



POLITECNICO DI TORINO

Corso Di Laurea Magistrale in ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE a.a 2018/2019

Classe di Laurea LM-4

Costruire in un'ottica di economia circolare: il compensato di pioppo come componente costruttivo per architetture a basso impatto ambientale.

Lo sviluppo di un modulo abitativo per un processo di autocostruzione

Candidato: Alessandro Biagioli

Relatore: Callegari Guido

Correlatrice: Pagliolico Simonetta Lucia.

INDICE

I – INTRODUZIONE	8
II - STATO DELL'ARTE	12
II.1 - Componenti architettonici in compensato di pioppo.	16
II.1.1 - Ciclo produttivo.	24
II.1.2 – Materie prime per la produzione di compensato di pioppo.	30
II.1.2.1 – Il pioppo e la pioppicoltura.	34
II.1.2.2 – Adesivi.	40
II.2 – Decostruzione ed economia circolare.	44
II.3 - Il riuso ed il riciclo	54
III. - CASI STUDIO	58
III.1. - WikiHouse	59
III.2 – Circular Building	69
III.3 – Facit Homes	73
IV – IL PROGETTO	78
IV.1 Linee guida progettuali e vincoli	80
IV.1.1 Problematiche spaziali	80
IV.2 - Assemblaggio componenti della struttura	82
Assemblaggio dei pannelli di rinforzo della cornice	83
Assemblaggio dei pannelli della cornice	84
Assemblaggio delle cornici	85
Inserimento degli scatolari in multistrato riempiti di fiocchi di cellulosa	87

Tipologie di scatolare in multistrato	89
Scatolare di isolamento delle pareti perimetrali e di copertura	89
Scatolare di isolamento dell'angolo inferiore di copertura	90
Scatolare di isolamento centrale in copertura	91
Scatolare di isolamento dell'angolo superiore di copertura	92
Sequenza di montaggio	93
Assemblaggio controtelaio isolato per infisso e pannelli chiusura inferiore.	94
Controtelaio isolato per infisso	97
Pannelli di chiusura inferiore	98
Assemblaggio pannelli di rivestimento interni ed esterni	99
Pannelli di rivestimento esterno	100
Pannelli di rivestimento interno	102
Inserimento pareti terminali e tramezzi	104
IV.3 - Il modulo abitativo	109
Pianta e prospetti	111
Pianta tecnologica	113
Sezione tecnologica	115
Stratigrafia: trasmittanza termica e sfasamento. - solaio di copertura	120
Stratigrafia: trasmittanza termica e sfasamento. - parete esterna	121
Stratigrafia: trasmittanza termica e sfasamento. - parete di chiusura	122

Stratigrafia: trasmittanza termica e sfasamento. - solaio inferiore	123
IV.4 Problematiche ambientali	124
IV.5 Aspetti strutturali	126
IV.6 Aspetti logistici: trasporto	127
IV.7 - Processi costruttivi a confronto	128
V - CONCLUSIONI	129
BIBLIOGRAFIA:	130
Libri	130
Tesi	131
Articoli	131
Normative	133
SITOGRAFIA:	135
RIFERIMENTI IMMAGINI	138

I – INTRODUZIONE

Parlando di architettura sostenibile, non si può non far riferimento all'importanza che rivestono i materiali impiegati per la loro energia e CO₂ incorporate, le prestazioni che li caratterizzano e la possibilità di reimmetterli in un ciclo di consumo tramite riuso o riciclo. L'analisi dei diversi scenari che si prospettano nella logica dell'economia circolare, permette di ridurre la richiesta di materia prima ed i consumi energetici necessari alla realizzazione dei componenti.

L'economia circolare, in architettura, è legata alla progettazione per la decostruzione e alla demolizione/decostruzione controllata. Questi mezzi, in sequenza, consentono, da un lato, di risparmiare tempo prezioso per demolire edifici, anche se si allungano le tempistiche e aumentano i costi progettuali, dall'altro lato consentono di velocizzare la fase di dismissione di un immobile, anche se di natura temporanea, e, grazie alla differenziazione per tipologia dei diversi materiali, di agevolare il riutilizzo/riciclo dei materiali e dei componenti.

L'utilizzo del legno in architettura è considerato un vero traguardo dal punto di vista ambientale per diversi motivi: la capacità intrinseca della biomassa ligno-cellulosica di bio-sequestrare la CO₂ dell'aria e inglobare il carbonio per un tempo prolungato sotto forma di sostanze organiche vegetali quali, ad esempio, la cellulosa; il rilascio di ossigeno in atmosfera nel corso della fotosintesi clorofilliana della pianta; le tecniche di lavorazione a secco, che comportano un minor dispendio di energia e facilitano le operazioni di riuso/riciclo.

A livello economico i vantaggi di questo materiale sono elevati: partendo dalla realtà locale è possibile

sfruttare questa risorsa per impiegarla in lavorazioni a chilometro zero, diminuendo nettamente i costi di trasporto ed anche la CO₂ incorporata del legno ^[1]. Inoltre l'impiego di questo materiale costruttivo apre le porte alla prefabbricazione abbattendo i tempi ed i costi di costruzione e facilitando d'altra parte le successive operazioni di demolizione controllata. La versatilità del legno, alimenta un concetto di economia circolare che interessa non soltanto il prodotto finito ma anche tutti i processi per produrlo.

Infine, l'impiego del legno facilita la sperimentazione e lo sviluppo di nuove idee e competenze progettuali, grazie anche al possibile utilizzo di macchine a controllo numerico CNC (Computer Numerical Control), come ad esempio frese e macchine per il taglio laser. ^[2] Queste ed altre caratteristiche, in particolare le proprietà fisiche e meccaniche che saranno trattate nei prossimi capitoli, fanno del legno, soprattutto di quello ingegnerizzato, un materiale assolutamente innovativo, sebbene esso abbia trovato un così largo impiego in passato.

In un quadro di salvaguardia ambientale al quale si sta mirando ormai dagli anni '90, il legno di pioppo assume un ruolo molto importante. La coltivazione in piantagioni permette una gestione controllata della coltura e l'impiego di cloni MSA (a maggiore sostenibilità ambientale) permette di ridurre l'utilizzo di fertilizzanti ed acqua. In un modello colturale intensivo, se al posto di cloni tradizionali I-214 venissero impiegati gli MSA con certificazione, verrebbe ridotto l'impatto sul surriscaldamento globale causato da gas serra del 30% (calcolato come GWP (Global Warming Potential) tramite metodo IPCC 2013)) e l'energia incorporata dal materiale del 20% (calcolato tramite metodo CED (Cumulative Energy Demand)); inoltre se il

¹ Cfr. Arrigoni A. et al., 2018.

² Indrawan S.E., 2017, p. 177.

pioppeto rispetta i canoni dettati dalla certificazione PEFC, i due indicatori vengono ridotti rispettivamente di un ulteriore 23% e 24% ^[3].

E' stato dimostrato tramite uno studio LCA condotto sul ciclo produttivo dei pannelli in compensato di pioppo ^[4], che mentre la certificazione PEFC del legname impiegato non ha un rilievo particolare sulla riduzione del GWP e del CED, l'impatto maggiore è dato dall'impiego di colle a base di UF (urea formaldeide) che incide su entrambi i parametri nella misura del 40%. Nei capitoli II.1.2.1 e II.1.2.2 saranno approfonditi alcuni aspetti che riguardano la coltivazione del pioppo e l'impatto sull'ambiente e le diverse tipologie di collanti impiegati, la loro eco-sostenibilità e l'innovazione tecnologica per ridurre gli impatti sulla salute e sull'ambiente.

Nel capitolo III saranno analizzati casi studio significativi in cui il compensato viene utilizzato come elemento piano per realizzare la struttura portante dell'edificio, con assemblaggio a secco. Essi saranno discussi e confrontati per mettere in evidenza i punti di forza e le soluzioni migliori adottabili per sfruttare appieno le proprietà del compensato di pioppo, un materiale eco-sostenibile che può adattarsi alle prerogative di prefabbricazione ed economia circolare. Oltre al materiale, un denominatore comune è anche rappresentato dalla possibilità di automazione del processo di taglio dei diversi pezzi della struttura, un elemento innovativo che rivoluziona l'idea di architettura portandola verso un futuro caratterizzato dal lavoro di macchinari intelligenti al servizio della prefabbricazione e della sperimentazione.

Sul percorso di altre tesi del Politecnico di Torino, in cui sono state trattate le tematiche dell'autocostruzione e del sistema WikiHouse ^[5], del compensato di pioppo ^[6], e del riutilizzo di scarti della lavorazione pioppo. Il sistema costruttivo WikiHouse è stato progettato per essere assemblato secondo una logica di autocostruzione e montaggio rapido e si presta molto bene alla produzione in serie.

Nel capitolo IV viene proposto un sistema costruttivo ibrido, basato sull'impiego di box di isolamento scatolari in compensato di pioppo. Questi componenti ricordano i box scatolari strutturali di isolamento prodotti da Facit Homes ma ne riducono gli svantaggi e i punti deboli. Sono costituiti da box scatolari di isolamento che hanno funzione strutturale, in quanto contribuiscono all'irrigidimento della struttura e permettono di distribuire meglio i carichi, come, ad esempio, il peso dei serramenti e la forza del vento.

Gli aspetti peculiari di questi elementi sono: la possibilità di prefabbricazione e di reimpiego, la leggerezza e la velocità di posa in opera e decostruzione, tutte caratteristiche che permettono di ridurre notevolmente i tempi di realizzazione dei sistemi costruttivi WikiHouse. Grazie al sistema di isolamento innovativo elaborato, il processo di autocostruzione viene facilitato e velocizzato, poiché si basa su uno schema di montaggio semplice, che non richiede il taglio di materiale isolante. La struttura risultante è un'ibridazione del sistema WikiHouse e dei box scatolari strutturali isolanti in cui il principale materiale impiegato è il compensato di pioppo. Questa struttura è adatta alla prefabbricazione e all'autocostruzione di moduli abitativi che richiedono semplicità e brevi tempi di

3 Cfr. Deidda A., 2018.

4 Cfr. Deidda A., 2018.

5 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

6 Cfr. Deidda A., 2018.

realizzazione. Un altro aspetto costruttivo che è stato analizzato e ottimizzato nella progettazione è la posa degli infissi. La struttura WikiHouse è stata adattata per ospitare un controtelaio isolato che, oltre ad agganciarsi ai portali, poggia direttamente sui box di isolamento scatolari senza alcun bisogno di rinforzarli per sostenerne il peso.

È stata, infine, posta particolare attenzione al rivestimento esterno della struttura per evitare il contatto delle parti lignee con il ristagno di umidità, e alla realizzazione di una facciata e di una copertura ventilate per il ricircolo dell'aria e la riduzione del carico termico estivo.

Sono stati verificati i valori di trasmittanza termica della struttura che dimostra di avere un ottimo potenziale di impiego in campo architettonico e sono stati confrontati gli impatti ambientali dell'EPS utilizzato come isolante nella tipologia WikiHouse tradizionale e della cellulosa insufflata all'interno degli elementi progettati. La particolare conformazione dei componenti dell'intera struttura permettono un facile trasporto in cantiere con dei ridotti tempi di posa in opera rispetto ai due casi studio analizzati, rendendo questo sistema costruttivo idoneo all'impiego in situazioni di emergenza. L'intera struttura può essere interamente autocostruita e decostruita in tempistiche ridotte, con la possibilità di impiegare componenti riutilizzati da altre strutture e riutilizzarli a loro volta, con l'obiettivo finale di prolungare il più possibile il ciclo di vita di tutti i componenti.

II - STATO DELL'ARTE

A partire dalla Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente e lo sviluppo, svoltasi a Rio de Janeiro nel 1992, è stata adottata l'Agenda 21 come modello per uno sviluppo sostenibile e per la definizione di alcuni principi condivisi dalle comunità aderenti, fra cui la gestione delle foreste, per fare fronte alla progressiva e incontrollata deforestazione amazzonica. Successivamente, nella Risoluzione del Consiglio e dei rappresentanti dei governi degli Stati membri dell'UE, avvenuta nel 1993 ad Helsinki, si iniziò ad avere un'ottica di preservazione e gestione sostenibile del patrimonio forestale ^[1]. In questa occasione nacque un organismo preposto a normare la gestione delle grandi foreste, il PEFC™ (Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes) [Fig. II.1], un programma di valutazione degli schemi di certificazione forestale che: “conserva la foresta come habitat per animali e piante; mantiene la funzione protettiva delle foreste nei confronti dell'acqua, del terreno e del clima; tutela la biodiversità degli ecosistemi forestali; verifica l'origine delle materie prime legnose; prevede il taglio delle piante rispettando il naturale ritmo di crescita della foresta; prevede che le aree soggette al taglio vengano rimboschite o preferibilmente rigenerate e rinnovate naturalmente; tutela i diritti e la salute dei lavoratori; favorisce le filiere corte; garantisce i diritti delle popolazioni indigene e dei proprietari forestali ^[2]”.

1 Cfr. sitografia [1].

2 Cfr. sitografia [13].

3 Sitografia [34].



[Fig. II.1] Logo certificazione PEFC.



[Fig. II.2] Logo certificazione FSC.

Ad affiancare questa certificazione è stato sviluppato l'FSC (Forest Stewardship Council) [Fig. II.2], letteralmente Consiglio per la gestione delle foreste, che promuove un'adeguata gestione forestale tracciando tutti i prodotti a base di legno o carta che vengono marcati. La certificazione FSC obbliga tutti coloro che importano i prodotti finiti a tracciare la provenienza del loro materiale, assicurandosi che siano foreste gestite secondo degli standard ben precisi.

In Italia tutti i materiali ed i beni forniti alla Pubblica Amministrazione vengono regolamentati tramite dei criteri ambientali minimi (CAM), che non escludono delle regolamentazioni più restrittive che possono essere già presenti a livello regionale. Essi sono definiti secondo ciò che è stato stabilito dal Piano per la sostenibilità ambientale dei consumi del settore della pubblica amministrazione e vengono impiegati secondo il Decreto del Ministro dell'Ambiente della Tutela del Territorio e del mare. “In Italia, l'efficacia dei CAM è stata assicurata grazie all'art. 221/2015 e, successivamente, all'art. 34 recante “Criteri di sostenibilità energetica e ambientale” del D.lgs. 50/2016 “Codice degli appalti” (modificato dal D.lgs 56/2017), che ne hanno reso obbligatoria l'applicazione da parte di tutte le stazioni appaltanti ^[3]”.

Questo garantisce che nell'ambito degli appalti pubblici venga sostenuta una politica volta alla ricerca di

[Fig. II.2A] Logo EPD.

materiali sostenibili che riducano l'impatto ambientale, e che alimenti un mercato circolare a favore di un'economia più "verde".

I CAM relativi al settore edilizio sono stati approvati con il **DM 11 ottobre 2017**, mentre quelli relativi alla fornitura di arredi per interni tramite il **DM 11 gennaio 2017**.

Si noti che i criteri ambientali minimi prevedono spesso, nel settore edilizio, che i componenti ed i materiali, come materie prime recuperate o riciclate, i calcestruzzi confezionati in cantiere o preconfezionati, gli elementi prefabbricati in calcestruzzo e le materie plastiche, siano dotati di una certificazione ambientale di prodotto EPD (conforme alla norma **UNI EN 15804** ed **ISO 14025**)^[4]. Invece, sia per il settore edilizio che per quello della fornitura di arredi per interni per la Pubblica Amministrazione, quando si tratta di elementi in legno o con componenti in legno, che può anche essere legno riciclato, sono richieste le certificazioni FSC, PEFCTM o equivalenti, perché si certifichi che il legno provenga da foreste gestite in maniera sostenibile/responsabile ^[5].

Nel caso del compensato, come di tutti i prodotti in legno, verrebbe quindi trascurato l'impatto causato dalla produzione dei componenti e dall'utilizzo di adesivi di sintesi.

Il 25 settembre 2015, le Nazioni Unite hanno approvato l'**Agenda Globale per lo sviluppo sostenibile** e i relativi 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile da portare a termine entro il 2030: Fra i traguardi dell'obiettivo 15, "La vita sulla Terra", il punto 2 cita: "Entro

il 2020, promuovere una gestione sostenibile di tutti i tipi di foreste, arrestare la deforestazione, ripristinare le foreste degradate e aumentare ovunque, in modo significativo, la riforestazione e il rimboschimento."

^[6]

Ad oggi le foreste gestite secondo i canoni di sostenibilità ambientale rappresentano la principale alternativa ecologica al disboscamento incontrollato che avveniva fino a pochi anni fa e vengono sfruttate sia per la produzione di prodotti a base legnosa, sia per la produzione di bioenergia. La maggior parte di esse si trovano in Asia e Europa dell'Est, del Nord e Centrale e, se considerate in gruppo, rappresentano più del 75% dell'estensione totale di foreste piantate nel mondo ^[7]. Si stima che da queste foreste, nel corso del 2005, siano stati raccolti circa 1.4 miliardi di metri cubi di legname, il 47% di esso è stato destinato alla lavorazione di legno tondo industriale, il 39% all'industria della cellulosa e della carta, e soltanto il 10% alla produzione di bioenergia. ^[8]

Sebbene il tempo tra le rotazioni di raccolta del legno sia molto vario, infatti spazia da 11 a più di 100 di anni a seconda della specie legnosa, se paragonato al tempo di rigenerazione degli altri materiali estratti per la produzione di elementi costruttivi, come rocce o metalli, è un tempo breve, e questa è un'ulteriore ragione per considerare il legno un materiale sostenibile ^[9]. Per di più è un dato interessante il fatto che il legno sia l'unico materiale che non viene estratto dal terreno ma al contrario cresce naturalmente ed una sua raccolta controllata non compromette il territorio da cui viene prelevato.

In edilizia sono presenti diversi marchi che certifica-

4 Cfr. Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana, a, 2017.

5 Cfr. Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana, a e b, 2017; Unioncamere e Symbola, 2018.

6 ONU, 2015, p.25.

7 Cfr. FAO, 2010.

8 Cfr. Carle et al., 2008. (FAO 2010 p.12)

9 Cfr. Ramage M.H. evvt al., 2017.

no il valore ambientale dei prodotti impiegati, come il marchio, **Ecolabel** o **EPD**. Le etichettature ambientali di prodotto vengono normate dalla serie **ISO 1402x**:

UNI EN ISO 14024:2001- Etichette di tipo I: rappresentano uno strumento volontario, e vengono attribuite a tutti i prodotti che rispettino determinati standard. All'interno della normativa sono indicate tutte le procedure, specificando le categorie di prodotto, i criteri ambientali e le caratteristiche funzionali per accertare la conformità rispetto le norme ambientali dei prodotti sottoposti ad etichettatura. Tra le più conosciute fanno parte di questa categoria Ecolabel [Fig. II.3](a livello internazionale), Nordic Swan Ecolabel [fig. II.4](per Svezia, Islanda, Danimarca, Finlandia e Norvegia) der Blaue Engel [Fig. II.5](certificazione governativa tedesca nata nel 1978 [1]) e Nf Environment [Fig. II.6].

UNI EN ISO 14021:2001 – Etichette di tipo II: norma le etichette auto-dichiarate da parte di produttori, importatori o distributori di prodotti, senza che vi sia controllo di un organismo indipendente di certificazione, rientrano in questa etichettatura, ad esempio, i marchi “Riciclabile” [Fig. II.7], “Compostabile” [Fig. II.8], ecc.

UNI EN ISO 14025:2001 – Etichette di tipo III: vengono impiegate per avere uno specchio delle caratteristiche oggettive dei prodotti in modo da catalogar-

li in base al loro impatto ambientale. Sono basate su analisi LCA [Fig. II.9], regolata all'interno della norma **ISO 14040**, sono a carattere prettamente informativo e si traducono in Dichiarazioni ambientali di Prodotto EPD (Environmental Product Declaration) che possono essere confrontate per tipologia di prodotto grazie alle Regole di Categoria di Prodotto (Product Category Rules - **PCR**) che stabiliscono le regole di riferimento per la valutazione dell'analisi del ciclo di vita del prodotto.

Il legno di pioppo riveste in questo scenario di rivalutazione dei materiali in chiave sostenibile un ruolo significativo, poiché si tratta di una varietà di legname particolarmente adatta per la coltivazione intensiva, a rapida crescita e ad alta resa, economica, che può essere coltivata senza l'uso massivo di pesticidi e che viene facilmente lavorata. È tra le più utilizzate in Italia sia nell'industria del mobile e dell'edilizia che della carta. Nel territorio Italiano le principali coltivazioni di pioppo sono situate in Pianura Padana-Veneta, ma comunque diffuse anche in altre Regioni come Piemonte, Lombardia e Friuli Venezia Giulia. Il settore agricolo che si occupa della piantagione della pioppicoltura, a partire dal suo apice da collocare negli anni '70, ha subito una grande diminuzione di terreni occupati dalle piantagioni e di aziende che li gestiscano [2]; questo è dovuto in parte alle politiche nazionali che non incentivano ad espandere la superficie coltivata

1 Cfr. sitografia [13]

2 Cfr. Levarato G. et al., 2018, sitografia [17]



[Fig. II.3] Logo certificazione Ecolabel.



[Fig. II.4] Logo certificazione Nordic Swan Ecolabel.



[Fig. II.5] Logo certificazione Der Blaue Engel.

a pioppeto, si prenda ad esempio il fermo biologico di due anni ^[3] che le aziende stanno cercando di far abolire o quantomeno ridurre a 12 mesi. In parte dipende anche dalla paura che gli imprenditori hanno nell' aprirsi alla sperimentazione di nuove tecniche e specie arboree. Infatti, osservando in modo difficile l'evoluzione scientifica nel campo pioppicolo, mal volentieri decidono di sperimentare le numerose quantità di cloni che permetterebbero di incrementare la produzione e ridurre i trattamenti fitosanitari, con un minor dispendio di risorse e con un migliore prodotto finale. Inoltre è opportuno precisare che si sta cercando di far riconoscere i "crediti di carbonio" dei terreni pioppicoli, ovvero la loro capacità dimostrata e certificata di sottrarre anidride carbonica dall'atmosfera, per poter ottenere maggiori incentivi da parte dello stato e poter così accrescere il valore certificato di questa specie legnosa. Infatti, oltre alla sottrazione di 70-140 litri di CO₂ ogni ora da parte di ciascuna pianta di pioppo in fase di sviluppo ^[4], (in media 11 tonnellate per ha/anno, 165 tonnellate/ha di CO₂ per un turno di 15 anni ^[5]), il pioppo ha altri meriti in materia di salvaguardia ambientale: è stato stimato che un ettaro di pioppeto depuri in dodici anni di vita 41.500 m³ di H₂O ^[6] grazie alla capacità di questa pianta di prelevare acqua contaminata tramite le sue radici, assorbire le impurità ed immagazzinarle nel suo legno,



[Fig. II.9] Schema esemplificativo di LCA, in cui viene sottolineata l'attenzione verso l'intero ciclo di vita di un oggetto.

per poi rimettere acqua depurata tramite vapore acqueo. "I pioppeti catturano inquinanti presenti nelle acque di scolo superficiali e nella falda freatica, prima che gli stessi raggiungano il fiume ^[7]". Inoltre questa specie arborea vanta di essere tra quelle considerate a rapido accrescimento, dunque riesce a produrre più materiale in meno tempo rispetto ad altre qualità legnose e, se posta in ambienti dove la concentrazione di CO₂ è molto alta, riesce ad aumentare la propria resa crescendo più velocemente.

Sono questi i principali motivi per cui questo legno viene già impiegato abbondantemente nel settore del mobile ed è in pieno sviluppo il suo utilizzo in quello edilizio: la sua versatilità e le sue caratteristiche fisiche, meccaniche ed ambientali fanno sì che venga visto come una materia prima di qualità e aprono nuove strade a sperimentazioni nei suoi diversi impieghi.

3 Cfr. sitografia [15] e [17], Levarato G. et al., 2018.

4 Cfr. sitografia [15].

5 Cfr. sitografia [20].

6 Cfr. sitografia [15].

7 Sitografia [20], p.25.



[Fig. II.6] Logo certificazione Nf Environment.



[Fig. II.7] Esempio di logo certificazione Riciclabile per oggetti di carta, cartone e cellulosa

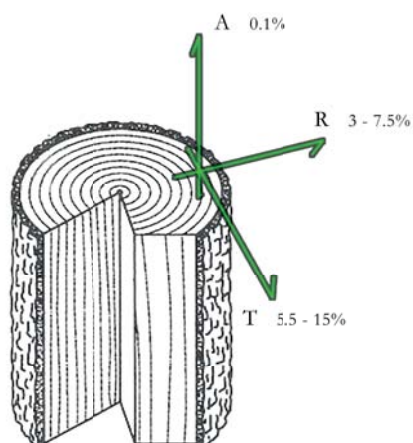


[Fig. II.8] Logo certificazione Compostabile.

II.1 - Componenti architettonici in compensato di pioppo.

