possibilità d'impiego. In quest'analisi gli impatti non sono normalizzati al livello prestazionale ma quantitativo (Lantschner N., a cura di, 2009)
- Scheda 1.02 Analisi qualitativa degli impatti "from candle to gate" (Vernelli V., 2011)
- Figura 1.09 analisi quantitativa del consumo di energia primaria diviso per fasi (Fassi A., Maina L., 2009)
- Tabella 1.08 Confronto degli impatti a paragone di prestazione (Lantschner N., a cura di, 2009).

Scheda 1.01
Scheda 1.02

Dal punto di vista ambientale, il consumo di energia primaria necessario alla produzione di un materiale isolante non è sempre basso.

Per quel che riguarda l'impatto ambientale gli isolanti di origine vegetale, animale o misto vegetale sono preferibili rispetto agli altri, in quanto il loro processo produttivo utilizza minori risorse non rinnovabili, vanta emissioni di inquinanti più basse e maggiore sicurezza per la manodopera nel processo di estrazione e lavorazione dei materiali.

I materiali di origine vegetale, come la cellulosa, il sughero, i il legno, la canna palustre, la canapa, e quelli di origine animale (lana di pecora) sono quelli che in assoluto comportano il minor consumo di energia. Per quanto riguarda invece gli isolanti di origine minerale, si ha un'incredibile variabilità infatti si osservano valori che spaziano dai 20 MJ/kg per la lana di roccia, la calce-cemento o cellulare e la vermiculite, circa 34MJ/ kg per la lana di vetro e quasi il doppio per il vetro cellulare, e valori che invece sono comparabili con quelli dei materiali vegetali per la pomice naturale e l'argilla espansa. Sono però i materiali di origine sintetica a far registrare i maggiori consumi di energia primaria con valori mai inferiori ai 100 MJ/kg; il contributo maggiore (~85% nel caso del polistirene, ~88% per il poliuretano e ~93% per il polietilene) è legato all'approvvigionamento delle materie prime; rilevanti sono poi il processo produttivo del polistirene e i trasporti per quanto riguarda poliuretano e polietilene. Il consumo dovuto agli imballaggi è molto modesto in tutti gli isolanti con un contributo massimo, nel caso peggiore, del polistirene di ~1 MJ/kg.

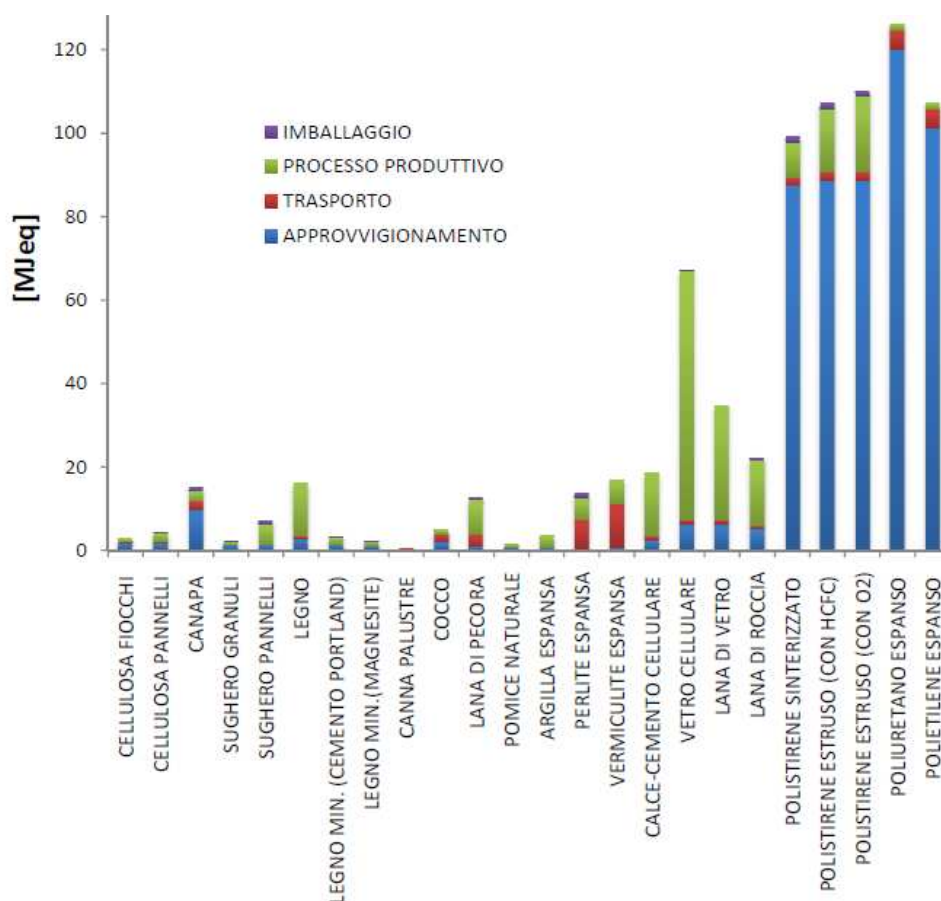


Figura 1.9 Consumo di energia primaria per diversi isolanti

In Italia la distribuzione di materiali isolanti naturali presenta ancora molti aspetti critici, e la loro commercializzazione non è paragonabile a quella dei materiali

I materiali isolanti naturali in Italia

Confronto a paragone di U

sintetici o delle lane minerali. Dal punto di vista economico, sicuramente, sono ancora favoriti i materiali isolanti di uso corrente, ma ciò non può limitare la conoscenza e la commercializzazione di prodotti nuovi e alternativi, con un impatto ambientale minore e con livelli prestazionali pari, se non superiori, a quelli di uso comune. Anche perché il prezzo, al momento superiore, degli isolanti naturali, potrebbe abbassarsi solo grazie a un incremento nelle vendite. Un corretto isolamento rappresenta sicuramente un investimento economico, ma prima ancora "ambientale"; infatti se da un lato un maggiore isolamento con materiali naturali implica un extra-costo iniziale ammortizzabile in pochi anni di gestione dell'edificio, dall'altro lato i veri benefici si hanno a livello ambientale, dove la riduzione di emissione di inquinanti da combustione e la quantità di anidride carbonica risparmiata, perché non emessa in atmosfera, rappresentano un vero e proprio guadagno.

Per avere un confronto di LCA a paragone di prestazione si è voluto analizzare l'impatto di un metro quadrato di diversi tipi di materiale isolante a parità di trasmittanza termica U fissando il valore a 0,2 W/m²K, variando quindi necessariamente il loro spessore. Si evince come siano i materiali sintetici quelli con un impatto maggiore, espresso in termini di CO₂ equivalente, perché contenenti plastiche a differenza dei materiali naturali come legni fibra di cellulosa canapa e sughero che sono caratterizzati da un contributo basso o addirittura negativo dell'effetto serra. Questo, come già sottolineato, è dovuto al fatto che i vegetali imprigionano CO₂ al loro interno e tale carbonio immagazzinato resta stoccato per tutta la vita utile del prodotto, fino allo smaltimento. Il contributo dell'energia rinnovabile sia insignificante nei materiali di origine sintetica o minerale, mentre assume un ruolo significativo nei materiali come il sughero, il legno la canapa.

Tabella 1.8 Confronto degli impatti a paragone di prestazione, U= 0,2 W/m²K

Materiale isolante	Spessore	Effetto serra	Embodied Energy non rinnovabile	Embodied Energy rinnovabile
	m	kgCO ₂	MJeq	MJeq
fibra di legno mineralizzata e legata con cemento portland	0,31	-13,396	502,929	886,864
lana di roccia	0,18	21,029	281,18	7,854
polistirene espanso estruso	0,18	87,945	797,676	7,810
fibra di cellulosa	0,19	3,333	73,790	27,115
fibra di canapa	0,2	-1,467	20,152	108,468
sughero	0,2	-17,647	565,426	651,796
lana di vetro	0,19	56,454	1036,367	55,706
EPS	0,19	63,742	1592,792	15,095

Da questo rapido confronto si nota come la fibra di canapa abbia delle notevoli qualità ambientali. Nel grafico di figura 1.9 si evidenziava che il consumo di energia primaria nella fase di approvvigionamento del prodotto è alto rispetto agli altri materiali vegetali, ma questo è dipendente da molteplici fattori che possono variare a secondo della localizzazione delle colture e degli impianti.

1.2.2 La canapa

Nel campo dello sviluppo sostenibile la canapa non richiede grandi energie per essere prodotta né per essere smaltita: coltura annuale, a basso impatto ambientale, non necessita di ulteriore irrigazione, non bisognosa di additivi chimici, di diserbanti industriali, ed in grado di risanare il terreno, sia integrandolo, cioè dandogli la possibilità di "riprodursi" che ripulendolo da metalli pesanti, oltre che sottrazione dall'atmosfera di CO₂ tramite il processo di fotosintesi.

Dal fusto secco di canapa si ottiene il 75% di canapulo e il 20% di fibra tecnica, utilizzata prevalentemente dall'industria tessile. Il restante 5% sono polveri di scarto.

Da un'indagine svolta da Assocanapa nel 2010 il conto economico relativo alla coltivazione e prima trasformazione della canapa si attesta sugli 0,85 €/kg che si suddivide in 0,25 €/kg per il canapulo e 0,60 €/kg per la fibra tecnica.

Gli impatti ambientali come si può vedere nella Tabella sono ridotti. Il consumo di energia primaria è dovuto soprattutto alla fase di approvvigionamento del prodotto, data la scarsa disponibilità sul mercato, ma è comunque un valore facilmente abbattibile utilizzando politiche di filiera corta.

Tabella 1.9 Impatti ambientali della produzione di canapa (Bioedilizia - prodotti e materiali per l'edilizia ecologica, bioedilizia e bioarchitettura)

U.F.	Effetto Serra	Embodied Energy non rinnovabile	Embodied Energy rinnovabile
	kgCO ₂	MJeq	MJeq
kg	-0,244	18,078	3,359

In Edilizia è usata sotto forma di biocomposito di calce e canapa o sotto forma di pannelli di fibra di scarto dell'industria tessile.

Ultimamente la fibra di canapa viene lavorata per produrre tessuti da utilizzare nei consolidamenti statici. E' questa una novità nel campo del rinforzo strutturale, infatti fino ad ora esistevano le fibre di carbonio, di vetro, di acciaio; ad esse ora si affiancano le fibre di canapa, di lino, di basalto. La biofibra di canapa ha buone proprietà meccaniche, una notevole resistenza a sforzi, tensioni e deformazioni, tanto da poter essere usata per rinforzare murature, archi, volte e tutte quelle parti strutturali soggette a fenomeni fessurativi e lesionativi, anche in edifici danneggiati da sismi o incendi.

L'isolante in fibra di canapa è composto da fibra di canapa scartata dall'industria tessile (85%) e fibra di poliestere (15%), oppure da amido di patate o colle naturali. Spesso alle fibre di canapa vengono mescolate altre fibre naturali come il Kenaf perché la loro presenza sul mercato è limitata. È trattato con sali di boro per migliorare le prestazioni antincendio e la refrattarietà a muffe e insetti senza che ci siano danni a strutture e materiali adiacenti. Viene fornito in rotoli o pannelli, può essere utilizzato come isolamento termo-acustico per tetti, pareti e pavimenti. È inattaccabile da insetti e roditori, imputrescibile, con alta capacità igroscopica che gli permette di assorbire l'umidità per poi cederla successivamente in vapore acqueo: in caso di condensa e infiltrazione la canapa si asciuga subito e mantiene inalterate le sue proprietà. Ha una conducibilità termica (λ) che può variare da 0,04 a 0,05 W/mK, assorbimento acustico da impatto al calpestio di 19 dB e capacità fonoassorbenti da 51 a 55 db. L'installazione è facile e veloce, con poche emissioni di polvere e senza provocare dermatiti da contatto e pruriti.

Questo tipo di materiale si presta bene per diverse applicazioni:

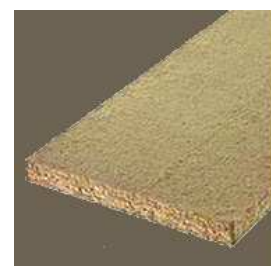
- cappotto esterno;
- isolamento interno di pareti e tetti;
- isolamento in intercapedine;
- isolamento per pareti divisorie;



Figura 1.10 La pianta di Canapa



Figura 1.11 Il canapulo e la fibra



Materassino in fibre di canapa



- isolamento solaio;
- isolamento copertura;
- isolamento da calpestio.

La canapa è riutilizzabile e riciclabile, è inoltre adatta a cicli di utilizzo a cascata. Le parti fibrose vengono destinate ad usi tessili, i residui del tessile all'isolamento e alla produzione della carta di qualità, la carta riciclata per ottenere carte meno pregiate e cartoni, e il tutto può essere nuovamente riciclato e, infine, utilizzato come combustibile. I pannelli di canapa possono essere riciclati o riutilizzati se privi però di poliestere e con basso dosaggio di ignifughi, altrimenti devono essere smaltiti in discariche specifiche.

Tabella 1.10 Impatti di un materassino di canapa per isolamento (Bioedilizia - prodotti e materiali per l'edilizia ecologica, bioedilizia e bioarchitettura).

Materiale	U.F.	Effetto Serra	Embodied Energy non rinnovabile	Embodied Energy rinnovabile
		kgCO2	MJeq	MJeq
Materassino in canapa	kg	0,208	14,524	22,381

Il biocomposto calce-canapulo



Figura 1.12 Canapulo



Figura 1.14 Calce-canapulo sfuso secco



Figura 1.13 Calce canapulo umido

Il biocomposito è un materiale ottenuto dalla combinazione della parte legnosa dello stelo di canapa "canapulo", ed un legante a base di calce idrata e additivi naturali.

La canapa ha il ruolo di materiale riempitivo, mentre la calce da legante e conservante. Attraverso la calce si riesce ad ottenere un basso degrado da invecchiamento e una migliore resistenza agli agenti climatici come pioggia battente, secchezza, sbalzi termici e attacchi batterici. Il "canapulo" è naturalmente ricco di silice, aiutando così l'indurimento della calce. Il mix si consolida in poche ore, mentre con il passare del tempo per via del processo di carbonizzazione, acquisisce una consistenza simile alla pietra.

Con il termine carbonizzazione si indica il processo che porta ad una graduale perdita di ossigeno, azoto ed idrogeno (con conseguente aumento del tenore di carbonio) dai tessuti.

Dal punto di vista ambientale il prodotto presenta un dispendio di energie per la produzione della calce che prevede l'estrazione del calcare dalle cave e la successiva cottura, a una temperatura di 800 -1000 °C, la calce viva deve essere successivamente 'spenta' per avere il legante e durante questa operazione, che prevede la sola aggiunta di acqua, si produce una reazione chimica che rilascia un enorme quantità di calore, il quale negli impianti moderni, viene incanalato e utilizzato o per velocizzare l'essiccazione finale dei blocchi in canapa e calce o nel caso in cui il biocomposito venga gettato direttamente in cantiere questa energia è sfruttata per la cottura iniziale del calcare. Il biocomposito di calce e canapa può una volta arrivato a fine vita, può essere riutilizzato, tritando il materiale e aggiungendo una piccola quantità di calce e acqua, che mi permette di rigettarlo o produrre nuovi blocchi in canapa e calce. Nel caso in cui, il biocomposito di canapa e calce, venga rilasciato nell'ambiente, la calce si sgretola e va ad aumentare il PH del terreno, invece la canapa non essendo più protetta, si biodegrada naturalmente.

Da questa base composta appunto da calce e canapa si possono ricavare più prodotti e, in base alle diverse destinazioni si avranno

diverse percentuale nei dosaggi dei due materiali e in alcuni casi aggiunte di altri componenti

Vediamo le principali caratteristiche:

- Isolamento termico – Con il continuo susseguirsi di micro-processi di condensazione e di evaporazione all'interno dei micropori del Natural Beton si riesce a bloccare il passaggio di caldo e freddo dall'esterno all'interno dell'edificio e viceversa. Il valore di λ del biocomposito è in media di 0,07 W/mK .
- Inerzia termica – Grazie alla sua massa importante il materiale è in grado di accumulare calore e di rilasciarlo lentamente con un effetto simile a quello percepito nelle case con muri di pietra, cioè fresco d'estate e caldo d'inverno.
- Traspirabilità ed assenza di condensa – Natural Beton permette il passaggio dell'umidità evitando problematiche di condensa e cattiva qualità dell'aria all'interno dell'edificio.
- Respirabilità – Natural Beton funziona come un polmone regolando l'umidità, assorbendo cioè quella in eccesso e rilasciandola quando l'aria è troppo secca come se fosse un umidificatore.
- Isolamento acustico – Grazie alla sua porosità il Natural Beton garantisce un ottimo assorbimento acustico.
- Riciclabilità – Al termine della sua vita utile il biocomposito è totalmente riutilizzabile una volta frantumato e reimpastato con acqua e calce.
- Biodegradabilità – Natural Beton se smaltito si decompone naturalmente essendo privo di sostanze tossiche.
- Capacità di contrastare i cambiamenti climatici – Natural Beton è in grado di catturare e sequestrare CO2 dall'atmosfera.
- Leggerezza – Il materiale è composto prevalentemente da truciolo vegetale e quindi molto più leggero dei materiali da costruzione ed isolanti convenzionali. A seconda delle applicazioni la densità del materiale varia da 200 a 450 kg/m3.
- Salubrità – Grazie al contenuto di calce idrata, Natural Beton permette di sanificare l'aria degli ambienti interni attraverso la sterilizzazione del vapore acqueo che fuoriesce durante il processo di respirazione.
- Durevolezza – E' un materiale vivente che respira e che grazie all'assenza di condensa non degrada garantendo una durata centenaria come la gran parte degli edifici storici costruiti nel passato con materiali prevalentemente naturali ed ancora esistenti.
- Ecocompatibilità – Basso livello di energia incorporata nel materiale (quantità di energia necessaria per la sua produzione, impiego e smaltimento) ed estrema capacità di bloccare il passaggio di caldo e freddo riducendo al minimo i consumi energetici.
- Resistenza al fuoco - Il biocomposito è ignifugo senza l'aggiunta di ulteriori sostanze tossiche per il ritardo della fiamma. Il "Centre Scientifique et Technique du Batiment" ha classificato il biocomposito nella categoria francese M1, equivalente in Italia come classe 1, il che le permette di essere utilizzata come materiale lungo il percorso di fuga in caso di incendio.

Tabella 1.11 Impatti ambientali del calce-canapulo (Bioedilizia - prodotti e materiali per l'edilizia ecologica, bioedilizia e bioarchitettura).

Materiale	U.F.	Effetto Serra	Embodied Energy non rinnovabile	Embodied Energy rinnovabile
		kgCO2	MJeq	MJeq
Mattone in calce-canapa	kg	0,294	3,313	5,568
Getto in calce canapulo	m ³	179,970	1436,745	1999,834

Il biocomposito di canapa e calce si presta a un vasta gamma di applicazioni a seconda della miscela e del tipo di preparazione. L'applicazione è semplificata dal fatto di poter lavorare con un

Applicazioni del calce-canapulo



Figura 1.15 Riempimenti in intercapedine



Figura 1.16 Riempimenti superficie inclinata a cassettoni



Figura 1.17 Riempimento superficie orizzontale



Figura 1.18 Massetti isolanti

materiale umido al quale si può far acquisire qualsiasi forma, oltre ad essere un materiale piacevole da maneggiare che non provoca alcun pericolo per la salute

a. Interventi di isolamento in casi di recupero edilizio

- Tetto: nuovo e ristrutturazioni

Una volta che i travetti sono stati posati in opera, un assito o dei pannelli di legno vengono fissati sotto i travetti per fornire il supporto alla miscela di canapa. Se i travetti hanno un'altezza inferiore ai 25 cm deve essere aggiunto uno spessore. La miscela di canapa (1:1) deve essere posata tra i travetti, livellata con un rastrello e compattata, così da formare uno strato di circa 23 cm. Uno spazio di 2 cm viene lasciato per l'aerazione. A discrezione, una membrana impermeabile all'acqua, ma traspirante, può essere fissata ai travetti.

Se le condizioni meteorologiche lo permettono, la miscela può essere lasciata esposta all'aria per qualche tempo così da consentire l'evaporazione di una parte del contenuto d'acqua.

- Tetto: isolamento senza la rimozione del manto di copertura

L'isolamento del tetto con questo metodo è possibile se un assito o dei pannelli sono stati fissati sopra i travetti e sotto la copertura. Anche in questo caso viene aggiunto internamente uno spessore ai travetti se la loro altezza è inferiore a 25 cm. Una rete semirigida viene fissata ai travetti con un listello di legno di 2 cm di spessore. Muovendosi verso l'alto la miscela di canapa viene posizionata nello spazio vuoto creato dalla rete, livellata e leggermente compattata. Pannelli di legno o un assito vengono fissati ai listelli lasciando così uno spazio di 2 cm per l'aerazione.

- Tetto: isolamento dall'esterno

Se i travetti all'interno devono essere lasciati a vista, deve essere rimosso il manto di copertura e fissati degli assi da 16-18 mm di spessore esternamente ai travetti. Una seconda fila di travetti viene installata sopra l'assito e fissata a quelli esistenti. Invece di usare travetti da 24 cm di spessore, possono essere impiegati 2 travetti da 12 cm per facilitare il processo. La miscela è quindi applicata come descritto sopra.

- Isolamento del pavimento del sottotetto

Questa metodologia viene impiegata quando il sottotetto non è abitabile. Pulire il pavimento ed assicurarsi che sia impermeabile alla polvere. Se così non fosse, si consiglia di applicare una membrana traspirante sul pavimento. Successivamente applicare, livellare e compattare uno strato di 20-30 cm di miscela di canapa (1:1). Nel caso in cui fosse richiesta una finitura calpestabile, applicare gli ultimi 5cm di miscela nella proporzione 1:2,2.

Quando il sottotetto viene isolato è consigliabile non coibentare il tetto così da rendere lo spazio costantemente areato. L'isolamento del sottotetto è uno degli interventi di coibentazione più importanti con effetti benefici nella prestazione energetica dell'intero edificio. L'isolamento effettuato in questo modo fornisce un ambiente ideale per lo stoccaggio di mobili o come archivio, grazie alla capacità della canapa di fungere da regolatore dell'umidità.

- Muri esterni

I muri esterni possono essere isolati sia dall'esterno che dall'interno. Per i vecchi muri di pietra o di mattoni è consigliato l'isolamento dall'interno. La miscela può essere applicata direttamente anche su muri con presenza di umidità poiché la canapa è in grado di regolare il contenuto di acqua.

Quando si ha a che fare con muri di nuova costruzione si consiglia di formare un cassero ad una distanza di 15-20 cm dal muro e riempirlo con miscela di canapa (1:2,2).

Per muri con doppia fila di mattoni (6 cm) o di pannelli lasciare uno spazio vuoto di 15-20 cm da riempire con la miscela di canapa (1:1).

Isolare un edificio dall'interno è generalmente l'opzione preferita, tranne i casi in cui il ridotto spazio interno o l'elevato numero di locali rende questa metodologia costosa e inefficiente.

- Isolamento interno

Fissare ai muri dei listelli di legno (3x4cm) ad una distanza di 40cm, anche incrociati, così da formare uno spazio di 3-4 cm dal muro. Alternativamente si possono fissare dei chiodi nel muro che vengono collegati con del filo di ferro in modo da formare una rete che funga da ancoraggio e supporto per la miscela. A questo punto è possibile montare un sistema di casseratura. Riempire lo spazio vuoto di 15-20 cm con la miscela di canapa (1:2,2) e completare con intonaco di calce.

Alternativamente si può costruire un muro formato da una doppia fila di mattoni da 6cm, da riempire con 15-20cm di miscela (1:1).

Un'altra opzione è quella di costruire una struttura di legno verticale contro il muro così da formare uno spazio vuoto di 15-20 cm. Una rete semi-rigida viene applicata ai montanti in legno con dei listelli da 2cm di spessore, così da formare una piccola cavità aerata. Riempire lo spazio tra la rete e il muro con la miscela (1:1) e quindi applicare i pannelli ai listelli.

- Intonaco di canapa

Questa soluzione è impiegata internamente quando lo spazio è scarso o ci sono delle aree con alti livelli di umidità. Ripulire il muro da pitture, parti scrostate o tappezzerie. Applicare 2-7 cm di intonaco di canapa in una o due applicazioni. La finitura può essere realizzata a seconda dei gusti: la canapa può essere lasciata a vista, il muro può essere colorato oppure può essere applicato un intonaco di calce.

- Isolamento esterno

Questa opzione viene solitamente preferita per non ridurre lo spazio interno dei locali o quando c'è l'intenzione da parte del proprietario di migliorare l'aspetto estetico esterno dell'edificio. Per questo metodo le superfici esterne di cemento devono essere dotate di una leggera struttura di legno o metallo, o martellinati per migliorarne l'ancoraggio. La miscela di canapa fornisce un notevole miglioramento termico anche quando applicata a materiali da costruzione con nessuna capacità isolante.

- Isolamento esterno intonacato

Montare una struttura in legno con listelli a 3-4 cm dal muro, o in alternativa fissare dei chiodi nel muro che vengono collegati con del filo di ferro in modo da formare una rete che funga da ancoraggio e supporto per la miscela. Montare un sistema di casseratura e riempire il vuoto di 15-20cm così formato, con miscela di canapa (1:2,2). Finire con intonaco di calce.



Figura 1.19 Massetto calpestabile



Figura 1.20 Intonaci di finitura



Figura 1.21 Intonaci di corpo



Figura 1.22 Intonaco a spruzzo



Figura 1.23 Intonaco a spruzzo



Figura 1.24 Massetto a spruzzo



Figura 1.25 Blocchi prefabbricati



Figura 1.26 Pannelli prefabbricati



Figura 1.27 Controparete in blocchi prefabbricati

- Isolamento esterno con finitura in legno

Montare una struttura in legno lasciando uno spazio dal muro di 20 cm. Fissare una rete semi-rigida con listelli di legno da 2 cm di spessore e riempire il vuoto con la miscela di canapa (1:1). Fissare l'assito di legno precedentemente trattato ai listelli.

- Pavimenti

Piano terra, nuovo o ristrutturato: una volta rimosso il terreno formare una massicciata di 15-20 cm di spessore con pietre di granulometria di 5-8 cm, di cui l'ultimo strato (5 cm) abbia una granulometria di 2-4 cm. Ogni 2 m installare nella massicciata per tutta la sua lunghezza una tubatura con forature nella parte superiore. Questa servirà ad aerare il sottofondo e a rimuovere eventuali eccessi di acqua. Quindi applicare uno strato di 20 cm di miscela di canapa (1:2,2), livellarlo e compattarlo.

Per l'esecuzione di riscaldamento a pavimento: posizionare sul massetto di canapa le traverse alle quali fissare le tubature. Posizionare un rinforzo in ferro o plastica e finire con un massetto di 6-7 cm di calce

- Cantine e aree umide

Pulire accuratamente i muri e applicare uno strato di 15-20 cm con le modalità già spiegate precedentemente. Alternativamente applicare 5-7 cm di intonaco di canapa. Questa metodologia regolerà la temperatura del locale, ed ulteriormente regolerà il livello di umidità.

b. Nuova costruzione

Fino ad oggi, diversi edifici, da uno a più piani, sono stati costruiti con le metodologie e materiali sopraccitati, i primi dei quali risalgono a 20 anni fa. I risultati sono stati straordinari. Tutti questi anni di esperienza non solo hanno consentito di migliorare la composizione delle varie miscele, ma soprattutto la qualità degli edifici e delle tecniche di applicazione.

Quando si costruisce con la canapa, l'obiettivo principale è quello di creare un involucro (muri e tetto) che funzioni come una membrana protettiva in grado di regolare l'umidità e la temperatura interna. Il secondo obiettivo è quello di formare un edificio omogeneo utilizzando principalmente due materiali naturali: la miscela di canapa e il legno. Questi materiali consentono all'edificio di "respirare", di rimanere fresco d'estate e caldo in inverno grazie alle qualità dei muri, del tetto ed degli intonaci. Il terzo obiettivo è di assicurare un ridotto consumo energetico, per esempio attraverso l'uso di pannelli solari termici in combinazione con un sistema di riscaldamento radiante, grazie all'efficienza termica dell'edificio raggiunta tramite l'utilizzo della canapa.

Una volta che tutti questi obiettivi sono stati rispettati, abbiamo ottenuto un edificio che offre uno spazio di lavoro o domestico che, principalmente rispetta la salute e il benessere dei suoi utilizzatori, e in aggiunta produce benefici sotto altri aspetti quali: l'uso di materiali naturali, il riciclo, le energie pulite, la facilità di costruzione con materiali economici e duraturi nel tempo e che richiedono solo un minimo di manutenzione.

- Fondazioni

La metodologia costruttiva delle fondazioni non varia da quella per gli edifici tradizionali. La struttura di legno viene fissata alle fondazioni, eventualmente delle piastre di acciaio possono essere

ancorate alle fondazioni alle quali fissare la struttura. La costruzione della soletta al piano terra viene eseguita come precedentemente spiegato.

- Muri

I muri formati con la miscela di canapa non sono portanti, per questo motivo è necessaria una struttura di legno per formare i muri perimetrali e il tetto. Questa deve essere appositamente calcolata e dimensionata da un ingegnere.

- Riempimento dei muri

Una volta che la struttura portante è stata eretta, gli impianti, sia elettrico che idrico, possono essere ad essa fissati, così da rimanere "annegati" nei muri una volta formati. Il sistema di cassetteria viene posizionato su entrambi i lati dei montanti in legno, cosicché essi restino nel mezzo dei muri perimetrali. Se ciò non fosse possibile, devono essere presi degli accorgimenti per garantire uno strato di almeno 5 cm di miscela di canapa intorno ai montanti.

Lo spessore dei muri varia da un minimo di 30 cm a un massimo di 40 cm. La composizione della miscela è di 1:2,2 or 1:2.5 e la quantità di acqua deve essere aggiustata a seconda della temperatura atmosferica. Una volta che la miscela è stata posata all'interno del cassero deve essere leggermente compattata e attentamente livellata. La cassetteria viene rimossa dopo 15-20 minuti di asciugatura. Eventuali buchi rimasti devono essere riempiti immediatamente e l'intera superficie lisciata. Una volta raggiunto il soffitto con la cassetteria, lasciare uno spazio di 5-10cm che deve essere riempito manualmente.

- Riempimento del tetto

I travetti devono essere dello stesso spessore della miscela (circa 23 cm) più uno spazio di 2 cm per l'aerazione, per un totale di 25 cm. Prima della posa della miscela fissare all'interno dei travetti un assito, dei pannelli di legno pre-trattati, o Fermacell. Se c'è il rischio di deformazioni dei pannelli di legno o dell'assito dovute all'umidità presente nella miscela (particolarmente nel periodo invernale), fissare una rete semi-rigida alla parte interna dei travetti, tramite listelli di 2 cm di spessore. Se lo spazio tra i travetti è maggiore di 40 cm, utilizzare una rete con maggiore rigidità. Quindi fissare l'assito o i pannelli di legno ai listelli, così da formare una cavità di 2 cm per l'aerazione. La miscela di canapa (1:1) con spessore di 23 cm deve essere livellata con un rastrello e leggermente compattata, lasciando uno spazio aerato di 2 cm anche nella parte superiore dei travetti. Una membrana impermeabile, ma traspirante, può essere installata per prevenire rischi di infiltrazioni d'acqua. Il suo uso non è obbligatorio, in quanto la miscela di canapa regolerà il livello d'umidità e di condensa che dovesse formarsi al di sotto del manto di copertura. A questo punto listelli di legno possono essere inchiodati a supporto della copertura.



:8 Chiusura verticale non



:9 Isolamento tetto a spruzzo

Tabella 1.12 I diversi usi e dosaggi del calce canapulo

POSIZIONE	SPESSORE	MISCELA (canapulo: legante)
TETTO	23cm+2cm	1:1
SOTTOTETTO	20-30cm	1:1
Strato di finitura	5cm	1:2,2
TRA MURI	10-20cm	1:1
PIANO TERRA	15-20cm	1:2,2
MURI ESTERNI Su mattoni o cemento	20cm	1:2,2
NUOVA COSTRUZIONE Supportato da struttura in legno	30-40cm	1:2,2 o 1:2,5
INTONACO	2-7cm	1:3 o 1:4

Confronto di sostenibilità tra i due sistemi

Per dare un confronto su base di impatti ambientali si riportano gli impatti ottenuti da un'analisi LCA from cradle to gate delle tre tipologie.

Tabella 1.13 Impatti delle diverse tipologie di calce-canapulo (Bioedilizia - prodotti e materiali per l'edilizia ecologica, bioedilizia e bioarchitettura).

Materiale	U.F.	Effetto Serra	Embodied Energy non rinnovabile	Embodied Energy rinnovabile
		kgCO ₂	MJeq	MJeq
Materassino in canapa	kg	0,208	14,524	22,381
Mattone in calce-canapa	kg	0,294	3,313	5,568
Getto in calce canapulo	m ³	179,970	1436,745	1999,834

Confrontare i dati in questo modo però ha poco senso perché le unità funzionali sono differenti, i materiali non sono stati normalizzati dal punto di vista prestazionale. Per tanto si ipotizzano tre stratigrafie differenti che consentono l'applicabilità del materiale imponendo un valore di trasmittanza termica uguale a 0,20 W/m²K.

- C.V.01: Parete perimetrale a telaio con materassino in canapa;
- C.V.02: Parete perimetrale a telaio in legno isolata con calce e canapulo applicato a spruzzo;
- C.V.03: Parete perimetrale in mattoni di calce e canapulo.

Tabella 1.14 Stratigrafie di confronto per l'applicazione del calce-canapulo (Bioedilizia - prodotti e materiali per l'edilizia ecologica, bioedilizia e bioarchitettura).

C.V.1		C.V.2		C.V.3	
s [m]	materiale	s [m]	materiale	s [m]	materiale
0,025	Lastra di cartongesso	0,025	Pannello in fibrogesso	0,015	Intonaco di calce o cemento
0,2	Pannelli isolanti in canapa	0,4	Getto in calce canapulo	0,3	Mattone in calce e canapa
0,015	Pannello osb	0,020	Intonaco di solo cemento	0,01	Intonaco di solo cemento
0,015	Lastra cemento rinforzato aquapanel			0,08	Isolamento termico in sughero
0,010	Intonaco di solo cemento			0,06	Intonaco di solo cemento
26,1	totale	34	totale	41,1	totale

Tabella 1.15 Impatti delle tre stratigrafie di confronto (Bioedilizia - prodotti e materiali per l'edilizia ecologica, bioedilizia e bioarchitettura).

Materiale	U.F.	Effetto Serra	Embodied Energy non rinnovabile	Embodied Energy rinnovabile
		kgCO2	MJeq	MJeq
C.V.1	m ²	-0,1895	619,731	762,923
C.V.2	m ²	80,061	771,997	932,678
C.V.3	m ²	48,407	692,411	859,764

Si evince come la stratigrafia C.V.1, sistema a telaio con materassino in canapa, presenti maggior prestazioni dal punto di vista di trasmittanza e minori impatti ambientali per quanto riguarda il ciclo di vita. Il calce-canapulo da parte sua però presenta maggior inerzia termica e maggior applicabilità, minor costo e maggior riciclabilità a fine vita.

1.2.3 Il legno

Il legno da costruzione ha delle elevate caratteristiche tecniche e si rivela un'alternativa importante all'acciaio e al cemento armato. Inoltre l'impiego del legno nelle costruzioni grazie alla sua capacità di assorbire CO₂ contribuisce ad abbatterne i livelli sempre più elevati. Tuttavia l'uso di questa materia deve essere attento e controllato altrimenti potrebbe comportare ad altri problemi ambientali come la deforestazione.

Vediamo innanzitutto quali sono le caratteristiche tecniche del legno, i problemi che può comportare uno sfruttamento incontrollato della materia e se esiste effettivamente un uso sostenibile.

Gli effetti di un incendio su una costruzione sono meno rapidamente distruttivi per il legno, che non per altri materiali quali metalli, pietre, cemento, perché le pietre e i mattoni, portati a elevate temperature si rompono facilmente e i metalli, si dilatano a perdono la loro resistenza. Con questi materiali, quindi, si possono verificare crolli improvvisi, non soltanto delle strutture orizzontali, ma anche per rovesciamento dei muri di sostegno (dilatazione longitudinale delle travi). Nel caso del legno invece, l'incendio determina una progressiva carbonizzazione dall'esterno verso l'interno della sezione che, comunque, non porta a cedimenti subitanei e lascia il legno non ancora carbonizzato efficiente dal punto di vista meccanico anche se la sua temperatura è aumentata. La rottura 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, in funzione della specie legnosa ma soprattutto delle dimensioni originarie della sezione; infatti, a parità di condizioni, una riduzione di alcuni centimetri è determinante per portare a rottura elementi di piccola sezione (ad esempio i travicelli e l'orditura minuta in genere) mentre è poco influente nel caso di



Figura 1.30 Il legno da costruzione



Figura 1.31 Test di resistenza al fuoco

Resistenza al fuoco



Figura 1.32 Test di resistenza meccanica

travi di grossa sezione. I punti deboli sono le unioni metalliche a vista, come scarpe, piastre, ecc. che, se non protette, sono le prime a cedere durante l'incendio.

La resistenza al fuoco è definita come l'attitudine di un elemento da costruzione a conservare, in un dato intervallo temporale, in tutto o in parte la stabilità R, la tenuta E, l'isolamento.

Gli elementi strutturali in legno devono garantire una protezione al fuoco almeno pari a Rei 90. Ciò si può ottenere utilizzando essenze legnose di prima classe di qualità secondo la Din 4074, trattate con vernici o sali minerali o proteggendole con elementi in legno naturale. Le vernici intumescenti possono essere coprenti o trasparenti, generalmente a base di acqua in due componenti separati (polimeri vinilici), che garantiscono la riduzione della reazione al fuoco per incrementare la resistenza al fuoco delle parti in legno, attraverso un processo di microespansione superficiale dei componenti che formano nel legno uno strato altamente coibente atto a rallentare l'aumento della temperatura. La scelta delle vernici intumescenti, discende anche dalla protezione dal fuoco che offrono, con una formula innovativa che non lascia pellicole sulla superficie perché lascia aperti i pori del legno, che così continuano ad assorbire e a cedere umidità in equilibrio con l'ambiente.

Queste vernici si basano sulla chimica dei borati idrosolubili, che sono stati oggetto di attenti studi nel corso degli ultimi 50 anni nel campo del trattamento protettivo del legno. I borati hanno la caratteristica peculiare di avere una tossicità così bassa per l'uomo da essere frequentemente usati in prodotti per uso domestico, e, in quanto sali naturali, hanno un impatto ambientale molto basso; hanno una tensione di vapore pressoché nulla, e perciò rimangono definitivamente nel legno, che è continuamente protetto. Tuttavia sono sempre da preferirsi in un'ottica ambientale interventi di protezione con elementi in legno massello.

Resistenza meccanica

Come l'acciaio, il legno è in grado di sopportare 14 volte il suo peso ed offre una resistenza alla compressione pari a quella del cemento armato.

La ragione dell'elevata stabilità risiede nella microstruttura del legno che è responsabile della forte resistenza alle sollecitazioni con un peso ridotto. Di conseguenza il legno è un materiale per costruzioni leggero dotato di proprietà tecniche straordinarie. Nonostante il suo ridotto peso, il legno offre un'elevata resistenza alla trazione e alla pressione e, con un corretto impiego, è resistente agli agenti atmosferici.

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.

In virtù della sua struttura, il legno possiede caratteristiche meccaniche anisotrope che assumono ordini di grandezza differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali: longitudinale (L); radiale (R); tangenziale (T), ma negli impieghi strutturali le caratteristiche meccaniche sono definite parallelamente alla fibratura e perpendicolarmente alla fibratura.

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 ↔ dinamici (di tipo impulsivo, alternanza);
- durata di azione dei carichi (resistenza a carichi di breve e lunga durata);

Secondo il DM 14.01.08 ogni prodotto per uso strutturale è soggetto a procedura di identificazione, qualificazione e accettazione. I criteri di classificazione previsti garantiscono all'elemento prestazioni meccaniche minime statisticamente determinate e controllate, senza necessità di ulteriori prove sperimentali e verifiche. La classe di resistenza di un elemento è definita mediante uno specifico profilo resistente unificato. Ad ogni tipo di legno può essere assegnata una classe di resistenza se i suoi valori caratteristici di resistenza, valori di modulo elastico e valore caratteristico di massa volumica risultano non inferiori ai valori corrispondenti a quella classe. Le norme di riferimento attuali per la classificazione del legno massiccio si riferiscono alla UNI EN 338.

Questa caratteristica è la capacità di un materiale di mantenere nel tempo le caratteristiche fisico meccaniche e di aspetto possedute nel momento della sua messa in opera, che per definizione non appartiene naturalmente al legno, il cui processo di deterioramento è dovuto a cause diverse tra cui principalmente la presenza di acqua che favorisce la proliferazione di batteri e funghi, e degli insetti xilofagi.

Le strutture di legno hanno un'ottima durabilità se progettate, realizzate e mantenute pensando, innanzitutto, alla prevenzione di situazioni dannose. Quindi in fase di progettazione bisogna prevedere la protezione degli elementi strutturali in legno anche



Figura 1.33 Legno attaccato da insetti Xilofagi

Durabilità



Figura 1.34 Funghi carie del legno

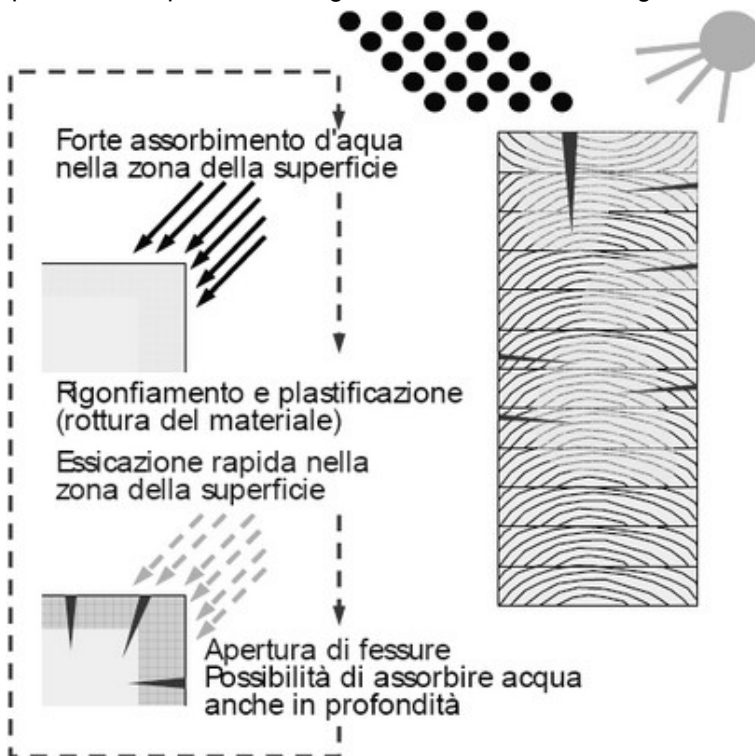


Figura 1.35 Effetto di de laminazione del legno lamellare





Figura 1.36 Gronda di legno e ferro battuto

con elementi sacrificabili e una facile manutenzione durata l'arco di vita dell'edificio. Spesso si paragona l'uso di un edificio con quello di un'automobile. Per far notare quanta più attenzione dedichiamo alla seconda, quando invece la scelta e la manutenzione dell'edificio sono certamente suscettibili di incidere sul nostro benessere (e sul nostro portafogli) in misura maggiore rispetto all'auto. Mentre per l'auto è ormai comune l'attenzione alle prestazioni (potenza, comfort, consumi, emissioni) e la ricerca di servizi di qualità (garanzia, tagliandi, ricambi originali), per l'edificio spesso si accetta quel che capita, oppure si fa poco per comprenderne e mantenerne il livello tecnico-prestazionale.

Le strutture di legno offrono un elevato comfort se progettate, realizzate e mantenute pensando, innanzitutto, alla prevenzione di situazioni locali di ristagno di umidità che, anche se limitate, possono innescare lo sviluppo di muffe. Il pericolo maggiore è quindi legato all'infiltrazione di acque meteoriche o al formarsi di condensa che il sistema non riesce a smaltire. Un esempio classico è quello delle testate di travi alloggiato all'interno delle murature, che fungono da sistemi di adduzione di umidità, con conseguenze disastrose se non sono previsti idonei particolari costruttivi che, nella maggioranza delle applicazioni, sono condizione sufficiente per assicurare una lunga durata alle strutture.

Quando non è possibile proteggere il legno dall'acqua e dal sole, si rende necessario impregnarlo con sali minerali spinti a pressione e in profondità; in tal caso il legname stagionato, con umidità media prossima al punto di saturazione delle pareti cellulari viene introdotto nell'autoclave dove si procede a creare un vuoto di 0,7 atmosfere, che svuota la cavità delle cellule dell'aria. Si introduce l'antisettico che per differenza di pressione comincia ad entrare nel legno; durante questa fase la pressione tende a ritornare ai livelli normali. Dato che tale procedura non è sostenibile è preferibile tuttavia cercare soluzioni alternative. Si riporta a tal proposito il parere del professore Franco Laner (2001, p. 23): "l'osservazione delle opere del passato mi ha portato ad una convinzione: vana è la ricerca della lunga vita del legno! Sapendo però che alcune parti, quelle a maggior contatto con l'acqua, con l'umidità o esposte ai raggi ultravioletti, ad attacchi biotici o xilofagi, degraderanno velocemente, si farà in modo – con attenta progettazione tecnologica – che le parti deteriorate si possano facilmente sostituire, oppure si farà in modo da proteggerle con elementi di sacrificio. Il progetto col legno dovrebbe dunque essere progetto di sostituibilità. Parti o elementi sostituibili garantiranno la durabilità dell'opera". Ancora oggi, infatti, sono disponibili ai nostri occhi gli splendidi tempi lignei giapponesi proprio perché intere parti o addirittura l'insieme sono stati oggetto di sostituzioni sapienti, come per l'usanza di ricostruire regolarmente il tempio di Ise Jingu in Giappone secondo cicli prestabiliti, ogni venti anni, dal 750 d.C. fino a oggi⁶⁸. Il progetto della durabilità delle architetture in legno, come spiega ancora Laner, non può essere necessariamente conservazione della materia, "semplicemente il più delle volte basterebbe sostituire il pezzo deteriorato, senza ricorrere a resine e pastrocchi di cui non si conosce nemmeno l'esito. La sostituzione, con semplici incaltri o fettoni, o con l'intero elemento strutturale, è ancor più lecita se proprio la struttura è

stata progettata per rendere facile la sostituzione del pezzo fuori servizio". Ciò significa in realtà che le unioni per collegare gli elementi sono fra i dettagli ed i particolari costruttivi più importanti e delicati della tecnologia del legno, sia nella concezione che nella realizzazione.

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: λ Legno = f(massa volumica, umidità, struttura, temperatura). Per legno con un contenuto di umidità di circa il 20%, la conduttività termica perpendicolarmente alla fibratura assume valori $\lambda_{\perp} = 0,10 \div 0,20$ W/(mK). Essa è quindi circa 15 volte più piccola che nel calcestruzzo armato e circa 10 volte in quello normale non armato. Alla bassa conducibilità si unisce l'elevata inerzia termica e la spiccata igroscopicità e fanno sì che l'edificio in legno assorba molto velocemente il vapore acqueo e lo ceda lentamente, smorzando così i picchi di umidità che l'uso dell'edificio comporta (cucina, doccia, affollamento). L'effetto di queste eccezionali caratteristiche fisico-chimiche del legno è ben noto e molto apprezzabile: si riducono le necessità di riscaldamento in inverno e raffrescamento/deumidificazione in estate e migliora la qualità dell'aria all'interno dell'edificio.

I materiali isolanti sono caratterizzati da un coefficiente minore di 0,1W/mK, pertanto il legno massello se non si può considerare un materiale isolante, è a tutti gli effetti il miglior materiale da costruzione dal punto di vista dell'isolamento termico. Nella Tabella sono riportati i coefficienti di conduttività termica di alcuni materiali strutturali.

Tabella 1.16 Confronto di conduttività termica tra i materiali strutturali

materiale da costruzione	conduttività termica [W/mK]
Legno	0.1-0.16
Mattone pieno	0.7
Mattone forato	0.2
Cls armato	2.3
Acciaio	20-50

1.2.3.1 I vantaggi dell'edilizia in legno

Le caratteristiche intrinseche del legno si ripercuotono in vantaggi nell'edilizia.

Il peso più contenuto delle costruzioni in legno riduce i requisiti previsti per le fondamenta e le basi. L'elevato livello di prefabbricazione semplifica lo svolgimento dei lavori in cantiere ed assicura una qualità standard e verificabile. È possibile contenere le dimensioni delle strutture dei cantieri e i costi della logistica risultano inferiori. Il sistema costruttivo a secco e la prefabbricazione riducono i tempi di realizzazione in modo sensibile e, di conseguenza, consente di sfruttare prima gli edifici, aspetto che va nuovamente a ridurre i tempi dei finanziamenti.

E' dimostrato che materiali come legno, fibre di legno o sughero risultano confortevoli già a temperatura ambiente, mentre quelli come il cemento o la pietra diventano termicamente confortevoli soltanto con temperature superficiali superiori. Inoltre il legno è antibatterico, non favorisce la crescita di muffe e regola il clima degli ambienti grazie alle sue buone caratteristiche igroscopiche e di inerzia termica.

Grazie alla scarsa conducibilità termica, diventano meno impegnativi i provvedimenti per limitare i ponti termici rispetto a quanto accade per una costruzione in muratura; Nell'ambito dell'isolamento termico le case in legno assicurano i massimi livelli di coibentazione.

Conducibilità termica e diffusione al vapore

Soluzione economica

Benessere

Alta protezione termica

Anche con i sistemi costruttivi standard, le abitazioni in legno raggiungono senza difficoltà i valori dei consumi richiesti dai termini di legge. Utilizzando un numero adeguato di strati isolanti, è possibile realizzare in modo semplice sistemi passivi o da 3 litri con le abitazioni in legno. Il ridotto consumo di energia consente di installare un impianto di riscaldamento di piccole dimensioni.

Traspirazione e protezione dall'umidità

Molte attività della vita quotidiana, come cucinare o fare la doccia, producono vapore acqueo. Quando il vapore permea attraverso materiali edili porosi dalla parte calda a quella fredda si parla di diffusione. Il legno, grazie alle sue proprietà igroscopiche, assume anche la funzione di regolatore dell'umidità, assorbendo quella in eccesso e restituendola all'occorrenza. Tali proprietà lo rendono ideale per le costruzioni permeabili al vapore. Assieme a materiali idonei e a strati funzionali disposti in modo corretto, la formazione di acqua di condensazione all'interno dell'elemento strutturale può essere evitata. Altrettanto importante è che l'involucro della struttura sia a tenuta d'aria, in modo da ridurre al minimo l'accumulo di umidità. Una costruzione traspirante è inoltre capace di espellere l'aria viziata e i cattivi odori all'esterno. A differenza delle costruzioni di muratura con il loro elevato contenuto d'acqua, le costruzioni in legno traspiranti diminuiscono il rischio di formazione di muffa che contribuiscono al deterioramento delle condizioni igienico ambientali e delle parti costruttive.

Statica e protezione sismica

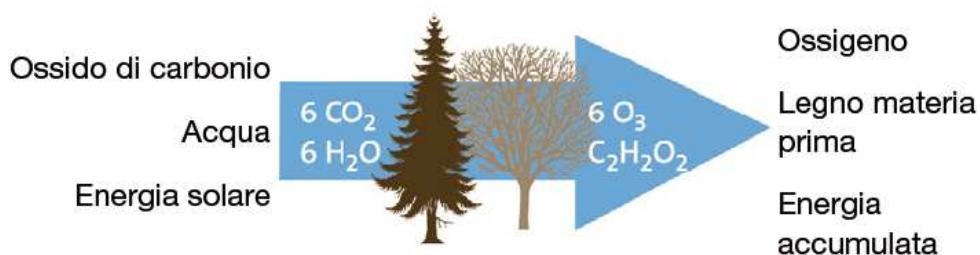
Grazie alle più recenti normative sia europee che nazionali in materia di calcolo strutturale e antisismico, il legno ha riacquisito la piena dignità che gli spetta di materiale strutturale. Recenti ricerche hanno evidenziato l'ottimo comportamento delle strutture di legno sottoposte ad azione sismica. L'edificazione con il legno in zona sismica si configura pertanto oggi sicura al pari di tutti gli altri sistemi costruttivi. D'altronde antiche costruzioni miste legno pietra hanno dimostrato che possono resistere anche a terremoti devastanti. Proprio dal punto di vista sismico il legno possiede proprietà molto importanti che lo rendono particolarmente adatto a questo tipo di sollecitazione; ad esempio le sue caratteristiche meccaniche aumentano al diminuire della durata dell'azione sollecitante, ossia offre grande resistenza ad azioni di breve durata proprio come

sisma e vento. Nella maggior parte dei casi, poi, gli elementi di legno sono collegati tra loro con connettori deformabili. Questi tipi di connettori, se adeguatamente dimensionati, permettono alle strutture di legno di raggiungere quel comportamento duttile che è ideale per la resistenza all'azione sismica. Le costruzioni di legno sono infine caratterizzate da un ottimo rapporto tra resistenza e peso proprio; pertanto se confrontate con le costruzioni in muratura, hanno una massa molto minore e risentono quindi meno dell'azione sismica.