Il legno è caratterizzato da un comportamento anisotropo, ovvero presenta diverse proprietà meccaniche (resistenza al taglio, alla flessione e compressione) e fisiche (dilatazione termica e conducibilità termica) a seconda della direzione delle sue fibre. Mostra una spiccata resistenza meccanica in direzione parallela alle fibre, mentre in direzione trasversale la resistenza si riduce notevolmente. Essendo un materiale igroscopico, che quindi a seconda della percentuale di umidità relativa nell'aria ^[1] assorbe o rilascia umidità, è soggetto ad un ritiro igroscopico non omogeneo, suddiviso secondo le direzioni anatomiche assiale, radiale e tangenziale: infatti passando dallo stato fresco allo stato secco, subisce una contrazione in direzione assiale dello 0.1%, 3-7,5% in direzione radiale ed infine del 5,5-15% in direzione tangenziale. [Fig. II.10]

Il compensato nasce, come altre tipologie di legno lavorato e/o ingegnerizzato, per compensare gli effetti dovuti all'anisotropia tramite la sovrapposizione di strati di spessore inferiore a 6mm detti sfogliati, con fibratura incrociata. Questo permette di creare un prodotto che compensi gli effetti della variazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche in direzione trasversale e parallela alla fibratura, irrobustendo il



[Fig. II.10] Schema delle percentuali di ritiro igroscopico del legno.

pannello lungo le due direzioni del piano e renderlo idoneo ad un suo utilizzo sia in verticale che in piano. I pannelli in compensato hanno sempre strati dispari, per poter beneficiare dello stesso aspetto in entrambe le facce e gli strati di sfogliato sono in numero non inferiore a 3.

Il legno compensato ha origini molto antiche, come testimoniano alcuni reperti dell'antico Egitto, ma solo alla fine degli anni '30 del XX secolo vennero sviluppati adesivi sintetici resistenti all'umidità e caratterizzati da buone proprietà meccaniche e di adesione ^[2].

Il compensato fu utilizzato dal 1908 al 1940 dalla società Sears Roebuck & Company originaria di Chicago all'interno delle Modern Homes, e da F. L. Wright nel 1911 con l'American Ready-Cut System che videro nell'utilizzo di questa tipologia di pannelli e nell'ormai consolidato metodo costruttivo balloon frame la chiave per poter seguire una logica di prefabbricazione e la creazione di modelli predefiniti dai quali si poteva partire per eseguire modifiche al fine di personalizzare il prodotto finale. Venne così ideato un sistema costruttivo che anticipava la logica di catena di montaggio e prefabbricazione impiegato nel settore dell'auto e che vide come precursore Henry Ford nel 1912.

I pannelli in compensato vennero utilizzati per l'assemblaggio di tamponamenti interni ed esterni, per coperture e solai, oltre che per alcuni oggetti di arredo, in sostituzione delle tavole di legno fino a quel momento impiegate per realizzare i balloon frame, abbattendo così i tempi di messa in opera dell'intera struttura ^[3].

Lo sviluppo di queste tecniche costruttive ha permesso di arrivare ai più moderni metodi di prefabbricazione che utilizzano pannelli in compensato progettati e

1 Cfr Giordano R., 2010.

2 Cfr. Deidda A., 2018.

3 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

Classi di durata del carico	1 - Interno	2 - Umido	3 - Esterno
Permanente (> 10 anni)	0.6	0.6	0.5
Lunga durata (6 mesi - 10 anni)	0.7	0.7	0.55
Media durata (1 settimana - 6 mesi)	0.8	0.8	0.65
Breve durata (< 1 settimana)	0.9	0.9	0.7

[Tab. II.1] Esempio di valore caratteristico “ k_{mod} ” per il calcolo della capacità portante del compensato in base alle condizioni termoigrometriche e le classi di durata del carico.

sagomati tramite l'impiego di macchinari CNC. Saranno tra gli argomenti approfonditi nei capitoli seguenti il caso di Facit Homes e WikiHouse, i due maggiori esponenti di queste tecniche progettuali, nate e sviluppate in territorio britannico rispettivamente nel 2009 e nel 2011 ^[4].

I componenti architettonici realizzati in compensato o in multistrato vengono classificati seguendo le norme UNI, che ne regolano l'aspetto, le prestazioni, i campi di applicazione, le resistenze e di conseguenza anche le diverse classi di incollaggio.

Quando si parla di progettare strutture in legno, non si può non far riferimento all'Eurocodice 5 altrimenti noto come norma **UNI EN 1995-1-1**. In essa vengono descritte minuziosamente tutte le problematiche da considerare in fase di progettazione con questa tipologia di materiale, specialmente per ciò che concerne carichi, impieghi, calcoli statici e analisi strutturale, resistenze meccaniche. [Tab. II.1]

Le **UNI EN 635-1** e **UNI EN 635-2** descrivono i criteri di classificazione di qualità secondo l'aspetto delle facce dei pannelli in compensato [Fig. II.11], viene riportata una suddivisione in 5 classi, in ordine di perfezione: E, I, II, III, IV, dove la classe E non presenta alcuna imperfezione ed è considerata l'ideale per pannelli a vista o usati per rivestimenti, mentre la classe IV raggruppa i pannelli di compensato che

presentano molte imperfezioni, come nodi, macchie di collante, fessure e stuccature, e che dovrebbero essere utilizzati per imballaggi o per applicazioni non a vista. In ogni caso la classificazione si applica a ciascuna faccia del pannello, per cui si potranno avere pannelli marchiati E/E, E/I... ^[5].

La **UNI EN 315** descrive le tolleranze dimensionali per i pannelli in compensato (lunghezza, larghezza, spessore) e le tolleranze di squadratura e della rettilineità dei bordi ^[6].

Essendo un materiale che assorbe umidità, il compensato, o più in generale il legno, necessita di trattamenti impermeabilizzanti, come un più elevato tenore di collante o un suo rivestimento tramite vernici, pellicole, impregnanti o catramatura nel momento in cui si decida di impiegarlo per un uso esterno. La norma **UNI EN 335-1** identi-



[Fig. II.11] Classi di qualità dei pannelli in compensato di pioppo.

4 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

5 Cfr. UNI EN 635-1:1996, UNI EN 635-2:1996, sitografia [22].

6 Cfr. UNI EN 315:2000.

Classi di rischio	Situazione del legno in opera	Esposizione ad umidificazione	Umidità del legno
1	Non a contatto del terreno ed al coperto	Sempre secco	Sempre < 18%
2	Non a contatto del terreno ed al coperto	Umidificazione occasionale ed intermittente	Occasionalmente > 20%
3	Non a contatto del terreno ed al coperto	Umidificazione frequente	Frequentemente > 20%
4	Nel terreno ed in acqua dolce	Umidificazione permanente	Permanentemente > 20%
5	In acqua di mare	Umidificazione permanente	Permanentemente > 20%

[Tab. II.2] Classi di rischio biologico estrapolate dalla UNI EN 335-1

ca 5 differenti classi di rischio biologico [Tab. II.2], che vengono attribuite secondo tre parametri principali: la situazione del legno in opera, l'esposizione ad umidificazione in servizio e gli agenti biologici che concorrono al degrado del legno. Partendo dalla classe 1 viene considerato un elemento in legno al riparo da fonti di umidità come terreno od aria esterna, in un clima costantemente secco, quindi con umidità sempre inferiore al 18%; la categoria di agenti biologici che possono subentrare sono le termiti, in tal caso la classe verrà denominata 1T. L'esposizione all'umidità verrà aumentata, fino al caso più sfavorevole, la classe 5. Essa considera un legno immerso in acqua salata, quindi con un'umidificazione costante che mantiene il legno sempre ad un livello di umidità maggiore del 20%. In questo caso potrebbe verificarsi l'attacco di funghi che degradano il legno, carie soffici ed organismi marini ^[1].

La classificazione della durabilità del legno soggetto all'attacco di funghi, termiti ed insetti viene trattata nella norma **UNI EN 350-1**, dove vengono elencati i criteri per effettuare la verifica a seconda del tipo di

legno selezionato per i provini. Un legno sottoposto all'attacco di termiti viene classificato come durabile, moderatamente durabile, non durabile. Invece, per ciò che riguarda gli attacchi fungini sono descritte cinque categorie: 1 molto durabile, 2 durabile, 3 moderatamente durabile, 4 poco durabile, 5 non durabile. La resistenza all'attacco degli insetti prevede solo due categorie, resistente e non resistente ^[2].

I principali pannelli di legno compensato vengono elencati e descritti all'interno della norma **UNI EN 313-1** e **UNI EN 313-2**. Sono descritte tre principali categorie di pannello: il compensato tradizionale, il paniforte (lamellare e listellare) ed infine il compensato composito. Inoltre i pannelli vengono distinti in base alla finitura superficiale, suddividendo pannelli non levigati, levigati, prefiniti, rivestiti.

1 Cfr. UNI EN 335-1:2006.

2 Cfr. UNI EN 350-1:1996.

Pannelli di compensato tradizionale piano [Fig. II.11] ^[3]



[Fig. II.11] Esempio di pannello in compensato tradizionale piano.

Esso è un pannello a base di legno formato da un insieme di strati incollati assieme, la fibratura di questi strati adiacenti forma un angolo retto. Per formare un pannello sono necessari almeno tre strati, sempre in numero dispari per mantenere una continuità nell'aspetto delle due facce. Gli strati non necessariamente sono formati da uno stesso genere legnoso, possono anche alternarsi di legno diversi per soddisfare determinati requisiti.

Questi pannelli si prestano molto bene al settore dell'arredamento, dell'imballaggio e a quello architettonico. Per questo motivo necessitano di una particolare attenzione l'aspetto materico, tattile e visivo. E' quindi relativamente facile trovare dei pannelli non levigati, quando si vuole preservare il naturale aspetto del legno, se si tratta di legno di qualità. Di frequente i pannelli di minor pregio materico vengono rivestiti, a seconda delle necessità applicative, sulla faccia a vista con diversi strati di materiale più pregiato che possono essere semplici piallacci di altre specie legnose, oppure carta impregnata, plastica, pellicola di resina,

tessuti, vernici e metalli ^[4]. Questi pannelli nobilitati prendono così il nome di pannelli in compensato rivestito. Essi possono essere suddivisi in base al tipo di rivestimento adottato.

Pannelli di compensato placcati [Fig. II. 12] ^[5]

Sono pannelli con base in compensato e rivestiti da



[Fig. II.12] Esempio di pannello in compensato placcato.

uno strato tranciato di legno più pregiato aggiunto mediante incollaggio. Solitamente viene rivestito soltanto un lato del pannello, quello a vista; nel caso in cui fossero rivestiti entrambi i lati il pannello viene denominato contro-placcato. I pannelli di compensato placcati vengono impiegati principalmente nel settore dell'arredamento per la produzione di mobilio.

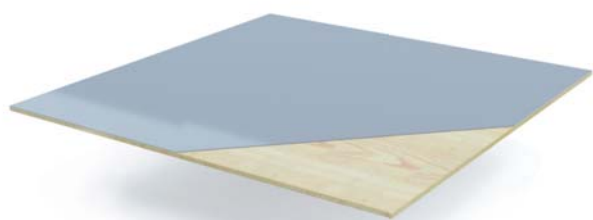
3 Cfr. Deidda A., 2018 e UNI EN 313-2.

4 Cfr. Deidda A., 2018 e UNI EN 313-2.

5 Cfr. Deidda A., 2018, UNI EN 313-2, sitografia [23].

Pannelli di compensato con elementi metallici

[Fig. II.13] ^[1]



[Fig. II.13] Esempio di pannello in compensato con elementi metallici.

Nel caso in cui siano richieste particolari prestazioni, a livello di resistenze meccaniche e resistenza agli urti, o più semplicemente per motivi estetici, il pannello di compensato può anche essere rivestito da strati metallici di diverso tipo:

- Metallo laccato: può essere impiegato per una maggiore resistenza all'urto, per un uso strutturale o per motivi estetici;

- Alluminio: di solito applicato sui due lati di uno strato di balsa a grana fine, permette di ottenere un pannello leggero e facilmente curvabile;

Galvanizzazione: tramite questo procedimento vengono fatti aderire al materiale legnoso dei depositi metallici, che vanno a costituire la base rigida su cui poter applicare altre finiture, quale la pittura;

- Acciaio inossidabile: può essere utilizzato come rivestimento per ottenere un supporto estremamente rigido ed ottenere pannelli adatti alla pavimentazione, oppure se spazzolato, la superficie rivestita può essere impiegata per tamponamenti;

- Alluminio melamminico: può essere un ottimo

materiale applicato sul compensato per ottenere pareti strutturali sottili oppure per realizzare porte. Viene anche impiegato sotto forma di struttura a nido d'ape applicata ai pannelli per soffitti leggeri.

Pannelli di compensato trattati ^[2]

Un altro tipo di trattamento a cui vengono sottoposti i pannelli di compensato consiste nell'impregnarli o rivestirli con sostanze apposite che aiutano a migliorare le loro prestazioni. Nel caso in cui si stia impregnando il prodotto, le sostanze vengono miscelate ai collanti utilizzati per i diversi strati, in modo da penetrare anche all'interno degli strati, nel caso di rivestimenti possono essere utilizzate vernici o pellicole. Possiamo ricordare tra i principali:

Trattamenti ignoritardanti: essi aiutano a combattere l'azione del fuoco, ritardandone gli effetti fino a 60 minuti;

Trattamenti idrorepellenti: vengono effettuati in fase di produzione per componenti estremamente durevoli all'umidità. L'incollaggio è di tipo fenolico, con collanti a base di melammina e che quindi rilasciano formaldeide. Non indicati per luoghi chiusi o abitati ^[3];

Trattamenti antiparassitari: sono spesso delle vernici o prodotti solubili in acqua impregnanti e vengono impiegate per proteggere il legno dall'attacco di parassiti e funghi, ma possono essere trattamenti più superficiali come solventi organici, o addirittura con prodotti gassosi come fumiganti e sublimanti.

1 Cfr. Deidda A., 2018, UNI EN 313-2, sitografia [23], sitografia [24].

2 Cfr. Deidda A., 2018.

3 Cfr. sitografia [25].

Pannelli di compensato tradizionale prefinito [Fig.II.14] ^[4]



[Fig. II.14] Esempio di pannello di compensato tradizionale prefinito.

La normativa identifica, in base alla condizione superficiale, questa categoria di pannelli ai quali tramite apposite tecniche vengono impresse finiture o particolari trattamenti.

- Pannelli postformati: in questa categoria sono compresi pannelli di compensato finiti secondo tutti gli aspetti, ma che vengono sottoposti a ulteriori trattamenti per ragioni estetico-funzionali. Vengono infatti prevalentemente realizzati bordi smussati per oggetti di mobilio ed arredo;
- Pannelli postformati prefiniti: a questi pannelli che presentano le caratteristiche dei precedenti, vengono applicate ulteriori finiture per garantirne l'impermeabilità, il mantenimento dimensionale e planare, la facile pulizia.
- Pannelli ripressati a rilievo: vengono realizzati per rendere visibile una decorazione in bassorilievo. Il legno viene inserito in una pressa con stampi in duralluminio che imprimono grazie all'elevata pressione e calore la forma desiderata al pannello;
- Pannelli prefiniti per la verniciatura e la laccatura;

- Pannelli stampati: è una tecnica impiegata principalmente per la riproduzione di legni pregiati, che vengono riprodotti stendendo diverse mani di vernice che ne riproducono il colore e successivamente imprimendo nel pannello verniciato il disegno delle venature richieste. Spesso adoperata per produrre arredo a basso costo.

Pannelli di compensato tradizionale curvato [Fig. II.15]



[Fig. II.15] Esempio di pannello di compensato tradizionale curvato.

Possono impiegati procedimenti diversi per produrre pannelli che strutturalmente sono identici a quelli piani già descritti in precedenza, ma formalmente possono assumere diverse configurazioni. Principalmente vengono impiegate tre tecniche per sagomare un pannello ^[5]:

- Sagoma, contro-sagoma e pressa a vapore: in questo procedimento il pannello già incollato viene adagiato tra una sagoma ed una contro-sagoma e, tramite una pressa che impiega il vapore per ammorbidire e curvare il legno, gli viene impressa la forma voluta;
- A guscio: “si dispone il pacco su una sagoma a forma di cupola e si appoggia su di esso un sacco di gomma in cui viene inserito un fluido che provoca il perfetto

4 Cfr. Deidda A., 2018.

5 Cfr. Deidda A., 2018.

adattamento del pannello alla sagoma ^[1];

▫ Ad alta frequenza: il pannello viene sottoposto ad un riscaldamento per perdite dielettriche e gli vengono applicati adesivi sintetici ad alta pressione. Grazie a questa tecnica la curvatura del pannello avverrà più rapidamente.

Pannelli di compensato ad anima [Fig. II.16] ^[2]



[Fig. II.16] Esempio di pannello di compensato ad anima.

Questa categoria di pannelli è formata da uno o più strati di sfogliati o tranciati su entrambe le facce, lo strato centrale è costituito da uno strato di un legno che può variare sia per specie legnosa che per tipo di sezione. Questa tipologia di pannello è altrimenti nota col nome di paniforte ed è impiegato specialmente quando viene richiesto un requisito di robustezza. Può essere applicato alla costruzione di mobili, porte, scaffali, controsoffitti e tramezzi leggeri, poiché la sua anima centrale gli consente di aumentare le capacità meccaniche ed acquisire così un'ancora maggiore indeformabilità.

Fanno parte di questa categoria:

▫ Paniforte di tavole: largamente utilizzati in edilizia sono composti da due pannelli di compensato tra le quali sono inserite delle tavole incrociate che, avendo

una fibratura perpendicolare a quella dei pannelli, migliorano la compensazione delle forze;

▫ Pannelli tamburati: sono dei pannelli formati da due strati di compensato (oppure truciolato, MDF) che vengono incollati su di un telaio in legno. Il telaio viene riempito con degli alveoli di carta che aiutano dare stabilità alla struttura e mantenere la forma imposta. Vengono impiegati per la loro leggerezza e facilità di impiego, poiché vengono spesso nobilitati tramite l'impiego di impiallaccature di altre specie più pregiate o di laminati;

▫ Paniforte listellare: tra i due strati di compensato sono inseriti dei listelli in legno massiccio di larghezza compresa tra i 7 mm ed i 30 mm; i listelli non sono necessariamente incollati tra loro. Anche in questo caso la fibratura dei listelli viene disposta perpendicolarmente a quella dei due pannelli che li contengono per aumentare la resistenza alle tensioni interne del legno e la resistenza meccanica;

▫ Paniforte lamellare: differisce sostanzialmente dal precedente in quanto l'anima di questo pannello è costituita principalmente da strisce di sfogliati, generalmente tutte incollate tra loro, disposte di taglio rispetto al piano del pannello e spesse meno di 7 mm e con la fibratura disposta parallelamente a quella dei pannelli esterni che le rivestono.

Questi ultimi due tipi di paniforti possono inoltre presentarsi con più di uno strato di listelli o di sfogliati disposti di taglio, e ogni strato viene separato dall'altro da uno sfogliato che ne aumenta le prestazioni.

1 Deidda A., 2018, p.50.

2 Cfr. Deidda A., 2018; Natterer J. et al., 1998, UNI EN 313-2:1996.

Pannelli di compensato strutturale X-LAM [Fig. II.17] ^[3]



[Fig. II.17] Esempio di pannello X-LAM.

Questa categoria di prodotto fa parte dei legni ingegnerizzati impiegati in campo architettonico per un uso strutturale. E' infatti riconosciuta l'elevata potenzialità di questa tecnica costruttiva che viene adoperata anche per la realizzazione di edifici a più piani, dato l'elevato rapporto tra la sua resistenza meccanica ed il peso; viene sagomato in pannelli prefabbricati per realizzare setti murari portanti, solai e coperture, riducendo lo spreco di materiale ed i tempi di costruzione. Vengono spesso impiegati programmi di calcolo per il corretto dimensionamento della stratigrafia del pannello come CLT design, grazie ai quali vengono stimati gli spessori in base ai carichi delle relative destinazioni d'uso ed alle luci da coprire.

Possono essere formati da un minimo di 3 ed un massimo di 9 strati adiacenti di tavole in legno con spessori che variano dai 15 mm ai 30 mm, spesso giuntate tramite giunti a dito o a coda di rondine ed incollate tra di loro formando un angolo di 90 gradi tra la fibratura degli strati adiacenti, esattamente come un pannello in compensato sfogliato. Vengono impiegati prevalentemente legni di conifere, il più utilizzato è

l'abete rosso, ma per specifiche necessità possono essere utilizzate altre specie.

Vengono prodotti pannelli piani ma con apposite lavorazioni (più onerose) possono essere anche curvati; non esiste una specifica normativa da seguire, per ciò è sufficiente attenersi alle norme redatte per i legni strutturali.

Pannelli di compensato composito [Fig. II.18] ^[4]



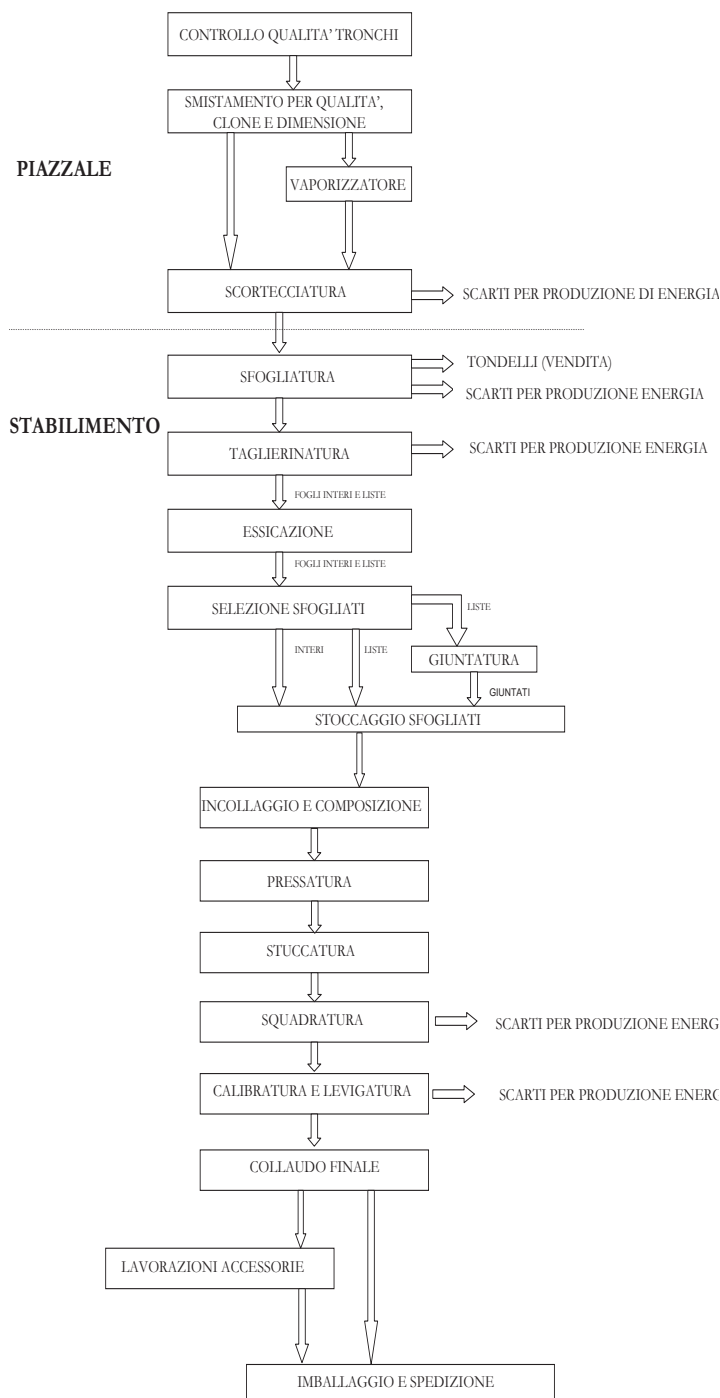
[Fig. II.18] Esempio di pannello di compensato composito con inserto in polistirene.

Nel settore nautico, o in caso serva rispettare precise norme termico-acustiche, viene spesso impiegato questo genere di pannello. Esso è costituito da due lastre di compensato tra le quali viene inserito un ulteriore strato di altro materiale, a seconda delle esigenze. L'anima inserita può anche essere messa tra gli strati di un singolo pannello, a patto che su entrambi i lati dell'inserto vi siano almeno due strati di sfogliato disposti trasversalmente. I materiali impiegati differiscono per proprietà e funzione: può essere in polistirene espanso, polistirolo granulare, PVC, sughero, gesso, gomma semirigida o struttura alveolare in legno riempita con polistirene.

3 Cfr. Deidda A., 2018; Natterer J. et al., 1998, sitografia [27]

4 Cfr. Deidda A., 2018; Natterer J. et al., 1998, sitografia [27]

II.1.1 - Ciclo produttivo.