Protezione dal rumore

In un'epoca dove il livello di rumore è in costante aumento, cresce il bisogno di calma e tranquillità e con esse la richiesta di isolamento acustico. Nelle moderne strutture di legno la protezione dal rumore si realizza principalmente con una precisa combinazione di strati di materiali termoisolanti che, uniti ad un opportuno disaccoppiamento acustico e un accurato studio dei dettagli di connessione, consentono di rispettare i requisiti acustici più severi. In questo modo le case di legno sono in grado di raggiungere la stessa protezione contro il rumore aereo delle costruzioni in muratura, in molti casi persino con spessori e massa minori. Anche il rumore da calpestio può essere limitato con un'accurata scelta degli strati di sottofondo e di controsoffitto.

1.2.3.2 Potenzialità ecologiche



Il legno ha delle grandi potenzialità dal punto di vista della sostenibilità perché è una materia rinnovabile capace di assorbire CO_2 dall'atmosfera.

In ogni m^3 di legno sono racchiusi circa 900 kg circa di CO_2 . L'impiego del legno come materia prima rinnovabile riduce l'aumento di CO_2 nell'atmosfera e contrasta quindi l'effetto serra. Gli alberi con la fotosintesi clorofilliana assorbono CO_2 dall'aria e acqua e sostanze nutritive dal terreno per creare materiale organico, ovvero il legno. Durante questo processo, si sfrutta la luce e si scompone la molecola del diossido di carbonio a basso tenore energetico in un atomo di carbonio, ricco d'energia, ed una molecola di ossigeno, anch'essa carica di energia. L'ossigeno (O) viene nuovamente restituito all'ambiente. Al contrario, il carbonio (C) è utile alla generazione organica dell'albero e rimane imprigionato nel legno per tutta la sua durata sotto forma di carbonio biogenico. Ogni tronco che viene utilizzato crea spazio per nuovi alberi incrementando la capacità di conservazione del carbonio all'interno del legno. Senza lo sfruttamento del legno, ad esempio nelle aree boschive non sottoposte ad abbattimento, il carbonio viene nuovamente rilasciato nell'atmosfera sotto forma di CO_2 con la decomposizione degli alberi senza produrre nessun vantaggio.

Nei periodi caratterizzati da un incremento di emissioni di CO_2 , grazie ad una silvicoltura regolata, le aree boschive curate e stabili, come si possono trovare in tutta l'Europa settentrionale, rappresentano uno dei fattori di maggiore importanza per la riduzione delle emissioni di CO_2 . In questo modo offrono il loro contributo ad un futuro positivo e sostenibile. Per così dire, il carbonio forma l'impalcatura della struttura organica dell'albero (corpo ligneo) e rimane imprigionato per tutta la "vita" di cui dispone l'albero come albero oppure materiale per costruzioni. Solo con la combustione o con la decomposizione naturale del legno il carbonio viene nuovamente rilasciato nell'atmosfera. In questo modo non contribuiscono solo le aree boschive, ma soprattutto gli edifici, i mobili o persino i giocattoli realizzati in legno utilizzato come contenitore di carbonio per ridurre il tenore di CO_2 presente nell'atmosfera. A prescindere dal modo in cui si utilizzano gli alberi, il carbonio rimane imprigionato al loro interno per tutta la durata dei prodotti. Secondo questo approccio, l'impiego esteso del legno, una materia prima ad emissioni di CO_2 zero, come materiale per l'edilizia e le costruzioni, riveste un ruolo significativo nella necessaria riduzione internazionale delle emissioni di CO_2 contribuendo alla tutela del clima in modo sostanziale.

Inoltre nella produzione di legno da costruzione e materiali in legno di regola serve molto poca energia. Nel corso di tutto il processo produttivo che comprende l'abbattimento degli alberi, la produzione, la lavorazione dei prodotti (taglio con sega, trattamento superficiale, assemblaggio, ecc.), ma anche il trasporto fino al cantiere, il montaggio e la sua dimissione il consumo energetico (la cosiddetta "energia grigia") è di gran lunga inferiore rispetto agli altri sistemi di costruzione. Rispetto alle costruzioni in laterizio, il consumo di energia totale del legno è circa il 75% in meno. Questa enorme differenza deriva dal fatto che i mattoni per essere prodotti necessitano di temperature molto elevate per tempi lunghi che vengono generate per la maggior parte con combustibili fossili. Il legno non è mai un rifiuto,

ma è, e rimane, un prodotto di pregio. Mentre i calcinacci minerali devono essere smaltiti in modo separato e costoso, il legno può essere trasformato nuovamente in materiali derivati dal legno o semplicemente usato come combustibile naturale. In ogni listello di legno la CO₂ è intrappolata sotto forma di carbonio e non finisce nell'atmosfera fino a quando il legno non viene trattato in un valorizzatore termico nell'ultimo passaggio del processo di riciclaggio. Un'abitazione in legno che viene smontata dopo il suo impiego non lascia dietro di sé rifiuti non riciclabili, ma solo prezioso legno. Alcuni componenti o elementi possono essere riutilizzati, mentre il legno residuo viene sfruttato per la produzione di energia. Con la combustione viene rilasciata solo una certa quantità di CO₂ imprigionata nel legno. In questo modo si completa il ciclo naturale del carbonio.

Nel protocollo di Kyoto sono stati definiti il rispetto delle aree boschive come forma di dispersione del carbonio e la possibilità di realizzare un meccanismo commerciale delle emissioni.

Quando lo sfruttamento del legno diventa un problema

Il legno è l'unico materiale da costruzione che si può definire una risorsa rinnovabile, ma negli ultimi anni l'attività dell'uomo ha gravemente ridotto questa risorsa. Lo sfruttamento incontrollato di foreste e boschi ha comportato nel corso del tempo la desertificazione di vaste aree del pianeta, con gravissime conseguenze ambientali. Il problema da una parte discende dal commercio illegale di semilavorati spediti in Europa e negli Stati Uniti, poiché, nota Jacopo della Fontana (1997, p.2), "Molte nazioni del terzo mondo dipendono pesantemente nell'economia dalle esportazioni dallo sfruttamento massiccio delle loro foreste (...). La mancata lavorazione sul posto del materiale le priva di un potenziale di lavoro interno e quindi di crescita sociale" e dall'altro dalla trasformazione delle aree boschive in campi per l'allevamento di bestiame che in pochi anni si esaurisce: secondo gli economisti un ettaro di pascolo rende annualmente circa 60 dollari, per una durata di meno di 20 anni. Lo stesso ettaro lasciato a foresta, gestito con piani di taglio progettati in modo da non erodere le dotazioni complessive, rende in media 200 dollari l'anno per un tempo indefinito.

Anche dal punto di vista sociale le compagnie del legno causano direttamente o indirettamente una serie di problemi. Per le popolazioni locali, infatti, le operazioni forestali arrivano inaspettate e improvvisamente cambiando la loro vita. Le operazioni sono veloci, durano il tempo necessario all'esaurimento della foresta, ma le conseguenze sono permanenti.

Le condizioni di lavoro sono pessime con gravi conseguenze sulla salute: i lavoratori nei magazzini e nelle segherie spesso non hanno sufficienti indumenti protettivi e la polvere di segatura provoca loro diverse malattie respiratorie complicate anche dai composti chimici tossici necessari per proteggere il legno da parassiti e muffe. Spesso si tratta di pesticidi a base di lindano e pentaclorofenolo altamente tossici per l'uomo e per l'ambiente, a cui i residui vengono lasciati in una buca del terreno con conseguente inquinamento del suolo e delle falde acquifere.

I tagli poi avvengono in modo incontrollato come una razzia, mostrando mancanza di rispetto oltre che per l'ambiente anche per le tradizioni locali. Ci sono alberi, ad esempio, come il Moabi (*Baillonella toxisperma*) e il Bubinga (*Guibourtia sp.*) che in Africa hanno una grande importanza. Un Moabi può raggiungere i 60 metri di altezza con un diametro di 4 metri, e rappresenta un importante punto di riferimento per chi si muove nella foresta, oltre a costituire un grande valore culturale e paesaggistico. I Moabi producono anche un prezioso olio utilizzato per cuocere nelle regioni della foresta, la cui produzione, per altro, rende molto di più del legno dell'albero abbattuto.

Per fronteggiare queste problematiche, nel 1987 si riunisce la commissione Brundtland (Commissione Mondiale sull'Ambiente e lo Sviluppo) che definisce il concetto di *sviluppo sostenibile* e continua ancora oggi ad avere forte influenza nel dibattito sulla

gestione delle foreste. Dal 1987, molte sono le pubblicazioni e gli accordi internazionali che si sono susseguiti. Tra questi la Convenzione sulla Biodiversità adottata nel 1992 dall'Unced (Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo), l'Obiettivo 2000 dell'Organizzazione Internazionale del Legname Tropicale ed il Programma d'Azione per le Foreste, presentato al convegno di Birmingham del 1998. Nonostante ciò, la strada verso pratiche sostenibili di silvicoltura è costantemente sabotata dalle crescenti forme di estrazione e commercio illegale di legname. Al fine di garantire l'applicazione dei diversi fattori connessi al concetto di sostenibilità, sono state individuate linee guida e strumenti idonei per intervenire sulla pianificazione, sull'attività gestionale e sul mercato. In tale ambito si inserisce la certificazione forestale che, sulla spinta delle principali organizzazioni non governative attive in campo ambientale, negli ultimi anni ha visto sviluppare alcuni importanti sistemi volontari di riferimento. La certificazione forestale è la dimostrazione del fatto che i prodotti provengono da boschi sottoposti a coltivazione sostenibile e mirano al mantenimento del patrimonio boschivo. Questo obiettivo viene perseguito con l'incentivazione e la promozione della coltivazione sostenibile. I severi criteri a cui si ispira la coltivazione delle aree boschive e il monitoraggio interno in combinazione con un monitoraggio esterno annuale in loco da parte di un ente di certificazione indipendente sono necessari a rispondere a questi obiettivi e disposizioni. Questa iniziativa ha avuto sin dall'inizio l'obiettivo di contrastare il diffondersi del commercio illegale del legno e promuovere la formazione di un mercato derivante da foreste gestite in maniera sostenibile anche attraverso l'incremento della capacità di controllo della produzione e del trasporto del legno e dei prodotti derivati. La soluzione infatti non è vietare il taglio delle foreste e dei boschi ma gestirli in modo attento e consapevole sia perché il legno è una risorsa straordinaria per potenzialità d'uso e LCA sia per non perdere le tradizioni culturali legate al legno, sia per la salute stessa delle foreste.

Il bosco ceduo europeo invece presenta il problema inverso, cioè quello dell'abbandono che lo porta progressivamente all'instabilità ecologica.

Durante il convegno organizzato dalla Holzbau il 26 settembre 2003 a Bressanone, sull'utilizzo del legno in architettura, il professore Julius Natterer (2003), studioso dell'argomento dagli inizi della sua carriera afferma: "I nostri antenati piantavano e proteggevano il bosco non solo per principi altruistici, ma perché consapevoli che da questo non ricavano soltanto materiale combustibile per il loro fuoco, ma anche il materiale necessario per costruire. Il bosco svolge diverse funzioni, influenza positivamente il clima, protegge il territorio, ha un valore culturale ed estetico altissimo. L'unico modo di salvaguardare anche per il futuro il patrimonio boschivo è quello di utilizzare il legno in edilizia".

Il mancato taglio dei boschi provoca il loro invecchiamento biologico cui può conseguire una maggiore instabilità ecologica e una minore funzionalità (...) I boschi ben gestiti, in cui i tagli non superano gli incrementi, continueranno a rimanere una fonte inesauribile di materia prima. È ampiamente dimostrato che una gestione intensiva ma corretta, ecologicamente sostenibile, può



Figura 1.39 Deforestazione incontrollata



Figura 1.37 Moabi



Figura 1.38 Taglio di un moabi

Il bosco ceduo europeo



Figura 1.40 Certificazione forestale



Figura 1.41 Pioppicoltura



Figura 1.42 Bosco ceduo abbandonato



Figura 1.43 Castagneto



Figura 1.44 Semilavorati di piccole dimensioni

determinare un aumento consistente della produzione legnosa senza particolari controindicazioni di carattere ambientale. È chiaro che la produzione legnosa di cui si tratta e che è necessario recuperare sia caratterizzata da pezzature di modeste dimensioni e, contemporaneamente, è doveroso cominciare a considerare non più disponibili i legnami di grandi dimensioni provenienti da foreste antiche e protette. Una gestione sostenibile del bosco consente, inoltre, di proteggere in maniera appropriata alcuni tipi di suolo e, contemporaneamente, di conservare intatte le dotazioni complessive. Questo principio è particolarmente valido per alcuni

tipi di arboricoltura in cui la maturità è raggiunta con turni di soli 10 anni, come la pioppicoltura o il bosco ceduo. Per quanto riguarda la pioppicoltura sono tuttora in corso in Francia, presso il *Centre Technique du bois et de l'ameublement* studi sugli impieghi del legno di pino nel lamellare. Il presupposto di queste ricerche è nel fatto che questa essenza si presta a coltivazioni estensive e di rapida crescita con ovvie conseguenze sui costi, benché, allo stato attuale delle ricerche, sia possibile affermare che le resistenze fisico-meccaniche del pino siano inferiori del 25-30% rispetto a quelle delle conifere comunemente impiegate nella fabbricazione del lamellare (Cunningham W.P., 2004, p. XI).

Il bosco ceduo, dal latino *caeduus* ossia adatto al taglio, a sua volta, si caratterizza per la periodicità dei tagli, con cicli di ricrescita di minimo 12 anni (garantiti dalla possibilità delle latifoglie di emettere nuovi getti, detti polloni, dalla ceppaia rimasta nel terreno), che insieme a quelli di manutenzione, pulizia a due anni e sfollo a otto anni, oltre ad essere finalizzati alla produzione di grezzi e semilavorati destinati al mercato, sono funzionali alla corretta conservazione del bosco, poiché proteggono il suolo dall'erosione dovuta agli agenti atmosferici, grazie al basso peso delle piante, all'intensità del reticolo radicale e alla costante copertura del terreno. In passato il bosco ceduo ha rappresentato una risorsa di primaria importanza poiché il breve turno di taglio (12, 24 anni) consentiva di produrre semi-lavorati di peso e ingombro limitati, facilmente trasportabili. Tuttavia l'interesse per il bosco ceduo si è andato perdendo con conseguenze disastrose per il mercato tradizionale.

Questo fenomeno è dovuto a diversi fattori: l'utilizzo di nuove fonti energetiche al posto del combustibile legno, l'evoluzione delle tecniche agricole (per citare un esempio, i pali di castagno tradizionalmente utilizzati nei vigneti sono stati sostituiti con pali in calcestruzzo), l'impiego, nel settore edilizio, di solai in calcestruzzo e acciaio e di impalcature interamente metalliche in sostituzione di quelle in tubi innocenti e Tavole di abete.

La diminuita portanza economica delle colture boschive, con conseguente riduzione del valore reale dei tagli di legname, ha prodotto in molte realtà italiane l'esodo dall'attività degli operatori, la mancanza di ricambio generazionale, ma soprattutto la mancata manutenzione del bosco ceduo (in particolare non si eseguono pulizia e sfollo), che comporta l'aggravarsi del rischio

incendio. Questo tema porta, evidentemente, le tematiche interne all'ecologia, nel campo dell'analisi economica, secondo i dettami di una disciplina relativamente nuova, che, come spiega ancora William Cunningham, è definita *economia ecologica*: "Questo è un campo transdisciplinare che vuole essere olistico, contestuale, sensibile ai valori ed ecocentrico. Nella sua concezione del mondo

include i principi della termodinamica; tra i suoi principali interessi ha la distribuzione equa delle risorse e dei diritti nella generazione attuale e tra essa e le generazioni future, ed è anche attenta ai diritti delle altre specie. Un'importante differenza tra questo nuovo campo e quelli precedenti è il riconoscimento del mondo come un sistema aperto, dinamico, in cui il sistema economico umano è inserito in modo inestricabile" (Berti S., Piazza M., Zanuttini R., 2002, p. 16).

In Italia in particolar modo, la maggior parte dei boschi cedui è costituita dal castagno e solo questa essenza copre una superficie di circa 700.000 ettari. Le regioni che mostrano le maggiori produzioni di legno di castagno sono Campania, Toscana, Calabria, Piemonte, Lazio dove avviene oltre il 90% della produzione nazionale. A livello regionale, con particolare riferimento alla Campania, l'industria boschiva del ceduo agisce tuttora su un mercato di produzioni assolutamente non adeguate alle potenzialità del legno.

Una soluzione sostenibile della risorsa legno è utilizzare colture a rapido accrescimento, da cui però si possono ricavare solo semilavorati di piccole dimensioni (diametro del tronco non superiore a 18 cm), il che, apparentemente, fa pensare a impieghi limitati della risorsa in questione.

Ma come ci insegna il caso del legno lamellare è possibile prescindere dalle dimensioni del tronco di partenza. È per questo particolarmente interessante notare che le recenti innovazioni in materia hanno come segno comune l'utilizzo di elementi in legno di dimensioni sempre più minute, fino ad arrivare ai trucioli o addirittura, in alcuni casi, alla segatura.

La grande battaglia ecologista sulla tutela delle foreste storiche ottiene, in prima istanza, il risultato di orientare parte della ricerca finalizzata all'innovazione tecnologica verso lo sviluppo di quei sistemi costruttivi che, come il lamellare, utilizzano semilavorati di piccole dimensioni, ottenibili da alberi relativamente giovani e provenienti da colture a rapido accrescimento.

In tal modo i contesti produttivi che hanno fondato la propria economia sull'utilizzo del legno si possano valorizzare e promuovere attraverso un processo di innovazione di modelli di produzione e attraverso il recupero di un modo di gestione dei boschi che apparteneva ad una tradizione oggi in forte crisi.

Gli ideatori dei nuovi compositi a base di legno (*Structural Composite Lumbers*) appaiono, dunque, particolarmente sensibili alle tematiche ambientali, in materia di gestione sostenibile delle foreste e dei boschi, del minor spreco possibile di materiale legnoso, e allo stesso tempo attenti al miglioramento delle prestazioni del materiale finale, dal punto di vista della durabilità, della resistenza meccanica, dell'efficienza strutturale. Per la produzione di questi nuovi compositi, si parte dalla possibilità di utilizzare fusti giovani per arrivare addirittura all'uso di legno riciclato come materia prima. La piccola dimensione della componente legnosa determina, inoltre, la possibilità di aumentare la plasmabilità del componente.

Sulla scia del legno lamellare, la cui invenzione precede l'insorgere della questione ambientale, nascono molte tecnologie fondate sulla ricomposizione di piccoli o piccolissime parti lignee ma sono tenute insieme da resine sintetiche, che se da un lato determinano eccezionali prestazioni dal punto di vista strutturale, allo stesso tempo sono fonte di grave inquinamento. Si tratta per lo più di collanti termoindurenti, generalmente derivati dalla condensazione della formaldeide con la resorcina; la condensazione è un processo di polimerizzazione che avviene con l'eliminazione dell'acqua dalla miscela per effetto del calore e di un catalizzatore. Quando i componenti raggiungono il punto di condensazione, le parti lignee vengono cosparse con l'aggiunta del catalizzatore. Il componente più pericoloso è proprio la formaldeide contenuta oltre che nella miscela di base, negli induritori contenenti paraformaldeide. In determinate circostanze (elevate temperature per esempio) i materiali trattati con questi prodotti rilasciano composti di formaldeide che si traducono in inquinamento dell'atmosfera e del terreno dovuto allo smaltimento dei residui delle lavorazioni. L'inalazione dei vapori di formaldeide, secondo alcune ricerche condotte negli Stati Uniti, può essere dannosa per il

Potenziale uso sostenibile del legno

sistema respiratorio degli uomini, e, in caso di incendio, il rischio di avvelenamento dovuto alla combustione di queste resine è molto elevato. Infine, la massiccia presenza di prodotti di sintesi, rende proibitivo il tradizionale metodo di dismissione delle parti lignee, derivanti dalla demolizione degli edifici, che prevedeva la trasformazione in legna da ardere e quindi una sorta di riciclaggio produttivo dei componenti alla fine del loro ciclo di vita.

Quindi se da un lato i semilavorati hanno un processo produttivo sostenibile dal punto di vista della gestione del bosco, dall'altro il materiale finito è fortemente inquinante e soprattutto non riciclabile.

Si può quindi sostenere che per soddisfare seriamente la domanda di eco-compatibilità la ricerca nel campo degli utilizzi del legno in edilizia deve seguire due strade: da una parte è necessario investire nel settore chimico, con la sperimentazione di colle non inquinanti (come per esempio la lignina¹³, polimero naturale che tiene insieme le fibre del legno, i risultati delle cui sperimentazioni non sono tuttavia ancora soddisfacenti), e dall'altra si rende indispensabile riscoprire sistemi fondati sull'assemblaggio, escludendo i diffusissimi incollaggi chimici, di elementi costruttivi derivati da semilavorati in legno massello di piccola dimensione.

1.2.4 I derivati del legno

La necessità di utilizzare ogni parte del legno e di superare i limiti dimensionali del tagliato hanno portato a diverse soluzioni di prodotti derivati e diversi sistemi costruttivi che vanno oltre il legno massello.

Per legno massiccio da costruzione si intendono listelli, Tavole, tavoloni e legno squadrato dal taglio o tramite profilatura di tondame in segheria per impieghi strutturali con funzione portante. Per impieghi in edilizia, il legno massiccio deve essere classificato secondo la resistenza in modo visivo o meccanico conformemente a DIN 4074. Per il legno di conifera e il legno di latifoglie esistono classi di resistenza differenti. Per ottenere un materiale più pregiato, il legno segato può essere sottoposto a ulteriori lavorazioni, ad es. essiccazione artificiale, piallatura, fresatura in generale. A seconda della specie legnosa, il legno da costruzione presenta anche una resistenza naturale diversa all'attacco di organismi nocivi. Per aumentarne la durabilità, il legno può essere trattato preventivamente con sostanze protettive. Per aumentare la lunghezza il legno massiccio da costruzione può essere giuntato a pettine, mentre per aumentare la sezione possono essere accoppiate due o tre lamelle di legno incollandole fra loro. Le singole lamelle possono essere giuntate longitudinalmente mediante giunti a pettine. La colla deve soddisfare i requisiti della UNI EN 301 per i componenti di legno con funzione portante.

Elementi massicci non portanti sono detti piallati. Hanno uno spessore minimo da 9,5 mm a 40 mm. I profilati trovano applicazione in interni ed esterni.

Il segato denota un potenziale molto basso rispetto ai numerosi criteri ambientali considerati, il più basso fra tutti i materiali di legno. L'impatto ecologico della segheria è determinato in particolare dall'essiccazione in camera, mentre il taglio ha un impatto sensibilmente inferiore. I processi di segheria hanno un impatto da 5 a 10 volte superiore rispetto all'impatto complessivo della produzione forestale. Le differenze fra le varie categorie sono relativamente ridotte e qualitativamente molto simili. Il prodotto non contiene alcuna percentuale di colla, pertanto non ha alcun impatto ecologico da questo punto di vista.

Elementi massicci monodimensionali



Tabella 1.17 Impatti ambientali elementi massicci riferiti a tonnellata secca

Impatti	Abete	Larice
Risorse abiotiche [g Sb eq]	145	182
Potenziale riscaldamento globale [kg CO ² eq]*	-775	-922
Potenziale riscaldamento globale [kg CO ² eq]	20	26
Fotosmog [g C ² H ²]	60	57
Acidificazione [g SO ² eq]	144	184
Sovrafertilizzazione [g PO ⁴ eq]	17	22
PEC non rinnovabili [MJ]	308	389
PEC rinnovabili [MJ]	8740	12853

* Tenendo conto dell'immagazzinamento di carbonio del legno

Attraverso le tecniche di *sfogliatura* e *tranciatura* si ottengono fogli di legno sottili che, opportunamente assemblati, danno vita a diverse tipologie di pannelli. Compensati, paniforti, pannelli sandwich e tamburati sono il risultato delle diverse modalità di unione dei fogli di legno, inoltre la necessità di risparmiare e di utilizzare ogni parte del tronco dà vita ai pannelli di particelle, di fibre e di lana di legno costituiti da frammenti di diverse dimensioni assemblati con l'uso di colle.

Questi prodotti offrono alcuni evidenti vantaggi rispetto alle Tavole di legno massello. Innanzitutto la possibilità di ottenere pannelli di notevoli dimensioni e di spessore molto diversificato (compensati, più sottili, e pannelli sandwich, più spessi), oltre che più leggeri e più resistenti (in particolare i tamburati). Inoltre i derivati

Pannelli



Figura 1.45 Pannello compensato



Figura 1.46 pannello truciolato OSB



Figura 1.48 Pannello di fibra a bassa densità



Figura 1.47 Pannello in lana di legno

presentano caratteristiche di resistenza uniformi, non più condizionate dalla direzione delle venature. A questo va aggiunta una maggiore stabilità dimensionale determinata dall'assemblaggio dei fogli che segue una logica di incrocio delle venature, dunque essi presentano una minore sensibilità alle variazioni dell'umidità atmosferica. Infine, alcuni pannelli offrono un'alta capacità coibente (in particolare quelli a base di lana di legno e quelli a base di fibra di legno).

Le principali controindicazioni relative ai derivati del legno riguardano la presenza, pressoché inevitabile al loro interno, di collanti di diversa natura e, con rare eccezioni, di tossicità accertata.