[Fig. II.19] Schema che rappresenta il ciclo produttivo Panguaneta.

Sebbene le aziende che producono compensato adottino processi molto simili, descriverò le metodologie utilizzate da Panguaneta, una delle principali aziende produttrici di compensato di pioppo in Italia. Panguaneta, oltre ad aver ottenuto la certificazione EPD per i propri prodotti, utilizza fonti di energia rinnovabile, quali biomasse lignocellulosiche, e dispositivi di recu-

pero del vapore acqueo prodotto in fase di essiccazione del legno. Pertanto tutte le informazioni riportate in questo capitolo sono state fornite dall'Azienda e sono schematizzate in [Fig. II.19].

Il processo produttivo si svolge in due zone principali: il piazzale esterno, dove vengono depositati i tronchi di pioppo destinati alla sfogliatura, e all'interno dello stabilimento, dove dal legno decorticato viene ottenuto lo sfogliato per confezionare i pannelli in compensato.

Prima fase

Controllo qualità tronchi

Inizialmente si procede al controllo di qualità dei tronchi. Eventuali imperfezioni o danni evidenti del tronco comporterebbero difetti all'interno dello sfogliato e, a seconda dell'entità del difetto del tronco, la selezione di qualità invia il materiale a un diverso trattamento.

Smistamento per qualità, clone e dimensione [Fig. II.20]



[Fig. II.20] Parco tronchi suddivisi per tipologia.

Vengono quindi separati i tronchi secondo diverse categorie.

In alcuni periodi dell'anno, come d'inverno, i tronchi avranno bisogno di essere scongelati, mentre d'estate

dovranno riacquistare un sufficiente grado di umidità per facilitare le operazioni successive. I tronchi vengono sottoposti, nel ciclo produttivo di Panguaneta, a un trattamento di vaporizzatore. I tronchi vengono depositati in una cella di vaporizzazione in cui convergono, tramite tubazioni sotterranee, i vapori riciclati dal processo di essiccazione e quelli creati da un generatore di vapore ad alta efficienza alimentato parzialmente dalla caldaia a biomasse. Questa fase serve a conferire ai topi basali temperatura e umidità ottimali.

Scortecciatura [Fig. II.21]



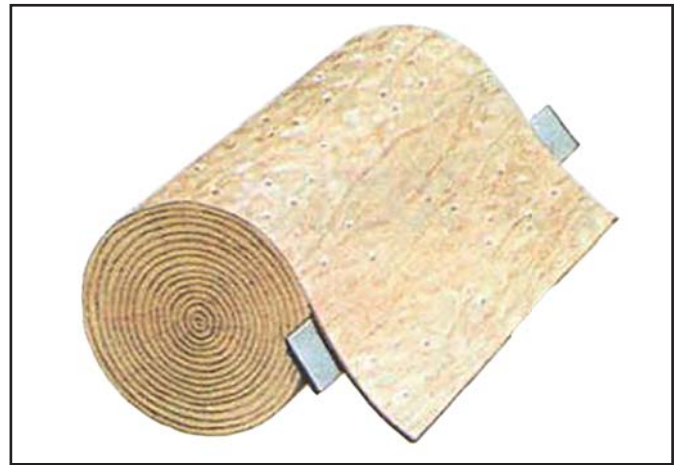
[Fig. II.21] Uscita tronchi dalla macchina per la scortecciatura.

I topi basali vengono trasportati ad una macchina automatica che provvederà alla rimozione della corteccia tramite coltelli rotanti e un sensore che rileva il diametro del tronco e che permette di asportare lo strato corticale e lasciare scoperta solo la parte più esterna del cambio.

Gli scarti prodotti sono impiegati come biomassa nella centrale termica per la produzione di energia.

Seconda fase

Sfogliatura [Fig. II.22]



[Fig. II.22] Schema del taglio di tipo radiale del tronco per ricavare gli sfogliati.

Tramite dei rulli i tronchi vengono trasportati all'interno dello stabilimento dove avverrà la sfogliatura. Questo passaggio avviene in una macchina totalmente automatizzata che tramite sensori laser centra il tronco e imposta l'angolazione di taglio per ottenere la massima resa.

Successivamente il tronco viene reso perfettamente cilindrico e sfogliato: facendo roteare il tronco, le lame avanzano ad una velocità omogenea, tale da produrre uno sfogliato uniforme della misura stabilita. Queste lame sono soggette ad usura e vengono periodicamente affilate da appositi macchinari. Un sottoprodotto di questa lavorazione è il cippato, costituito da scaglie di legno di dimensioni variabili prodotte principalmente in fase di riduzione del tronco a cilindro. Il cippato viene raccolto e inviato alla centrale termica per produrre energia.

Altri sottoprodotti di lavorazione di questa fase sono i tondelli, la parte centrale del tronco che non può essere sfogliata, costituita da falso durame di color bruno. I tondelli vengono rivenduti dall'Azienda a produttori di pallet.

Taglierinatura [Fig. II.23]

[Fig. II.23] Pannelli sottoposti a taglierinatura.

Gli sfogliati appena prodotti vengono tagliati a misura tramite macchine CNC a taglio laser. Gli scarti prodotti in questa fase sono raccolti ed impiegati come biomassa.

Essiccazione [Fig. II.24]

Il contenuto di acqua nel legno è soggetto a variazioni continue a seconda delle condizioni termoigrometriche ambientali e viene espresso come **umidità relativa percentuale**:

$$U (\%) = 100(P_u - P_o)/P_o$$

dove P_u è il peso del campione, P_o è il peso dello stesso campione assolutamente secco e $(P_u - P_o)$ è l'umidità assoluta.

L'umidità del legno utilizzato in industria non dovrà superare la soglia del 20%, limite massimo al di sopra del quale il legno è vulnerabile all'attacco biologico^[1].

Il pannello finito e pronto per la spedizione dovrà infine presentare l'**umidità normale** del 12%, corrispondente a quella del legno in equilibrio igrometrico con aria a temperatura di 20°C e umidità relativa del 65% (UNI EN 322).

Il valore di umidità relativa dei pannelli varierà successivamente a seconda delle condizioni ambientali del luogo di destinazione o di stoccaggio^[2].

Gli sfogliati vengono accatastati su bancali d'acciaio e, trasportati all'interno dell'essiccatore tramite mu-letti. Nell'essiccatore l'umidità relativa degli sfogliati viene ridotta fino a un minimo del 5%^[3]. La riduzione del tenore di umidità permette di prevenire gli attacchi batterici o da parte di insetti xilofagi, di conferire maggiore rigidità e capacità di carico, di preparare la superficie per l'adesione ai collanti e di rendere più leg-

1 Cfr. Ramage M.H. et al., 2017.

2 Cfr. Ibidem e Castro G. et al., 2014

3 Cfr. Deidda A., 2018.



[Fig. II.24] Essiccatoio.



[Fig. II.25] Selezione manuale degli sfogliati.



[Fig. II.26] Rulli trasportatori con sfogliati da giuntare.

gero il materiale e più facilmente trasportabile ^[4].

Selezione degli sfogliati [Fig. II.25]

Una volta raggiunta l'umidità ideale, gli sfogliati vengono selezionati a mano da operatori esperti in base alle qualità estetiche e tecnologiche e all'impiego finale ^[5].

Giuntatura [Fig. II.26]

Non tutti gli sfogliati hanno le misure standard richieste per la creazione di un pannello: quelli che risultano fuori misura per difetto prendono il nome di liste e vengono inserite in un apposito macchinario che provvederà a giuntare i diversi pezzi per raggiungere le misure richieste e per poterli reinserire nella catena di montaggio dei pannelli.

Stoccaggio degli sfogliati

Gli sfogliati vengono quindi stoccati in appositi magazzini a umidità relativa controllata, in modo da non vanificare il dispendioso processo di essiccazione.

Incollaggio e composizione [Fig. II.27]

Gli sfogliati vengono condotti alla fase di incollaggio tramite trasportatori a rulli. Il compensato, sempre



[Fig. II.27] Composizione del pannello in seguito alla stesura dei collanti.

composto da un numero strati dispari, viene assemblato alternando le sfoglie con fibratura incrociata a 90°. Il collante viene cosparsa tramite appositi rulli intrisi di adesivo sulle due facce di uno strato, che viene successivamente posizionato tra altri due strati non rivestiti con resina. Il quantitativo di collante utilizzato può variare in base al numero di strati e all'impiego finale del pannello prodotto. In questo modo si evita lo spreco e la fuoriuscita di colla al momento della pressatura. Nel caso di Panguaneta la quantità impiegata varia dal 15% al 26% ^[6] del peso totale del legno di pioppo con umidità relativa del 5%.

Gli strati più esterni, essendo a vista, sono solitamente costituiti da fogliati di pioppo di qualità superiore, oppure, su richiesta, da sfogliati di specie legnose più pregiate. Il pacchetto di sfogliati viene quindi sottoposto a termo-pressatura.



[Fig. II.28a] Pannelli nella pressa mono-vano. [Fig. II.28b] Particolare dell'interno pressa mono-vano.

4 Cfr. Ramage M.H. et al., 2017.

5 Cfr. Deidda A., 2018.

6 Panguaneta, 2017.



[Fig. II.29] Pressa a 16 vani.



[Fig. II.30] Stuccatrice automatica.



[Fig. II.31] Stuccatura manuale.

Pressatura a caldo

La pressione, la temperatura e i tempi di pressatura variano da impianto a impianto e in base alla tipologia di pannello. La pressione e la temperatura favoriscono la reazione di polimerizzazione dell'adesivo e garantiscono la presa tra i diversi strati.

Le presse impiegate possono variare per tipologia. Panguaneta dispone di due presse, una mono-vano [Fig. II.28a; Fig. II.28b] in cui i pannelli vengono pressati tutti insieme in uno stesso scomparto, ed una pressa a sedici vani, nella quale i pannelli vengono impilati uno sopra l'altro ma suddivisi in 16 vani separati [Fig. II.29].

La prima pressa viene utilizzata per la maggior parte dei pannelli prodotti, specie i pannelli di piccola misura, come 250 x 122 cm, che possono essere introdotti contemporaneamente aumentando la capacità produttiva e massimizzando la produzione. La seconda invece viene utilizzata per la produzione di fuori formato o comunque di pannelli di grandi dimensioni, come 312x187 cm, viene impiegata soltanto nel caso in cui tutti e 16 i vani possono essere riempiti contemporaneamente.

I residui di colla che restano adesi ai macchinari nella fase di giuntatura, incollaggio e pressatura a caldo vengono smaltiti come rifiuti (codice **CER 080410**),

Stuccatura

I pannelli grezzi così ottenuti passano sotto la supervisione di un operatore specializzato [Fig. II.31]. I difetti più o meno evidenti vengono stuccati con stucco chiaro nel caso di legno di pioppo oppure uno stucco rosa per i legni esotici. I pannelli possono anche essere introdotti in una stuccatrice automatica che svolge il lavoro in autonomia [Fig. II.30].

Squadratura.

Ora che il pannello è stato rifinito esteticamente ponendo rimedio alle imperfezioni, viene inviato alla squadratura e rifilatura dei bordi per raggiungere la misura richiesta dagli standard di produzione dell'azienda. Il taglio avviene tramite seghe circolari, e gli



[Fig. II.32] Pannelli sottoposti a calibratura e levigatura.

scarti prodotti, anche in questo caso, vengono bruciati nella caldaia a biomasse per la produzione di energia.

Calibratura e levigatura

Questi due processi vengono eseguiti in contemporanea: il pannello viene calibrato e se lo spessore supera il limite consentito, viene lavorato all'interno di una macchina levigatrice [Fig. II.32], che, tramite carta abrasiva, conferisce ai pannelli il giusto spessore. Successivamente viene ripetuta la misurazione e, se lo spessore dovesse ancora eccedere e quindi non risultasse idoneo, il pannello verrà ulteriormente levigato. Gli scarti prodotti vengono bruciati nella caldaia a biomasse per la produzione di energia.

La carta abrasiva esausta viene smaltita in discarica (codice **CER 120117**).

Collaudo finale [Fig. II.33]

L'operatore addetto alla levigatura verifica che tutto sia idoneo tramite un controllo visivo. Tramite gli ultrasuoni vengono segnalati eventuali strati scollati o dove ci sono mancanze e vuoti di colla.

Imballaggio e spedizione [Fig. II.34]

L'imballaggio e la spedizione dipendono anche dalle specifiche richieste del cliente.

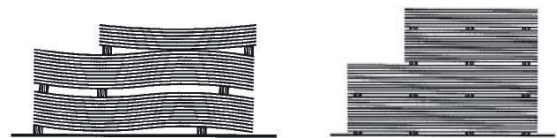


[Fig. II.33] Collaudo finale tramite ultrasuoni.

Di norma tra un gruppo di pannelli e l'altro vengono posti dei pezzi di legno come distanziali, tutti rigorosamente posizionati in asse con quelli superiori e inferiori in modo da evitare che il peso dei pannelli sovrastanti causi curvatura di quelli inferiori [Fig. II.35]. Vengono inoltre reggiati, tramite reggia in polipropilene, per impedire movimenti orizzontali del plico di pannelli durante la movimentazione e il trasporto.

Ogni plico di pannelli riporta una banda di carta in cui viene precisata la tipologia dei pannelli, le misure e gli standard ambientali rispettati e sulle quali è riportato il nome dell'azienda produttrice.

Nei pannelli più grandi, per i quali il rischio di eventuali lesioni durante il trasporto è notevolmente maggiore, vengono aggiunti dei paraspigoli in cartone lungo i lati superiori ed inferiori e degli angolari in cartone in corrispondenza degli angoli del plico.



[Fig. II.35] Esempio di deformazioni generate dal disallineamento verticale dei distanziatori.



[Fig. II.34] Esempio di pannello di compensato composito con inserto in polistirene.

II.1.2 – Materie prime per la produzione di compensato di pioppo.

Per la produzione dei pannelli di compensato di pioppo viene utilizzato del “tondame” di pioppo da cui sono ricavati gli sfogliati o i tranciati che verranno poi sovrapposti con le rispettive fibrature incrociate. In Italia la reperibilità del tondame di pioppo influenza la sostenibilità dei prodotti finiti. Infatti, il declino della pioppicoltura citato precedentemente, ha portato ad una carenza di materia prima locale e ha causato un aumento di richiesta di materia da fonti extraterritoriali che ha portato a una crescente importazione di legname grezzo di pioppo e legno tondo ad uso industriale di non conifere^[1], aumentando notevolmente il costo della materia prima, l'energia e la CO₂ incorporate del materiale. Paolo Fantoni, denuncia una situazione allarmante che è testimoniata dal crescente calo di aziende pioppicole passando da 62000 azien-

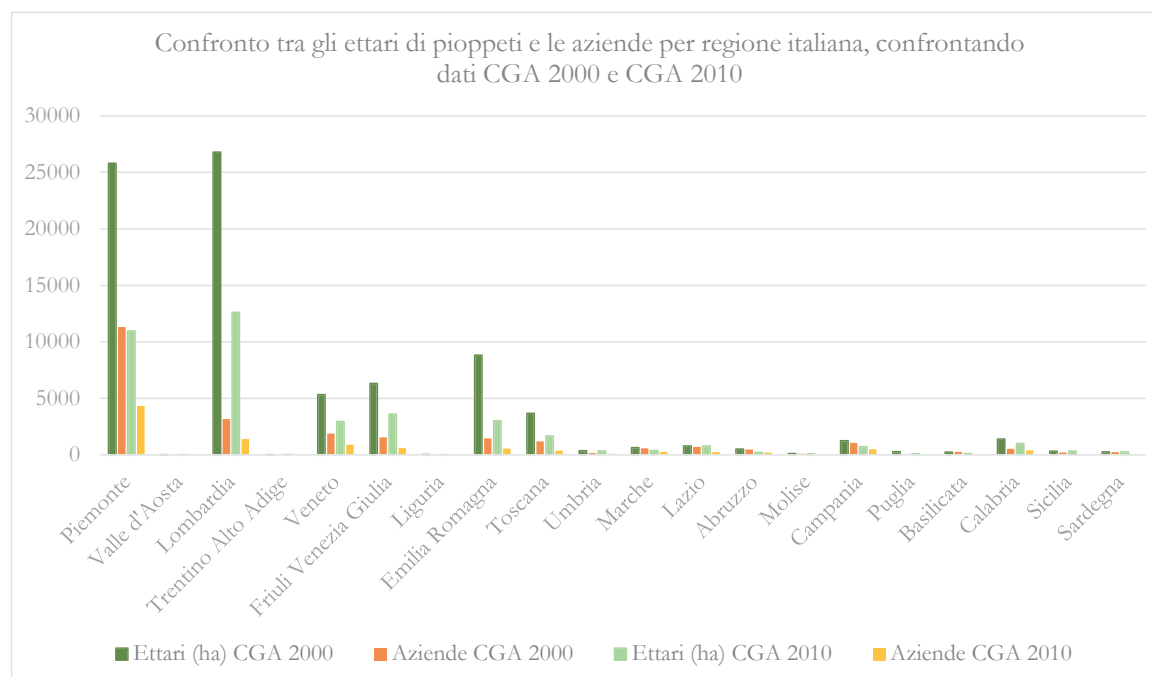
de pioppicole con 170000 ettari di terreno coltivato a pioppo di fine anni settanta a 18000 aziende che producono in un territorio di circa 39000 ettari nel 2010:
^[2] “Dai primi anni Ottanta abbiamo assistito a un costante disinteressamento delle istituzioni nei confronti di un comparto che contava oltre 62.000 aziende, con vincoli ambientali sempre più penalizzanti che hanno avuto effetti pesantissimi sull'intero sistema”. Questo trova conferma nei dati ricavati su fonte Istat (Censimento Generale dell'Agricoltura), nei dati dell'Inventario Forestale Nazionale (IFNI) e nei dati relativi all'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC). Riguardo ai dati INFC il censimento più recente è datato 2015 ma al momento sono stati completati nel 2014 soltanto i sopralluoghi aerei, i dati non saranno disponibili fino a che il censimento di dati raccolti a terra non sarà terminato, per questo motivo sono stati utilizzati quelli più recenti

1 Cfr. sitografia [15] e [17], Levarato G. et al., 2018.

2 Cfr sitografia [15].

	CGA 2000			CGA 2010		
	Ettari (ha)	Aziende	ha/az	Ettari (ha)	Aziende	ha/az
Piemonte	25797	11315	2.28	10979	4321	2.540847
Valle d'Aosta	2	15	0.13	1	1	1
Lombardia	26790	3165	8.46	12615	1400	9.010714
Trentino Alto Adige	16	6	2.67	28	5	5.6
Veneto	5326	1895	2.81	2951	893	3.304591
Friuli Venezia Giulia	6316	1551	4.07	3603	600	6.005
Liguria	32	45	0.71	8	12	0.666667
Emilia Romagna	8825	1459	6.05	3024	568	5.323944
Toscana	3674	1182	3.11	1670	370	4.513514
Umbria	378	152	2.49	346	100	3.46
Marche	654	578	1.13	394	272	1.448529
Lazio	787	705	1.12	801	246	3.256098
Abruzzo	524	466	1.12	231	199	1.160804
Molise	124	97	1.28	94	46	2.043478
Campania	1249	1054	1.19	735	506	1.452569
Puglia	292	75	3.89	101	44	2.295455
Basilicata	250	274	0.91	121	63	1.920635
Calabria	1411	542	2.60	995	399	2.493734
Sicilia	322	202	1.59	337	60	5.616667
Sardegna	275	244	1.13	275	69	3.985507
ITALIA	83044.00	25022.00	3.32	39309.00	10174.00	3.86

[Tab. II.3] Distribuzione dei terreni coltivati a pioppo e delle aziende pioppicole secondo dati CGA 2010 e CGA 2000.



[Fig. II.36] Istogramma riassuntivo della distribuzione dei terreni coltivati a pioppo nel territorio Italiano secondo dati CGA 2010 e INFC 2005.

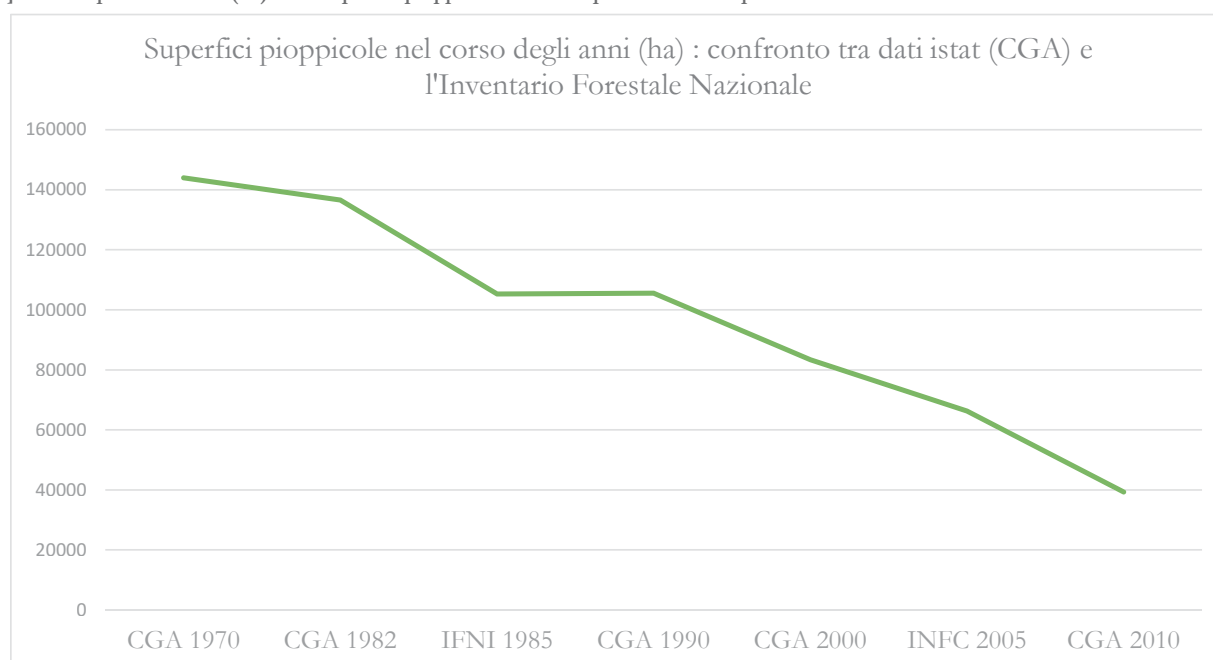
datati 2005 [Tab. II.3; Tab. II.4; Fig. II.36; Fig. II.37].

Da questi grafici si può osservare come nella maggior parte delle regioni italiane nell'arco di un decennio si siano dimezzati sia i terreni adibiti alla coltivazione di pioppo, sia le aziende pioppicole. Questo dato sottolinea la necessità di una nuova politica che incentivi

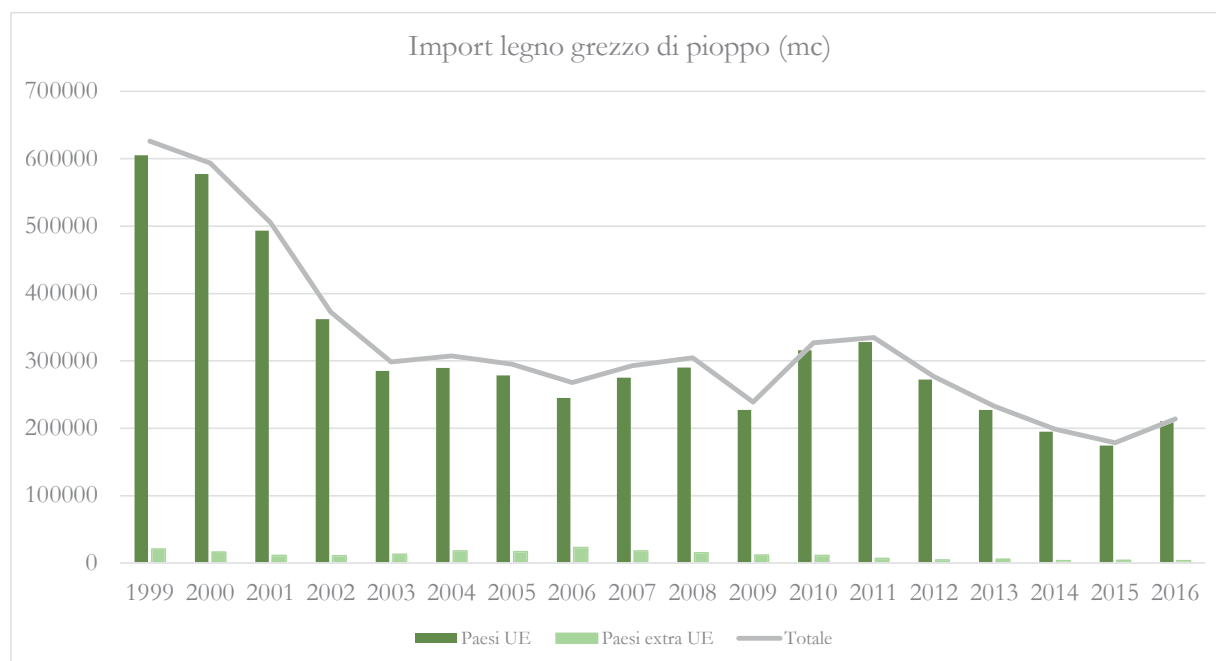
questo tipo di coltivazione per poter sfruttare questa risorsa anche in altri ambiti oltre a quello della produzione di mobilio, senza incorrere nella necessità di importare materiale dall'estero. Secondo i dati Eurostat l'importazione di legno grezzo di pioppo sembrerebbe avere una tendenza negativa, mentre i valori

CGA 1970	CGA 1982	IFNI 1985	CGA 1990	CGA 2000	INFC 2005	CGA 2010
143981	136580	105244	105556	83368	66270	39308

[Tab. II.4] Valori espressi in ettari (ha) delle superfici pioppicole in diversi periodi storici reperite da fonti diverse.



[Fig. II.37] Grafico a linee riassuntivo che sottolinea il trend della coltivazione di pioppo dal 1970 al 2010..



[Fig. II.38] Istogramma dell'import di legno grezzo di pioppo dal 1999 al 2016 da paesi UE ed extra UE. (EUROSTAT)

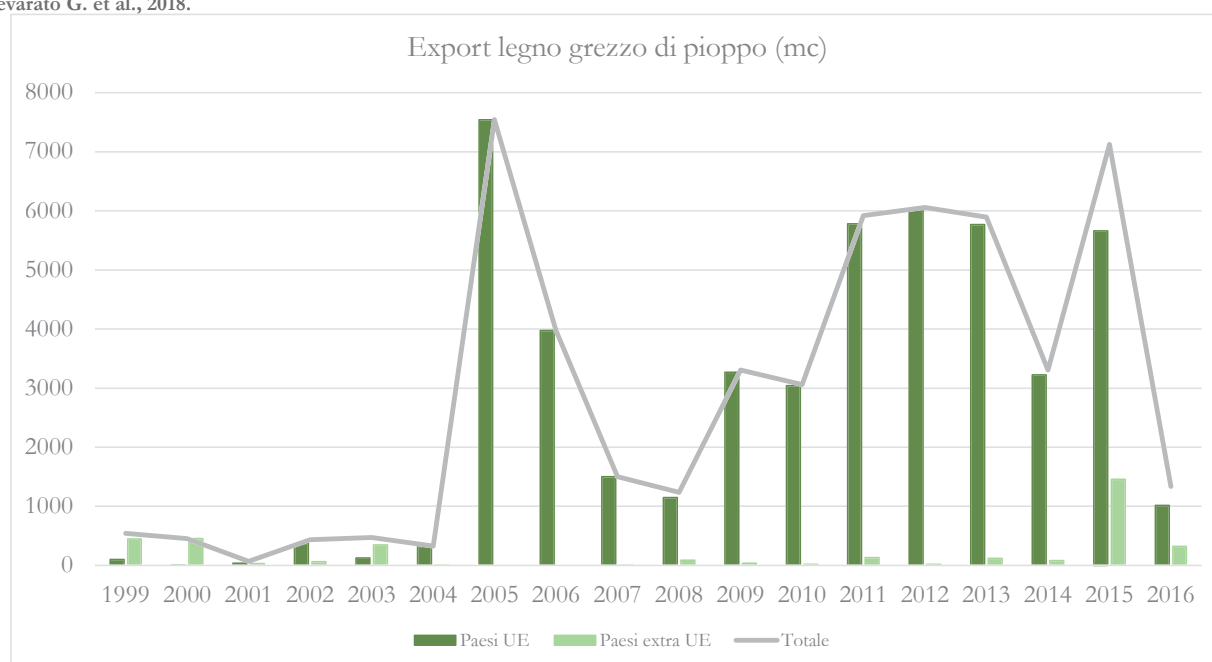
di esportazione dal 1999 al 2016 sono aumentate più del 100%. [Fig. II.38; Fig. II.39]

Nonostante i dati a disposizione siano a volte discordanti poiché provenienti da diverse fonti (raccolta di dati statistici tramite i database di ISTAT, Eurostat ed UNECE/FAO),^[1] si sta cercando di sviluppare delle startup come AgriOpenData grazie alle quali sarà possibile avere un quadro completo di tutti i dati riguar-

danti ogni aspetto della coltivazione: dalla tipologia di coltura, all'espansione territoriale, dal monitoraggio delle raccolte a quello dei prodotti utilizzati.

Per conferire la tipica rigidezza, omogeneità e stabilità ai diversi strati che formano il pannello, vengono applicate su ogni strato delle particolari resine sintetiche che, spesso mescolate ad additivi, garantiscono una presa solida che impedisce ad ogni strato di se-

1 Cfr. Levarato G. et al., 2018.

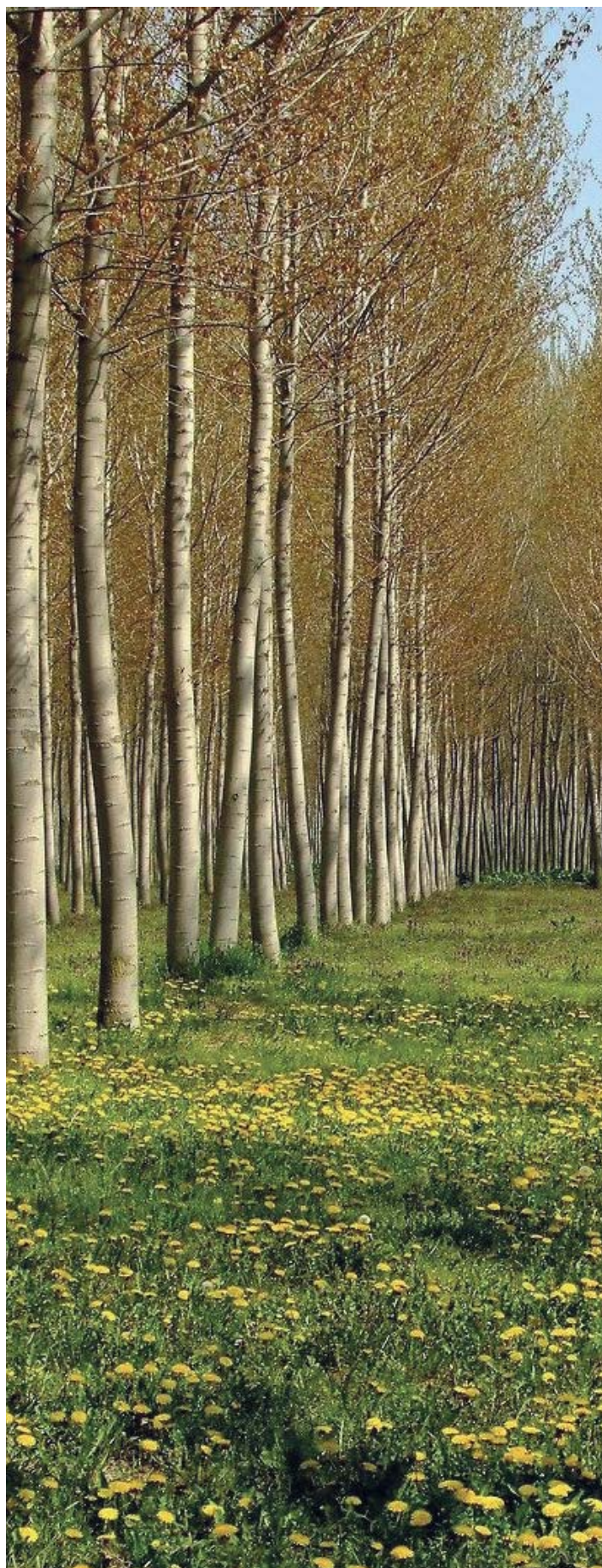


[Fig. II.39] Istogramma dell'export di legno grezzo di pioppo dal 1999 al 2016 da paesi UE ed extra UE. (EUROSTAT)

pararsi dal resto della tavola, una protezione efficace da umidità, attacchi fungini, attacchi batterici e di insetti xilofagi. Come sarà trattato nei capitoli seguenti, vengono impiegati diversi tipi di collanti che oltre ad avere diverse proprietà intrinseche, e quindi vantaggi mirati, possiedono anche i relativi svantaggi che sono legati per lo più alla composizione chimica ed alla percentuale impiegata nel singolo pannello. Per cui, come riportato nelle specifiche normative, la produzione e l'utilizzo di ogni pannello sono soggette a restrizioni ben precise. ^[2]

2 - Cfr. UNI EN 13986 e DM 10 ottobre 2008.

II.1.2.1 – Il pioppo e la pioppicoltura.



[Fig. II.40] Pioppeto sul Po.

Il compito di produrre dei tronchi di legno di pioppo di ottima qualità, destinati alla lavorazione, viene necessariamente portato a compimento dal processo di pioppicoltura. Esso non solo è determinante per la quantità di prodotto che giungerà nelle segherie ma è anche fondamentale da un punto di vista qualitativo: aver cura di tutte le fasi del processo di piantagione e raccolta del pioppo, a partire dalla scelta del clone più adatto alle proprie esigenze e tutte le operazioni di piantumazione, concimazione e potatura, determinano la buona riuscita di un raccolto, poiché ogni piccolo errore nei diversi passaggi può comportare una malformazione del legno, o in qualche modo ad un suo danneggiamento che oltre alla conseguente diminuzione della parte utile alla lavorazione, comporta anche un abbassamento della qualità e del prezzo del prodotto finale. ^[1]

In Italia viene impiegato prevalentemente il clone I-214: quest'ultimo non fa parte dell'insieme di cloni riconosciuti come MSA (maggiore sostenibilità ambientale), è sempre stato soggetto all'attacco di funghi ed insetti, ma grazie alla sua bassa massa volumica riesce ad essere venduto ad un prezzo maggiore rispetto agli altri cloni, e per la produzione di compensato dimostra di avere ottime qualità meccaniche. ^[2]

La scelta del clone viene effettuata principalmente in base al futuro impiego del legno ottenuto, le capacità dell'albero di resistere a funghi ed insetti ed alle specifiche caratteristiche del sito in cui sorge la piantagione (come la necessità o meno di irrigare o concimare).

Vi sono ben 41 cloni MSA riconosciuti e catalogati a seguito di attività di ricerca e piantagione sperimentale eseguite ai sensi del **DM 308/1996** e delle attività eseguite per il progetto QualiAmbiPio, che non vengono sfruttati a pieno, ma che sono ben più resistenti,

1 Cfr. Corona P. et al., 2018, Deidda A., 2018.

2 Cfr. Deidda A., 2018 e Castro G., 2014.

produttivi, hanno una migliore conformazione e possono anche necessitare di minori opere di irrigazione grazie alla capacità di radicare velocemente ed in profondità. ^[3] Nei Programmi di Sviluppo Rurale di molte regioni ci sono degli appositi contributi per chi pratica una pioppicoltura diversificata, ovvero andando ad alternare in percentuale i cloni MSA all'ormai consueto I-214, ai fini di un'arboricoltura più sostenibile perché necessita di meno prodotti per la protezione delle piante e una cura minore nelle diverse fasi di coltivazione e per evitare il rischio di malattie che colpiscano l'intero raccolto, causando un ingente danno economico. ^[4] Le direttive date dalle certificazioni ambientali PEFC e FSC, mirano ad evitare che venga commercializzato del legno prodotto illegalmente da foreste gestite in maniera non sostenibile o da raccolti illegali, e stabiliscono che i terreni coltivati a pioppo sopra una certa estensione debbano essere policlonali, non necessariamente con cloni MSA. PEFC stabilisce che vadano introdotti il 10% di altri cloni oltre al prevalente per terreni superiori a 20 ha, FSC invece ne richiede il 20% per terreni con un'estensione maggiore a 30 ha. ^[5]

Solitamente i nuovi alberi di pioppo vengono ricavati da esemplari adulti tramite la riproduzione per talea [Fig. II.41] : si tratta di un ramo di un anno di età lungo fino a 15 cm che abbia una gemma, e una volta piantato sia in grado di sviluppare un impianto radicale proprio. Queste talee vengono coltivate nei cosiddetti "barbatellai" [Fig. II.42], nei quali rimangono per una durata di circa tre anni. Prima di piantarvi le talee, però, il terreno viene preparato tramite aratura, concimazione, fresatura e trattamenti fitosanitari che permettano di contrastare gli attacchi fungini, batterici e di insetti.

Questo tipo di piantagione è molto densa: un ettaro contiene infatti circa 62.500 talee che dopo un anno di coltivazione producono 125.000 astoni da piantare in vivaio. ^[6] In questa fase le talee vengono anche irrigate, è un'operazione molto costosa che viene attuata quattro volte in un anno durante il periodo estivo, poiché richiede un maggiore apporto di acqua, per un totale di 3.000.000 l/ha. Questa operazione è necessaria poiché le radici non si sono sviluppate ancora abbastanza da garantire un approvvigionamento idrico

3 Cfr. Corona P. et al., 2018.

4 Cfr. Corona P. et al., 2018.

5 Cfr. Corona P. et al., 2018.

6 Cfr. Deidda A., 2018.



[Fig. II.41] Talea di pioppo.



[Fig. II.42] Barbatellaio.



[Fig. II.43] Pioppelle nel vivaio.

autonomo.

La fase successiva al barbatellaio prevede che gli astoni ricavati dalle talee vengano piantati in un vivaio [Fig. II.43], precedentemente preparato tramite operazioni di aratura, fresatura, concimazione, diserbanti e trattamenti fitosanitari, secondo uno schema meno denso del precedente: infatti si possono contare 7.000 astoni in un ettaro di terreno. ^[1]

Questa è una fase cruciale, della durata di uno o due anni, per ottenere delle pioppelle prive di difetti, poiché il tronco ancora giovane e malleabile di queste piante permette di correggere eventuali imperfezioni di forma, per rendere così il tronco dritto ed aumentare le probabilità che il legno che vi si ricaverà sia di ottima qualità. Le pioppelle scelte per i pioppeti inoltre non devono presentare nessun tipo di malattie e/o parassiti. ^[2] Anche in questa fase ai problemi dati dalla siccità estiva viene posto rimedio tramite un'irrigazione meno impattante della precedente ma sempre scandita da quattro interventi per un totale di circa 2.000.000 l/ha. ^[3]

1 Cfr. Deidda A., 2018.

2 Cfr. Deidda A., 2018.

3 Cfr. Deidda A., 2018.

4 Cfr. Ibidem e Castro G., et al., 2014.



[Fig. II.44] Preparazione del pioppeto per la messa a dimora delle pioppelle

Infine le pioppelle vengono prelevate e piantate in un pioppeto. Anche in questo caso il terreno deve essere preparato [Fig. II.44] in precedenza tramite interventi di cippatura per eliminare la base dei fusti di pioppo precedentemente raccolti, e tutto il vecchio impianto radicale. ^[4] Il terreno più adatto per questa specie arborea è caratterizzato da una forte permeabilità, infatti i terreni sabbio-limosi o sabbio-argillosi permettono di evitare l'accumulo d'acqua tipico dei terreni prevalentemente argillosi che ne determinerebbe l'asfissia dell'apparato radicale. Allo stesso tempo i terreni troppo permeabili, con fondi molto sabbiosi o molto ghiaiosi, non permettono comunque un giusto equilibrio nella concentrazione di nutrienti del terreno, che tenderebbero a defluire con l'acqua, senza pervenire alla pianta. La scelta di un terreno ottimale permetterebbe un rapido sviluppo della pianta che troverebbe da subito tutti i nutrienti che le servono, ma soprattutto che anche durante la crescita non siano necessari ulteriori interventi di concimazione. Un'altra caratteristica del terreno è la presenza dell'acqua: per questa specie è molto importante godere di una generosa disponibilità d'acqua, che ne permetterebbe



[Fig. II.45] Pioppelle messe a dimora nel pioppeto.

be l'auto sostentamento, rendendo inutile irrigare il pioppeto durante il primo anno di ciclo (operazione indispensabile nel caso in cui ci fosse un problema per lo sviluppo di radici che affondino in riserve d'acqua sotterranee). Quindi la vicinanza a corsi d'acqua oppure la presenza di falde freatiche sono condizioni necessarie per agevolare la crescita dei pioppi e, come accennato in precedenza, fondamentali per garantire un maggiore filtraggio delle acque inquinate o per evitare l'erosione del terreno in caso di allagamenti e nubifragi. ^[5]

La messa a dimora [Fig. II.45] deve avvenire preferibilmente in seguito a dieci giorni in cui tutta la parte della pianta che sarà interrata viene fatta idratare direttamente a bagno in acqua. Questa operazione viene eseguita durante il periodo di riposo invernale, ed è consigliabile non effettuarlo in corrispondenza di giorni in cui la temperatura scende sotto zero poiché il terreno ghiacciato impedirebbe il corretto interramento di tutto l'apparato radicale, causando danni alla pianta. Inoltre, per evitare che la pianta si disidrati a causa delle numerose gemme presenti, sono altamente sconsigliati gli impianti tardo-primaverili. ^[6]

In questa fase la densità degli alberi è nettamente inferiore rispetto alle due fasi precedenti, infatti come riportato da Corona et al.: ^[7] “nelle piantagioni di pioppo per la produzione di assortimenti destinati alla sfogliatura il numero di alberi per ettaro può variare da un minimo di 150 (67 m² per albero) a un massimo di 330 (30 m² per albero), anche se in genere è preferibile una densità tra 200 e 280 alberi per ettaro, con sesti di impianto in quadro, a rettangolo o a settonce. La scel-

ta della spaziatura va comunque effettuata tenendo in considerazione le caratteristiche della stazione (clima, suolo), il clone e la durata del turno, utilizzando densità minori nei terreni meno fertili”.

La durata del turno, che comprende il lasso di tempo dalla messa a dimora delle pioppelle al taglio dell'albero, può essere stabilita in base a diverse esigenze che possono essere motivi prettamente economici dettati dal valore di mercato delle varietà più pregiate, oppure necessità tecniche come il tipo di clone, la spaziatura della piantagione e le condizioni fitosanitarie. ^[8]

Come riporta lo studio condotto dall'Istituto di Sperimentazione per la Pioppicoltura, ^[9] per i cloni ibridi coltivati in Lombardia occorrono turni di circa 10-11 anni, mentre per le specie esotiche i turni vanno da 12 a 20, fino a che i tronchi non raggiungono i 30-35 cm di diametro a petto d'uomo.

Per semplificare le diverse condizioni che caratterizzano ogni produzione, si può asserire che i turni si suddividono principalmente in quattro categorie riconosciute dall'Ente Nazionale per la Cellulosa e per la Carta: ^[10]

- Turno fisiocratico: il taglio avviene all'11° anno di età, quando l'albero ha raggiunto un livello di crescita medio e si riesce così a massimizzare la raccolta;
- Turno finanziario: il taglio avviene all'11° anno di età, viene determinato in seguito al calcolo delle diverse spese sostenute, le condizioni di mercato e gli interessi sui capitali anticipati;
- Turno tecnico: dipende fortemente da quella che è la richiesta del mercato in quel momento; se ad esempio nel mercato c'è un'ampia richiesta di compensati,

5 Cfr. sitografia [15] e sitografia [9].

6 Cfr. Deidda A., 2018 e Corona P. et al., 2018.

7 Corona P. et al., 2018, p. 14.

8 Cfr. sitografia [34].

9 Cfr. sitografia [34].

10 Cfr. Deidda A., 2018.

il turno sarà ottimale per massimizzare la produzione di sfogliati;

▫ Turno patologico: si basa sulle diverse resistenze dei cloni alle malattie che possono interessare le piante di pioppo. Il turno prosegue fino a che la malattia interessa solo il livello corticale o al massimo quello periferico, in modo da non intaccare la produzione di sfogliati.

Per poter mettere a dimora le pioppelle bisogna arare il terreno per una profondità di circa 30-50 cm, questa operazione è spesso seguita da una ripuntatura ad una profondità di 70-120 cm.

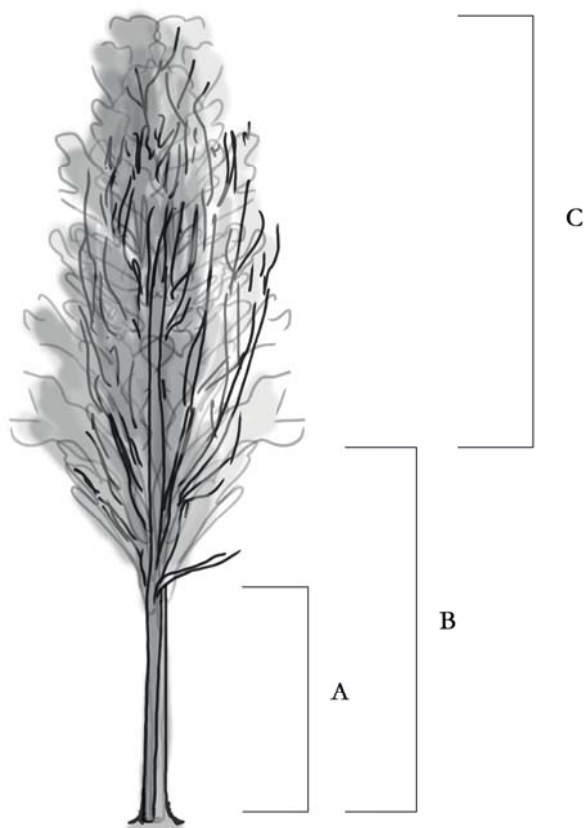
Vengono così scavate le buche di un diametro che si aggira intorno ai 30 cm e le pioppelle, che per l'industria del compensato possono avere un anno o due

di vivaio, verranno interrate per un quinto della loro altezza. ^[1]

Da questo momento per i primi due anni, le piante subiranno operazioni di potatura di correzione e formazione, grazie ai quali si eliminano imperfezioni, mentre successivamente le operazioni serviranno a rimuovere i rami lungo il tronco fino a 7 metri di altezza [Fig. II.46]. Infatti negli impianti per la produzione di pannelli di compensato, questi interventi sono mirati ad ottenere un toppe basale che non abbia nodi, e che quindi permetta di ottenere sfogliati di ottima qualità. ^[2] Per evitare imperfezioni, la potatura deve essere eseguita nel periodo di riposo invernale, in cui vengono rimossi i rami giovani lungo il fusto centrale; questa operazione sarà ripetuta fino al quinto anno del turno.

Come osservato da Corona P. et al. 2018, sono necessarie altre operazioni sullo strato attivo del terreno anche dopo la piantagione delle pioppelle; infatti entro la prima metà di un turno di dieci anni vengono eseguiti questi interventi per migliorare la sua struttura e la sua permeabilità, in modo da limitare il propagarsi di vegetazione infestante ed evitare le perdite per evapotraspirazione; nella seconda metà del turno invece si tende semplicemente ad eliminare la vegetazione spontanea con uno o due interventi, perché si è notato che non apporta migliorie sostanziali alla crescita degli alberi.

Durante l'intero turno, è ammesso l'utilizzo di prodotti fitosanitari per la salute delle piante, ma è obbligatorio il loro impiego nel rispetto della salute dell'ambiente e dell'operatore che lo utilizza, quindi è strettamente necessario utilizzare i dosaggi consigliati e soprattutto, nel caso del pioppo, soltanto prodotti che siano omologati per questa specie arborea.



[Fig. II.46] Schema con le diverse parti per i tagli del legno:
A: parte dedicata alla sfogliatura per produrre compensati, cassette di legno, e Tranciati. 7m di altezza.
B: parte dedicata alla segazione per la produzione di pannelli listellari, imballaggi, semilavorati per mobili ed infissi e componenti d'arredo.
C: parte dedicata alla triturazione per produrre biomassa, pannelli di particelle e pasta per prodotti di carta.

1 Cfr. Corona P. et al., 2018.

2 Cfr. Corona P. et al., 2018.

Anche in questo caso le certificazioni FSC e PEFC stabiliscono i criteri minimi ed i fitofarmaci da utilizzare nelle piantagioni certificate.

Al termine del turno è fondamentale la fase di taglio e stoccaggio dei tronchi, perché se eseguita in maniera grossolana potrebbe causare la perdita di valore del legno ottenuto. Esistono infatti due principali metodi di raccolta utilizzati in tutto il mondo: uno è caratterizzato dall'utilizzo di macchinari di derivazione agricola accompagnati dalla manodopera umana, l'altro invece è un processo che avviene quasi interamente sotto forma meccanica, caratterizzato da macchinari molto costosi e complessi.