- Pannelli stratificati:

Compensati: il termine deriva dalla possibilità di compensare le deformazioni naturali del legno attraverso l'incollaggio a pressione di fogli di tranciato o sfogliato, paniforti, tramezzini e tamburati: particolari tipi di compensati, i paniforti sono composti da un'anima in listelli o lamelle di legno massello (pioppo, abete, o pino) rivestita sulle due facce da fogli di tranciato o sfogliato di spessore compreso tra i 10 e i 30 mm, generalmente di pioppo o betulla, disposti con venatura ortogonale rispetto ai listelli; gli spessori complessivi variano da 10 fino a 50 mm; i tramezzi o pannelli sandwich sono prodotti simili ma hanno un'anima in pasta di legno pressata, schiuma di gomma, acetato di cellulosa espanso o fogli di carta ondulata; in tutti i casi la parte interna funziona come isolante o pannello di irrigidimento.

Il legno compensato di piallacci presenta un potenziale elevato nella maggior parte dei criteri ecologici considerati (potenziale di riscaldamento globale, acidificazione, PEC e fotosmog). Ciò è dovuto alla quantità di risorse necessarie alla produzione dei piallacci e degli adesivi, all'uso importante di energia elettrica - che a livello europeo (UCPTE-Mix), a causa delle quantità importanti di energia elettrica di origine nucleare o termica, provoca importanti problemi ecologici e si manifesta quindi in modo negativo sul bilancio ecologico -, e ai quantitativi di adesivi utilizzati. La quantità di adesivo nel prodotto è piuttosto importante e quindi anche il suo effetto sulla valutazione globale.

Truciolati: il termine indica l'utilizzo di scarti di legno finemente sminuzzati essiccati, mescolati e incollati a pressione per ottenere pannelli con elevate caratteristiche meccaniche, di basso costo, indeformabili, con minori limiti dimensionali rispetto ai compensati ma di peso unitario maggiore; gli spessori variano da 3 a 24 mm e la lunghezza è determinata in funzione delle necessità, il truciolato infatti è prodotto in nastro continuo tagliato in misure standard. Le facce dei pannelli possono essere lisce e compatte o rivestite con fogli di truciolati o di laminato plastico. Il limite maggiore dei truciolati è di non poter essere assemblati con tecniche di incastro tradizionali, viti o chiodi; si sono pertanto messe a punto tecniche di assemblaggio che utilizzano elementi complementari come spigoli di massello, spine, biette, profili di plastica o alluminio e metodi di unione con caviglia e bullone; il truciolato inoltre in presenza di umidità eccessiva può gonfiarsi perdendo le sue caratteristiche meccaniche.

Rispetto alla maggior parte dei criteri ambientali, i pannelli OSB mostrano un potenziale da basso a moderato. Per PEC, risorse abiotiche e potenziale di ossidazione fotochimica, i valori sono tuttavia superiori alla media degli altri materiali a base legno. Ciò è dovuto, nel caso specifico, all'elevato fabbisogno elettrico per la fabbricazione del prodotto, che determina gravi problemi ecologici in tutta Europa (UCPTE-Mix) in virtù dei forti consumi di energia atomica e termica, che hanno un'incidenza negativa sul bilancio, e delle quantità di colla utilizzate. La percentuale di colla nel prodotto è mediamente alta e, pertanto, incide nella stessa misura sull'impatto ambientale complessivo del prodotto.

- Pannelli di fibre:

Prodotti con frammenti e cascami (abete, pioppo o faggio) ammorbiditi al vapore a 170° e opportunamente sfibrati meccanicamente con mole rotanti al fine di ottenere una massa omogenea; da ciò si ottengono diverse tipologie di pannelli utilizzando procedimenti a secco o con addizione di acqua. Si distinguono in teneri meno di 350 kg/m³, semiduri 350-800 kg/m³ o di durezza normale 800 o più kg/m³. I più comuni prendono il nome commerciale di faesite, manosite o MDF. Gli spessori variano da 2 a 11 mm e le dimensioni possono raggiungere i 5 m. Il loro utilizzo nel settore dell'edilizia varia dalle controsoffittature e rivestimenti in genere alle casse formi.

Rispetto alla maggior parte dei criteri ambientali, il pannello di fibre mostra un potenziale molto basso. Questo è dovuto nel caso specifico al consumo ridotto di energia elettrica per la fabbricazione del prodotto. La percentuale di colla nel prodotto è eccezionalmente bassa e, pertanto, incide nella stessa misura sull'impatto ambientale complessivo del prodotto. Bisogna sottolineare in particolare il fatto che il potenziale di riscaldamento globale del pannello di fibre a bassa densità ha un valore negativo. Infatti, questo pannello mantiene intatto il "credito" per l'immagazzinamento di CO₂ che tutti gli altri materiali a base legno compensano invece con l'utilizzo di colla o il consumo elevato di energia per la fabbricazione.

- Pannelli in lana di legno:

Realizzati con strisciole di legno di spessore inferiore al mm, tagliate nel senso della fibratura, impregnate con sostanze ignifughe, antiparassitarie e antiputrescenti, le strisce vengono agglomerate con materiali leganti a formare pannelli rigidi ricchi di cavità irregolari. Lo spessore varia da 1,5 a 7,5 cm e le dimensioni raggiungono i 2 m. Utilizzati solitamente per la realizzazione di controsoffittature e pareti isolanti.

Tabella 1.18 Impatti pannelli riferiti a tonnellata secca

Impatti	OSB3 colla pf	Comp. colla pf	Pannello di fibra
Risorse abiotiche [g Sb eq]	2580	5214	1014
Potenziale riscaldamento globale [kg CO ₂ eq]*	-786	-424	-156
Potenziale riscaldamento globale [kg CO ₂ eq]	250	538	139
Fotosmog [g C ² H ²]	269	353	40
Acidificazione [g SO ₂ eq]	1983	3612	1097
Sovrafertilizzazione [g PO ₄ eq]	172	297	50
PEC non rinnovabili [MJ]	5476	11115	3074
PEC rinnovabili [MJ]	17367	27402	3293

* Tenendo conto dell'immagazzinamento di carbonio del legno



Figura 1.49 Legno lamellare



Figura 1.50 Legno lamellare



Figura 1.51 Le potenzialità del legno lamellare



Figura 1.52 Costruzioni in legno lamellare

1.2.4.1 Legno lamellare

Costituito da listelli di legno massello incollati tra loro a formare pannelli o travi di diverse dimensioni.

Il procedimento costruttivo prevede l'unione di lamelle lignee, normalmente di 33 mm di spessore, incollate con adesivi sintetici ad alta resistenza, per dare forma a elementi di dimensione prestabilita. Generalmente quando si tratta di travi queste non superano i 200-220 mm di larghezza, per un'altezza che può superare i 2 metri. Il vantaggio offerto dal legno lamellare consiste nel massimizzare e uniformare le caratteristiche di resistenza meccanica del materiale attraverso una selezione che permette di scartare le parti di legname contenenti nodi e imperfezioni.

Il tipo di collante utilizzato, inoltre, consente di realizzare un legame meccanico del tutto analogo per caratteristiche a quello naturale. Gli altri vantaggi del legno lamellare consistono nel presentare caratteristiche meccaniche elevate in rapporto al peso proprio degli elementi strutturali, nel ridurre le variazioni dimensionali determinate dall'umidità, offrendo la possibilità di conformare gli elementi secondo una grande varietà di profili oltre ad una facilità di collegamento mediante chiodatura, imbullonamento e incollaggio.

Il processo produttivo del legno lamellare prevede le seguenti fasi:

- *scelta del legname*: il materiale deve essere il più omogeneo possibile; si utilizzano legnami facilmente reperibili ed economici, generalmente l'abete rosso o, per lavorazioni speciali, il pino silvestre, il rovere o il larice; la norma di riferimento DIN 1052 fissa due categorie di legnami in funzione delle loro caratteristiche fisico-meccaniche e delle tensioni massime ammissibili; la normativa stabilisce inoltre le dimensioni massime in 60 cm" per l'area della sezione trasversale per legni di conifera e 50 cm² per legni di latifolia, la larghezza massima è fissata in 25 cm e l'altezza delle lamelle non supera i 30 mm se non per elementi costruttivi dritti per i quali può arrivare a 40 mm; per le travi curve il raggio di curvatura degli elementi strutturali deve essere almeno 200 volte lo spessore delle singole lamelle;

- *essiccazione*: avviene in modo *artificiale* in appositi essiccatoi e, dopo un periodo di riposo di due o tre giorni necessario ad equilibrarne il livello, l'umidità finale deve essere compresa tra il 7 e il 16%, mentre tra due lamelle adiacenti la differenza non deve superare il 4%;

- *controllo qualità*: le lamelle subiscono due tipologie di controlli: la prima, per rilevare la presenza di sacche di umidità, prevede anche un controllo delle condizioni ambientali dei reparti di lavorazione e stoccaggio del legname; la seconda prevede la ricerca visiva di difetti (nodi, imbarcamenti, inclinazione, cipollature) e l'eventuale asportazione delle parti non rispondenti ai parametri di qualità prefissati;

- *giuntatura di testa*: successivamente alla fresatura si procede all'unione di testa delle lamelle; il tipo di giunto trasversale più utilizzato è quello detto a *pettine*, a *dita* o a *becchi* che offre un'ampia superficie di incollaggio e ha pochi stridi rispetto ad altre tipologie di giunzioni;

- *piallatura e calibratura*: la piallatura e la calibratura delle superfici da incollare consentono di ottenere piani lisci e privi di imperfezioni, condizioni necessarie alla corretta unione delle lamelle;

- *incollaggio e pressatura*: le colle utilizzate (a base di resorcina-formaldeide, melammina-urea-formaldeide o urea-formolo) creano un legame intermolecolare tra la colla e le fibre di cellulosa e lignina, perciò la resistenza meccanica ottenuta tra due lamelle è analoga a quella delle molecole di legno; l'operazione di incollaggio avviene mediante pressatura uniforme.

Per la maggior parte dei criteri ambientali considerati, il legno lamellare mostra un potenziale moderato, tuttavia denota un elevato potenziale di acidificazione. Ciò è dovuto, nel caso specifico, all'elevato fabbisogno elettrico per la fabbricazione del prodotto, che determina gravi problemi ecologici in tutta Europa (UCPTE-Mix) in virtù dei forti consumi di energia atomica e termica, che hanno un'incidenza negativa sul bilancio, e delle quantità di colla utilizzate. Un altro fattore determinante è il processo di essiccazione per la preparazione del segato. La percentuale di colla nel prodotto è relativamente bassa e, pertanto, incide nella stessa misura sull'impatto ambientale complessivo del prodotto.

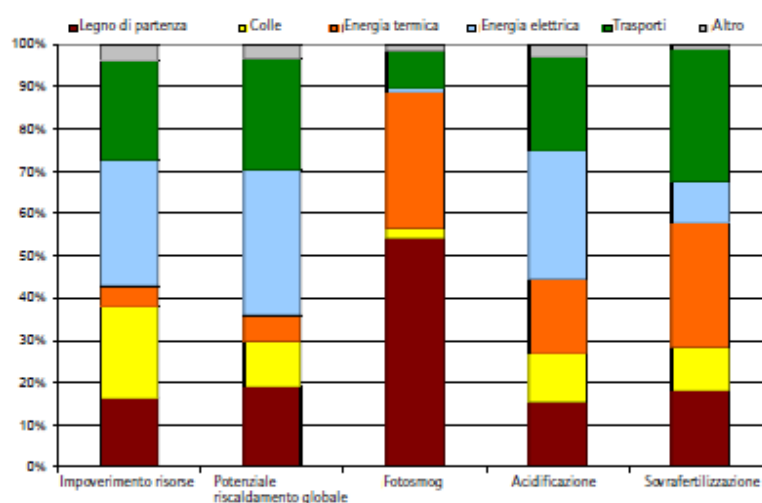


Figura 1.53 Impatti ambientali per processi del legno lamellare

Tabella 1.19 Impatti riferiti a tonnellata secca

Impatti	Legno lamellare	X-Lam colla pf
Risorse abiotiche [g Sb eq]	1660	2538
Potenziale riscaldamento globale [kg CO ² eq]*	-571	-775
Potenziale riscaldamento globale [kg CO ² eq]	202	271
Fotosmog [g C ² H ²]	210	307
Acidificazione [g SO ² eq]	1750	1818
Sovrafertilizzazione [g PO ⁴ eq]	173	148
PEC non rinnovabili [MJ]	3335	5339
PEC rinnovabili [MJ]	19640	21740



Figura 1.54 X-Lam 5 strati



Figura 1.56 Sezione pannello X-Lam



Figura 1.55 Giunto per pannelli X-Lam



Figura 1.57 Montaggio pannelli X-Lam

1.2.4.2 X-Lam (Cross Laminated Timber)

Il Sistema costruttivo è basato sull'utilizzo di elementi edilizi pieni realizzati tramite la sovrapposizione di tre, quattro, cinque o sette strati di Tavole di legno disposti a fibre incrociate. Le Tavole che formano lo strato esterno generalmente sono disposte verticalmente e possono essere unite anche con giunti maschio-femmina. In alcuni casi le Tavole interne sono separate tra loro per ridurre il peso e permettere la facile disposizione delle canalizzazioni degli impianti per l'assemblamento delle Tavole si possono utilizzare colle che garantiscono l'assenza di emissioni di formaldeide; alcuni sistemi prevedono l'assemblaggio tramite chiodatura. I pannelli a più strati così ottenuti hanno una notevole capacità di ripartire i carichi puntuali, perpendicolari alla loro superficie e contemporaneamente

resistere ai carichi agenti lungo le direttrici principali del piano. Per questa loro caratteristica sono adatti per realizzare pareti esterne con funzione portante e di controventamento, pareti interne, solai piani e inclinati ed anche elementi a sviluppo rettilineo come architravi e montanti. Pareti e solai così ottenuti formano una struttura a tre dimensioni indeformabile, a patto di utilizzare adeguati sistemi di connessione; di solito si utilizzano connettori meccanici (bulloni, aste filettate, chiodi, spinotti) in grado di garantire la trasmissione dei carichi tra un elemento e l'altro. Gli spessori degli elementi edilizi così ottenuti variano a seconda del numero di strati, delle essenze legnose utilizzate e delle sollecitazioni a cui sono sottoposti in relazione alle destinazioni funzionali; presentano dimensioni comprese tra i 7,5 e i 16 cm

circa, lo spessore ridotto in relazione alla resistenza elevata è una delle caratteristiche di questo sistema costruttivo. Un altro fattore che rende interessante la tecnica in oggetto è la semplicità di fabbricazione e la velocità delle fasi montaggio: gli elementi edilizi (solai, pareti...) vengono prefabbricati (l'elevato grado di modularità dei pannelli permette la realizzazione degli elementi su misura in base alle indicazioni di progetto), completi delle aperture previste e uniti gli uni agli altri direttamente in cantiere con semplici metodi di congiunzione che riducono considerevolmente i tempi di montaggio. La produzione avviene tramite impianti a controllo numerico che garantiscono la precisione delle misure. La semplicità di connessione è alla base dei metodi nei quali i materiali isolanti, e le finiture interne ed esterne sono resi solidali agli elementi portanti. La dimensione delle porte e delle finestre deve essere attentamente valutata in modo da non inficiare la capacità di trasmissione dei carichi verticali e orizzontali e quindi la capacità di irrigidimento degli elementi massicci. Di fatto la quantità di legno utilizzata in questo sistema determina la presenza di una massa considerevole che definisce interessanti valori in termini di isolamento termoacustico e di resistenza al fuoco. L'ottimo comportamento statico nei confronti delle sollecitazioni sismiche è raggiunto grazie al peso ridotto e alla concezione "tridimensionale" della struttura.

Uno dei limiti del sistema costruttivo in esame sta nel fatto che, pur consentendo una buona libertà compositiva (oltre che la possibilità di abbinare al legno l'uso di materiali diversi), è necessaria una definizione anticipata delle scelte progettuali per evitare che le modifiche "in corso d'opera" pesino sull'economia dell'intero sistema.

Come già per il legno lamellare, anche in questo caso deve aver luogo, dopo quello tecnico, anche uno sviluppo giuridico e normativo del prodotto: ancora non esiste un regolamento vincolante che ne stabilisca in modo univoco caratteristiche e campi di applicazione. Esistono al momento solo omologazioni specifiche per il prodotto delle singole aziende, che offrono al progettista la massima sicurezza riguardo ai contenuti e tutte le informazioni rilevanti, ma non ne consentono un uso generale e standardizzato. Ciò è dovuto principalmente al retroterra imprenditoriale del singolo produttore: alcuni utilizzano per la produzione di pannelli di legno massiccio a strati incrociati X-Lam materiale proveniente dalla propria segheria, altri comprano appositamente il legno, altri ancora producono in un capannone di dimensioni ben definite e particolari. Tutto ciò si ripercuote sulle diverse dimensioni finali dei pannelli. Da questo, e dalla denominazione finora ancora non unificata dei prodotti, sono sorte differenze, che talvolta creano confusione presso gli utenti. Il problema è stato comunque riconosciuto ed è iniziata l'elaborazione a vari livelli di regolamenti vincolanti.

Principali caratteristiche dei pannelli X-Lam:

- Costruzione massiccia: isolamento acustico, elevata protezione antincendio, in grado di sopportare carico, massa con capacità di accumulo materiale
- Unico: utilizzo di un unico materiale e un unico sistema costruttivo per realizzare pareti portanti, ma anche solai, copertura e parte interne
- Tempi di costruzione ridotti: montaggio veloce ed a secco, immediatamente caricabile.
- Comodità abitativa: la temperatura superficiale è vicina alla temperatura ambientale.
- Qualità a vista: abete, larice, pino cembro, abete bianco, pino Douglas e cembro possono essere piallati, levigati, spazzolati a seconda del grado di finitura che si vuole ottenere.
- Superficie senza fughe: lo strato più esterno è un pannello monostrato senza fughe tipo tavola, senza giunti mobili tra gli elementi.
- Guadagno di spazio: guadagno di spazio grazie allo spessore ridotto della struttura per case ecologiche e case passive.
- Prefabbricazione: costruzione economica grazie alla prefabbricazione dell'intera parete che comprende l'isolamento a cappotto, e considerando anche il montaggio da parte di una ditta specializzata.
- Costruzione antisismica: costruzioni ad elementi, i giunti avvitabili degli elementi consentono di assorbire e compensare le vibrazioni.
- Stabilità dimensionale: grazie alle fibre incrociate, i pannelli non si ritirano o rigonfiano con il variare di temperatura e umidità.
- Isolamento termico: le eccellenti caratteristiche di accumulazione e d'isolamento proteggono i locali dal surriscaldamento estivo.

Si distinguono:

- Pannelli di Tavole parallele. Elementi edilizi massicci ottenuti tramite l'assemblaggio, mediante chiodi, spinotti di legno o colla, di una serie di Tavole che vengono affiancate e posizionate "di costa". Si realizzano in tal modo pareti, solai e coperture che garantiscono la conducibilità termica del legno massiccio. Gli spessori dei componenti così realizzati variano in funzione della larghezza delle singole Tavole e della funzione statica a cui *devono* assolvere: tra gli 8 e i 10 cm per le pareti e tra i 12 e i 20 cm per i solai. L'assemblaggio delle singole Tavole permette di ottenere elementi piani della larghezza desiderata, nei quali eventuali correnti disposti superiormente e inferiormente alle Tavole assicurano la trasmissione degli sforzi orizzontali. Le lastre realizzate con questo sistema e utilizzate per i solai possono essere abbinata all'uso del calcestruzzo, tramite la realizzazione di adeguate connessioni. Si ottengono così strutture di solaio miste in grado di coprire luci di 10 metri.
- Multistrato strutturale. Il principi costruttivi e statici sono assimilabili alle tecniche costruttive a pannelli a Tavole incrociate; in questo sistema le Tavole

*Principali
caratteristiche*

vengono sostituite da tre, cinque o sette strati incrociati di pannelli in legno monostrato di spessore variabile. Costituiti da essenze resinose non pregiate, gli elementi edilizi ottenuti hanno formato massimo di 4.5x20 m. Anche in questo caso gli spessori sono limitati, compresi tra 54 e 186 mm, ma garantiscono ottimi risultati sia in termini di resistenza alle sollecitazioni che in termini di coibenza termoacustica, è di facile realizzazione e veloce da assemblare.

Rispetto alla maggior parte dei criteri ambientali, il compensato di Tavole mostra un potenziale da basso a moderato. Questo è dovuto nel caso specifico al consumo assolutamente ridotto di energia per la fabbricazione del prodotto. In termini relativi

l'impiego di energia elettrica è in questo caso il fattore con maggiore impatto. La percentuale di colla nel prodotto è relativamente bassa e, pertanto, incide nella stessa misura sull'impatto ambientale complessivo del prodotto.

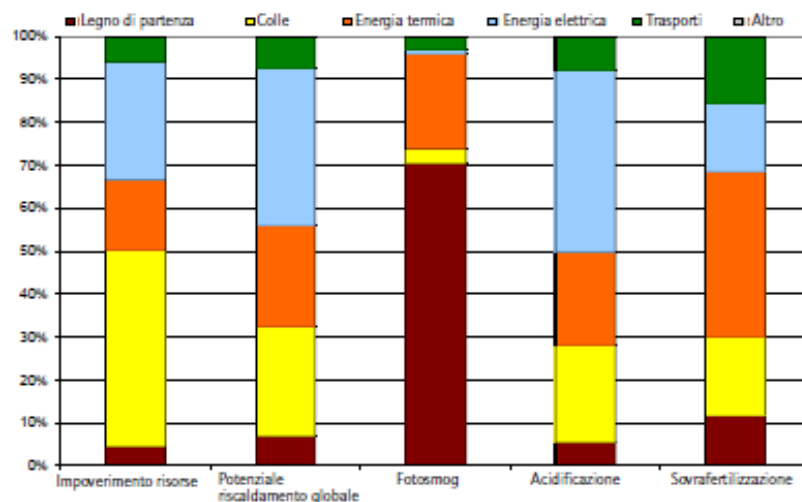


Figura 1.58 Impatti ambientali per processi dell'X-Lam

1.2.5 Tecniche costruttive

La diffusione geografica del legno e la continuità temporale del suo utilizzo come materiale da costruzione hanno reso possibile il perfezionamento di una notevole quantità di tecniche costruttive ancora oggi utilizzate diffusamente.

Le tecniche costruttive lignee ancora oggi utilizzate si possono ricondurre a due grandi famiglie: costruzioni massicce e costruzioni leggere a telaio. Le prime si caratterizzano per l'uso di pareti, realizzate da una struttura portante definita da elementi piani di grandi dimensioni, separata dallo strato avente funzione di isolamento, in base ad una logica che tende a stratificare gli elementi in base al loro compito specifico (elementi portanti, isolamento, rivestimento). In quanto massicce le pareti offrono una buona inerzia termica che garantisce l'accumulo termico dell'edificio. Le costruzioni leggere si caratterizzano per l'uso di elementi lineari di piccole dimensioni che, assemblati a pannellature leggere, realizzano la struttura portante del sistema; l'isolamento è compreso nel piano della struttura portante e non si ha una stratificazione come nel precedente caso.

È possibile affermare che le tecniche costruttive lignee derivano da due sistemi costruttivi tradizionali: da un lato edifici realizzati con *tronchi di legno sovrapposti*, strutture massicce tipiche dei paesi scandinavi, della Russia, e in genere delle regioni montane, dall'altro gli edifici realizzati con *tecniche ad ossatura portante a graticcio*, costruzioni leggere diffuse in ampie zone dell'Europa centrale.

L'evoluzione delle costruzioni a graticcio definisce il sistema platform frame e i sistemi a montanti lunghi, Stav-klrke norvegesi, la cui evoluzione ha dato vita al sistema costruttivo a balloon frame utilizzato dai pionieri americani alla fine del XIX secolo: da questi sistemi, denominati ad ossatura portante, derivano quelli recenti detti a "gabbia portante", basati sulla definizione di una maglia tridimensionale di elementi portanti lineari. Specifico sviluppo del sistema a platform frame, inoltre, è il sistema degli edifici a pannelli portanti con intelaiatura di legno.

Nel gruppo delle costruzioni massicce vi sono gli edifici costituiti da tronchi sovrapposti, quelli costituiti da Tavole incrociate sovrapposte, quelli in legno ricostruito e quelli realizzati con pannelli multistrato strutturali.

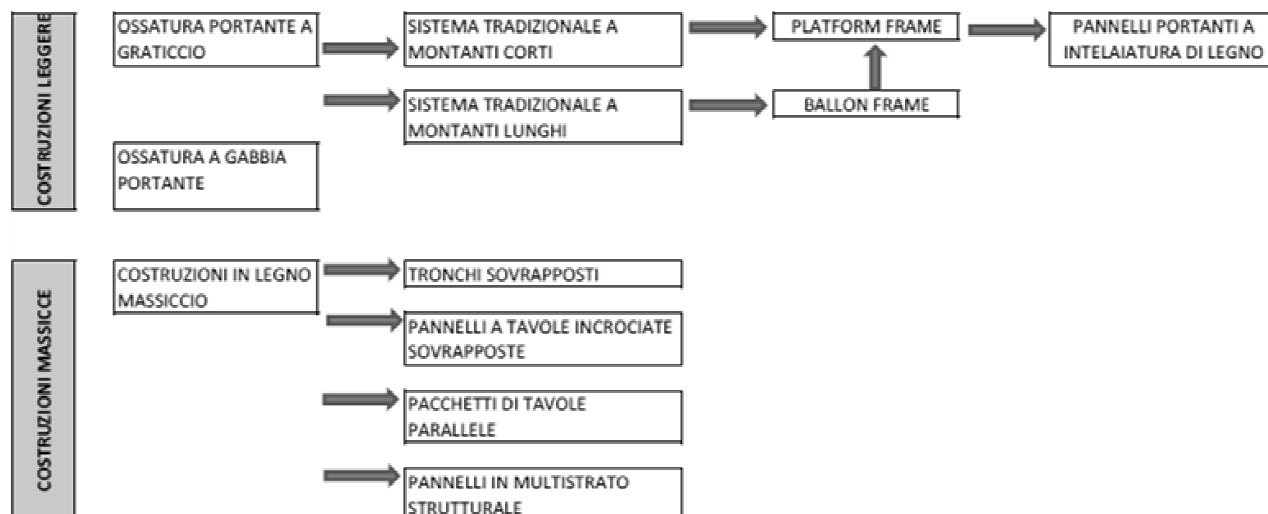


Figura 1.59 Schema sviluppo delle tecniche costruttive di legno

1.2.5.1 Edifici a ossatura portante o a graticcio

Per edifici a ossatura portante vanno intesi quei sistemi costruttivi, diffusi in ampie zone dell'Europa centrale orientale e settentrionale tra il XII secolo fino anche a metà XIX, in cui la funzione portante è svolta da elementi lineari di dimensione massiccia a sezione generalmente quadrata: pareti e chiusure esterne svolgono la sola funzione di tamponamento e protezione dagli agenti atmosferici. Il progressivo declino di questa tecnica costruttiva avviene con la rivoluzione industriale e la diffusione di metodi di connessione metallici (chiodi, bulloni, piastre) a basso costo. Questa tecnica costruttiva, infatti, era basata sull'utilizzo di incastri spesso complessi da realizzare, che richiedevano maestranze specializzate. Inoltre necessitava di un notevole impiego di legname in quanto gli incastri, riducendo la sezione resistente, rendevano necessario un sovradimensionamento degli elementi portanti. Peraltro, la discreta libertà lasciata nell'organizzazione planimetrica degli edifici, la possibilità di erigere edifici fino a sei piani di altezza e la relativa facilità costruttiva così come i tempi abbastanza brevi di costruzione e la disponibilità di materiale e il basso costo della manodopera ne decretarono il successo soprattutto tra il XV e il XVIII secolo nelle categorie emergenti di artigiani e commercianti in Francia e Germania.