Il primo caso è quello più tradizionale, maggiormente adoperato e comporta dei piccoli investimenti con costi che esulano dalla dimensione del lotto in cui viene applicato; la pianta viene tagliata da un operatore tramite motosega, supportato da un trattore munito di braccio spingi-tronchi; successivamente la pianta viene "allestita" da due operatori, ovvero vengono effettuate le operazioni di "collaudo e misurazione", in cui vengono verificate le misure della pianta, "deramatura" in cui vengono tagliati i rami presenti lungo il tronco centrale, quelli più grossolani e i cimali saranno poi ammassati e caricati su camion; e "depezzatura" in cui il tronco viene suddiviso secondo le sezioni utili all'utilizzo finale,^[3] fase in cui viene ricavato il toppe basale utile alla sfogliatura.

I rami più esili (< 3-4 cm) saranno lasciati a terra o bruciati nello stesso luogo in cui sono stati tagliati.

Nel secondo caso si parla invece di una procedura estremamente meccanizzata, dove vengono impiegate specifiche macchine denominate harvester [Fig. II.47] che eseguono il taglio la deramatura e la depezzatura su rami fino ad un diametro di 4-5 cm. Rispetto al

precedente metodo però ci sono notevoli differenze di spesa e di resa: se da un lato è vero che in questo modo è possibile lavorare piantagioni più grandi senza incorrere in affaticamento, dall'altro l'investimento iniziale in questi macchinari è nettamente maggiore ed un appezzamento più esteso significa un maggiore consumo di gasolio con conseguente inquinamento dell'ambiente ed un significativo aumento della CO₂ incorporata dal prodotto finale. Inoltre sembra che questo processo estremamente meccanizzato porti a dei prodotti qualitativamente peggiori con misure meno precise di quelle prese dagli operatori del primo



[Fig. II.47] Esempio di Harvester.

metodo, e un danneggiamento delle cortecce.^[4]

3 Cfr. Castro G., et al., 2014.

4 Cfr. Castro G., et al., 2014.

II.1.2.2 – Adesivi.

L'adesivo viene utilizzato per unire i diversi strati di sfogliato e costituisce il secondo componente del compensato di pioppo. L'adesivo influenza le prestazioni meccaniche del pannello a seconda della tipologia impiegata, e della quantità. e Inoltre, la durabilità del pannello in opera, in funzione della classe di esposizione ambientale, dipende dalla classe di incollaggio. In Italia vengono riconosciute tre diverse classi di incollaggio per i pannelli in compensato che sono elencate nella normativa UNI EN 314-2: ^[1]

- classe 1: per ambienti interni asciutti
- classe 2: per ambienti esterni coperti
- classe 3: per ambienti esterni non coperti

Nell'industria esistono diversi tipi di adesivi: essi possono essere suddivisi in base alla composizione chimica, il meccanismo di indurimento e l'impiego che se ne vuole fare. ^[2]

Nel caso del compensato, o più in generale dei pannelli a base legnosa, vengono impiegate principalmente quattro tipologie di adesivi:

Urea Formaldeide (UF) [Fig. II.48]

Questa resina deriva dalla reazione chimica tra urea e formaldeide. Essa è tra le più impiegate nel settore grazie al costo relativamente basso, all'alta reattività e rapidità di polimerizzazione e alle buone prestazioni meccaniche. Attualmente viene stimata una produzione annua di resine UF pari a più di 5 mln di tonnellate. ^[3]

Questo resina viene commercializzata sotto forma di liquido o polvere e indurisce se sottoposta ad una temperatura maggiore di 10 °C. Viene impiegata

per realizzare pannelli per uso interno e fatta polimerizzare mediante pressatura a caldo.

La tenuta dell'adesivo dipende dal rapporto molare F/U: più è grande questo valore più l'incollaggio sarà forte, tuttavia, maggiore sarà la quantità di formaldeide non reagita presente nel pannello dopo polimerizzazione e tanto più crescerà il pericolo di emissioni di VOC dal pannello in opera.

Inoltre, l'adesivo è soggetto a degrado in presenza di umidità, a causa di un fenomeno di idrolisi della resina, e può perdere le prestazioni meccaniche e rilasciare formaldeide nell'ambiente. Per questo motivo gli adesivi UF sono impiegati per il confezionamento di pannelli per interni.

Melammina-Urea-Formaldeide (MUF)

Una parte di urea può essere sostituita con aggiunte melamminiche per aumentare la resistenza all'acqua dell'adesivo. Nella produzione del compensato l'adesivo viene applicato e pressato a caldo. La resina è incolore e trasparente



[Fig. II.48] Esempio di urea formaldeide allo stato polveroso.

1 Cfr. UNI EN 314-2.

2 Cfr. Deidda A., 2018.

3 Cfr. Ming L. et al., 2018.

Fenolo Formaldeide (PF)

Questo tipo di resina viene definita fenolica appunto perché ottenuta dalla reazione chimica tra fenolo e formaldeide.

Essa si può trovare allo stato liquido sotto forma di soluzione, oppure sotto forma di polvere allo stato solido. Il processo di indurimento che porta alla reticolazione viene velocizzato somministrando calore oppure aggiungendo degli agenti indurenti. Questo tipo di resina, spesso impiegata per produrre compensati marini, ha una colorazione scura, a livello meccanico manifesta una spiccata duttilità ^[4] e, nonostante l'elevata tossicità dimostrata a contatto con la pelle, emette minori quantità di VOC rispetto alle resine MUF. ^[5]

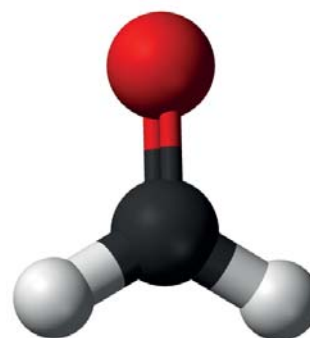
Fenolo-Resorcinolo-Formaldeide (PRF)

La PRF è una resina sintetica che viene prodotta sempre dalla reazione tra fenolo e formaldeide, ma con la co-condensazione di una parte di resorcinolo. La resorcina è un elemento costoso, motivo per cui viene spesso sostituita con altri fenoli più economici. Questa resina viene impiegata in particolar modo quando vi è necessità di produrre componenti che dovranno essere esposti alle intemperie, poiché la resina permette un'alta idrorepellenza e resistenza alle intemperie.

Gli adesivi sono caratterizzati dall'emissione di VOC (Volatile Organic Compounds) a causa, principalmente, della presenza di formaldeide [Fig. II.49], una sostanza inodore dall'odore pungente che si presenta

sotto forma gassosa a temperatura ambiente. Soltanto dal 1° gennaio 2016 è passata da sospetta cancerogena, come asserito nella circolare emessa dal Ministero della Salute n°57 del 22 giugno del 1983 che ne limitava la presenza negli ambienti interni a 0,1 ppm (0,124 mg/m³), ^[6] a presunta o certamente cancerogena. ^[7] Viene prodotta naturalmente da tutti gli organismi viventi, visto che è indispensabile per la produzione di proteine. È presente in molti cibi anche se in basse concentrazioni e viene emessa in natura da tutti gli organismi vegetali. I componenti legnosi prodotti industrialmente ne hanno una concentrazione nettamente maggiore a causa della formaldeide non reagita presente nelle colle a base di UF e della reversibilità del legame ammino-metilene nelle resine polimerizzate. Tutti i pannelli vengono divisi secondo le diverse classi di emissione elencate nella **UNI EN 13986 2015 appendice B**. ^[8] La norma prevede due classi di emissione: **E1** (basse emissioni) ed **E2**. Per ciò che riguarda la classe con la minore emissione vengono fatte diverse prove per accertare che il componente vi appartenga:

- Metodo della camera, normata dalla **UNI EN 717-1**, ^[9] è una prova iniziale secondo cui tutti i tipi di pannello devono presentare un'emissione di formaldeide non superiore a 0,124 mg/m³ aria;
- Metodo del perforatore, normato dalla **UNI EN 120** ^[10] viene impiegato per i pannelli di particelle MDF e OSB, per verificare che il contenuto di formaldeide



[Fig. II.49] Struttura chimica della formaldeide.

4 Cfr. sitografia [31].

5 Cfr. Deidda A., 2018.

6 Cfr. Deidda A., 2018.

7 Cfr. sitografia [29]

8 Cfr. UNI EN 13986:2015.

9 Cfr. UNI EN 717-1: 2004.

10 Cfr. UNI EN 120: 1995.

dei pannelli essiccati nel forno sia non superiore a 8 mg/100 g di pannello;

□ Metodo della gas-analisi, normato dalla **UNI EN 717-2** ^[1] viene utilizzato per tutti gli altri tipi di pannelli e prevede un'emissione non superiore a 3,5 mg/m² h.

^[2]

In Italia, a seguito del **DM 10 ottobre 2008**, ^[3] viene imposta la classe **E1** per tutti i prodotti a base legno commercializzati. ^[4] La classe E1 è richiesta in Europa per i pannelli base legno, ma esistono normative ancora più cogenti in materia di emissioni, come ad esempio la **CARB phase 2** ^[5] [Fig. II.50] adottata in California oppure la **Four stars** ^[6] [Fig. II.51] adottata in Giappone, che per i pannelli in compensato prevedono emissioni pari a 0.05 ppm, ^[7] la metà rispetto a quanto consentito dalla normativa europea.

Le resine rilasciano un maggiore quantitativo di VOC soprattutto nel momento in cui vengono riscaldate per attuare il processo di polimerizzazione. Le emissioni sono principalmente date dal fatto che nel processo di polimerizzazione, molte molecole di formaldeide

rimangono non reagite, non si legano alla struttura reticolata della resina e rimangono libere di disperdersi nell'ambiente. Nelle resine UF le emissioni di formaldeide sono anche dovute alla reversibilità del legame ammino-metilene e a fenomeni di idrolisi in presenza di acqua, che portano alla liberazione di formaldeide legata. ^[8]

Per limitare il fenomeno possono essere utilizzati nella resina additivi che catturano e fissano le molecole di formaldeide, e riducono le emissioni del pannello finale. Queste aggiunte molto spesso finiscono per modificare chimicamente la struttura del collante, cambiandone anche le proprietà intrinseche.

Conseguenze ambientali

L'uso di adesivi petrolchimici comporta evidenti conseguenze ambientali. Essi in primo luogo comportano lo sfruttamento di una risorsa fossile non rinnovabile ovvero il petrolio, che a sua volta, in un'ottica "from cradle to grave", comporta grandi dispendi di energia per essere estratto e per tutti i successivi processi di raffinazione, oltre che ad emissioni di gas serra.

1 Cfr. UNI EN 717-2: 2004.

2 Cfr. sitografia [30].

3 DM 10 ottobre: 2008.

4 Cfr. sitografia [28].

5 Cfr. CARB phase 2

6 Cfr. Four stars

7 Cfr. sitografia [33].

8 Cfr. Ming L. et al., 2018; sitografia [32].



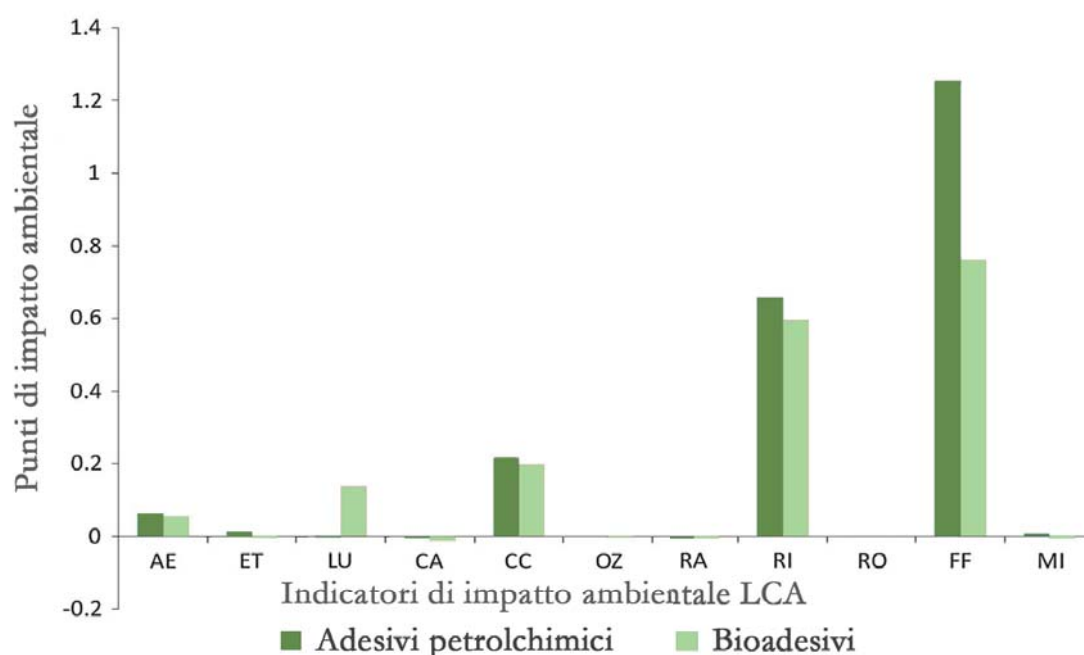
[Fig. II.50] Logo certificazione Carb Phase 2.



[Fig. II.51] Logo certificazione Four Stars.

Nella ricerca di McDevitt J. et al.,^[9] tramite un'analisi LCA, viene paragonato l'impatto ambientale che comporta un pannello di MDF prodotto con adesivi petrolchimici, comparato con un secondo prodotto con bio-adesivi costituiti da elementi naturali come lignina e proteine del mais. Come si evince dal grafico [Fig. II.52] in cui vengono riportati tutti i parametri dello studio LCA, l'adesivo petrolchimico registra un impatto maggiore del 39% per ciò che riguarda il consumo di carburanti fossili: questo deriva dal fatto che nella produzione dei bio-adesivi si consuma meno petrolio e ci sono meno emissioni dovute ai trasporti; inoltre viene evidenziato come l'impatto degli adesivi derivanti dal petrolio sul cambiamento climatico sia maggiore del 9% rispetto al secondo.

9 Cfr. McDevitt J. et al., 2014.



[Fig. II.52] Grafico riassuntivo degli indicatori di impatto ambientale degli adesivi petrolchimici confrontati con i bioadesivi.

II.2 – Decostruzione ed economia circolare.

L'economia legata ad un oggetto o un materiale viene definita circolare quando si impiegano dei meccanismi circolari (loop) grazie ai quali un determinato componente o materiale può essere riciclato e reimmesso nel ciclo produttivo. Più è piccolo il loop creato e più velocemente il materiale può essere riutilizzato, più è grande, maggiore è il numero di processi per poterlo riutilizzare e più alta risulterà l'energia incorporata del materiale. ^[1] [Fig. II.53]

Il concetto di economia circolare è stato introdotto e completato partendo da diverse tematiche già affrontate in passato. Il Think-tank fondato da Aurelio Peccei cinquant'anni fa presentò un rapporto dal titolo: "I limiti dello sviluppo" ^[2] pubblicato nel 1972, nel quale i ricercatori fornivano previsioni sull'esaurimento delle risorse. Il concetto di "cradle to cradle, C2C" di Braungart e McDonough ^[3] del 2003 e la metodologia di progettazione eco-compatibile. Il "Regenerative Design" di John T. Lyle, ^[4] con un approccio alla progettazione che favorisce la "rigenerazione", ovvero il ripristino, il rinnovo o la rivitalizzazione delle fonti di energia e di materiali proprie.

Le basi della progettazione circolare si fondano su due logiche diverse ^[5]: una è la logica del Re.S.O.L.V.E. (Regeneration, Share, Optimise, Loop, Virtualise), elaborata dalla fondazione Ellen MacArthur, ^[6] che individua nei sei punti dell'acronimo la base per poter influenzare positivamente l'economia legata all'uso di materie prime [Fig. II.54]; la seconda, elaborata inizialmente dall'architetto Frank Duffy negli anni '70 e successivamente sviluppato da Stewart Brand nel corso degli anni '90, illustra come il manufatto architettonico sia da vedere come un sistema composto da sei strati, "6 S": site (sito), structure (struttura), skin

1 Cfr. sitografia [3].

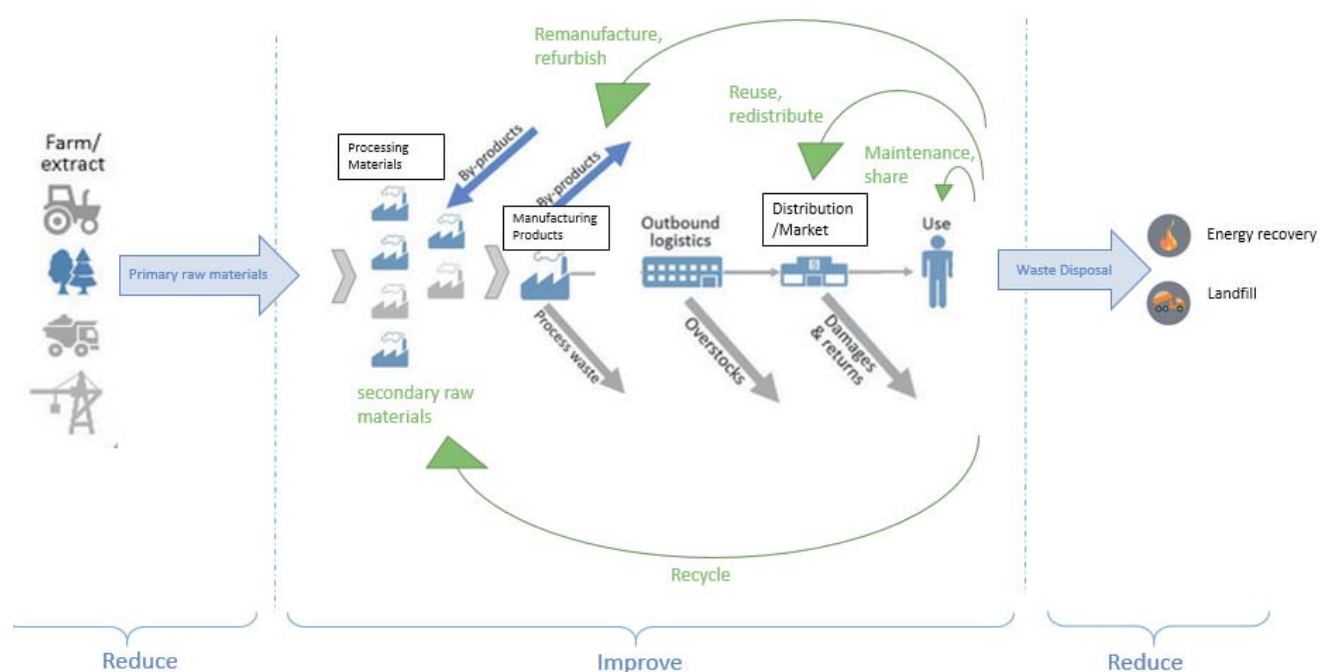
2 Cfr. Donella H. et al, 1972.

3 Cfr. McDonough W. et al, 2003.

4 Cfr. Zimmann R. et al, 2016.

5 Cfr. Zimmann R. et al, 2016.

6 Cfr. sitografia [49].



[Fig. II.53] Schematizzazione di loop dei materiali.

(pelle esterna), services (servizi), space (spazio) e stuff (oggetti), separati, ma interconnessi, ciascuno dotato di diversa durabilità. A questi sei strati lo studio ARUP^[7] aggiunge il settimo: system (sistema), utile nel caso di un intero contesto abitativo, un sistema urbano.

[Fig. II.55, Fig. II.56] Ogni strato ha una diversa durabilità, partendo dal sistema che è l'elemento che perdura per un tempo maggiore e finendo agli oggetti che hanno una durata più breve. La costruzione di un edificio consiste fondamentalmente nell'accostare elementi che hanno durate differenti, è quindi importante mantenerli facilmente separabili

per poterli sostituire con un basso impatto ambientale^[8]

Come riportato nel piano d'azione dell'Unione Europea sull'economia circolare elaborato nel 2015,^[9] è necessario rivoluzionare l'approccio nell'impiego delle materie prime. L'obiettivo è quello di limitare, da un lato, l'impiego di risorse non rinnovabili, dall'altro di sperimentare ed implementare in tutti i Paesi della Comunità Europea un nuovo sistema che riduca la domanda di materie prime per dare più spazio al riciclo e al riuso. . Diverse sono le iniziative da intraprendere. Incentivare le industrie, mediante agevolazioni da parte dell'Unione Europea, verso un'economia più sostenibile che miri ad un mercato certificato e sorvegliato e a potenziare le fasi del processo produttivo secondo un'ottica di circolarità. Migliorare le normative che riguardano i rifiuti prodotti dalle industrie. .

Gli obiettivi che il piano d'azione si prefigge sono orientati ad ottenere risultati significativi per uno sviluppo sostenibile entro il 2030, e tra i diversi termini di ricerca vengono approfonditi quello dei rifiuti del



[Fig. II.54] Schematizzazione della logica ReSOLVE.

settore edilizio, .

Secondo questo piano è necessario sensibilizzare anche gli appalti pubblici e trasformarli in “appalti verdi”, per rendere la pubblica amministrazione un modello di sostenibilità ambientale e di progettazione ecocompatibile che promuova la riparazione, il riuso ed il riciclo dei prodotti.

Per ciò che riguarda la produzione di un bene è importante monitorare le risorse, assicurandosi che, da un lato, provengano da fonti gestite in maniera sostenibile e, dall'altro, che il processo produttivo sia efficiente e innovativo, garantendo la massima resa e il

7 Cfr. sitografia [50].

8 Cfr. Zimmann R. et al., 2016.

9 Cfr. Commissione Europea, 2015.

minimo consumo e spreco di risorse.

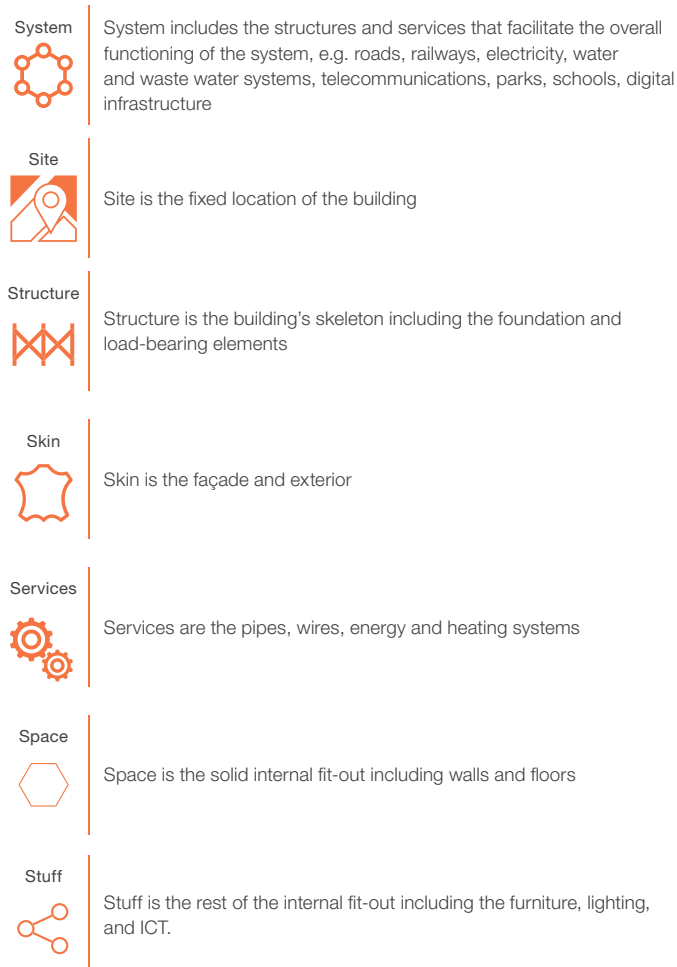
E' necessario inoltre rendere la progettazione eco-compatibile su più campi e non lasciare che si riduca al mero aspetto energetico. In tal senso, si prevede l'inserimento di marcature che indichino se un prodotto è riparabile, riutilizzabile e riciclabile, di quali materiali è composto e di quanto tempo è stimata la sua vita. Allo stesso modo è necessario rivalutare le "etichette verdi" e monitorarne l'attendibilità.^[1]

Tutto questo aiuterebbe a rafforzare la coscienza dei consumatori e guidare la loro scelta.

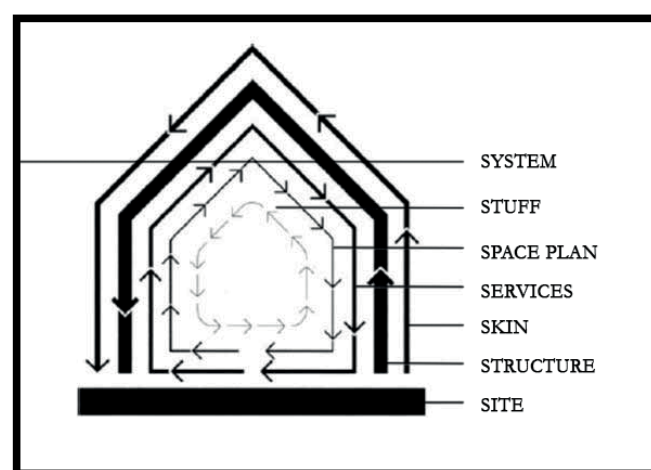
La Commissione Europea provvederà anche all'inserimento di alcuni indicatori utili a definire la sostenibilità ambientale dell'edificio durante l'intero ciclo di vita.^[2]

Il potenziale di un materiale a essere dismesso o a essere reinserito nel ciclo produttivo, dipendere dalla progettazione dell'oggetto per cui il materiale viene impiegato, dal modello economico adottato, e dalla sua composizione.^[3] "La biomassa, per esempio, è usata a livello energetico per più dell'80% sotto forma di cibo, mangime o carburante, per questo è difficile da riutilizzare. Per la stessa ragione anche i combustibili fossili hanno un basso potenziale di circolarità. Al contrario, i metalli e i minerali hanno un potenziale di riutilizzo e riciclo infinito. Per esempio, nel 2017, il 77% della produzione mondiale di alluminio proviene dal riciclo di rottame di alluminio".

L'idea di circolarità è ricercata assiduamente e molto spesso diventa un obiettivo da perseguire nella produ-



[Fig. II.55] Principio delle 7 S.



[Fig. II.56] Esempificazione del principio delle 7 S.

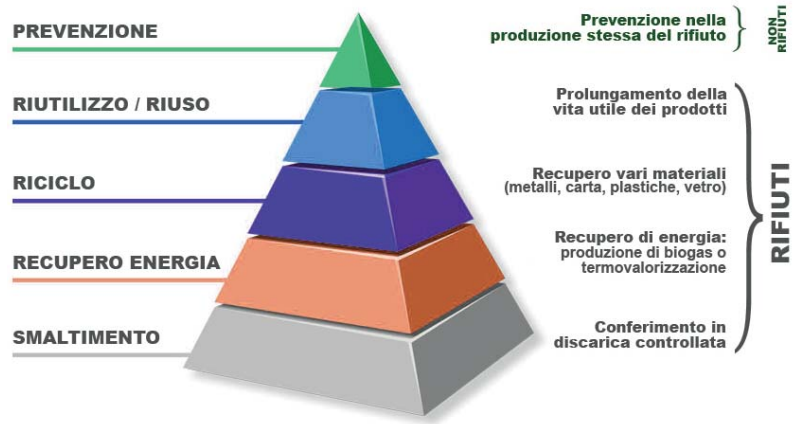
1 Cfr. Commissione Europea, 2015.

2 Cfr. Commissione Europea, 2015.

3 Sitografia [3]: "However, looping potentials are not only dependent on the product design or the business and purchasing models but also on the type of processed materials. Biomass, for example, is used by more than 80% energetically in form of food, feed and fuel, and is therefore difficult to reuse. For the same reason also fossil fuels have a low circularity potential. In contrast, metals and minerals have an infinite reuse and recycle potential. In 2016, for instance, 77% of the global Aluminium output was recycled globally"

zione di materiali ed oggetti. Come sostiene Allwood J.M., ^[4] se la domanda è in crescita, non c'è possibilità di mantenere circolare il ciclo di vita di un materiale, poiché si dovrebbe soddisfare un numero crescente di servizi che richiedono un numero crescente di materia prima, diminuendo di conseguenza le possibilità di reimpiegare nel breve tempo un materiale che ha bisogno di essere riprocessato prima di essere reimmesso in circolo. Sembrerebbe dunque una scelta più adeguata la riduzione della domanda di materia prima, questo potrebbe avvenire se si riducesse la domanda di servizi che richiedono il consumo di questi materiali.

Inoltre, per abbassare questa richiesta di materia prima si è anche ipotizzato un aumento del costo delle opere che ne derivano: ciò servirebbe a dare più valore anche ad oggetti che, fino ad ora, venivano smaltiti per essere rimpiazzati da altri nuovi ad un prezzo minore rispetto al costo di un eventuale riciclo. Come sostengono Esposito et al.: ^[5] “Nel modello attuale di sviluppo, le nuove tecnologie e i modelli di business innovativi potrebbero contribuire a migliorare la produttività delle risorse in Europa e a ridurre i costi totali annuali di 900 miliardi di euro entro il 2030 [...] Nell'edilizia, la tecnologia applicata ai processi industriali potrebbe ridurre i costi di costruzione fino al 50%. [...] Ma [n.d.r.] l'effetto “rebound” può essere notevole: la riduzione del costo delle risorse comporta tipicamente un utilizzo maggiore delle risorse stesse, per volumi stimati che variano dal 5 al 20% entro il 2030 per i tre ambiti analizzati”. Dunque quest'analisi porterebbe a pensare che un cambiamento verso



[Fig. II.57] Schema piramidale sulla gerarchia della gestione dei rifiuti.

un'economia circolare, adottando quindi un modello di sviluppo sostenibile, possa avvenire o in paesi ricchi oppure sotto forma di imposizione normativa. ^[6]

Nella gerarchia della gestione sostenibile delle risorse e in quella della gestione sostenibile dei rifiuti il posto in cima alla piramide è occupato dalla voce “riduzione”, sia del consumo di risorse che della produzione di rifiuti. È quindi saggio pensare ad un calo della richiesta di materie prime. [Fig. II.57; Fig. II.58]

Solitamente il riciclo avviene riducendo il materiale ad uno stato liquido, il liquido viene quindi purificato e riutilizzato per la produzione di altri manufatti, dotati degli stessi requisiti di quelli dismessi o addirittura superiori. Si parla in questo caso di upcycling. Quando questo non è possibile, il processo prende il nome di

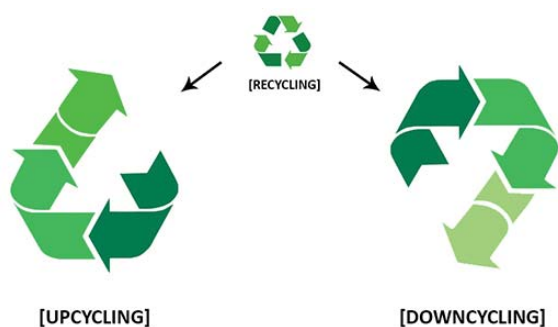


[Fig. II.58] Schematizzazione del principio di economia circolare.

4 Cfr. Allwood J.M., 2014.

5 Esposito et al., 2015.

6 Cfr. Allwood J.M., 2014.



[Fig. II.59] Illustrazione schematica dell'upcycling e del downcycling.

“downcycling” [Fig. II.59] dove il materiale riprocessato, perde proprietà meccaniche a causa di impurità o degli stessi processi applicati per il riciclo ^[1] e viene impiegato per la produzione di oggetti dotati di un minor pregio estetico e/o qualitativo. Spesso il riciclo richiede l'impiego di additivi chimici per compensare parzialmente la perdita di proprietà, come nel caso delle materie plastiche

Ogni processo comporta un dispendio di energia e quest'ultima, ad oggi, viene prodotta principalmente tramite l'impiego di combustibili fossili, rilasciando un grande quantitativo di CO₂ nell'ambiente. Aumentare dunque la creazione di loop di riciclo, in moltissimi casi, equivarrebbe ad incrementare il livello di inquinamento ambientale e, in particolare, di emissioni di gas serra responsabili del surriscaldamento globale.

Se un riciclaggio mirato può ridurre la domanda di nuovi minerali estratti dal pianeta, e quindi ridurre il consumo di risorse non rinnovabili, puntare all'efficienza del materiale potrebbe portare a un minore consumo di risorse, sfruttandone al meglio le caratteristiche, riducendo il numero di lavorazioni da effettuare e contenendo così il dispendio di energie e

l'emissione di gas serra. ^[2]

Come riportato da Lucon et al., ^[3] il consumo energetico attribuibile al settore edilizio durante il 2010 è stato di circa 117 EJ, ovvero un valore che in proporzione è pari al 51% del consumo globale di elettricità, oppure al 32% di energia finale globale consumata. Considerando che più dell'80% dell'energia viene prodotta tramite combustibile fossile, ^[4] è evidente il ruolo che giocano gli edifici nella riduzione di risorse non rinnovabili. Secondo un approccio basato sul ciclo di vita, andrebbero anche considerate, oltre alla gestione, le fasi di produzione dei materiali, di costruzione degli edifici, di manutenzione, di dismissione e riuso o riciclo. ^[5]

La **Direttiva CEE 442/75** ^[6] fornisce la definizione di rifiuto come “qualsiasi sostanza od oggetto [...] di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi” e stabilisce il Catalogo Europeo dei Rifiuti (CER) da applicarsi a tutti i rifiuti, sia quelli destinati allo smaltimento che al recupero, secondo raggruppamenti e codici definiti (Allegato I). Con la decisione **2014/955/Ue**, entrata in vigore il 01/06/2015, il numero di codici ammonta a 842 voci. Si tratta di sequenze numeriche composte da 6 cifre riunite in coppie volte ad identificare un rifiuto in base al processo produttivo da cui è originato. Il primo gruppo identifica il capitolo, mentre il secondo indica usualmente il processo produttivo e/o la categoria o il tipo di materiale. Ad esempio il capitolo CER 17 comprende i rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione. I codici CER si dividono in non pericolosi e pericolosi; i secondi vengono identificati graficamente

1 Cfr. Allwood J.M., 2014.

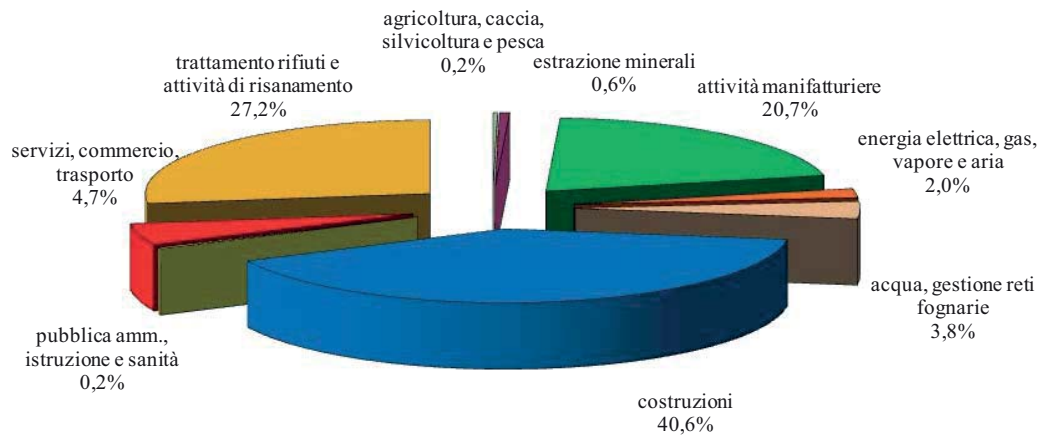
2 Cfr. Allwood J.M., 2014.

3 Cfr. Lucon et al., 2014.

4 Cfr. Agenzia internazionale dell'energia, 2016.

5 Cfr. Cabeza et al., 2014

6 Cfr. Direttiva 75/442/Cee.



[Fig. II.60] Grafico a torta sulla percentuale dei rifiuti speciali totali prodotti in Italia nel corso del 2016.

con un asterisco * dopo le cifre. Ad esempio il codice 170605* corrisponde ai materiali da costruzione contenenti amianto. ^[7]

Il **DL 205 del 3 dicembre 2010**, che recepisce la **Direttiva Europea 98/2008** sui rifiuti, classifica i rifiuti in due categorie: la prima li distingue per tipologia, ovvero quelli urbani, che vengono smaltite in discarica, ed i rifiuti speciali, derivanti generalmente dal settore industriale; la seconda è una divisione in base alla pericolosità, che li classifica in rifiuti pericolosi e non pericolosi.

Il settore edilizio produce prevalentemente rifiuti non pericolosi, come i rifiuti inerti. Il **Decreto Ministeriale 03/08/2005** definisce come rifiuti inerti: “i rifiuti solidi che non subiscono alcuna trasformazione fisica, chimica o biologica significativa”. ^[8] Il settore edilizio produce anche quantità più ridotte di rifiuti speciali (**DL 22/97 art.7**) pericolosi o potenzialmente pericolosi, derivanti, ad esempio, dalle attività di scavo (CER 170503*, 5*, 7*).

Secondo la fonte ISPRA (Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale) 2018, ^[9] in Italia

nel corso del 2016 la percentuale di rifiuti speciali da costruzione e demolizione rappresentava il 40,6% dei rifiuti speciali prodotti in totale [Fig. II.60]. La percentuale dei rifiuti speciali non pericolosi ammontava al 43,4% [Fig. II.61] mentre quelli pericolosi al 4,3% [Fig. II.62]. In Italia questa categoria di rifiuti è composta per il 53% di scarti da micro-demolizione residenziale, 39% da micro-demolizione non residenziale e soltanto l'8% proviene dalla demolizione completa di edifici. In base al ciclo di vita di un edificio, nella fase di costruzione e manutenzione vengono prodotti rifiuti molto eterogenei (basti pensare al legname per ponteggi e casseforme, plastiche per imballaggi, metalli, cartone, ecc.), anche se in piccola quantità: infatti queste due fasi producono soltanto il 6,9% dei rifiuti totali. Al contrario, nella fase di demolizione, gli scarti prodotti sono notevolmente maggiori (93%) ma omogenei: laterizio e calcestruzzo (85-90%), metalli (<5%) e rifiuti leggeri (>5%). ^[10]

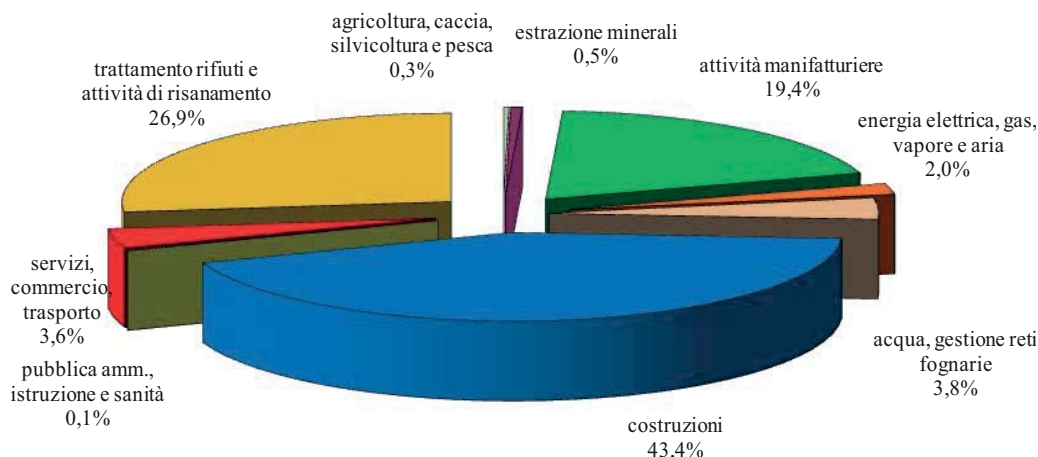
Il miglior modo per assicurare una corretta gestione dei rifiuti C&D al momento della demolizione, per gli edifici già esistenti, è praticando quella che viene

7 Cfr. Pagliolico S., b.

8 Cfr. DM 03/08/2005.

9 Cfr. ISPRA 2018.

10 Cfr. sitografia [2].



[Fig. II.61] Grafico a torta sulla percentuale dei rifiuti speciali non pericolosi prodotti in Italia nel corso del 2016.

definita “demolizione selettiva”, dove i diversi componenti della struttura vengono separati e per ognuno di essi viene applicato uno specifico metodo di smaltimento basato sul suo grado di pericolosità (nei confronti dell’uomo e dell’ambiente) ed il suo grado di riciclabilità..^[1]

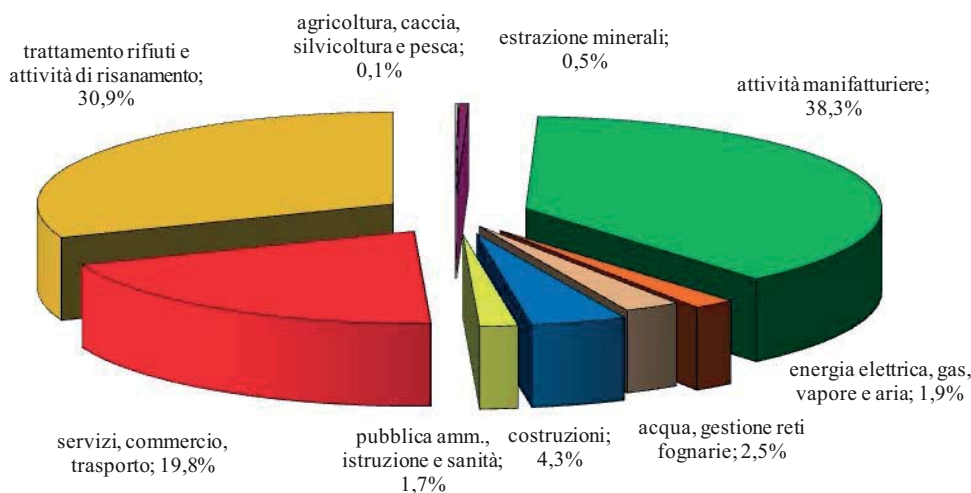
Per poter praticare una demolizione selettiva è necessario cercare di rispettare alcune regole specifiche che da un lato semplificano il lavoro garantendo che il cantiere rimanga un ambiente a norma durante tutta la durata dell’operazione, dall’altro permette di non aumentare in maniera eccessiva la CO2 incorporata dei diversi materiali.

Innanzitutto è necessario verificare che il cantiere in questione non sia collocato ad una distanza eccessiva dai principali centri di smaltimento, solitamente si tende a non superare i 40 km, questo evidentemente serve a prevenire le scomodità di eccessivi spostamenti e tutte le emissioni ad essi legate.

In ogni caso è necessario osservare i fabbricati circostanti e soprattutto le vie di comunicazione, che permettano il passaggio di mezzi pesanti, e se nel cantiere ci sono o meno degli spazi appositi per un deposito temporaneo di materiali.

Osservare le tecniche costruttive impiegate negli edifici da demolire è un aspetto fondamentale per garan-

1 Cfr. Assefa e Ambler, 2017.



[Fig. II.62] Grafico a torta sulla percentuale dei rifiuti speciali pericolosi prodotti in Italia nel corso del 2016.

tire la buona riuscita della decostruzione, in termini di qualità di materiali ricavati. Infatti nel momento in cui si decostruisce un edificio si cerca di selezionare delle frazioni omogenee, che abbiano quindi una continuità nell'uso dei materiali, in questo modo sarà più facile ottenere dei materiali di scarto di qualità. ^[2]

Si è parlato per molto tempo di MPS (Materia Prima Seconda) ovvero di un rifiuto che tramite diversi processi e lavorazioni, non viene semplicemente smaltito, ma viene riutilizzato nello stesso ambito o in ambiti diversi per impedire l'eccessivo sfruttamento di risorse. Un tempo la distinzione tra materia prima e materia prima secondaria penalizzava l'impiego di quest'ultima, perché l'acronimo MPS veniva associato al termine "rifiuto", alimentando un'incertezza crescente sulla qualità del materiale riciclato. ^[3] La "**DIRETTIVA 2008/98/CE**" e, in Italia, il **DLgs 205/2010** (IV correttivo del DLgs 152/2006) hanno introdotto al posto di MPS il concetto di cessazione della qualifica di rifiuto: «Un rifiuto cessa di essere tale quando è stato sottoposto a un'operazione di recupero, incluso il riciclaggio e la preparazione per il riutilizzo e soddisfatti i criteri specifici, da adottare nel rispetto delle seguenti condizioni:

- la sostanza o oggetto è comunemente usato per scopi specifici
- esiste un mercato o una domanda per tale sostanza o oggetto
- la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti

-l'utilizzo di tale sostanza o dell'oggetto non porterà ad impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana». ^[4]

Uno dei principali obiettivi di questo decreto è quello di facilitare il passaggio ad una maggiore disponibilità di risorse grazie all'alto tasso di riciclo.

Grazie alle campagne di sensibilizzazione e alle normative in materia di riuso/riciclo, l'acronimo MPS è diventato sinonimo di eco-compatibilità e quindi di qualità. Ad esempio, il **DM 203/2003** ^[5] ha stabilito che gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il proprio fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo.

All'interno di un sistema economico circolare, grazie alla re-immissione delle MPS nel ciclo produttivo, si avrà una sempre maggiore disponibilità di materia prima, che permetterà di soddisfare al meglio la richiesta di mercato evitando di attingere da fonti non rinnovabili.

Il settore edile è considerato tra quelli più impattanti dal punto di vista di estrazione di materie prime. Secondo quanto riportato da Arrigoni ^[6] il 50% dei materiali grezzi estratti nel mondo vengono utilizzati per l'edilizia.

All'interno dell'Unione Europea, i tassi di riciclaggio dei materiali edili varia da paese a paese, passando da valori inferiori al 20%, nel caso di Finlandia e Bulgaria nel corso del 2012, al 100% nel caso di Olanda Irlanda e Malta sempre considerando il 2012. Nel 2014 20 paesi dell'unione su un totale di 28 riciclano più dell'80%

2 Cfr. Pagliolico S., a.

3 Cfr. Commissione Europea, 2015.

4 Cfr. Direttiva 2008/98/CE.

5 Cfr. DM 203/2003.

6 Arrigoni, A., et al., 2018. "For instance, almost half of the raw materials extracted globally are fabricated into building components (WU, 2016)"

dei rifiuti C&D [Fig. II.63] ^[1]

Per garantire un controllo della delicata fase di fine vita di un oggetto si può ricorrere a una metodologia progettuale denominata “progettazione per la decostruzione”, che è una strategia per ridurre il costo della futura demolizione e per ridurre sensibilmente l’impiego di materiali pensati per un unico utilizzo e poi destinati allo smaltimento. ^[2]

La progettazione viene sviluppata su diversi livelli: ^[3]

- opere a mano per la rimozione di elementi interni, come le diverse finiture, pavimentazione, porte e finestre, mobili, pannelli interni.
- opere a macchina per lo smantellamento della struttura dell’edificio, comprensive di fasi di separazione dei diversi componenti e movimentazione nel sito.
- trasporto: è importante una corretta progettazione del letto del camion e di come disporre i materiali sia nella fase di carico che in quella di scarico
- altre operazioni come la frantumazione di materiale, la pulizia del sito e altro.

Progettare un edificio tenendo conto del tipo di lavoro che occorre svolgere per ciascuna fase, semplifica il lavoro, lo velocizza e permette di ricavare una percentuale maggiore di materiale recuperato.

In fase di progettazione, alcuni accorgimenti sui sistemi costruttivi utilizzati possono fare la differenza sulle tempistiche di decostruzione, sulla qualità e quantità di materiale recuperato. In genere sarebbe preferibile evitare di impiegare materiali isolanti sfusi insufflati direttamente nelle intercapedini, sotto forma di granuli o fibre che, senza i giusti accorgimenti, potrebbero disperdersi nel sito. Evitare l’utilizzo dei collanti per comporre i diversi strati del pacchetto murario e del solaio. L’impiego di queste sostanze per far aderire i diversi strati e per fissarli tra loro oltre a rallentare le operazioni di demolizione e andrebbero a ridurre la qualità e la quantità dei materiali a causa della difficile separazione. Ad esempio: incollare le lastre in cartongesso al telaio d’acciaio o di legno, incollare i pannelli in compensato al telaio in acciaio o legno dei tramezzi, incollare gli isolanti ai pannelli di rivestimento del pacchetto muro o alla sua intelaiatura, incollare finiture in plastica sulle pavimentazioni e pavimentazioni al massetto in cemento, oppure incollare delle strutture in legno ad altre in acciaio. ^[4]

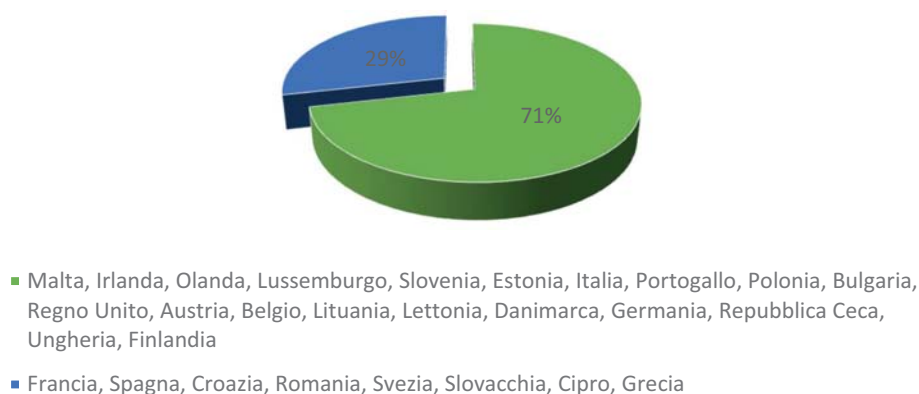
Nonostante questo, la maggior parte degli edifici sono ancora progettati per una demolizione tradizionale e

1 Cfr. sitografia [38].

2 Cfr. Thormark, 2001.

3 Cfr. Pagliolico S., a.

4 Cfr. Pagliolico S., a.



[Fig. II.63] Grafico a torta sulla percentuale dei paesi europei che nel 2014 riciclano almeno l'80% dei rifiuti C&D.