Gli elementi strutturali orizzontali e verticali sono spesso irrigiditi da elementi diagonali di controventatura, che formano una serie di triangoli completamente indeformabili. Nella maggior parte degli edifici realizzati con questa tecnica costruttiva risulta evidente la netta distinzione tra la maglia portante e le parti che hanno la sola funzione di tamponamento e protezione dagli agenti atmosferici: tale distinzione funzionale è sottolineata dal loro caratteristico aspetto con la struttura

portante in vista e gli spazi vuoti tra gli elementi riempiti con mattoni intonacati o disposti a spina di pesce, con pietre, mattoni di terra cruda essiccata, impasti di terra e fibre vegetali o reti di vimini con rincalzi in malta di calce. In alcuni casi la struttura portante non è in vista ma viene protetta da uno strato di intonaco che permette l'uso di materiali diversi a costituire il tamponamento.

Nell'ambito di questa modalità costruttiva è possibile fare una distinzione tra un sistema che utilizza "montanti lunghi", costituito cioè da elementi unitari verticali portanti che vanno dal suolo alla copertura e sistemi a "montanti corti", in cui gli elementi strutturali verticali sono interrotti e assemblati all'altezza di ogni piano a correnti orizzontali. Il sistema a montanti corti è quello utilizzato e diffuso soprattutto nell'architettura medioevale, rinascimentale e barocca dell'Europa centrale e settentrionale. Il sistema a montanti lunghi, invece, raggiunge la sua massima espressione fra il X e XII secolo in Norvegia, dove la grande disponibilità di materiale e l'approfondita conoscenza ereditata dalle costruzioni navali in legno danno vita ad una cospicua produzione di edifici religiosi (stav-kirke).

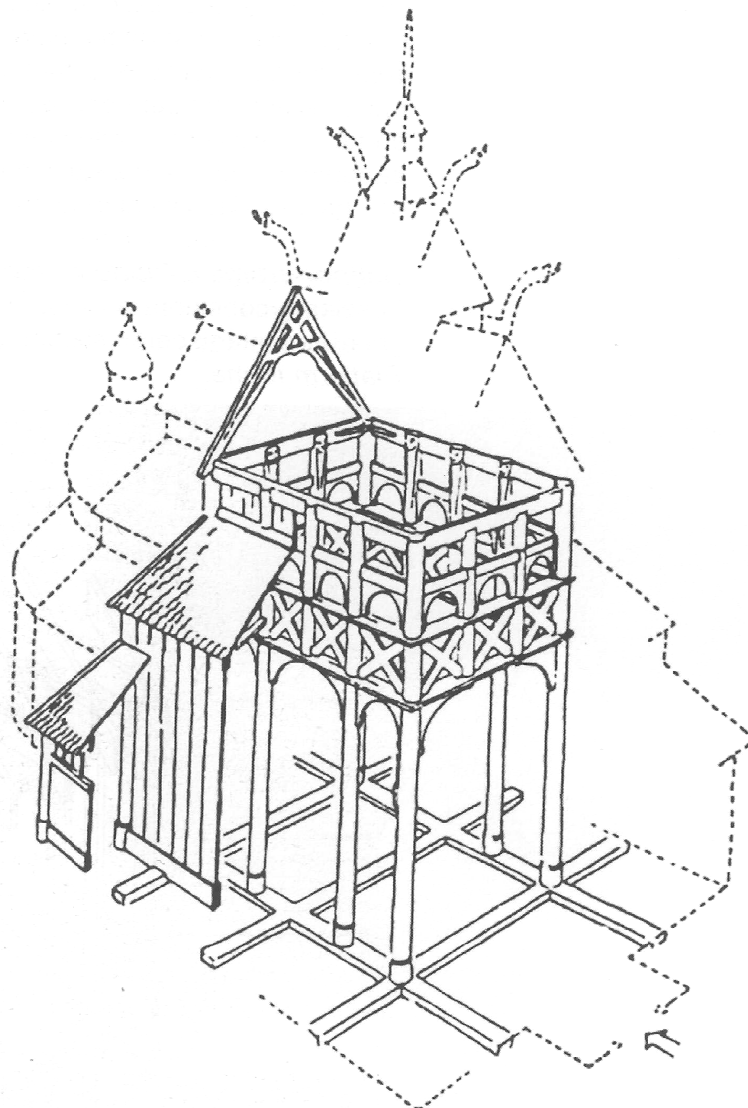


Figura 1.61 Graticcio a montanti lunghi, stav-kirke (Colabella S., 2006)

Gli edifici così costruiti sono definiti da una serie di pali alti anche fino a 11 m aventi diametro variabile tra i 30 e i 40 cm, sovradimensionato rispetto alle sole necessità statiche.

Tali pali, inizialmente confitti direttamente nel terreno, funzionano come pilastri dell'edificio e sono controventati nella loro parte superiore da mensole a quadrante e dai puntoni delle eventuali navate laterali. Il collegamento al tetto, sorretto da capriate a forbice, avviene tramite croci di sant'Andrea (croci decussate). Il sistema così scrupolosamente irrigidito opponeva naturale resistenza agli sforzi orizzontali determinati da carichi ventosi dovuti alle condizioni climatiche locali ed accentuati dall'esposizione degli edifici stessi, collocati per motivi religiosi sulla cima dei rilievi. L'umidità del terreno a diretto contatto con i pali era causa del rapido degrado di questi edifici, per tale ragione si realizzarono successivamente fondazioni costituite da travi rovesce in legno poggianti su basamenti in pietra. su ogni trave di fondazione si realizzavano delle cavità nelle quali venivano inseriti i pilastri (non più di quattro per parete) opportunamente modellati nella zona di incastro.

Interessanti sono le fasi costruttive che prevedevano il montaggio a terra delle strutture della navata centrale, complete di pali mensole e architravi di collegamento e successivamente l'innalzamento delle strutture stesse con tecniche derivate dalle costruzioni navali: a queste seguiva il montaggio sui longheroni superiori delle capriate a forbice della copertura a realizzare il completo irrigidimento e la completa connessione delle diverse parti dell'edificio. infine venivano erette le pareti con Tavole di modesto spessore. Il montaggio avveniva abbastanza rapidamente ma il requisito fondamentale era l'accurata preparazione dei singoli pezzi e degli incastri di collegamento degli elementi strutturali.

- *Ballon frame e Platform frame*

Possiamo considerare come evoluzioni delle tecniche tradizionali a montanti lunghi e a montanti corti i sistemi diffusi negli Stati Uniti denominati *balloon frame* e *platform frame*. Il sistema *balloon frame* si afferma intorno alla metà del XIX secolo (è del 1833 il primo edificio, una chiesa, realizzato con questa tecnica a Chicago) sostituendo i "vecchi" sistemi a telaio importati dall'Europa caratterizzati da travi pilastri e controventi uniti tra loro da incastri talvolta anche molto complessi.

La penuria di carpentieri specializzati in grado di costruire strutture articolate, la diffusione di chiodi, bulloni, piastre metalliche a basso costo resa possibile dall'industrializzazione dei sistemi produttivi, unita alla necessità dei "pionieri" americani di erigere edifici in tempi brevi, autonomamente o con semplici squadre di montatori e quindi con tecniche elementari, sono gli elementi che hanno reso possibile la diffusione e il successo di questo sistema costruttivo.

Il sistema è caratterizzato da montanti e travetti di sezione ridotta, disposti a breve distanza e uniti tramite chiodi; i montanti sono continui per l'altezza di due piani (limite massimo di altezza dell'edificio); un corrente superiore sostiene l'ossatura del tetto, a lato dei montanti sono fissate le travi tramite chiodatura: i montanti e i travetti del solaio del piano terra poggiano su un corrente di fondazione. Il rivestimento è realizzato con Tavole che assicurano l'irrigidimento e il consolidamento della costruzione; negli spazi vuoti tra i montanti viene inserito materiale isolante necessario a garantire l'adeguata protezione termica all'involucro edilizio, la controventatura è assicurata da aste inserite tra i montanti. È un sistema costruttivo basato sull'utilizzo di elementi di dimensioni standardizzate, prodotti industrialmente.

*Ballon frame e
Platform frame*

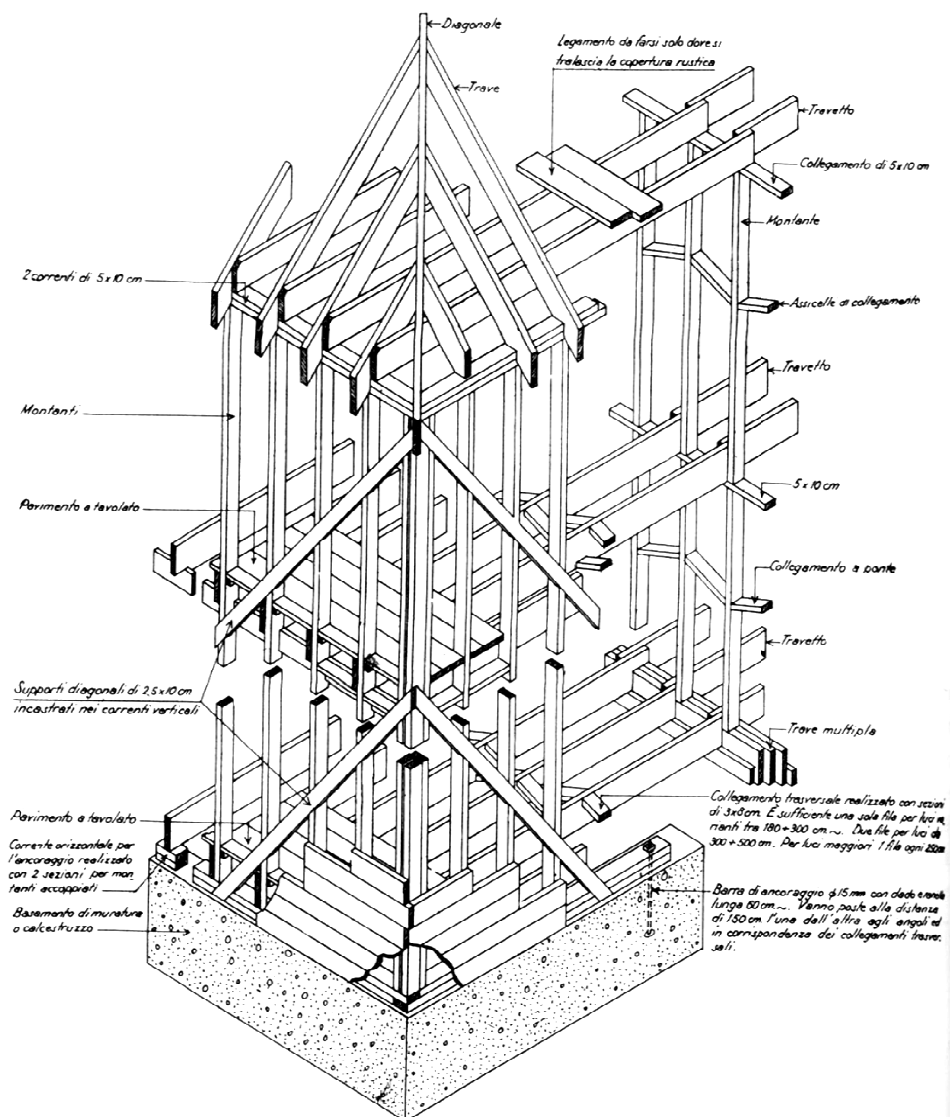


Figura 1.61 Sistema costruttivo Ballon frame (Colabella S., 2006)

Il sistema *platform frame* (telaio orizzontale) si può considerare l'evoluzione del *balloon frame*. Il principio è quello per cui il telaio orizzontale del solaio costituisce la superficie di appoggio per gli steli intelaiati (alti un piano) delle pareti perimetrali, dei tramezzi e dei tavolati. Questo sistema costruttivo ha permesso di superare l'altezza di due piani tipica dei sistemi a montanti verticali continui, rendendo possibile la realizzazione di edifici alti fino a sei piani. Le pareti e il tetto (la cui struttura è realizzata analogamente alle pareti verticali), possono essere costruiti in cantiere oppure prefabbricati e successivamente trasportati in cantiere, sollevati con un argano (visto il peso relativamente ridotto) e montati piano per piano. La struttura dei pannelli di parete è costituita da due correnti, uno posto sopra e uno al di sotto dei montanti verticali di sezione ridotta disposti con un interasse multiplo di 30 cm; i montanti vengono inchiodati di testa ai correnti. La funzione di controventatura necessaria alla tenuta statica dell'edificio è realizzata dal rivestimento della parete oppure da traversi diagonali. Il rivestimento con funzione di irrigidimento può essere realizzato da tavole di legno posate orizzontalmente o diagonalmente, attualmente anche da pannelli di compensato, da pannellature osb, o da pannelli di fibre. Su questo primo rivestimento si procede con diverse

tipologie di finitura, il rivestimento interno è di solito costituito da lastre di gesso che garantiscono una discreta protezione della struttura da eventuali incendi. tutte le connessioni necessarie al montaggio degli edifici che adottano questa tecnica sono realizzate unicamente da chiodi, scarpe e squadrette metalliche, sul corrente di fondazione appoggiano solo i travetti del solaio al piano terra e nessun montante.

- Sistema a pannelli portanti

La tecnica costruttiva a pannelli portanti si può a tutti gli effetti considerare come l'evoluzione del sistema platform frame con il quale ha in comune le fasi costruttive. Determinata dalla progressiva industrializzazione del processo produttivo che ha permesso lo sviluppo delle tecniche di prefabbricazione, questa può spingersi fino al completo assemblaggio in fabbrica dei setti portanti completi di isolamento, rivestimenti interni ed esterni realizzati con diverse modalità e materiali.

Il sistema si basa in sostanza su un'ossatura portante preassemblata in fabbrica, luogo nel quale avviene la maggior parte delle manovre di montaggio: l'ossatura è costituita, come nel sistema platform frame, da montanti corti disposti a una distanza di 62,5 cm (misura che permette di minimizzare lo scarto dei materiali di rivestimento interno, generalmente costituito da pannelli di legno, cartongesso o fibra-gesso, che hanno mediamente larghezza di 125 cm, e da materiali isolanti usati come tamponamento degli spazi liberi tra i montanti) e da un rivestimento esterno realizzato con lastre la cui funzione portante è tutt'uno con quella di tamponamento e di controventamento delle spinte orizzontali. Questo sistema costruttivo veniva già utilizzato nel dopoguerra per edificare architetture di modeste dimensioni, ma ha avuto il suo maggiore sviluppo in Francia e nel nord Europa negli anni '80. I moduli costruttivi possono esser utilizzati come pareti interne ed esterne, solai e strutture di copertura. Le differenze principali con l'originario sistema platform frame stanno nelle dimensioni maggiori di montanti e traversi che costituiscono il telaio interno dei pannelli; queste si rendono necessarie a sorreggere rivestimenti più pesanti in relazione alle peggiori condizioni climatiche; vengono inoltre eliminati gli elementi diagonali necessari a trasmettere gli sforzi orizzontali e sostituiti da Tavole diagonali o pannelli in multistrato o in legno ricomposto.

Il funzionamento a lastra dei pannelli è il tratto peculiare del principio strutturale di questo sistema costruttivo: pareti esterne, solai e tramezze interne (superfici *bidimensionali*) interagiscono tridimensionalmente tramite adeguate connessioni, realizzando così geometrie spaziali che oppongono adeguata resistenza alle spinte orizzontali scaricate dagli elementi edilizi esterni ai solai e alle pareti ad essi collegati. Un'altra caratteristica specifica del sistema costruttivo a pannelli portanti sta nel fatto che non utilizza alcuna connessione di carpenteria tra gli elementi prefabbricati implicando una notevole facilità esecutiva: le connessioni sono realizzate generalmente da zeppe di legno duro e ferramenta metallica quali viti e bulloni, piastre, chiodi, angolari, ecc., e devono esser adeguatamente realizzate e ben protette perché da esse dipendono in gran parte il comportamento statico, l'isolamento termo-acustico, la protezione dagli agenti atmosferici e la resistenza al fuoco dell'intero edificio. Il rivestimento esterno dei pannelli può come già accennato, essere realizzato con diverse modalità: legno disposto in Tavole orizzontali posate su un'armatura verticale, oppure assito verticale su armatura orizzontale, opportunamente forata per permetterne l'aerazione. oppure con pannelli preparati per accogliere l'intonaco; in caso di rivestimento con intonaco questo viene posato su uno strato di isolante che realizza un cappotto esterno oppure su contro-pareti in laterizio, è possibile inoltre pensare al rivestimento esterno tramite pareti ventilate in laterizio, che necessitano delle adeguate aperture alla base e in sommità per permettere la ventilazione della facciata.

*Sistema a pannelli
portanti*

Il livello di prefabbricazione del sistema può raggiungere gradi differenziati: dall'utilizzo di elementi lignei di misure standard montati in cantiere, all'utilizzo di pannelli assemblati completamente in fabbrica.

Un'ulteriore evoluzione si è raggiunta con la produzione di vere e proprie cellule tridimensionali che permettono la riduzione del prezzo grazie ai limitati costi di trasporto e montaggio: in questo sistema i moduli tridimensionali sono interamente assemblati in fabbrica e costituiti da tutti gli elementi edilizi di un edificio: solai, tramezzi, tamponamenti, impianti: generalmente vengono realizzate in fabbrica anche le finiture. Le cellule tridimensionali vengono poi assemblate tra loro in cantiere e vincolate ad una struttura di fondazione in c.a.

1.2.5.2 Ossatura a gabbia portante

Questa tecnica costruttiva può essere considerata a tutti gli effetti come l'evoluzione dei sistemi costruttivi tradizionali intelaiati a graticcio, che realizzavano un'ossatura portante senza il contributo delle facciate, tale sistema costruttivo è rintracciabile già nelle abitazioni preistoriche basate sul principio della palafitta (pilastri interrati e collegati da elementi orizzontali) che permangono tutt'oggi nell'edilizia tradizionale di alcune aree del mondo. I limiti di questi sistemi tradizionali consistono nella ridotta dimensione dei componenti (luci ridotte) e nella realizzazione dei vincoli quasi solamente mediante incastri; ciò imponeva una certa rigidità nelle scelte costruttive.

Lo sviluppo delle tecnologie del legno lamellare ha reso possibile la realizzazione di edifici con maglia strutturale caratterizzata da interassi di notevole dimensione tra i pilastri e quindi da travi con luce elevata. Il principio costruttivo è del tutto assimilabile a quello degli edifici a gabbia portante in calcestruzzo armato e in acciaio realizzati mediante elementi edilizi verticali e orizzontali con funzione portante; ne risulta che le pareti esterne assolvono solo alla funzione di tamponamento, non sono concepite per sopportare carichi ma possono essere utilizzate con funzione di irrigidimento dell'intero sistema strutturale. È quindi teoricamente possibile realizzare pareti di facciata, divisorie e tavolati con qualsiasi sistema costruttivo (elementi intelaiati, pareti massicce ..) e in relazione ad esso, con qualsiasi materiale (legno, vetro, laterizio ...). Inoltre, proprio in virtù della distinzione tra elementi portanti, costituiti da componenti lineari, ed elementi portati è possibile pensare ad una disposizione planimetrica delle pareti facilmente modificabile in relazione a mutate esigenze e necessità: la libertà della disposizione in pianta è quindi una caratteristica che permangono nel tempo e non è legata alla sola fase di ideazione. Le pareti di tamponamento devono assolvere esclusivamente alle funzioni di isolamento termo-acustico e di difesa dagli agenti atmosferici; in tal modo risultano avere dimensioni notevoli pur non svolgendo alcun compito statico.

La modularità è uno dei requisiti fondamentali che permette al sistema un elevato livello di prefabbricazione. La scelta del modulo da utilizzare per il reticolo strutturale definisce il vincolo progettuale attraverso il quale si giunge alla determinazione degli spazi interni, al posizionamento degli elementi portanti verticali, e di conseguenza, alla determinazione della luce delle travi principali e secondarie, che risultano quindi essere un multiplo del modulo e sono comprese generalmente fra i 3 e gli 8 metri.

Punti delicati e di particolare attenzione durante la progettazione sono i nodi, cioè i punti in cui convergono due o più elementi portanti; hanno il compito di trasmettere gli sforzi tra le pareti verticali e quelle orizzontali. Non essendo mai completamente rigidi ed essendo concretamente difficile ottenere un incastro che impedisca ogni possibile rotazione, si pone il problema di irrigidire la maglia della struttura attraverso le pareti o l'uso di diagonali in acciaio o in legno (irrigidimento verticale), oltre che con solai che si comportano staticamente come una piastra (irrigidimento orizzontale). Vanno quindi studiate attentamente le giunzioni tra gli elementi strutturali, dove nello stesso punto convergono molti elementi.

1.2.5.3 Costruzioni in legno massiccio

- Tecnica costruttiva a tronchi massicci sovrapposti

La caratteristica fondamentale dei sistemi a tronchi sovrapposti è quella di soddisfare in modo efficiente alla necessità di ottenere un adeguato isolamento termico e acustico, una buona protezione dal fuoco e buone prestazioni di resistenza meccanica grazie alle proprietà specifiche del legno massiccio. È uno dei sistemi costruttivi in legno più antichi, diffuso soprattutto nelle alpi svizzere, francesi e austriache, nel nord Europa, in Russia e Scandinavia; i tronchi in legno vengono semplicemente sovrapposti senza bisogno di ulteriori lavorazioni. Incrociati e fissati agli estremi: a seconda della funzione degli edifici si adottano soluzioni per ottenere pareti più o meno piane e isolate grazie al riempimento degli spazi vuoti creati dalla sovrapposizione di elementi in legno di forma tronco-conica con impasti di terre, argilla, paglia, muschio, calce.

Attualmente la diffusione di questa tecnica costruttiva è legata alla disponibilità di materia prima (di solito legni di conifere) che ne rende più o meno economico l'impiego; ciò perché anche per edifici di modeste dimensioni è necessaria una grande quantità di legname per metro cubo di edificio costruito calcolato vuoto per pieno. In questo sistema gli elementi massicci di legno vanno a costituire una vera e propria struttura muraria continua, dove laterizi ed elementi lapidei sono sostituiti da tronchi o tavoloni disposti orizzontalmente e sovrapposti gli uni agli altri. Le pareti così costituite hanno sia funzione portante che di controventamento e irrigidimento dell'intero edificio. per assolvere

a questo compito è fondamentale che le pareti siano posizionate tra di loro in modo da formare angoli retti: prese singolarmente, infatti, le pareti non avrebbero la stabilità adeguata.

L'assemblaggio delle pareti avviene generalmente con incastri realizzati tramite intagli agli angoli e, soprattutto in caso di muri con lunghezze superiori ai 5-6 metri, con elementi di collegamento realizzati da spinottature di legno sfalsate verticalmente. gli incastri d'angolo adottano soluzioni più o meno complesse ed evolute: da quelle basate sull'asportazione di mezzo legno, fino a quelle con incastri a coda di rondine più moderne).

Per edifici che necessitano di prestazioni maggiori in termini di comfort termico vengono oggi utilizzati elementi massicci di forma rettangolare sagomati lungo la superficie di contatto con l'elemento sovrapposto: ciò permette un maggiore isolamento e irrigidimento delle pareti stesse. si è passati quindi da sistemi costituiti da tronchi circolari alla parziale sagomatura degli stessi per favorirne la sovrapposizione, fino ai tavoloni squadrati e sagomati in modo complesso. La parete può essere completata affiancando all'interno uno strato di materiale isolante termoacustico, rivestito eventualmente con un ulteriore strato di legno o qualsiasi altro materiale di finitura che non comprometta la traspirabilità dell'intero pacchetto della parete.

Per edifici realizzati con questo tipo di tecnica costruttiva, che prevede pareti appoggiate in modo continuo sul terreno di appoggio, diventa fondamentale la modalità di realizzazione del basamento di fondazione che, oltre ad assolvere a funzioni statiche, deve essere in grado di proteggere il legno dall'umidità e dagli agenti atmosferici.



Figura 1.63 Tronchi massicci sovrapposti



Figura 1.64 Costruzione in tronchi di legno sovrapposti

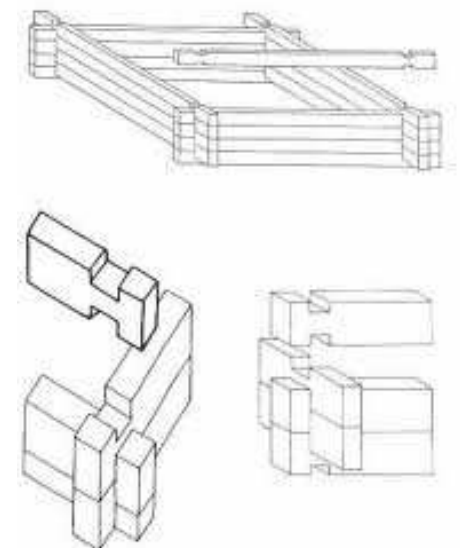


Figura 1.65 schema di montaggio con tronchi di legno sovrapposti

Le pareti vengono quindi solitamente appoggiate su un basamento realizzato in pietra, muratura o calcestruzzo, con altezza minima di 40-50 cm: tra questo e la parete viene spesso interposta una guaina impermeabilizzante.

Uno dei principali limiti di questo sistema sono gli abbassamenti considerevoli che si verificano nelle pareti a causa della sollecitazione a compressione che agisce in modo perpendicolare alle fibre del legno.