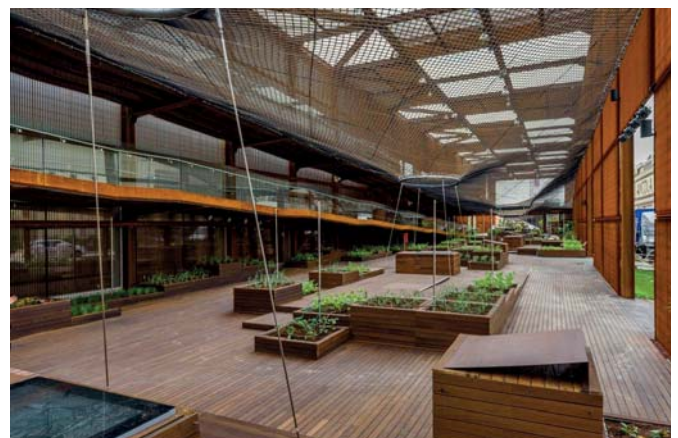
sembra che fino ad oggi non sia stato prioritario ricercare un approccio al progetto che preveda la decostruzione ed il riutilizzo dei materiali così ottenuti.

^[5] L'idea di creare prodotti che possano espandere il proprio ciclo di vita applicando su essi nuovi modelli di progettazione circolare, sembra essere sempre più una strategia vincente ed un pensiero condiviso che viene riportato anche da materialflows.net: ^[6] “Il nuovo design del prodotto svolge un ruolo chiave per estendere la durata della vita del prodotto e la chiusura dei loop di materiali, poiché si pensa che le nuove strategie di progettazione riguardino la durabilità, la manutenzione e la riparabilità, nonché l'aggiornabilità o la compatibilità”.

I padiglioni realizzati per Milano Expo 2015 sono esempi di progettazione per la decostruzione. Gli organizzatori dell'esposizione, infatti, hanno chiarito nei bandi di concorso come fosse indispensabile progettare i padiglioni non solo scegliendo opportunamente i materiali in base alla loro energia incorporata, ma anche in base agli scenari di decostruzione, reimpiego o riciclo dei loro componenti. In uno studio condotto sul padiglione del Brasile [Fig. II.64], sono stati valutati mediante analisi LCA i benefici di un reimpiego dei materiali utilizzati in termini di impatto ambientale ed energia incorporata e sono stati confrontati due diversi scenari di fine vita dell'edificio: gli impatti della struttura fino al termine della sua “prima” vita (6 mesi) e gli impatti della struttura fino a un termine di 10 anni che comprende il periodo seguente alla prima demolizione (valutato secondo le modalità di progetta-

zione per strutture temporanee dettate dall'Eurocodice ^[7]). Lo studio ha dimostrato che l'edificio pensato per essere smantellato in un breve periodo dopo la realizzazione non è sostenibile, ^[8] in quanto la fase di produzione dei materiali è quella che determina un maggiore impatto e la che sostenibilità dipende dalla vita utile dell'opera. ^[9]

La fase operativa del padiglione, è risultata, dal punto di vista energetico, poco impattante, perché sono state utilizzate energie provenienti principalmente da fonti rinnovabili. Si è visto anche come le fasi di costruzione e demolizione, per quanto la demolizione selettiva comporti un dispendio energetico maggiore, sia in fase progettuale che di realizzazione, siano considerabili ad impatto molto basso. Inoltre, il costo di decostruzione, se comparato all'elevatissimo costo energetico della fase di produzione dei materiali, è risultato sensibilmente inferiore. ^[10] Infine, lo studio ha messo in luce come la scelta del materiale abbia un ruolo fondamentale nel determinare l'impronta ecologica dell'edificio. I materiali autoctoni, aventi elevato contenuto di riciclato, dotati di certificazione EPD e, nel caso dei materiali legnosi, di certificazione FSC o PEFC, sono più sostenibili non solo da un punto di vista etico, ma anche ambientale ed economico. ^[11]



[Fig. II.64] Fotografia del padiglione del Brasile di Milano Expo 2015.

5 Arrigoni, A., et al., 2018. “most of the buildings are still designed for a traditional demolition at their EOL”; Cfr. Thormark, 2001

6 Cfr. sitografia [3].

7 Cfr. CEN, 2002.

8 Cfr. Arrigoni A. et al., 2018.

9 Cfr. Rauf e Crawford, 2015.

10 Cfr. Gao et al. 2001.

11 Cfr. Arrigoni A. et al., 2018.

II.3 - Il riuso ed il riciclo

Riciclare e recuperare il legno proveniente dalla demolizione degli edifici sta divenendo sempre più una pratica consueta, ma ad influenzare la percentuale di materiale effettivamente riciclato o recuperato intervengono da un lato i limiti dettati dal tipo di progettazione adottata per l'edificio, dall'altro la facilitazione delle operazioni di recupero data dalla decostruzione.^[1]

Riusare e riciclare è ad oggi uno dei cardini della sostenibilità applicata al campo dell'edilizia ed assicura ampi benefici come la drastica riduzione dell'estrazione di materie prime, l'uso ridotto di energia per la trasformazione delle stesse nel caso del riuso del componente, diminuire l'inquinamento di falde, mari e fiumi, e ridurre notevolmente la quantità di rifiuti che verrà portata nelle discariche per inerti o per rifiuti speciali non pericolosi, nonché aprire nuovi scenari di impiego di materie riciclate allungandone la vita utile ed alimentando così un pensiero che sta prendendo sempre più piede che è quello di una progettazione sostenibile che tenga anche conto dei possibili scenari di fine vita di un edificio.

Come si è accennato precedentemente, nell'**art. 184-ter del DLgs 205 del 3 dicembre 2010** viene ridefinito il concetto di rifiuto, specificando che, secondo determinati criteri, un rifiuto sottoposto a processi di riciclaggio o, più in generale, operazioni di recupero, smette di essere considerato tale ed acquista una nuova vita.

Ogni operazione che viene condotta sul materiale da recuperare equivale ad energia incorporata che si va a sommare al bilancio totale, andando così a compro-

mettere l'idea di sostenibilità che è alla base dell'intervento stesso di recupero. Per questo preciso motivo è da prediligere il riutilizzo di un componente ancora prima di pensare a scenari di riciclo che implicano ulteriori lavorazioni e dispendi energetici. Questo però come ogni dato è da contestualizzare: la produzione di pannelli di legno truciolare, per esempio, utilizzando legname di recupero, richiede sì un consumo energetico dovuto all'utilizzo di forni per l'essiccazione del legname, ma questo consumo è comunque nettamente inferiore rispetto a quanto non ne richieda l'essiccazione del legno appena tagliato.^[2] Allo stesso modo, l'utilizzo dei forni per l'essiccamento è sì l'operazione più energivora nella produzione di componenti legnosi, ma se viene paragonata agli altri due principali materiali da costruzione, il cemento e l'acciaio, si scoprirà che è relativamente bassa.^[3] Dunque acciaio e cemento sono più impattanti per il consumo energetico, per l'utilizzo del suolo al quale vengono sottratte risorse e per ciò che comportano i processi necessari alla loro produzione a livello di emissioni.

Nonostante sia più dispendioso a livello di tempo ed energie progettare un oggetto prevedendo la sua decostruzione e realizzarlo possa richiedere un maggior consumo energetico, quando si analizza la sua energia incorporata a fine ciclo di vita e la si paragona alle emissioni che altrimenti produrrebbe in mancanza di questi accorgimenti, ci si rende conto di quanto in realtà recuperare materiali per il riuso ed il riciclo sia una pratica sostenibile ed efficace ^[4]. Secondo i dati dell'Istituto Nazionale Italiano per la Ricerca e la Protezione Ambientale, intorno al 94% dei rifiuti provenienti al settore delle costruzioni e demolizioni vengono di

1 Dodoo A. et al., 2014, p. 281.

2 Cfr. Dodoo A. et al., 2014.

3 Cfr. Gustavsson e Sathre, 2006 ; Perez-Garcia et Al., 2005 ; IPCC, 2007.

4 Cfr. Arrigoni A. et al., 2018.

norma riutilizzati o riciclati. ^[5]

Come ha stabilito il Parlamento Europeo infatti, l'uso del legno deve seguire una logica che vada in ordine di priorità o a "cascata", principio a cui il legno sembra adattarsi particolarmente bene ^[6]: al primo posto si colloca la lavorazione per realizzare prodotti a base di legno, seguito dal loro riutilizzo mantenendo la stessa funzione, il riciclo tramite altri processi di lavorazione (quindi trasformazione dei prodotti principalmente in carta, pannelli truciolari e OSB), impiegarli come combustibile per produrre bioenergia e soltanto in ultimo la discarica. ^[7]

Come evidenziato da Dadoo et al ^[8]: "Il principio a Cascata rispetta quelle che sono le quattro dimensioni dell'economia delle risorse: qualità delle risorse, tempo di utilizzo, recuperabilità e tasso di consumo. Secondo queste quattro caratteristiche un utilizzo ottimale delle risorse legnose si ottiene abbinando la qualità della risorsa al compito che si sta svolgendo, in modo da non utilizzarne una di qualità elevata quando una di qualità inferiore sarebbe sufficiente; aumentare l'utilità totale ottenuta da una risorsa prolungando il tempo durante il quale è utilizzata; migliorare una risorsa attraverso il recupero e il ritrattamento [...] per ulteriori usi di qualità superiore; e bilanciare il tasso di utilizzo di una risorsa con la capacità dei terreni forestali di rigenerare le risorse perdute".

E' quindi una scelta sostenibile quella di adoperare il legno come materiale per l'edilizia se si prevede che la durata della vita dei componenti legnosi e delle strutture arrivi ad estendersi il più possibile, ^[9] almeno il

minimo necessario a garantire una rotazione completa nel processo di raccolta del legname, che a seconda delle specie legnose e dei cloni selezionati ha una diversa durata temporale. ^[10]

Come sostengono Gustavsson e Sathre ^[11], prima di giungere alle fasi finali del processo a cascata, ovvero la combustione per produrre energia, è opportuno valutare la disponibilità di materia prima di quel luogo: infatti con una limitata disponibilità di legname, dovuta anche alla ridotta dimensione di alcune foreste, la catena a cascata da utilizzare dovrà preferibilmente essere complessa, in modo da riutilizzare i prodotti in legno più volte e permettere così la rigenerazione forestale.

Fino ad oggi i benefici del riciclare materiale legnoso sono sempre stati misurati confrontandoli con lo smaltimento in discarica, oggi invece in molti paesi Europei il nuovo termine di paragone potrebbe essere quello di utilizzarli come materiale da bruciare per produrre energia: il legno non trattato, tramite inceneritori convenzionali, quello trattato, in impianti specifici con filtri per depurare i fumi tossici che vengono prodotti. ^[12] Questo metodo per produrre energia, è in conformità con quanto ha stabilito la commissione dell'Unione Europea il 30 novembre 2016 tramite l'adozione di un Pacchetto legislativo denominato "Energia pulita per tutti gli europei", dove tra i diversi obiettivi viene considerato di grande importanza incrementare la produzione energetica da fonti rinnovabili come appunto la combustione di legname, questo però senza sovvertire le regole dettate dal principio a

5 Cfr. ISPRA, 2016. (Arrigoni A. et al., 2018.)

6 Cfr. Haberl H., Geissler S., 2000 ; www.federlegnoarredo.it

7 Comunicazione della commissione al Parlamento Europeo et al., 2013.

8 Dadoo A., et al., 2014, pp. 282-283.

9 Cfr. Pearson, T., et al., 2012 ; Arslan, H., 2007.

10 Cfr. Deidda, A., 2018 ; Ramage, M.H., et al., 2017.

11 Gustavsson e Sathre, 2006.

12 Cfr. Dadoo A., et al., 2014.

cascata e quindi rispettando l'ordine procedurale fino a qui descritto. ^[1] Nonostante questo la combustione di biomasse rimane un argomento ostico e sul quale non tutti sono d'accordo: come accennato nel capitolo introduttivo infatti è preferibile utilizzarle e lavorarle per produrre biogas che verrà poi impiegato per creare energia. Va fatto però un distinguo per ciò che riguarda l'impiego di biomasse per la produzione di energia elettrica: malgrado si pensi che la combustione diretta delle biomasse sia una soluzione ecologica o a minore impatto ambientale, le ricerche condotte sugli inquinanti derivanti da queste combustioni suggeriscono il contrario. Infatti nel 2010, i fumi provenienti dalla combustione biocombustibili, soprattutto la legna, sono stati classificati come cancerogeni dall'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC). Attualmente i metodi per diminuire gli inquinanti dati dalla combustione sono tramite l'adozione di filtri molto costosi, e man mano che la ricerca avanza sempre più complessi. E nonostante ciò, a parità di energia prodotta, gli impianti a base di metano, gas naturale e oli combustibili rimangono quelli con un minore impatto ambientale. ^[2] Come però già accennato e come viene proposto nella ricerca di Federico Valerio, ^[3] rispetto alla combustione diretta potrebbe rappresentare una svolta a favore di una fonte di energia rinnovabile e a basso impatto ambientale l'impiego di biomasse per trasformarle in combustibili gassosi, come biometano, syngas ed idrogeno, e liquidi, come metanolo, olio diesel ed etanolo.

Inoltre, secondo quanto riporta Marco Ragazzi, ^[4] per

la combustione di legname chimicamente trattato o in cui sono presenti colle ureiche, melanine, vernici o polivinilcloruri, bisogna utilizzare appositi forni che possano raggiungere temperature anche superiori a 1000 °C, poiché a temperature inferiori verrebbero emessi in atmosfera degli agenti inquinanti contenuti nei fumi.

I gas prodotti dal deterioramento del legno ed altri materiali biodegradabili (principalmente metano ed anidride carbonica) in discarica per digestione anaerobica, vengono immagazzinati e riutilizzati come combustibile per la produzione di calore ed energia elettrica. Solitamente da un m³ di biogas viene ricavato:

- circa 1,8-2,2 kWh di energia elettrica
- circa 2-3 kWh di energia termica. ^[5]

Dunque la gestione dei rifiuti biodegradabili è molto più sostenibile dello smaltimento diretto dal punto di vista ambientale, se si considera che questi gas prodotti, in una semplice discarica, finirebbero nell'atmosfera. In particolare, nel caso delle fibre di legno, nel momento in cui si decompongono rilasciano una quantità di metano che supera, per gravità di impatto ambientale sul riscaldamento climatico, gli effetti che avrebbe la CO₂ assorbita biosequestrata dall'albero da cui si è ricavato il legno. ^[6]

La logica della lavorazione a cascata del legno è utile non soltanto a garantire un utilizzo più sostenibile di questa risorsa, ma, come accennato, mira anche alla realizzazione di componenti che possano perdurare per periodi di tempo molto maggiori, garantendo un sequestro prolungato di CO₂ dall'ambiente. ^[7]

1 Cfr. sitografia [7].

2 Cfr. Valerio F., 2012.

3 Cfr. Valerio F., 2012.

4 Cfr. Ragazzi M., 2016.

5 Cfr. sitografia [11].

6 Cfr. Allwood J.M., 2014.

7 Cfr. sitografia [7].

Secondo Allwood J.M., ^[8] una delle soluzioni per ridurre le emissioni di CO₂ a livello mondiale consiste nella riduzione della domanda di sostituzione. Viene stimato che la metà delle emissioni mondiali prodotte dalle industrie siano causate dalla produzione di materiali da costruzione e che gli edifici che vengono realizzati con questi materiali rimangano liberi per la maggior parte della loro vita utile; un vero problema se si pensa che quegli stessi edifici vengono realizzati per resistere più di 100 anni e che invece nel Regno Unito vengono abbattuti dopo 40 e in Cina dopo solo 20. ^[9] Questo esempio ci mostra come l'energia incorporata da questi manufatti non venga affatto sfruttata ed evidenzia così la necessità di riciclare i materiali per valorizzare quello che altrimenti rappresenterebbe una piaga per il bilancio ambientale globale.

Come riportato nella proposta del Comitato Europeo, ^[10] è fondamentale che le imprese siano sviluppate in modo da essere efficienti nell'uso delle diverse risorse del processo produttivo, ma allo stesso tempo che siano anche inserite in un meccanismo prima europeo e poi mondiale, in cui ci sia una simbiosi industriale in grado di sfruttare quelli che sono i sottoprodotti di un'industria e riuscire a reimpiegarli per i prodotti di un'altra.

8 Cfr. Allwood J.M., 2014.

9 Cfr. Allwood J.M., 2014.

10 Cfr. Commissione Europea, 2015.



[Fig.1] Modulo realizzato al Milano Design Days 2018

III. - CASI STUDIO

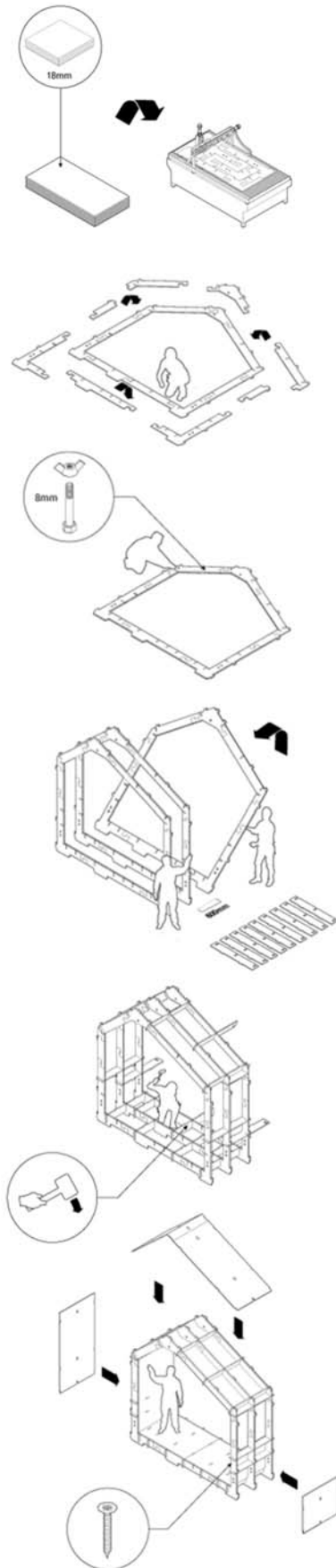
L'impiego del materiale compensato nel campo edilizio, è una strada già solcata da alcune compagnie, soprattutto, come si vedrà, nel contesto del Regno Unito.

Sono state sperimentate diverse tecniche costruttive, ognuna che mirasse a diversi obiettivi: alcuni a obiettivi formali e tecnologici come Facit Homes, altri a sistemi ad incastro legno-legno in autocostruzione per moduli abitativi, come nel caso di WikiHouse; altri ancora, in collaborazioni tra più studi di architettura, a dei sistemi di veloce assemblaggio, formati da elementi murari prefabbricati per formare un edificio che si potesse rapportare alle logiche di economia circolare legata al campo dell'architettura.

La tematica dell'utilizzo del compensato di pioppo come elemento per realizzare strutture portanti, è stata affrontata insieme al relatore di questa tesi Guido Callegari per la prima volta in occasione del Milano Design Days 2018 in cui è stato presentato un modulo in multistrato assemblato e disassemblato in giornata nel portico di Palazzo Giureconsulti, per la ditta Panguaneta che appunto si occupa della produzione di compensati [Fig.1]. Da questa esperienza è

nato lo stimolo ad esplorare ed approfondire le tecniche utilizzate e sperimentate sino ad oggi per l'impiego di questo materiale in architettura; inoltre la ricerca effettuata ha mirato a rapportare questa tecnologia ad un'idea di architettura sostenibile che si inserisca all'interno di un'economia circolare legata ai materiali da costruzione.

III.1. - WikiHouse



[Fig. III.1] Schema delle fasi di assemblaggio di WikiHouse.

WikiHouse viene fondata nel 2011 nel Regno Unito da Alastair Parvin e Nick Ierodiaconou entrambi membri dello studio Architecture 00. Questa è una delle principali organizzazioni che mira a promuovere uno sviluppo open-source della progettazione architettonica, è basato sulla collaborazione di più parti che possono attingere a dei file base disponibili su una pagina dedicata del loro sito^[1]; tramite apposite piattaforme installabili sul proprio computer c'è quindi la possibilità di usufruire di un modello base di WikiHouse e modificarlo per adattarlo alle proprie esigenze. A progetto terminato, questa logica open-source prevede il caricamento del proprio progetto nel sito dell'organizzazione per costituire così una sorta di libreria online utile a chiunque volesse utilizzare questa tipologia costruttiva a proprio vantaggio, così da potersi relazionare a progetti già sviluppati e partire quindi da modelli di riferimento sempre più perfezionati.

Elaborare una qualsiasi risorsa open-source permette quindi il grande vantaggio di utilizzare tutto ciò che funziona dei progetti già esistenti, rielaborarlo e farlo proprio. Approfondire determinati aspetti partendo da una base solida e già esistente, permette di progredire più facilmente in ciò che si sta facendo, evidenziando sempre nuove problematiche e trovando nuove soluzioni.

Nel caso di WikiHouse, è stato stimato che non tutti coloro che hanno contribuito a sviluppare nuove idee o applicazioni, negli anni, fanno parte del mondo dell'architettura [Fig. III.2]:

(SCHEMINO A TORTA PRESO DA PDF)

Questo rappresenta un altro dei punti cardine della logica open-source, infatti le diverse competenze di chi usufruisce dei dati messi a disposizione, ha permesso di osservare il sistema costruttivo da punti di vista molto differenti e questo grande connubio di arti è il

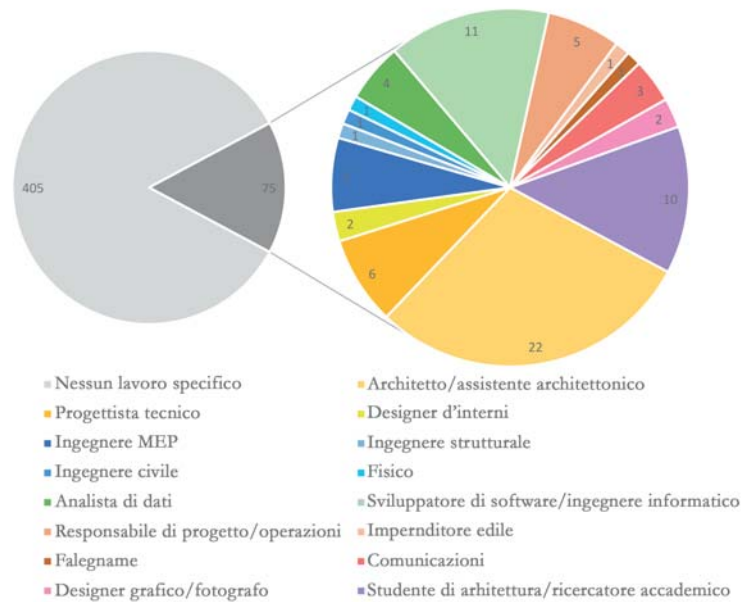
1 Sitografia [35].

punto di forza per la soluzione di problematiche legate a diversi campi, dall'elettronica all'idraulica, dal design al sistema costruttivo in sé; in questo modo ogni esperienza conta ed ha il preciso scopo di dar luogo a nuove riflessioni migliorando l'esistente con il proprio contributo.

Questo è un notevole passo avanti rispetto agli obiettivi di WikiHouse, promuovere l'ideale di quarta rivoluzione industriale nella quale le macchine a controllo numerico vengono impiegate per la produzione di edifici, permettendo, tramite il web, di dislocare la progettazione e la realizzazione dei componenti impiegati nell'edilizia in modo da avere la possibilità di avere un centro di produzione praticamente in tutto il mondo ^[1]; questo garantirebbe quindi una forte indipendenza del committente sia nei confronti di chi fornisce il servizio di taglio dei componenti, sia di chi fornisce il materiale impiegato.

Questo ed altri obiettivi che l'associazione si propone e che mirano a questa rivoluzione industriale 4.0, sono riportati nel loro sito ufficiale ^[2], in seguito sono riportati i principali:

- progettare per diminuire consumi, sprechi, costi, tempistiche e le abilità necessarie;
- progettare per avere strutture modulari facilmente assemblabili;
- progettare per la decostruzione, tramite l'utilizzo di parti imbullonate o ad incastro;
- progettare utilizzando pochi materiali e semplici tecniche di assemblaggio;
- progettare prodotti che diventino parte di un'eco-



[Fig. III.2] Grafico a torta in cui vengono illustrate le diverse professioni di chi ha utilizzato il sistema WikiHouse.

nomia circolare;

- progettare prodotti che in cantiere vengano semplicemente assemblati;
- progettare garantendo la sicurezza dalla fase di costruzione a quella di decostruzione.