- Pannelli a Tavole incrociate, X-Lam

Nel 1996 presso l'Università tecnica di Graz si sviluppa un nuovo utilizzo delle Tavole laterali dei tronchi di abete con pannelli strutturali di grandi dimensioni: l' X-Lam, acronimo dall'inglese cross laminated timber, ossia legno incollato a strati incrociati. Dall'elemento lineare e unidirezionale quale è l'elemento di legno nasce, attraverso l'incollaggio di diversi strati di Tavole incrociati, cioè ortogonali l'uno rispetto all'altro, un materiale con l'efficacia strutturale tanto della lastra quanto della piastra, che può essere quindi sollecitato staticamente in diverse direzioni. Nel 1999, presso lo stabilimento della KLH in Austria comincia la produzione del pannello multistrato a strati incrociati e dall'ottobre del 2000, l'Ing. Kadera Vaclav apre la commercializzazione del pannello al mercato italiano, presentandolo per la prima volta alla fiera SAIE di Bologna. Uno dei primi lavori più importanti eseguiti sul nostro territorio italiano furono i villaggi per le Olimpiadi di Torino del 2006 a Cesano e Prigelato, completati in 5 mesi. Recentemente è stata realizzata a Berlino una casa di sette piani e a Londra un edificio di nove piani.

Nella Scheda 1.03 sono rappresentati gli eventi fondamentali che hanno segnato l'evoluzione dell'uso del legno di piccole dimensioni in architettura nel corso del XX secolo. Dal punto di vista del progresso tecnologico, la storia dimostra come i principali obiettivi (aumentare il grado di efficienza strutturale, ridurre il coefficiente di instabilità dimensionale, aumentare la plasmabilità, la durabilità, la resistenza al fuoco e agli agenti atmosferici) siano stati effettivamente raggiunti. Sul versante delle tematiche ambientali, se da un lato appare molto confortante l'utilizzo del legno giovane e di poco pregio, dall'altro non sembra ancora risolto il problema dell'inquinamento del materiale finito a causa della grande quantità di colle sintetiche utilizzate.

Nella Scheda 1.03 si ripercorrono le varie tappe delle tecniche costruttive in legno nel loro sviluppo sostenibile.

1.2.5.4 Tecniche costruttive in commercio

Le tecniche costruttive moderne si differenziano anche in base al produttore e in molti casi anche la sostenibilità di un prodotto cambia. Ad esempio uno stesso pannello X-Lam di due produttori diversi, può avere sistemi produttivi, materiali di base, sistemi di messa in opera diversi e quindi di conseguenza anche gli impatti cambiano.

Si vuole pertanto presentare tramite schede alcune tecniche interessanti descrivendo con particolare attenzione le caratteristiche di ecosostenibilità. Dato che è risultato impossibile condurre un'analisi quantitativa di tipo LCA per mancanza di dati riguardo alla produzione (i produttori si sono mostrati restii a fornire informazioni) e non potendo utilizzare i database nazionali in

X-Lam

Scheda 1.03

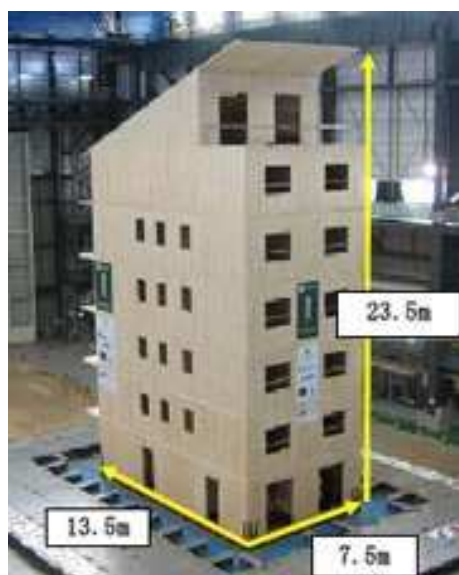


Figura 1.66 Test sismici su un edificio in X-Lam di 7 piani

Scheda 1.03

Schede 1.04 - 1.12

quanto troppo generici per questo livello di confronto, si è condotta un'analisi qualitativa utilizzando criteri comuni individuati dallo studio dello sfruttamento della risorsa legno e dai principi di sostenibilità di Natural Step, suddividendo le caratteristiche in ecologiche e tecniche.

Tabella 1.20 Criteri dell'analisi qualitativa

caratteristiche ecologiche	caratteristiche tecniche
- materiale riciclato	- sfruttamento inerzia termica
- materiale riciclabile	- comfort igrotermico
- prodotto da filiera corta	- comfort acustico
- materiale reversibile	- valutazione antisismica
- bilancio CO ₂ negativo	- connessioni plastiche
- evita utilizzo di colle	- modularità
- colla priva di formaldeide	- spazio impiantistico
- certificazione pefc o simili	- manodopera non specializzata
- semilavorato di piccole dimensioni	- posa manuale

Per avere un giudizio complessivo confrontabile abbiamo dato ad ogni risposta un punteggio che possiamo sommare. Dato che il peso di ciascun impatto è qualcosa di soggettivo poniamo che tutti gli impatti abbiano lo stesso peso.

Quindi applichiamo:

- 0 per risposta negativa o per non applicabilità dell'indice
- 1 per un possibile sviluppo
- 2 per risposta positiva

Tabella 1.21 Sistemi costruttivi in legno in commercio indagati

sistemi	criteri ecologici	criteri prestazionali
sistema a telaio - Lignotrend - montanti Upsi	14/18	14/18
elementi componibili - Steko - mattoni di legno	16/18	15/18
sistema parete - Lignotrend - WÄNDE Fux 4s	14/18	13/18
sistema X-Lam - Sistem costruzioni - BBS	14/18	12/18
sistema X-Lam - Massiv Holz maver - MHM	18/18	14/18
sistema X-Lam - Naturhaus abtenau	14/18	15/18
sistema per solaio e copertura - Legnolego	13/18	18/18
sistema per solaio - Lignotrend - Ligno Decke	14/18	13/18
sistema per solaio - Lignatur - Lke guscio	14/18	13/18

Successivamente per avere un confronto prestazionale dal punto di vista termico si sono confrontati su 3 ipotetiche stratigrafie di chiusura verticale, Tabella :

- chiusura esterna semplice, spessore 30 cm
- chiusura esterna con predisposizione impianto elettrico, spessore 30 cm
- chiusura esterna con intercapedine impiantistico di 10 cm, spessore 40 cm

Le diverse stratigrafie e i calcoli di prestazioni sono riportati nella Scheda 2.13.

Scheda 1.13

1.2.6 Confronto tra diversi materiali per strutture

Attualmente la maggioranza dei materiali impiegati in edilizia non sono rinnovabili. La pietra, l'acciaio, il polycarbonato, il cemento armato, il titanio, ecc... sono tutti materiali riciclabili, ma non rinnovabili. Uno tra i pochi materiali rinnovabili e di largo impiego e di possibile utilizzo nelle strutture è il legno. Gli edifici in legno

collegano valenze quali la conservazione delle risorse e la protezione ambientale con la rinnovabilità del materiale.

In genere la maggior parte dell'energia impiegata in queste fasi proviene da fonti energetiche non rinnovabili e altamente inquinanti per immissione di anidride carbonica prodotta dalla combustione dei derivati del petrolio o del carbone.

Il consumo energetico nella fase di costruzione (realizzazione e demolizione) di un edificio oscilla tra i 16 e l'18 % di quello totale necessario per tutta la sua vita, in genere stimata in ottanta anni. Il consumo energetico relativo alla costruzione oltre che depauperare risorse non rinnovabili incide sull'inquinamento ambientale.

Un'analisi dell'intero ciclo di vita mirata a definire consumi e inquinamento indotto da tutte le attività svolte per la produzione del bene edilizio può dare utili indicazioni sulla scelta dei materiali da usare per una reale sostenibilità dello sviluppo.

Il legno costa 1 Mj/t di energia primaria di produzione contro i 4 Mj/t del calcestruzzo armato, i 60 dell'acciaio, fino ai 250 dell'alluminio (Berti S., Piazza M., Zanuttini R., 2002, p. 16).

Una recente rassegna completa della letteratura scientifica ha esaminato ricerche condotte in Europa, Nordamerica e Australia sulla valutazione del ciclo di vita dei prodotti in legno (Wermer F., Richter K., 2007).

I Numerosi studi sulla valutazione del ciclo di vita condotti in varie parti del mondo hanno dimostrato che i prodotti in legno offrono chiari vantaggi ambientali in ogni fase rispetto ad altri materiali da costruzione. Gli edifici in legno possono offrire minori emissioni di gas serra, minore inquinamento atmosferico, produzione di minori volumi di rifiuti solidi e minore utilizzo delle risorse ecologiche.

Università di Trento

In uno studio svolto nel Laboratorio di Progettazione Edilizia dell'Università di Trento, usando un software dedicato, si è eseguito un confronto dei costi energetici e dell'impatto ambientale di differenti edifici per comprendere e approfondire come il materiale possa influire sui costi energetici dalla realizzazione alla demolizione. A tal fine si è svolto un lavoro che ha dato la misura della differenza dell'impatto ambientale prodotto dall'uso di materiali diversi: ha messo a confronto tre edifici uguali di tre piani fuori terra, realizzati uno con lo scheletro portante in legno del tipo platform frame, uno con il sistema portante in acciaio di tipo *Steel Frame* e l'altro in cemento armato. Per svolgere lo studio è stato usato il software *Athena's Environmental Impact Estimator* sviluppato dall' "Athena Sustainable Materials Institute" di Merrickville (Canada). Dopo la scelta degli elementi costruttivi da analizzare e la definizione delle caratteristiche dei materiali, sono stati fatti i computi metrici, quindi inseriti gli elementi costruttivi nel modello e, dopo l'elaborazione dei dati, è stata condotta l'analisi dei risultati. Sono state prese in considerazione i consumi energetici e l'inquinamento indotto durante la produzione dei materiali, la costruzione dell'edificio e la demolizione. La produzione comprendeva le fasi di estrazione del materiale, di trasporto e della lavorazione delle materie prime. La costruzione era riferita a tutti i processi relativi alla movimentazione dell'elemento costruttivo: dallo stabilimento di produzione all'arrivo in cantiere, fino alla posa in opera. Nella demolizione sono stati presi in considerazione anche il trasporto alla discarica o il riciclo. I risultati sui quali si è concentrata l'attenzione sono stati quelli relativi: alle emissioni in acqua e in aria, all'impiego delle risorse energetiche e all'uso di materie prime utilizzate.

Tabella 1.22 Valori impatti ambientali delle strutture, materiali a confronto: legno, acciaio, c.a., Università di Trento.

impatti	U.F.	tipo di struttura					
		legno		acciaio		c.a.	
		%		%		%	
energia consumata	TJ	100	0,484	0,6	121,2	350,9	1,70

rifiuti solidi	t	100	6,149	5,8	94,9	358,2	22,03
inquinamento atmosferico	g x10 ³	100	5,731	6,3	109,4	411,3	23,58
inquinamento idrico	mgx10 ³	100	95,873	1142,3	1191,5	515,5	475,14
WP	t	100	18,41	20,7	112,7	605,8	111,53
consumo di risorse	t	100	77,488	79,4	102,5	684,3	530,25

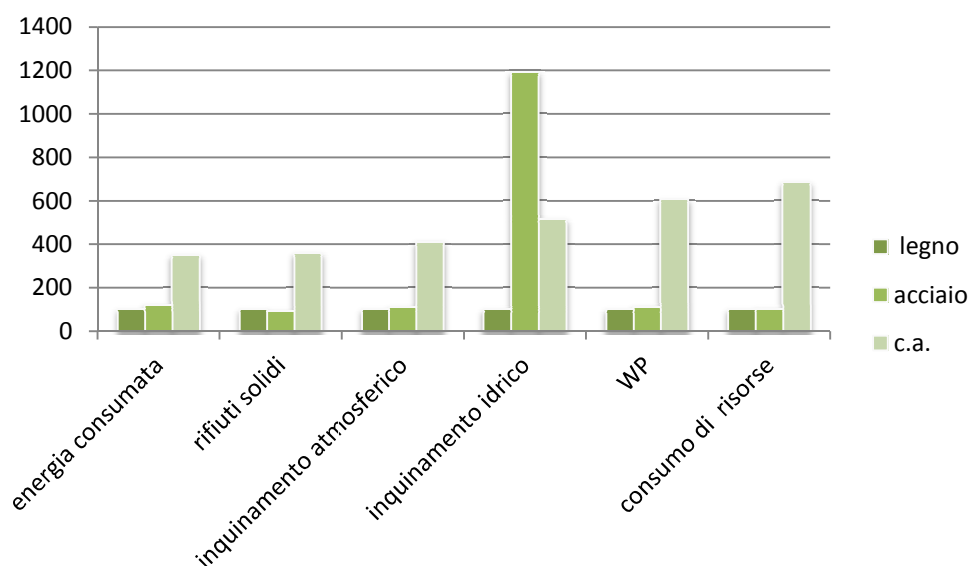


Figura 1.67 Confronto percentuale degli impatti delle strutture a confronto. Il legno è usato come valore di riferimento, Università di Trento.

a. Confronto legno e c.a.

Per quanto riguarda l'emissione di CO₂ si è potuto verificare che le lavorazioni per il confezionamento del materiale necessario per realizzare la struttura in cemento armato producono una massa equivalente di CO₂ pari a 175 t contro i 38,74 t del legno, mentre nella fase di costruzione, di gestione, di manutenzione ordinaria e di demolizione dell'edificio le emissioni sono praticamente irrilevanti e scarsamente relazionate alla diversità dei materiali. I rifiuti solidi prodotti per la struttura di legno sono circa 4 volte superiori a quelli prodotti per la struttura in cemento armato a causa degli sfridi determinati dalle lavorazioni in opera. I rifiuti solidi del legno però sono facilmente riciclabili in oggetto d'uso.

Per quanto riguarda le risorse primarie utilizzate il divario è notevole. L'uso di energia primaria utilizzata per metro quadro di costruzione in GJ/mq ovvero quella utilizzata in tutto in TJ, risulta maggiore nel caso del cemento armato che in quello del legno con valori rispettivamente pari a 4,754 GJ/mq e 2,041 TJ nel cemento armato e 2,036 GJ/mq e 1,028 TJ nel legno. In conclusione si può dire che prendendo in considerazione tutte le fasi ne risulta che i valori del cemento armato rispetto a quelli del legno sono sempre superiori. In particolare l'indice di inquinamento dell'acqua è cinque volte superiore, l'indice di inquinamento dell'aria è tre volte superiore, i rifiuti solidi prodotti sono due volte superiori, l'energia consumata due volte e mezzo superiore.

b. Confronto legno e acciaio:

Per quanto riguarda il consumo energia primaria esso è circa il 20 % in più per preparare gli elementi costruttivi in acciaio rispetto a quelli in legno, mentre durante le fasi di costruzione e di manutenzione, sostanzialmente i consumi sono analoghi.

Roberto Zanuttini e
Paolo Lavisca

Per quanto riguarda l'emissione di gas in aria anche in questo caso il legno dimostra la sua sostenibilità. Per quanto riguarda la quantità di rifiuti solidi il legno è penalizzato per il problema degli sfridi in cantiere. Undici volte superiore è l'indice che misura l'inquinamento dell'acqua prodotto dall'acciaio rispetto al legno.

Nel libro "Strutture di legno: analisi del ciclo di vita e certificazioni" Roberto Zanuttini e Paolo Lavisca propongono la comparazione degli impatti presunti nella costruzione di casa unifamiliare di 220 m², con tre tecnologie alternative. Le analisi di LCA sono condotte con il software Athena's Environmental Impact Estimator.

Tabella 1.23 Valori impatti ambientali delle strutture, materiali a confronto: legno, acciaio, c.a. (Zanuttini R. e Lavisca P.)

impatti	U.F.	tipo di struttura					
		legno		acciaio		c.a.	
		%		%		%	
energia consumata	TJ	100	0,255	152,55	0,389	220,39	0,562
rifiuti solidi	t	100	10,7	83,15	8,897	131,36	14,056
inquinamento atmosferico	v.c. m ³	100	3.236	173,92	5628	215,42	6971
inquinamento idrico	v.c. m ³	100	407.787	346,70	1413784	214,86	876.189
Gas serra	e.CO ₂	100	62.183	123,09	76.543	150,48	93.573
consumo di risorse	t	100	121.804	113,71	138.501	192,93	234.996

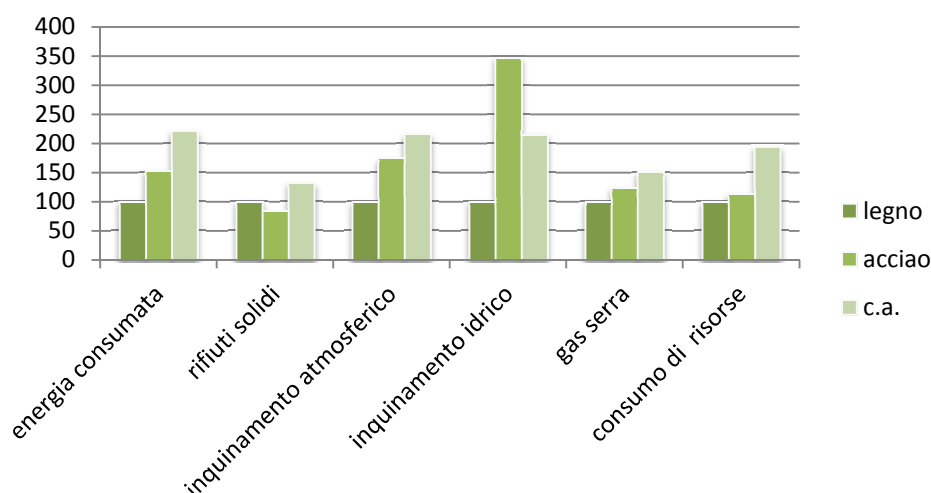


Figura 1.68 Confronto percentuale degli impatti delle strutture a confronto. Il legno è usato come valore di riferimento (Zanuttini R. e Lavisca P.)

Athena Institute

L'Athena Sustainable Materials Institute è un'organizzazione canadese no-profit di ricerca che sviluppa la metodologia Life Cycle Assessment (LCA) nel settore delle costruzioni.

L'Athena Institute per conto del Canadian Wood Council ha condotto uno studio in cui ha messo a confronto tre ipotetiche case di identiche dimensioni e configurazione, aventi strutture di legno, acciaio e cemento (colato in forme isolate). La valutazione del ciclo di vita è stata condotta con l'EcoCalculator ATHENA prendendo in considerazione un periodo ventennale e i dati sono relativi a Toronto. I risultati della valutazione sono riassunti in sei misure chiave relative a uso primario totale e uso pesato di materie prime, potenziali emissioni di gas serra, misuratori di inquinamento dell'aria e delle acque e produzione di rifiuti solidi. Si evince che a confronto con la costruzione in legno, acciaio e cemento incorporano

e consumano rispettivamente il 12 e il 20 per cento in più di energia, emettono il 15 e il 29 per cento in più di gas serra, rilasciano il 10 e il 12 per cento in più di inquinamento atmosferico e generano il 300 e il 225 per cento in più di inquinamento delle acque.

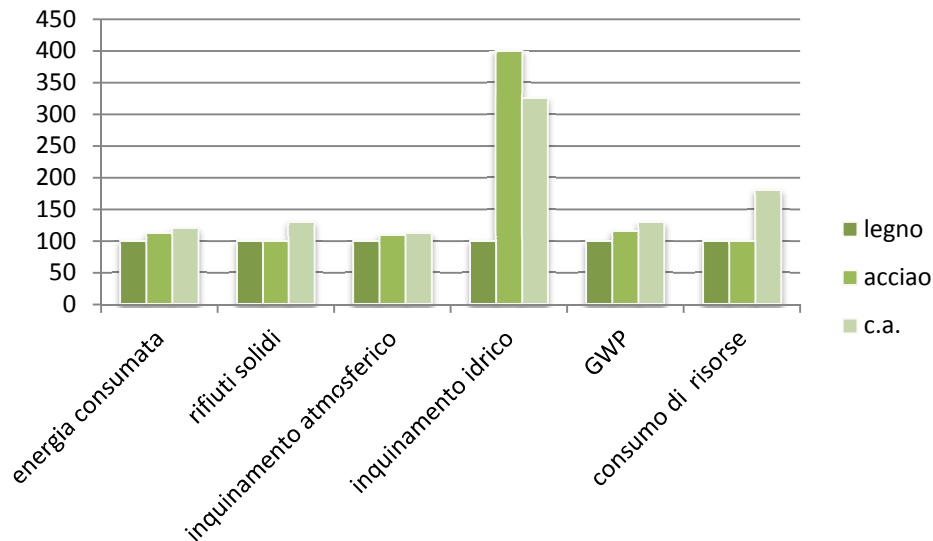


Figura 1.69 Confronto percentuale degli impatti delle strutture a confronto. Il legno è usato come valore di riferimento, Athena institute (Building Green with Wood).

Forintek è un istituto di ricerca nazionale del Canada che si occupa dello sviluppo e innovazione dei prodotti di legno.

Forintek

Viene svolta una analisi LCA per un tipico muro esterno realizzato con cinque sistemi alternativi. La valutazione del ciclo di vita è stata condotta con l'EcoCalculator ATHENA. I dati sono riferiti a Vancouver. I risultati della valutazione sono riassunti in misure chiave relative a consumi energetici, cambiamento climatico e inquinamento atmosferico.

Questo grafico mette a confronto un tipico muro esterno a struttura in legno con cinque sistemi alternativi, in termini di prestazioni ambientali in tre categorie.

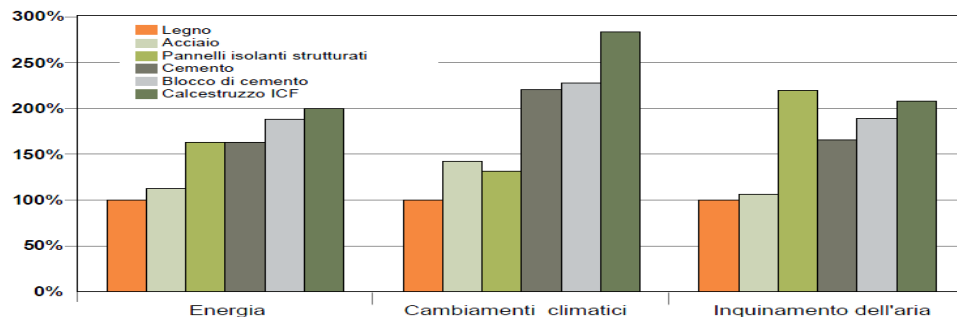


Figura 1.70 Confronto percentuale degli impatti delle strutture a confronto. Il legno è usato come valore di riferimento (Building Green with Wood).

ALLEGATI

SEZIONE A - PREMESSE

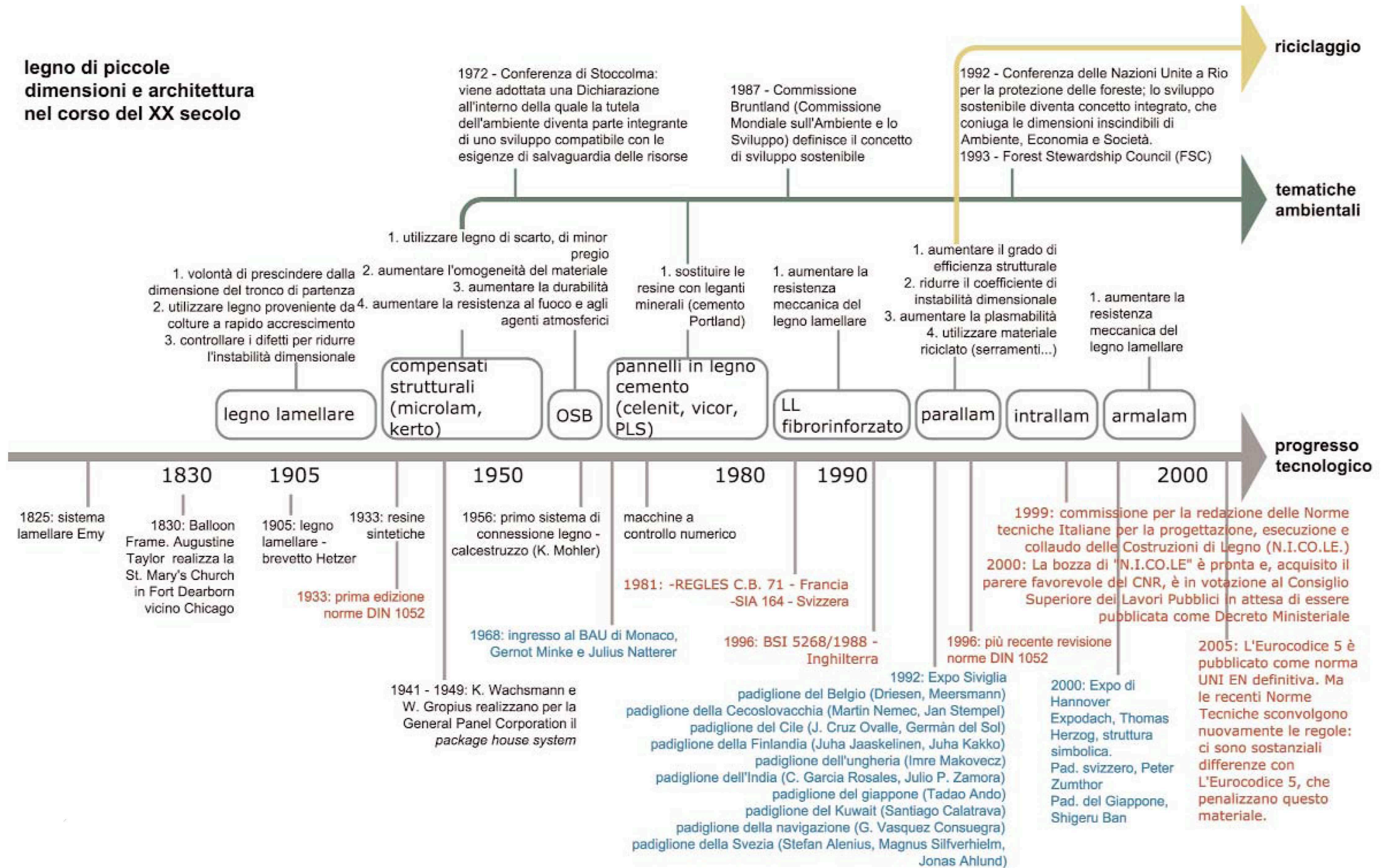
Capitolo 1: La Progettazione Sostenibile

- Scheda 1.01 - Analisi e confronto quantitativo materiali isolanti
- Scheda 1.02 - Analisi e confronto qualitativo materiali isolanti
- Scheda 1.03 - Evoluzione delle tecniche costruttive in legno
- Scheda 1.04 - Analisi sistema a telaio "Lignotrend"
- Scheda 1.05 - Analisi sistema modulare a mattoni di legno "Steko"
- Scheda 1.06 - Analisi sistema strutturale a tavole sovrapposte "Lignotrend"
- Scheda 1.07 - Analisi sistema a pannelli ad assi incrociati BBS "Sistem Costruzioni"
- Scheda 1.08 - Analisi sistema a pannelli ad assi incrociati "MHM"
- Scheda 1.09 - Analisi sistema a pannelli ad assi incrociati "Naturhaus"
- Scheda 1.10 - Analisi sistema per solai e coperture assemblati a secco "LegnoLegò"
- Scheda 1.11 - Analisi sistema per solai e coperture assemblati a secco "Lignotrend"
- Scheda 1.12 - Analisi sistema per solai e coperture assemblati a secco "Lignatur"
- Scheda 1.13 - Analisi e confronto prestazionale tra i sistemi

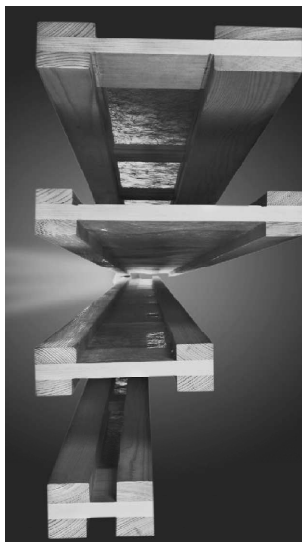
MATERIALI ISOLANTI			PARAMETRI PRESTAZIONALI				ECOINDICATORI			AMBITI D'IMPIEGO																
NOTE:			conduttività termica λ	Densità o massa volumica ρ	coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore μ	capacità termica massiva o calore specifico c	classe di reazione al fuoco Euroclassi secondo EN13501-1	potenziale di effetto serra GWP100	potenziale di acidificazione AP	Fabbisogno di energia primaria non rinnovabile PEI	sotto la platea di fondazione	pavimento di cantine o controterra, resistenza a compressione minima 500kg/m²	isolamento esterno pareti contro terra delle cantine	isolamento esterno facciate per sistemi a cappotto e facciate ventilate- pannelli	isolamento interno pareti senza barriere al vapore	isolamento per pareti con sistema costruttivo a telaio	solai intermedi isolamento acustico e anticalpestio	ultimo solaio	solai o tetti in travi di legno	isolamento sopra i puntoni	terrazze tetto piano e tetto verde					
			W/mK	kg/m³	-	J/kgK	-	kgCO₂ equivalenti per kg di materiale	kgSO₂ equivalenti per kg di materiale	MJ/kg																
ORIGINE MINERALE	ARGILLA ESPANSA		0,160	350	5	1000	A1	0,1781	0,0005	1,4881																
	IDRATI DI SILICATO DI CALCIO		0,045	115	5	1030	A2	0,5591	0,0011	6,6039			3	●												
	CALCIO SILICATI		0,050-0,070	300	5	900	A1	N.D.	N.D.	N.D.					3	●										
	FIBRE DI VETRO		0,035-0,040	16-80	1	1030	A1-A2	2,4848	0,0155	51,5629			3	●		7	●	3	●	●	8	●	9	●	9	●
	FIBRE DI ROCCIA		0,036-0,040	30-130	1	1030	A1-A2	1,7529	0,0142	23,8888			3	●		7	●	3	●	●	8	●	9	●	9	●
	PERLITE ESPANSA		0,050	85	1	1000	A1	0,3632	0,0013	9,6616							3	●	●	●	●	●	3	●	●	
	VETRO CELLULARE		0,040-0,050	105-160	∞	1000	A1	1,1727	0,0029	20,2377	●	●	●	3	●	3	●		●					●		
	GRANULATO DI VETRO CELLULARE		0,100	210	5	1000	A1	0,4383	0,0020	8,6056	●		●													
	SINTETICA	PANNELLI DI POLISTIROLO	EPS	0,035-0,044	11-30	20-30	1450-1500	E	4,08525	0,0149	107,1848			2	●	●		●	●				●			
XPS CO2			0,040	38	70	1450	E	4,1347	0,0156	101,5289	1	●	●	●	●	6	●		●			●	●			
XPS HFC			0,032	45	70	1450	E	82,173	0,0241	106,0495	●	●	●	●	6	●		●			●	●				
POLIURETANO PUR		0,030	40	60	1260	D-E	4,2014	0,0178	102,5367					5	●		●				●	●				
ORIGINE VEGETALE	FIBRE DI CANAPA		0,040	30-85	1-5	2000	D	-0,0141	0,0048	31,8534			3	●		7	●	3	●	●	8	●	3	●		
	FIBRE DI CELLULOSA	FIOCCHI	0,040	35-55	2	1900	E	-0,794	0,0030	7,6164										●	●					
		PANNELLI	0,040	50	2	1900	E	-0,2376	0,0052	19,3642						●				●						
	FIBRE DI COCCO		0,050	90	1	2000	E	0,4932	0,0270	33,5615							3	●								
	FIBRE DI LEGNO	P.EXTRAPOROSI	0,040	160	5	2000	E	-0,5171	0,0092	0,0005				●	4	●	7	●	3	●	●	8	●			
		P.POROSI	0,050-0,055	250-270	5	2000	E	-0,1486	0,0113	0,0004				●	4	●	7	●	3	●	●	8	●	3	●	
	FIBRA DI LINO	CON F. POLIESTERE	0,040	30	1	1550	E	0,5094	0,0067	39,0361							7	●	3	●	●	8	●			
		SENZA POLIESTERE	0,040	30	1	1550	E	0,2367	0,0055	34,9593							7	●	3	●	●	8	●			
	SUGHERO	NATURALE GRANULI	0,060	160	3	1800	E	-1,6798	0,0002	0,5999								●		●	●	●				
ESPANSO PANNELLI		0,040	120	18	1670	E	-1,1956	0,0020	7,5127				●				3	●	●	●	●	3	●			
ESPANSO GRANULI		0,042	100	3	1800	E	-1,1956	0,0020	7,5127								●	3	●	●	●					
ANIMALE	LANA DI PECORA	FIOCCHI	0,040	30	2	1500	E	0,1008	0,0024	15,4127													7	●		●
		MATERASSINI	0,035	90	3	1500	E	0,1997	0,004	20,7578													7	●	3	●

TABELLA DEGLI IMPATTI		APPROVVIGGIAMENTO		PRODUZIONE						USO		DISMISSIONE
		Consumo di risorse rinnovabili	Consumo di risorse non rinnovabili	consumo di energia	riduzione ozono	effetto serra	acidificazione	smog fotochimico	rischi per addetti alla produzione	nocività nella messa in opera	nocività in esercizio	riuso/riciclo/smaltimento
ORIGINE VEGETALE	FIBRA DI CELLULOSA-PANNELLI		●	●						●		●
	FIBRA CELLULOSA-FIOCCHI									●		
	SUGHERO ESPANSO-PANNELLI	●		●						●	●	●
	SUGHERO GRANULARE	●										
	FIBRA DI LEGNO			●						●		
	FIBRA DI LEGNO-CON BITUME		●	●		●	●	●		●	●	●
	LANA DI LEGNO E LEGANTI MINERALI		●	●		●	●	●		●		●
	CANAPA, KENAF		●	●						●		●
	LINO, MAIS									●		
	COCCO, JUTA									●		
	CANNA PALUSTRE											
ORIGINE ANIMALE	LANA DI PECORA		●	●						●		●
ORIGINE MINERALE	POMICE NATURALE		●						●	●		
	MINERALI GRANULARI ESPANSI		●	●		●	●	●	●	●	●	
	CALCE-CEMENTO CELLULARE		●	●		●	●	●		●	●	●
	VETRO CELLULARE		●	●		●	●	●		●	●	●
	LANE MINERALI		●	●		●	●	●	●	●	●	●
ORIGINE SINTETICA	FIBRA DI POLISTIRENE		●	●		●	●	●	●	●	●	
	FIBRA DI POLISTIRENE DA RICICLO		●	●		●	●	●		●	●	
	POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO (EPS)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	POLISTIRENE ESPANSO ESTRUSO (XPS)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	POLIURETANO ESPANSO (PUR)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	POLIETILENE ESPANSO		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

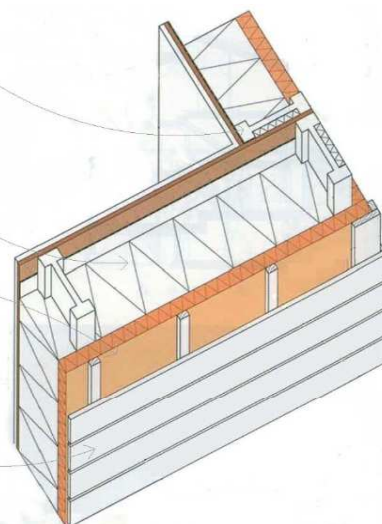
legno di piccole dimensioni e architettura nel corso del XX secolo



Sistema a telaio "Lignotrend"



STRUTTURA PORTANTE DI LEGNO
 INTERCAPEDINE RIEMPITO CON FIOCCHI DI CELLULOSA OTTENUTI DA SFIRIDI DI FALEGNAMERIA
 ISOLANTI IN PANNELLI DI FIBRE DI LEGNO
 FINITURA ESTERNE CON DOGHE DI LEGNO DI CASTAGNO



tipologia

elemento strutturale per parete sistema a telaio- U psi

anno di sperimentazione

N.D.

azienda

Lignotrend, Adria Legno

riferimenti

www.lignotrend.it

provenienza

Germania

autorizzazione

DiBt di Berlino Z-9.1-555

ETA-05/021

Certificato natureplus®

DATI PRESTAZIONALI riferiti a un elemento con h 240

conducibilità termica	λ	W/mk	0,093
resistenza al vapore	μ		—
densità		kg/m	4,5
protezione acustica	Rw	dB	—
resistenza al fuoco	Rei	min	—
velocità di combustione		mm/min	—
Modulo G da forza di taglio	$G_{0,m}$	N/mm ²	—
Modulo di elasticità	$E_{0,m}$	N/mm ²	—
resistenza a compressione	$f_{c,0,k}$	N/mm ²	—
resistenza a flessione	$f_{m,k}$	N/mm ²	—

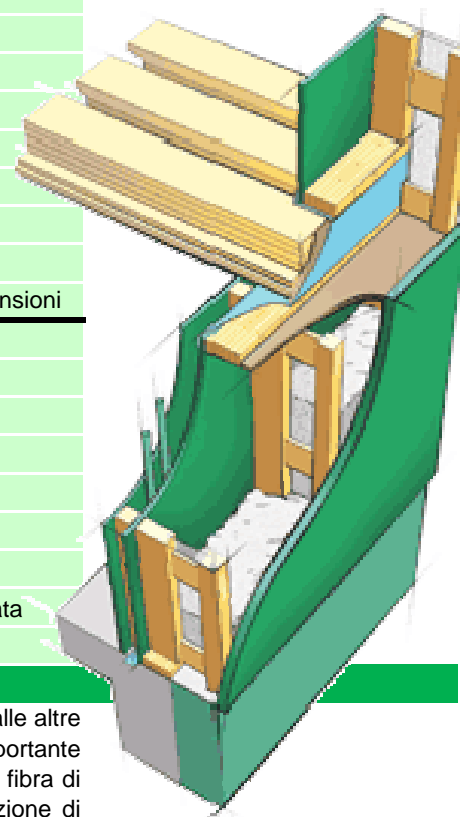
i valori dipendono dai materiali della stratigrafia

ANALISI QUALITATIVA

1	materiale riciclato
2	materiale riciclabile
1	prodotto da filiera corta
2	materiale reversibile
2	bilancio CO ₂ negativo
0	evita utilizzo di colle
2	colla priva di formaldeide
2	certificazione pefc o simili
2	semilavorato di piccole dimensioni
0	sfruttamento inerzia termica
2	comfort igrotermico
2	comfort acustico
2	valutazione antisismica
2	connessioni plastiche
2	modularità
2	spazio impiantistico
1	manodopera non specializzata
1	posa manuale

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	14/18
caratteristiche tecniche	14/18



DESCRIZIONE

Elementi strutturali costituiti da lamelle orizzontali incollate a distanza regolare le une dalle altre fra due lamelle verticali (montanti). L'unione di questi elementi costruisce la struttura portante delle pareti perimetrali, che vengono riempite tramite iniezione a spruzzo di isolante in fibra di cellulosa oppure da pannelli di lino o canapa. Il rivestimento delle pareti svolge funzione di irrigidimento e di contenimento del materiale.

INFORMAZIONI TECNICHE

impiego	Costruzione a telaio e tavole adatta per nuove costruzioni o ristrutturazioni e risanamenti energetici. Facciata continua portante o non portante, come contropuntone nei tetti, come montante di parete divisoria
messa in opera	Gli elementi vengono assemblati in azienda incollando le varie lamelle. Poi si assemblano in cantiere per formare il telaio della struttura con connessioni metalliche
dimensioni	Larghezza dai 200 ai 360 mm, altezza 2940 mm. Montanti verticali: da 59x40mm a 59x100 mm le lamelle orizzontali incollate tra i montanti a 399-470 mm di distanza
prestazioni materiali e LCA	Struttura leggera e stabile, alto isolamento grazie alla grande quantità di isolante Legno abete rosso/abete bianco/duglasia; colla di poliuretano, circa 1,1% di colla sulla massa dell'elemento assolutamente priva di formaldeide e certificata in classe di emissione E0, che non emette sostanze inquinanti; connessioni metalliche. Il ciclo ecologico viene rispettato dalla scelta dei materiali fino allo smaltimento

Sistema modulare "Steko"



tipologia

Sistema modulare di elementi componibili per strutture portanti

Anno di sperimentazione

1996

azienda

Steko

riferimenti

www.steko.ch

provenienza

Svizzera

autorizzazione

N.D.

DATI PRESTAZIONALI

conducibilità termica	λ	W/mk	0,14
resistenza al vapore	μ		12
densità		kg/m ³	-
protezione acustica	Rw	dB	31-56
resistenza al fuoco	Rei	min	180
velocità di combustione		mm/min	-
Modulo G da forza di taglio	G _{0,m}	N/mm ²	-
Modulo di elasticità	E _{0,m}	N/mm ²	-
resistenza a compressione	f _{c,0,k}	N/mm ²	10
resistenza a flessione	f _{m,k}	N/mm ²	-

ANALISI QUALITATIVA

1	materiale riciclato
2	materiale riciclabile
1	prodotto da filiera corta
2	materiale reversibile
2	bilancio CO ₂ negativo
2	evita utilizzo di colle
2	colla priva di formaldeide
2	certificazione pefc o simili
2	semilavorato di piccole dimensioni
0	sfruttamento inerzia termica
2	comfort igrotermico
2	comfort acustico
1	valutazione antisismica
2	connessioni plastiche
2	modularità
2	spazio impiantistico
2	manodopera non specializzata
2	posa manuale

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	16/18
caratteristiche tecniche	15/18



1. listellatura
2. pannelli di sughero
3. granulare di sughero
4. controparete impiantistica

DESCRIZIONE

Sistema modulare di elementi componibili standard in legno massiccio stagionato e ricavato da coltivazioni boschive; realizzato industrialmente, ciascun modulo è costituito da cinque strati di legno massiccio incollati tra loro in posizione sfalsata e da una intercapedine interna nella quale possono essere alloggiati gli impianti o inserito del materiale isolante sfuso. Il modulo non necessita di barriere al vapore, profili o membrane di tenuta e può essere riutilizzato in fase di dismissione. La superficie può essere lasciata a vista o rivestita.

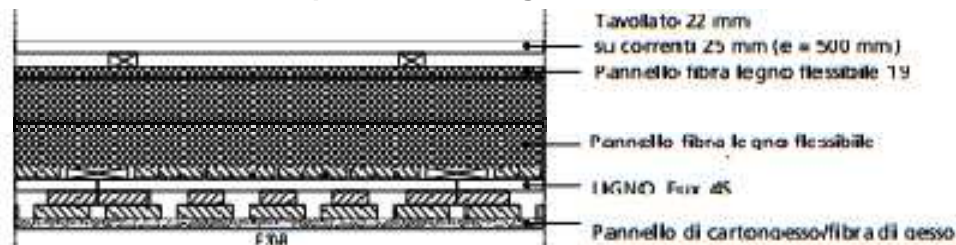
INFORMAZIONI TECNICHE

impiego	Chiusure verticali e partizioni interne
messa in opera	Facile, veloce e autoesplicativo. L'accoppiamento dei singoli moduli è garantito da uno speciale sistema ad incastro trasversale con tenone e mortasa, che ne determina la perfetta chiusura e la realizzazione di elementi edilizi particolarmente stabili senza l'impiego di malte o incollanti. Non necessita di sistemi di sollevamento. L'installazione degli impianti può avvenire anche a parete terminata.
dimensioni	Il sistema modulare viene prodotto in varie dimensioni dal modulo quadruplo 54 cm a quello base 16 cm, il modulo portante, il modulo cappello e il modulo angolare. Lo spessore base è di 240 mm
prestazioni	Pareti traspiranti con buona diffusione al vapore, buon grado di isolamento termico e acustico. Possibile autocostruzione
materiali e LCA	È realizzato con legno massiccio abete rosso/abete bianco ricavato da foreste gestite in modo sostenibile e a basso consumo di risorse

Sistema a tavole sovrapposte "Lignotrend"



possibile stratigrafia



tipologia

Elemento strutturale per parete a tavole sovrapposte

Anno di sperimentazione

N.D.

azienda

Lignotrend, Adria Legno

referimenti

www.lignotrend.it

provenienza

Germania

autorizzazione

DIBt di Berlino Z-9.1-555

ETA-05/021

Certificato natureplus®

DATI PRESTAZIONALI

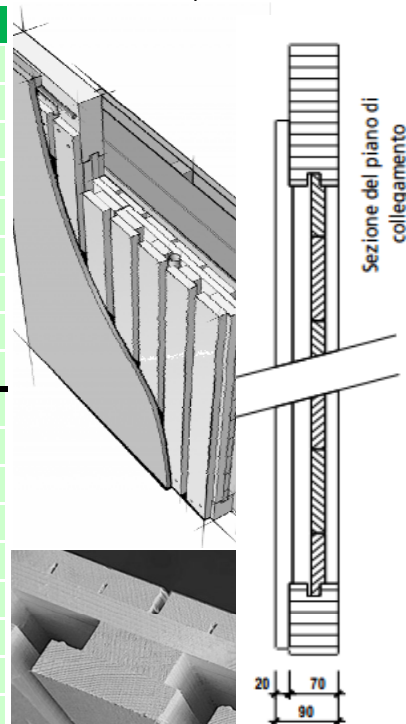
conducibilità termica	λ	W/mk	0,18
resistenza al vapore	μ		8,7
densità		kg/m ³	362
protezione acustica	Rw	dB	-
resistenza al fuoco	Rei	min	-
velocità di combustione		mm/min	-
Modulo G da forza di taglio	G _{0,m}	N/mm ²	-
Modulo di elasticità	E _{0,m}	N/mm ²	-
resistenza a compressione	f _{c,0,k}	N/mm ²	-
resistenza a flessione	f _{m,k}	N/mm ²	-

ANALISI QUALITATIVA

- 1 materiale riciclato
- 2 materiale riciclabile
- 1 prodotto da filiera corta
- 2 materiale reversibile
- 2 bilancio CO₂ negativo
- 0 evita utilizzo di colle
- 2 colla priva di formaldeide
- 2 certificazione pefc o simili
- 2 semilavorato di piccole dimensioni
- 0 sfruttamento inerzia termica
- 2 comfort igrotermico
- 2 comfort acustico
- 1 valutazione antisismica
- 2 connessioni plastiche
- 2 modularità
- 2 spazio impiantistico
- 1 manodopera non specializzata
- 1 posa manuale

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	14/18
caratteristiche tecniche	13/18



DESCRIZIONE

Pareti in blocchi tavolari di legno massiccio e di forma stabile.

Composto da un corpo centrale formato da due strati di tavole parallele e/o incrociate distanziate e incollate ha funzione portante, gli strati esterni sono costituiti da tavole di legno disposte in verticale ed incollate al nucleo centrale. Sono predisposti per la posa di impianti elettrici. Possibilità di riempimento delle cavità per migliorare l'isolamento termico/acustico. Giunti e fissaggi con viti e chiodi.

INFORMAZIONI TECNICHE

impiego	Per pareti esterne e interne; eventualmente anche per coperture piane ed inclinate
messa in opera	Le pareti vengono montate a secco assemblando gli elementi meccanicamente tramite apposite viti, chiodi e zanche d'acciaio. Quindi inserite in due travi di legno lamellare che fungono da architrave e basamento, a loro volta ammassate meccanicamente alle strutture orizzontali dei solai e delle coperture piane o inclinate
dimensioni	Larghezze elementi 500, 625 e 750 mm (giunto di testa) / 600 mm (giunto maschiato). Lunghezze elementi standard 2480 mm, 2980 mm. Spessori elementi secondo calcoli statici - 90 mm LIGNO Vario 4S - 109 mm LIGNO Lux 5 - 90 mm LIGNO Fux 4S - 127 mm LIGNO Fux 6. Tavole di legno di spessore tra i 16,5 e i 26,5 mm e una larghezza tra i 68 e i 150 mm
prestazioni	Leggera e robusta allo stesso tempo. Prestazioni di isolamento acustico e termico e di protezione al fuoco non sono elevate, ma possono essere incrementate con l'accoppiamento di pannelli
materiali e LCA	Tavole di legno in abete rosso o in abete bianco di piccolo spessore. Connessioni in acciaio. Colla di poliuretano

Sistema a pannelli ad assi incrociati "Sistem Costruzioni"



tipologia

Elemento strutturale per parete
Pannelli ad assi incrociati BBS tipo X-lam

Anno di sperimentazione

N.D.

azienda

Sistem Costruzioni

riferimenti

<http://www.sistem.it/>

<http://www.mozzonebs.it>

provenienza

Modena, Italia

autorizzazione

ETA-06/0009 CE

dibt-berlin Z-9.1-534

DATI PRESTAZIONALI

conducibilità termica	λ	W/mk	0,13
resistenza al vapore	μ		70
densità		kg/m ³	470
protezione acustica	Rw	dB	
resistenza al fuoco	Rei	min	30
velocità di combustione		mm/min	0,67
Modulo G da forza di taglio	$G_{0,m}$	N/mm ²	60
Modulo di elasticità	$E_{0,m}$	N/mm ²	11.000
resistenza a compressione	$f_{c,0,k}$	N/mm ²	21
resistenza a flessione	$f_{m,k}$	N/mm ²	18

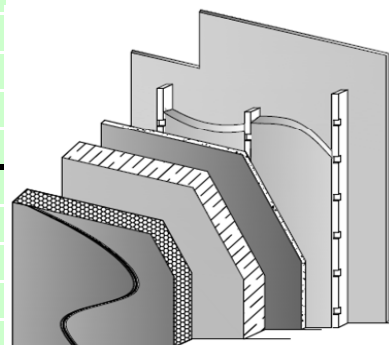
ANALISI QUALITATIVA

1	materiale riciclato
2	materiale riciclabile
1	prodotto da filiera corta
2	materiale reversibile
2	bilancio CO ₂ negativo
0	evita utilizzo di colle
2	colla priva di formaldeide
2	certificazione pefc o simili
2	semilavorato di piccole dimensioni
2	sfruttamento inerzia termica
2	comfort igrotermico
2	comfort acustico
2	valutazione antisismica
2	connessioni plastiche
2	modularità
0	spazio impiantistico
0	manodopera non specializzata
0	posa manuale

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	14/18
caratteristiche tecniche	12./18

Parete standard
U=0,23-0,19
Sfasamento 12-16 ore
Isolamento acustico db 42-45



Spess. cm. 2,25	INTERNO : pannello in gesso-fibra spessore mm. 10 incollato lungo i bordi, avvitato ai listoni + cartongesso mm. 12,5 avvitato alla lastra di gesso-fibra stuccato e tinteggiato.
Spess. cm. 6,00	Listoni in abete essiccato, fresati interasse cm. 50
Spess. cm. 6,00	Riempimento in lana di roccia dens. 50 kg/mc.
Spess. cm. 2,50	Pannello in Celenit sp. 2,5 cm con cemento portland
Spess. cm. 9,8 / 11,4	Pannello strutturale BBS
Spess. cm. 8,0 / 10,0	Coibentazione in Lana di Roccia a fibre orientate o fibra di legno dens. 230 kg/mc
Spess. cm. 0,5	Intonaco con rete di armatura in polietilene
Spess. cm. 0,2	Intonachino colorato

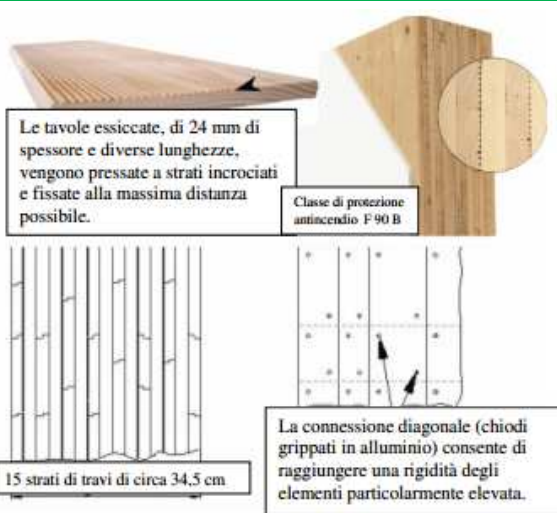
DESCRIZIONE

Si tratta di un compensato multistrato, interamente in legno.
Grazie all'incollaggio degli strati longitudinali con quelli trasversali è possibile ridurre al minimo il movimento del legno. Studiato per costruzioni nuove.

INFORMAZIONI TECNICHE

impiego	Elemento strutturale sia per pareti che per solai per stratificazione a secco. Immediatamente caricabile
messa in opera	Prefabbricazione dell'elemento strutturale BBS, composizione stratigrafia in opera
dimensioni	Spessore dai 75 mm a 334 mm a seconda delle esigenze strutturali. Multistrato incrociato 3-5-7-9-strati. Larghezza 125 cm. Lunghezza fino a 24 m (giunto a cuneo incastrato a coda di rondine)
prestazioni	Trattiene il calore e al contempo sopporta carichi elevati. Garantisce, inoltre, un'elevata resistenza al fuoco, un buon isolamento acustico ed un processo di asciugatura veloce
materiali e LCA	BBS composto dal 99,4% di legno (abete/larice/pino cembro/abete bianco/pino douglasia) e da un 0,6% di colla PU priva di formaldeide, si può considerare un materiale monolitico, ossia un blocco di legno. Piastre e viti in acciaio per giunzioni. Larice per dormiente. Guarnizioni Trelleborg P12-Densly black

Sistema a pannelli ad assi incrociati "MHM"



tipologia

Parete in legno massiccio a strati di tavole incrociate.

Anno di sperimentazione

2003

azienda

Massivholzmaier

riferimenti

www.massivholzmaier.de

provenienza

Germania

autorizzazione

DIBt di Berlino Z-9.1-602

DATI PRESTAZIONALI

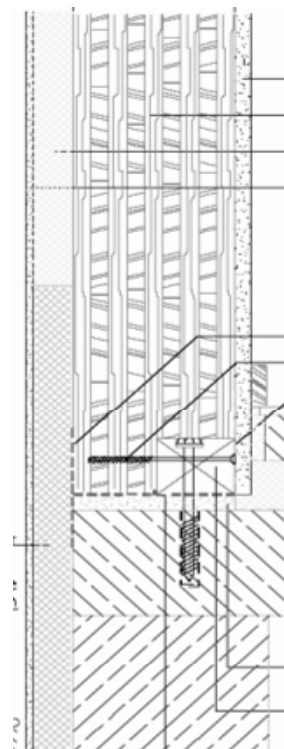
conducibilità termica	λ	W/mk	0,094
resistenza al vapore	μ		65
densità		kg/m ³	480
protezione acustica	Rw	dB	35-48
resistenza al fuoco	Rei	min	30-90
velocità di combustione		mm/min	0,7
Modulo G da forza di taglio	G _{0,m}	N/mm ²	
Modulo di elasticità	E _{0,m}	N/mm ²	
resistenza a compressione	f _{c,0,k}	N/mm ²	
resistenza a flessione	f _{m,k}	N/mm ²	

ANALISI QUALITATIVA

2	materiale riciclato
2	materiale riciclabile
2	prodotto da filiera corta
2	materiale reversibile
2	bilancio CO ₂ negativo
2	evita utilizzo di colle
2	colla priva di formaldeide
2	certificazione pefc o simili
2	semilavorato di piccole dimensioni
2	sfruttamento inerzia termica
2	comfort igrotermico
2	comfort acustico
2	valutazione antisismica
2	connessioni plastiche
2	modularità
2	spazio impiantistico
0	manodopera non specializzata
0	posa manuale

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	18/18
caratteristiche tecniche	14./18



DESCRIZIONE

Struttura monolitica multistrato costituita da tavole di legno di abete assemblate in strati incrociati. Le pareti sono costituite da legno non trattato chimicamente senza l'aggiunta di materiali isolanti. Le tavole vengono essiccate e portate a 14±2% di umidità, di lunghezza e larghezza diverse, preseate a strati incrociati e assemblate mediante inserimento di chiodi di alluminio grippato. Sulle tavole viene realizzato un profilo a battuta alternata su entrambi i lati corti mentre una delle facce viene realizzata con scanalature di 2-3 mm di profondità al fine di realizzare cuscinetti d'aria che aumentino il potere termoisolante. Gli elementi vengono poi tagliati e sagomati delle dimensioni necessarie. Per l'inserimento degli impianti è possibile ricavare, ancora in azienda, in modo agevole, delle tracce con fresature o lasciare appositi passaggi sulle pareti.

INFORMAZIONI TECNICHE

impiego	Chiusure verticali
messa in opera	Una volta preassemblate, le pareti e gli elementi vengono trasportati in cantiere, montati e uniti tra loro mediante viti metalliche; si evitano colle
dimensioni	Le tavole hanno spessore 24 mm e una larghezza compresa tra i 10 e i 30 cm. L'elemento finito è costituito da 7 a 36 tavole e può arrivare fino a 3,25 m di altezza e 6 metri di lunghezza con uno spessore compreso tra i 7 e i 36 cm
prestazioni	Ottima robustezza e solidità, coibenza termo-acustica grazie all'elevato spessore e alla presenza dei cuscinetti d'aria. Lo spessore elevato garantisce anche elevata resistenza al fuoco. Scherma circa il 97,5% delle onnipresenti radiazioni ad alta frequenza e dell'elettrosmog
materiali e LCA	Le pareti vengono realizzate con "sottoscorze" di abete rosso, abete bianco, pino, ricavate dagli scarti di lavorazioni di falegnameria, quindi acquistabili ad un prezzo economico. Sfrutta l'aria come isolante. Connessioni metalliche. La malta di legno (miscela di cera, olio di girasole e segatura) rende gli elementi idrorepellenti

Sistema a pannelli ad assi incrociati "Naturhaus"



tipologia

Parete massiccia in tavole di legno a strati incrociati con interposto isolamento

Anno di sperimentazione

1999

azienda

Naturhaus abtenau

riferimenti

<http://www.naturhaus-abtenau.at>

provenienza

Germania

autorizzazione

N.D.



DATI PRESTAZIONALI

conducibilità termica	λ	W/mk	0,14
resistenza al vapore	μ	-	10
densità		kg/m ³	-
protezione acustica	Rw	dB	39-60
resistenza al fuoco	Rei	min	30
velocità di combustione		mm/min	-
Modulo G da forza di taglio	$G_{0,m}$	N/mm ²	-
Modulo di elasticità	$E_{0,m}$	N/mm ²	-
resistenza a compressione	$f_{c,0,k}$	N/mm ²	1,2
resistenza a flessione	$f_{m,k}$	N/mm ²	-

ANALISI QUALITATIVA

1	materiale riciclato
2	materiale riciclabile
1	prodotto da filiera corta
2	materiale reversibile
2	bilancio CO ₂ negativo
0	evita utilizzo di colle
2	colla priva di formaldeide
2	certificazione pefc o simili
2	semilavorato di piccole dimensioni
2	sfruttamento inerzia termica
2	comfort igrotermico
2	comfort acustico
2	valutazione antisismica
2	connessioni plastiche
2	modularità
2	spazio impiantistico
0	manodopera non specializzata
1	posa manuale

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	14/18
caratteristiche tecniche	15./18

DESCRIZIONE

Struttura autoportante in pannelli preassemblati di legno: le pareti sono composte da cinque strati di tavole in legno di abete incrociate ed incollate sovrapposte l'una sull'altra in modo da formare una griglia regolare nei cui spazi vuoti vengono inseriti, come isolamento, pannelli di legno o in fibra minerale. La parete presenta un nucleo centrale costituito da tre strati di tavole incrociate che svolgono funzione portante e due strati esterni composti da tavole verticali con funzione di rivestimento. La parete può essere completata con ulteriori pannelli termo e fonoisolanti. Tutte le pareti sono predisposte per l'inserimento delle tubazioni degli impianti. Tenuta all'aria e al vapore assicurata inserendo nella parete dei fogli di barriera al vapore o guaine traspiranti.

INFORMAZIONI TECNICHE

impiego	Chiusure verticali
messa in opera	Assemblate a secco in cantiere, incastrate tra loro mediante giunti maschio e femmina. Nella parte inferiore e superiore vengono chiuse con travi lamellari unite alla stessa tramite incastro maschio e femmina. Ammorsate alle strutture orizzontali mediante l'inserimento di barre di acciaio. Le eventuali pannellature vengono assemblate alle pareti utilizzando viti o tasselli in acciaio
dimensioni	Pannelli di 1,25 X 2,50 m spessore 13 cm. Le tavole centrali hanno spessore di 26 mm e 10 cm di larghezza disposte a passo ravvicinato quelle verticali a 32,5 cm quelle orizzontali
prestazioni	Robustezza, solidità, isolamento termico e acustico. Buona resistenza al fuoco se accoppiato a un pannello di cartongesso a protezione
materiali e LCA	Tavole di abete di piccole dimensioni. Colla priva di formaldeide. Connessioni metalliche

Sistema per solai e coperture assemblati a secco "LegnoLego"



tipologia

Sistema strutturale ad elementi modulari assemblati a secco

Anno di sperimentazione

N.D.

azienda

LegnoLego

riferimenti

www.legnolego.it

provenienza

Italia

autorizzazione

DATI PRESTAZIONALI

conducibilità termica	λ	W/mk	-
resistenza al vapore	μ		-
densità		kg/m ³	-
protezione acustica	R _w	dB	-
resistenza al fuoco	Rei	min	-
velocità di combustione		mm/min	-
Modulo G da forza di taglio	G _{0,m}	N/mm ²	-
Modulo di elasticità	E _{0,m}	N/mm ²	-
resistenza a compressione	f _{c,0,k}	N/mm ²	-
resistenza a flessione	f _{m,k}	N/mm ²	-

ANALISI QUALITATIVA

- 1 materiale riciclato
- 2 materiale riciclabile
- 1 prodotto da filiera corta
- 2 materiale reversibile
- 2 bilancio CO₂ negativo
- 1 evita utilizzo di colle
- 2 colla priva di formaldeide
- 0 certificazione pefc o simili
- 2 semilavorato di piccole dimensioni

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	13/18
caratteristiche tecniche	18./18

- 2 sfruttamento inerzia termica
- 2 comfort igrotermico
- 2 comfort acustico
- 2 valutazione antisismica
- 2 connessioni plastiche
- 2 modularità
- 2 spazio impiantistico
- 2 manodopera non specializzata
- 2 posa manuale

DESCRIZIONE

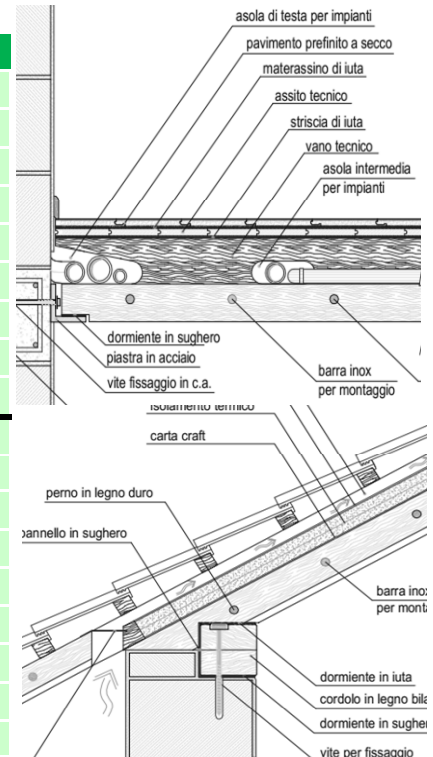
Moduli prefabbricati, composti da tavole di legno essiccate e forate dallo spessore variabile da un minimo di 80 mm a 280 mm, assemblate con perni in legno duro infilati a secco. Nell'estradosso dei solai viene ricavato un vano tecnico da tavole che, opportunamente forate, irrigidiscono la struttura e permettono il passaggio degli impianti. Il sistema, facilmente trasportabile, si monta molto rapidamente, anche senza l'impiego di personale qualificato; è sempre smontabile e riutilizzabile. Per avere un comportamento a piastra si inseriscono barre di acciaio inox.

INFORMAZIONI TECNICHE

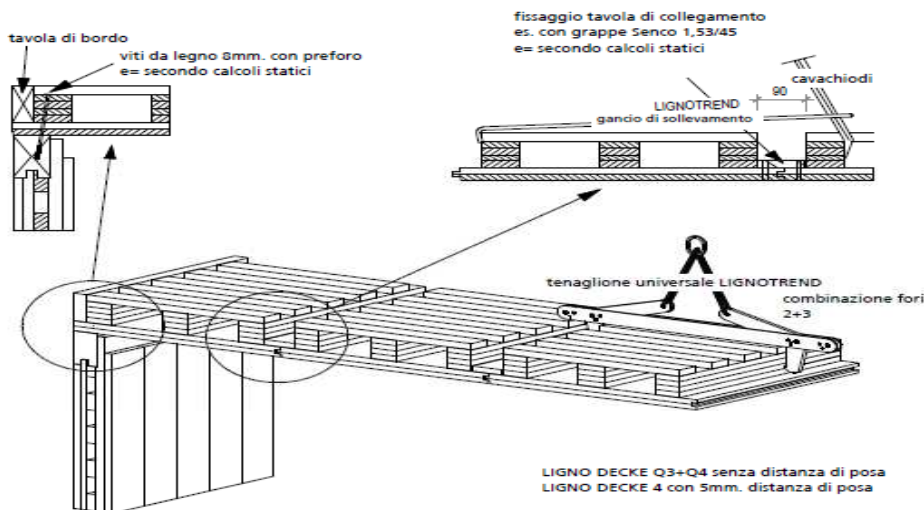
impiego	Sia costruzioni nuove sia restauro e consolidamento di edifici. Strutture orizzontali: solai e travi strutture inclinate: coperture e pensiline. Strutture verticali: pilastri, pareti e setti
messa in opera	I moduli vengono montati in opera, assemblati a secco con perni, senza impiego di incollanti. È possibile anche la movimentazione manuale
dimensioni	Elementi lunghi fino a 13 metri e larghi 1 metro realizzano una piastra in legno massiccio ricavata dall'unione di tavole di legno dello spessore variabile. Barre di acciaio inox inserite ogni 90÷120 cm. L'altezza dei costoloni di irrigidimento dei solai varia da 40 mm a 200 mm ad interasse 504 mm
prestazioni	Tutto il sistema è predisposto per l'impiego in zona sismica. La finitura intradosso grecata-ondulata e il forte spessore di legno concorrono a smorzare il suono. L'ottimo isolamento termico è dovuto al notevole spessore del massello e viene incrementato dai pannelli di sughero o di fibra di legno o dal coibente sfuso. Il carattere massiccio dei moduli assicura l'isolamento acustico e riduce il passaggio del suono. Il legno naturale, di alto spessore, garantisce la regolazione dell'umidità ambientale. L'accesso al vano tecnico, per la manutenzione degli impianti, è facilitato dal pavimento flottante. Lo spessore minimo di 8 cm assicura una resistenza al fuoco pari a 30'÷50'; aumentando lo spessore si raggiunge un R.E.I. da 90'÷120'÷180'

materiali e LCA

Tavole di abete/larice/rovere essiccate e impregnate di Sali di boro. Perti di legno duro e acciaio inox, Juta. I materiali isolanti possono essere pannelli di sughero o in fibra di legno, sughero granulare, silice espansa. Karta Kraft



Sistema per solai e coperture assemblati a secco "Lignotrend"



tipologia

Elemento strutturale per solai e coperture in tavole di legno

Anno di sperimentazione

azienda

Lignotrend, Adria Legno

riferimenti

www.lignotrend.it

provenienza

Germania

autorizzazione

DIBt di Berlino Z-9.1-555

ETA-05/021

Certificato natureplus®

DATI PRESTAZIONALI (Q4 143 mm chiuso)

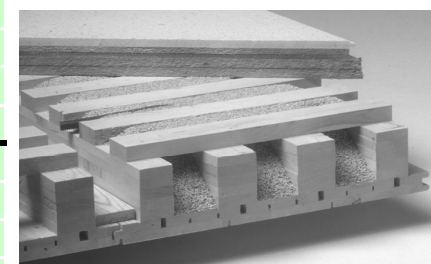
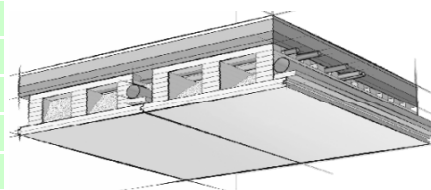
conducibilità termica	λ	W/mk	0,2
resistenza al vapore	μ		8,3
densità		kg/m ³	42-72
protezione acustica	Rw	dB	> 64
resistenza al fuoco	Rei	min	30
velocità di combustione		mm/min	N.F.
Modulo G da forza di taglio	$G_{0,m}$	N/mm ²	52
Modulo di elasticità	$E_{0,m}$	KN/mm ²	1160
Momento resistente	$M_{R,k}$	kNm	14,2
Taglio resistente	$V_{R,k}$	kN	39,4

ANALISI QUALITATIVA

1	materiale riciclato
2	materiale riciclabile
1	prodotto da filiera corta
2	materiale reversibile
2	bilancio CO ₂ negativo
0	evita utilizzo di colle
2	colla priva di formaldeide
2	certificazione pefc o simili
2	semilavorato di piccole dimensioni
2	sfruttamento inerzia termica
2	comfort igrotermico
2	comfort acustico
1	valutazione antisismica
2	connessioni plastiche
2	modularità
2	spazio impiantistico
0	manodopera non specializzata
0	posa manuale

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	14/18
caratteristiche tecniche	13/18



DESCRIZIONE

Elementi strutturali costituiti da tavole in legno massiccio sovrapposte ed incollate. I moduli hanno tre o quattro nervature portanti. Anche il piano longitudinale ha una funzione portante. Questo piano di intradosso può essere prodotto già in fabbrica con diverse finiture di superficie, anche a vista. Il lato superiore dell'elemento viene chiuso con una griglia trasversale. I canali longitudinali tra le nervature e gli spazi vuoti della griglia trasversale accolgono le canalizzazioni e il materiale granulare per l'isolamento del rumore da calpestio. Il piano longitudinale può essere prodotto con l'intradosso in legno chiuso o profilato, anche con una finitura fonoassorbente già integrata in fabbrica. Lungo le giunzioni laterali gli elementi sono profilati con maschio e femmina e vengono collegati con una tavola di giunzione al fine di ottenere un piano rigido.

INFORMAZIONI TECNICHE

impiego	Per strutture portanti di solai, coperture piane ed inclinate
messa in opera	Una volta trasportati in cantiere, i singoli moduli vengono assemblati mediante incastro maschio e femmina ed ammortati fra loro con l'ausilio di apposite connessioni metalliche. Successivamente vengono fissati alle strutture di supporto con viti, anche in acciaio. I giunti presenti fra un modulo e l'altro vengono coperti con tavole di legno, quindi posa degli impianti e pacchetto di finitura
dimensioni	Gli elementi sono preassemblati in moduli con lunghezza pari a 3 metri e larghezza 600-625 mm, uniti arrivano a coprire luci fini a 18 m. L'altezza può variare da 75 a 282 mm. 40 -140 mm è l'altezza dei travetti portanti. Le singole lamelle hanno uno spessore tra i 17 e i 27 mm
prestazioni	Ottima fonoassorbenza. Massima sicurezza. Installazione economica. Superfici con facce a vista di alto pregio. Assoluta stabilità nella forma grazie all'incollaggio incrociato degli strati in legno Prevenzione antincendio R 30-B
materiali e LCA	Abete rosso/abete bianco, 1,6% colla PUR (priva di formaldeide JAIA), connessioni in acciaio

Sistema per solai e coperture assemblati a secco "Lignatur"



tipologia

Elemento scatolare il legno per solai e coperture

Anno di sperimentazione

1988

azienda

Lignatur

riferimenti

www.lignatur.ch

provenienza

Svizzera

autorizzazione

N.D.

DATI PRESTAZIONALI

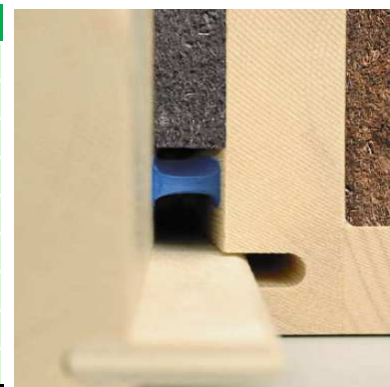
conducibilità termica	λ	W/mk	0,13
resistenza al vapore	μ	-	-
densità		kg/m ³	470
protezione acustica	Rw	dB	40
resistenza al fuoco	Rei	min	90
velocità di combustione		mm/min	0,8
Modulo G da forza di taglio	G _{0,m}	N/mm ²	690
Modulo di elasticità	E _{0,m}	KN/mm ²	11000
resistenza a compressione	f _{c,0,k}	N/mm ²	21
resistenza a flessione	f _{m,k}	N/mm ²	24

ANALISI QUALITATIVA

1	materiale riciclato
2	materiale riciclabile
1	prodotto da filiera corta
2	materiale reversibile
2	bilancio CO ₂ negativo
0	evita utilizzo di colle
2	colla priva di formaldeide
2	certificazione pefc o simili
2	semilavorato di piccole dimensioni
2	sfruttamento inerzia termica
2	comfort igrotermico
2	comfort acustico
1	valutazione antisismica
2	connessioni plastiche
2	modularità
2	spazio impiantistico
0	manodopera non specializzata
0	posa manuale

VALUTAZIONE ANALISI QUALITATIVA

risposta negativa o non applicabilità dell'indice	0
possibile sviluppo	1
risposta positiva	2
caratteristiche ecologiche	14/18
caratteristiche tecniche	13./18



DESCRIZIONE

Elementi scatolari prefabbricati in legno con struttura a celle, costituiti da lamelle in legno di abete essiccato al 10±2% di umidità, in varie misure, incollate e pressate fino a formare elementi modulari sui quali viene applicato a pennello, uno strato di protezione contro l'umidità. I profili laterali hanno un incastro maschio e femmina. Gli elementi sono predisposti per l'alloggiamento degli impianti nelle cavità o nei giunti tra gli elementi o in lamelle scanalate. E' possibile prevedere lamelle removibili per permettere facile manutenzione. E' possibile ottenere un comportamento a piastra accoppiando uno strato supplementare tipo OSB o un nastro metallico perforato o dei perni ogni 1,5 m

INFORMAZIONI TECNICHE

impiego	Solai a struttura continua o discontinua o coperture piane, a falde o curve. Campate fino a 12 m
messa in opera	Gli elementi vengono montati a secco appoggiati direttamente sulle pareti esterne. Talvolta vengono intagliati per essere messi in opera sui profili di appoggio. Per connettere i vari elementi tra loro e alla struttura vengono impiegati connettori meccanici in acciaio. Gli elementi scatolari LIGNATUR vengono posati affiancati senza fuga e avvitati all'appoggio. Un giunto di caucciù butile assicura l'ermeticità pratica e duratura delle fughe degli elementi. L'estremità del giunto deve essere pressata al legno della soglia sul posto
dimensioni	200 mm di larghezza(LKE). Lunghezza massima 12 metri e altezza variabile tra 80 mm e 320 mm
prestazioni	Ottime capacità statiche: ridotto peso specifico e comportamento rigido. Può coprire luci fino a 9 metri. Nella versione abbinata a tavole OSB può considerarsi un comportamento a piastra. Alto isolamento e assorbimento acustico nella versione silence con intradosso forato e abbinato ad un pannello isolante o cartongesso. Protezione antincendio. Alto accumulo e isolamento termico se abbinato con isolante all'interno
materiali e LCA	Abete rosso, 10 +/-2 %, incollato muf (melanina urea formaldeide), zincato in senso longitudinale. Protezione dall'umidità con fondo Solocryl. Vernice per il legno Pigrol a base di cera. Caucciù butile

	SISTEMA A TELAIO		SISTEMA MISTO				X-LAM						
	unità	Upsi	steko		WÄNDE		natura		mhm		naturhaus		
semplice	cm	2,5	abete bianco	3	abete bianco	2,5	abete bianco	10	bbs abete bianco	2,5	abete bianco	13	naturhaus
	cm	2,5	pannello tipo osb	18	isolante sciolto	9	wande	14	isolante	11	mhm	11	isolante pannello
	cm	16,5	isolante sciolto	3	abete bianco	12,5	isolante pannello	-	-	10,5	isolante pannello	-	-
	cm	2,5	pannello tipo osb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione
	cm	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata
	cm	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice
	tot	30	spessore	30	spessore	30	spessore	30	spessore	30	spessore	30	spessore
	g/m ²	<500	condensa	<500	condensa	NO	condensa	NO	condensa	NO	condensa	NO	condensa
	W/m ² k	0,23	trasmissione	0,22	trasmissione	0,248	trasmissione	0,22	trasmissione	0,23	trasmissione	0,254	trasmissione
	h	10.18'	sfasamento	9.12'	sfasamento	8,1	sfasamento	9	sfasamento	12,3	sfasamento	9,16	sfasamento
con spazio impianto elettrico	cm	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco	13	naturhaus
	cm	2,5	interc. Impiant.	2,5	interc. Impiant.	9	wande	2,5	interc. Impiant.	11	mhm	11	isolante pannelli
	cm	2,5	pannello tipo osb	3	abete bianco	12,5	isolante pannello	10	bbs abete bianco	10,5	isolante pannelli	-	-
	cm	14	isolante sciolto	13	isolante sciolto	-	-	9	isolante	-	-	-	-
	-	2,5	pannello tipo osb	3	abete bianco	-	-	-	-	-	-	-	-
	cm	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione
	cm	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata
	cm	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice
	tot	30	spessore	30	spessore	30	spessore	30	spessore	30	spessore	30	spessore
	g/m ²	<500	condensa	NO	condensa	NO	condensa	NO	condensa	NO	condensa	NO	condensa
	W/m ² k	0,25	trasmissione	0,27	trasmissione	0,248	trasmissione	0,272	trasmissione	0,23	trasmissione	0,254	trasmissione
h	9,45	sfasamento	9,5	sfasamento	8,1	sfasamento	10,15	sfasamento	12,3	sfasamento	9,16	sfasamento	
con intercapedine impiantistico 10 cm	cm	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco	2,5	abete bianco
	cm	10	interc. Impiant.	10	interc. Impiant.	10	interc. Impiant.	10	interc. Impiant.	10	interc. Impiant.	10	interc. Impiant.
	cm	2,5	pannello tipo osb	3	abete bianco	9	wande	10	bbs abete bianco	11	mhm	13	naturhaus
	cm	16,5	isolante sciolto	15,5	isolante sciolto	12,5	isolante pannello	11,5	isolante	10,5	isolante pannelli	8,5	isolante pannelli
	-	2,5	pannello tipo osb	3	abete bianco	-	-	-	-	-	-	-	-
	cm	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione	-	protezione
	cm	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata	3,5	camera ventilata
	cm	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice	2,5	doghe di larice
	tot	40	spessore	40	spessore	40	spessore	40	spessore	40	spessore	40	spessore
	g/m ²	<500	condensa	NO	condensa	NO	condensa	no	condensa	NO	condensa	NO	condensa
	W/m ² k	0,22	trasmissione	0,24	trasmissione	0,237	trasmissione	0,231	trasmissione	0,23	trasmissione	0,267	trasmissione
h	10,5	sfasamento	10,51	sfasamento	8,45	sfasamento	10,4	sfasamento	13	sfasamento	11	sfasamento	