Questi grandi punti proposti da WikiHouse mirano ad un tipo di architettura che sovverta le logiche, a volte fallimentari, fino ad ora adottate, aspirando ad una tecnologia che contrasti il cambiamento climatico tramite una progettazione sostenibile, che sia adattata allo specifico caso ma che sia comunque adottabile da tutti e ovunque, un'architettura semplice che permetta di ottenere ottime prestazioni ma ad un costo che sia alla portata di tutti ^[3].

Materiali e tecniche

Questo sistema costruttivo viene realizzato utilizzando pannelli di Compensato o di OSB, a seconda del budget di partenza e delle esigenze strutturali che il materiale scelto dovrà soddisfare.

1 Cfr. sitografia [37].

2 Cfr. sitografia [35].

3 Cfr. Parvin A., 2013.

I diversi pezzi della struttura che vengono riportati sui fogli di taglio al CAD vengono tagliati tramite frese a controllo numerico (CNC) [Fig. III.3; Fig. III.4]. Su ogni pezzo viene riportato il codice [Fig. III.5] che servirà in un secondo momento a riconoscere la sua collocazione all'interno dell'edificio.

Il taglio viene eseguito in dei centri specializzati, non in cantiere, ed è un aspetto che potrebbe rallentare le operazioni di montaggio in caso dovessero insorgere problematiche dovute alla progettazione.

La logica seguita da WikiHouse per il montaggio delle diverse componenti, prevede che possa essere eseguito anche da mano non esperta, aprendo molte strade a dinamiche di autocostruzione. Come riporta David F.A. Edward ^[4] e come illustrato nel blog dedicato alla struttura WikiFarmhouse, creato dagli stessi proprietari ^[5], in realtà ancora non è possibile affidare la costruzione solamente a mani inesperte, poiché certe dinamiche e processi possono essere svolti soltanto con la supervisione di individui specializzati, motivo per cui i costruttori necessari per realizzare quest'ultima si sono rivelati 9 dei quali uno era un operaio specializzato. Questo è dovuto anche al fatto che, nel caso britannico, secondo il CITB (Construction Industry

Training Board), tutti i progetti devono essere realizzati impiegando manodopera specializzata, l'appaltatore dovrà provvedere a monitorare il processo dando istruzioni in merito e la fase di costruzione deve essere supportata da un piano dei lavori di costruzione in forma scritta ^[6].

Il montaggio della struttura viene sempre eseguito a secco, questo permetterebbe di abbreviare molto i tempi di costruzione, visto che trattandosi di una struttura in legno, patisce l'umidità e, più in generale, delle condizioni metereologiche, per cui necessita una certa celerità nel montaggio per evitare che la struttura del legno si imbarchi o si danneggi, rendendo difficile se non impossibile la collocazione dei diversi componenti dotati di incastri.

Impatto sul mercato.

WikiHouse nasce in Gran Bretagna, dove in molti casi il prezzo di una casa non è accessibile ai più, specialmente se parliamo di città importanti come Londra. Infatti, agli inizi del 2000 la Gran Bretagna è stata colpita da una grande crisi del mercato immobiliare, questo sembra aver portato ad un bisogno sempre crescente di una soluzione alternativa alle vie tradizionali

4 Cfr. Edward F.A. David, 2018.

5 Cfr. sitografia [36]

6 Cfr. Edward F.A. David, 2018.



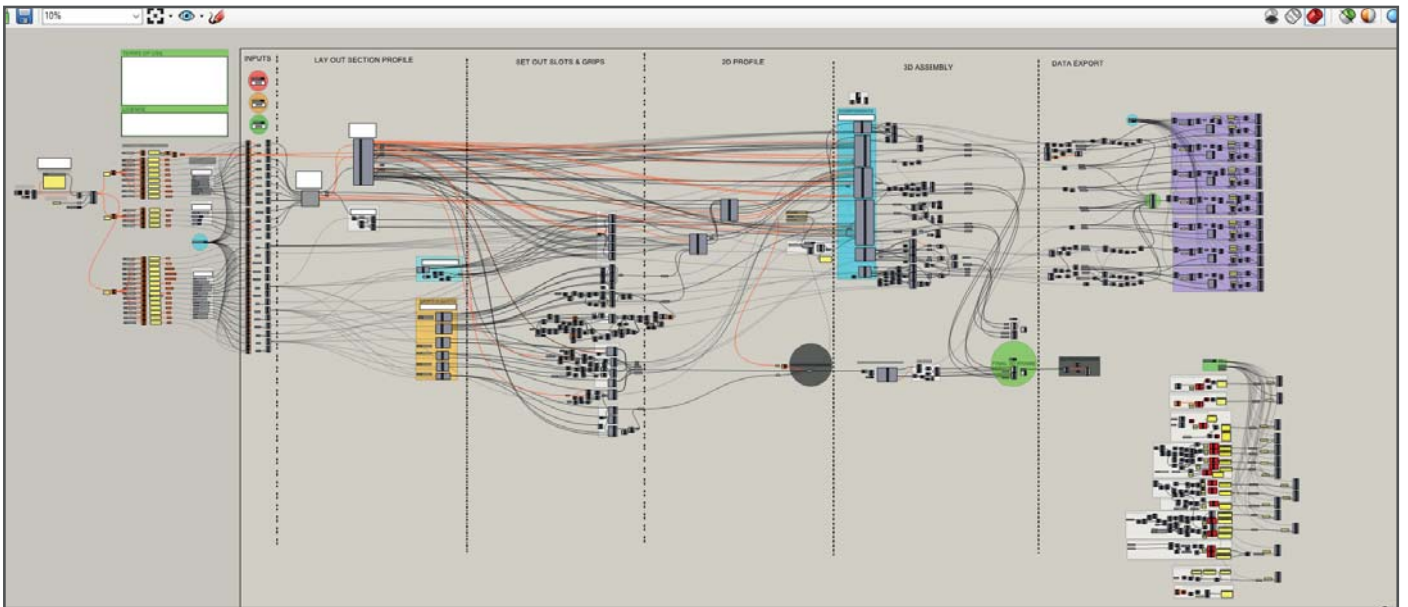
[Fig. III.3] WikiHouse 4.0



[Fig. III.4] WikiHouse 4.0



[Fig. III.5] WikiHouse 4.0



[Fig. III.7] WikiHouse 4.0

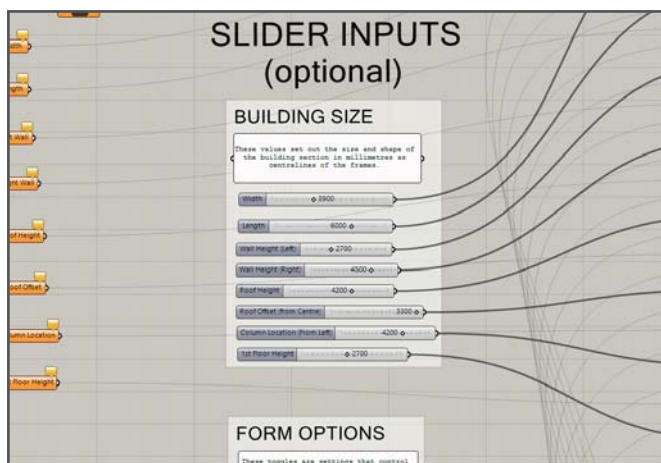
per costruire/ottenere una casa.

L'idea di autocostruzione diventa così baluardo dell'idea di ottenere case a basso costo, a più riprese, anche con tempistiche decise in base alla disponibilità economica della committenza. Come accadde nel caso riportato da Valentina Ronco e Monica Aimone, A WikiHouse Extension [Fig. III.6] ^[1], il proprietario ha deciso di auto-costruirsi un ampliamento della propria abitazione utilizzando questo sistema costruttivo ed adattandolo alle proprie esigenze, sia in termini di costo, sia in termini di tempistiche. Questo processo è stato possibile visto che ogni passo verso la realizza-

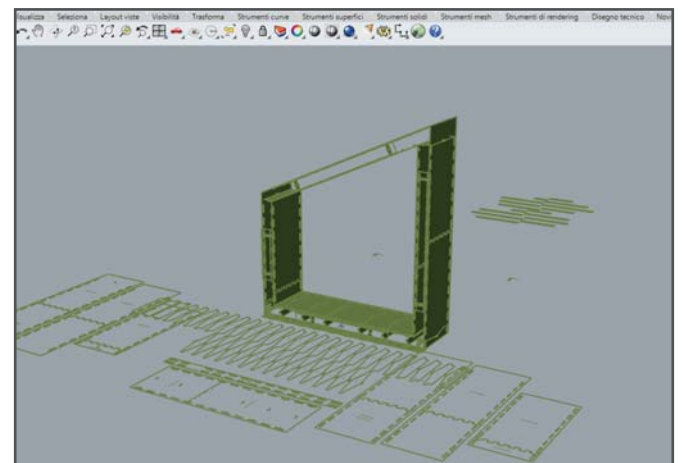
zione dell'estensione è stato preso in base alle possibilità del committente, partendo dalla stessa realizzazione dei diversi componenti, al loro montaggio ed in fine al montaggio degli impianti e finitura. Nonostante al possibile "effetto Ikea" ^[2], che indubbiamente gioca un ruolo importante per chi realizza la propria casa e ne accresce il valore emotivo, un possibile problema sembrerebbe essere rappresentato dalla diminuzione dell'effettivo valore di vendita dell'immobile, dato da un'idea di precarietà ed inaffidabilità di moduli WikiHouse rispetto a case tradizionali. Edward F.A. David tuttavia ricorda come, al contrario, un basso co-

1 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

2 Cfr. Edward F.A. David, 2018.



[Fig. III.8] WikiHouse 4.0



[Fig. III.9] WikiHouse 4.0

sto di realizzazione e la facilità di apportare modifiche e/o opere di manutenzione rispetto alle tradizionali abitazioni siano invece da considerare come un vero punto di forza ^[3].

Processo costruttivo, casi a confronto:

Come già accennato WikiHouse é basata sul modello Open Source, infatti per permettere di interfacciarsi velocemente con questo sistema costruttivo è stato sviluppato un sistema parametrico denominato Wren [Fig. III.7]: esso, grazie all'impiego di software BIM come Grasshopper, un plug-in del programma di modellazione Rhinoceros, oppure Sketchup Pro, viene utilizzato per ottenere in pochi passi un modello tridimensionale [Fig. III.9] della struttura a portali semplicemente specificando il numero dei piani, la dimensione, il numero dei portali e l'altezza [Fig. III.8]. Ogni pezzo viene numerato tramite codici alfanumerici e visualizzato sul software come se facesse parte di fogli di taglio destinati alle macchine CNC: gli elementi restituiti tramite Wren presentano infatti tutte le finiture che serviranno poi al montaggio finale e sono quindi pronti per essere riportati sui fogli di compensato.

Una volta ottenuta, la struttura dovrà essere trasportata fino al sito in cui verrà assemblata.

Sia nel caso di WikiFarmhouse [Fig. III.10] che in quello di WikiHouse Extension la struttura portante è stata ricavata secondo questa procedura, l'unica differenza sostanziale sta nel materiale impiegato che nel primo caso sono tavole in compensato di abete rosso Wisa per la parte strutturale e invece tutti i pannelli utilizzati per i tamponamenti di un compensato brasiliano meno costoso entrambi di spessore 18 mm, e nel secondo, per un maggiore risparmio e per motivi



[Fig. III.6] A WikiHouse Extension



[Fig. III.10] Wiki Farmhouse



[Fig. III.11] WikiHouse 4.0

3 Cfr. Edward F.A. David, 2018.

statici meno gravosi, tavole di OSB di spessore 18 mm per le componenti murarie ed i solai, mentre per il solaio di copertura é stato adottato un OSB di spessore 12mm.

Entrambe queste strutture rappresentano gli unici casi di architetture destinate all'edilizia residenziale realizzate in maniera permanente e non temporanea come per esempio il caso di WikiHouse 4.0 [Fig. III.11] (primo caso di struttura realizzata con la tecnologia WikiHouse a due piani in occasione del London Design Festival nel 2014) o altri padiglioni che spesso non prevedono l'installazione di impianti o l'inserimento dell'isolante.

Fondazioni

Le fondazioni che si possono impiegare per queste strutture possono essere di ogni tipologia, purché consone al luogo in cui vengono costruite, alla tipologia di terreno e che possano ospitare le travi radice sulle quali assemblare la struttura.

Possono essere quindi puntuali come le fondazioni a vite, possono interessare soltanto i setti portanti come le fondazioni a cordolo, oppure possono riguardare tutto il basamento della struttura come nel caso delle fondazioni a platea, anche se con conseguente impiego di maggiori quantità di calcestruzzo.

Scegliere la tipologia più adatta rappresenta infatti la scelta della parte più delicata ed importante per la costruzione di case prefabbricate in legno: le fondazioni determinano principalmente la sicurezza e la stabilità di tutta la struttura, oltre che permettere di evitare altre problematiche comunque importanti trattandosi di strutture lignee, come l'umidità di risalita, la dispersione di calore o l'eventuale infiltrazione di radon proveniente dal sottosuolo. Nei casi analizzati notiamo invece come nonostante tutto siano state prese decisioni non sempre felici su diversi campi.

In WikiFarmhouse le fondazioni [Fig. III.12; Fig. III.14] sono a cordolo e su di esse sono state poggiate le travi di radice in legno sulle quali è stata assemblata la struttura. Tuttavia sono state riscontrate diverse problematiche legate al posizionamento della barriera contro l'umidità di risalita, poiché non è stata inserita nei cordoli centrali annullando così i benefici delle barriere che invece sono state interposte tra il cordolo in calcestruzzo e la trave radice [Fig. III.13].

Inoltre un'ulteriore problematica è rappresentata dall'assenza di travi radice in legno sui cordoli più corti, questo non permette di ancorare la parte centrale dell'edificio alle fondazioni che rimangono sospese e sottoposte a sforzi maggiori sui nodi.

Nel caso di WikiHouse Extension invece, il tipo di



[Fig. III.12] WikiHouse 4.0



[Fig. III.13] WikiHouse 4.0



[Fig. III.14] WikiHouse 4.0



[Fig. III.15] WikiHouse 4.0



[Fig. III.16] WikiHouse 4.0

fondazione adottata è puntuale. Sono stati impiegati dei Jackpad di plastica riciclata prodotti da una ditta inglese [Fig. III.15; Fig. III.16]; le fondazioni puntuali, nonostante richiedano una minore quantità di lavori di scavo e possano essere posate a secco, in presenza di un terreno disomogeneo possono portare ad un carico maggiore su alcuni nodi della struttura con la possibilità di causare un danneggiamento agli incastri dei diversi pannelli.

E' stata inserita una membrana impermeabilizzante che protegge la struttura dall'umidità di risalita del terreno sottostante ma senza una preparazione preliminare del terreno che ospita le fondazioni.

Struttura

In entrambi i casi analizzati, la struttura viene montata a partire dai portali in legno. Questi alla base presentano dei cunei che vengono inseriti all'interno delle sagomature ricavate nelle travi radice montate sulle fondazioni. Viene solitamente mantenuta una continuità di materiale tra le travi alla base e la struttura, per evitare di avere dei comportamenti diversi dal punto di vista materico che potrebbero portare ad un danneggiamento della struttura.

I portali vengono normalmente assemblati a terra e successivamente posizionati [Fig. III.17]; sono degli elementi scatolari composti da dei pannelli che lungo il perimetro presentano una dentellatura in modo da permettere l'incastro con le componenti perpendicolari che al contrario hanno una serie di fori perimetra-



[Fig. III.17] WikiHouse 4.0



[Fig. III.18] WikiHouse 4.0

li. Sono provvisti di elementi di rinforzo in legno che permettono di aumentare la robustezza dei nodi ogni volta che si ha un cambio di geometria. Nel momento in cui vengono assemblati, al loro interno viene inserito l'isolante che può essere di diversi tipi di materiale. Essi vengono montati in genere con un passo di circa 1.2 metri, e tra un portale e l'altro sono presenti pannelli che collegano l'uno agli altri in modo da incrementare la stabilità dell'intera struttura. Questi elementi presentano a loro volta delle forature in corrispondenza del lato interno della tamponatura per permettere il passaggio degli impianti. Successivamente ai portali viene montato il solaio contro terra, che presenta a sua volta degli elementi perpendicolari tra loro a formare una griglia di base che verrà poi tamponata da dei pannelli che formeranno il piano di calpestio. Gli elementi della sottostruttura del pavimento presentano anch'essi dei fori per permettere il passaggio della parte impiantistica [Fig. III.18]. Nel caso di WikiFarmhouse, la parte relativa alla copertura è stata assemblata successivamente poiché composta dai prolungamenti degli stessi portali che costituiscono il piano terra dell'abitazione.

Solitamente la struttura così ottenuta viene tamponata con dei pannelli di rivestimento prima dalla parte esterna per minimizzare i danni provocati da eventuali

piogge o umidità che altrimenti colpirebbero le parti interne della struttura: i pannelli infatti potrebbero imbarcarsi provocando il disallineamento degli incastri e il danneggiamento dei materiali; successivamente si procede con l'inserimento dell'isolante nel lato interno delle mura e del tetto, ed infine si procede con la chiusura dell'intercapedine con pannelli di compensato analoghi a quelli impiegati all'esterno.

Isolamento

Per ciò che riguarda l'isolamento dei due casi studio proposti sono state adottate diverse soluzioni, considerando che si dispone di una vasta scelta di materiali che si possono meglio adattare alle diverse esigenze prestazionali e che siano adeguate al sistema costruttivo impiegato per ottimizzare i tempi di assemblaggio. Si possono impiegare pannelli rigidi, come il sughero o pannelli in fibra di cellulosa, oppure materiale insufflato nelle intercapedini come fiocchi di cellulosa, o anche altri materiali sintetici come nel caso di WikiFarmhouse che ha impiegato pannelli di polistirolo, che se da un lato ha delle ottime prestazioni, dall'altro deriva dalla lavorazione dello stirene che è un prodotto derivato dal petrolio, e perciò con energia e carbonio incorporata elevate. Inoltre intagliare questi pannelli ha richiesto un maggiore quantitativo di tempo ai pro-



[Fig. III.19] WikiHouse 4.0



[Fig. III.20] WikiHouse 4.0



[Fig. III.21] WikiHouse 4.0

prietari poiché è stata un'operazione manuale ed inoltre il polistirolo tende a sgretolarsi [Fig. III.19; Fig. III.20]. Monica Aimone e Valentina Ronco fanno notare come la discontinuità di questo isolante all'interno dei portali possa creare dei ponti termici, anche se trattandosi di legno la differenza è poco percepibile [1]. In questo caso il polistirolo è stato utilizzato non soltanto per i portali ma anche per isolare le intercapedini della copertura, delle pareti e del solaio contro terra. Per la pavimentazione relativa al solaio intermedio invece è stata utilizzata lana di roccia, un materiale poco idoneo a questo impiego considerando che è poco gestibile in fase di montaggio a causa dei rigonfiamenti che rendono difficile la chiusura degli elementi scatolari. Inoltre senza degli accorgimenti in fase di progetto, gli impianti presenti sotto i pannelli che formano il piano di calpestio non possiedono un'intercapedine dedicata e quindi fluttuano nell'isolante senza una membrana che li separi.

Nel caso di WikiHouse Extension sono state condotte scelte migliori dal punto di vista dell'isolante, poiché si è optato per un materiale prodotto tramite il riciclo della plastica [2], ed è stato impiegato per le intercapedini dei portali, delle pareti perimetrali e della copertura

[Fig. III.21]. Le problematiche riscontrate da Monica e Valentina in seguito ad un sopralluogo hanno evidenziato come la stratigrafia impiegata nel solaio contro terra non fosse adatta a conferire stabilità alla pavimentazione [3] a causa dell'errata configurazione degli spazi per il passaggio dell'impianto di riscaldamento a pavimento che, immerso in uno strato di isolante, risultava frapposto tra la barriera al vapore che ricopre il piano formato dai pannelli in OSB e le piastrelle della pavimentazione, provocando un'instabilità superficiale.

Infissi e membrane protettive

La struttura così ottenuta, al termine del processo di assemblaggio, deve essere necessariamente resa impermeabile ed ermetica applicando una barriera impermeabile contro le infiltrazioni di aria. Sono quindi presenti delle forature delle esatte dimensioni del telaio della finestra, ed anche se il contro telaio può essere o meno montato, è consigliabile in quanto il peso degli infissi potrebbe portare al cedimento dei pannelli su cui vengono montati [4]. Secondo la corretta procedura, oltre alla membrana contro vento applicata su tutta la struttura che viene fatta risvoltare all'interno dell'intercapedine della parete che ospita l'infisso, andrebbero aggiunti un nastro all'interno dell'intercapedine ed uno all'esterno per migliorare la tenuta al vento e limitare le eventuali infiltrazioni.

Nel caso di WikiFarmhouse oltre a non essere stati adottati dei contro telai, non sono stati applicati nemmeno i nastri isolanti all'esterno del foro degli infissi. I fori per la collocazione delle finestre sono stati realizzati senza tenere conto dello spazio che all'interno avrebbe dovuto essere riservato al controsoffitto che ospita gli impianti elettrici e di aerazione. Per questo motivo il controsoffit-

1 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

2 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

3 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

4 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

to è stato sagomato per permettere la corretta apertura delle ante degli infissi.

Rivestimenti

La fase finale per ultimare l'edificio realizzato consiste nel rivestire le superfici interne ed esterne, con l'apposizione degli elementi di copertura e di scolo delle acque piovane per impedire le infiltrazioni ed il ristagno di umidità che provocherebbe l'infradiciamento degli elementi strutturali.

Per evitare il ristagno di umidità sulla sommità della struttura, è importante prevedere le giuste inclinazioni delle falde, infatti una copertura completamente piana non è indicata per il materiale ligneo. Perciò è sempre preferibile una copertura a falde, sulla quale applicare una doppia orditura di montanti a griglia ortogonale per realizzare una copertura ventilata. Al termine della falda, la linea di gronda deve essere occupata da una lamiera che, agganciata sotto la lamiera di copertura, permetta la raccolta delle acque e che protegga quindi le pareti sottostanti risvoltando sullo strato di rivestimento verticale. Si è visto come Nel caso di WikiFarmhouse siano stati adottati entrambi questi accorgimenti, mentre nel secondo caso studio la gronda è stata posizionata soltanto al termine della falda, causando infiltrazioni nei pannelli sottostanti che porteranno ad un inevitabile degrado dei materiali.

Per ciò che riguarda il rivestimento verticale, viene sempre sostenuto da una sottostruttura agganciata alle tavole che compongono le pareti in legno: l'unico problema riscontrato riguarda l'angolo della WikiFarmhouse che non è coperto dal rivestimento di lamelle di legno, lasciando le parti in legno esposte alle intemperie e al conseguente degrado.

Internamente sono stati adottati pannelli in cartongesso montati lasciando sempre uno spazio di intercapedine per il passaggio degli impianti.

Allo stesso modo, in WikiHouse Extension internamen-

te sono stati montati dei pannelli in compensato a vista, lasciando sempre lo spazio necessario al passaggio degli impianti, mentre all'esterno sono stati applicati pannelli bianchi che ricordassero l'intonaco per motivi urbanistici dettati dal piano regolatore.

Schermature solari

In nessuno dei casi studio analizzati sono state inserite delle soluzioni esterne per permettere di filtrare i raggi solari nel periodo estivo per evitare un eccessivo apporto solare nell'edificio.

Come è possibile notare dalle immagini riportate infatti, tutti gli edifici presentano soltanto dei serramenti a filo parete. Questi ultimi sono fissati direttamente alla struttura portante che non presenta intercapedini utili alla posa di schermi come serrande o simili [Fig. III.22].

Non sono state apportate nemmeno migliorie esterne come ad esempio l'aggiunta di sistemi brise-soleil agganciati alla struttura della facciata.

Questa problematica potrebbe non essere rilevante nel caso specifico degli edifici analizzati: la latitudine di Birmingham, ad esempio, nei mesi di giugno, luglio ed agosto permette di avere in media una massima temperatura di 21 C° con una minima di 11 C°. Se però si pensasse di realizzarli altrove, al momento la struttura WikiHouse non contempla questo genere di soluzioni tecnologiche



[Fig. III.22] WikiHouse 4.0

III.2 – Circular Building



[Fig. III.23] Circular Building

Questo edificio è stato realizzato dallo studio Arup in collaborazione con Frener & Reifer, BBAM Construction and The Built Environment Trust.

Esso è stato realizzato in occasione del London Design Festival, per produrre una prova tangibile di come l'economia circolare applicata all'edilizia sia un tema su cui riflettere e soprattutto sia una vera risorsa per porre dei rimedi alle problematiche ambientali date dall'uso incontrollato e spesso irresponsabile delle materie prime ^[1].

Esso rappresenta infatti uno dei primi esempi di edifici realizzati secondo un principio di circola-

rità di tutti i materiali impiegati.

Aspetti di circolarità:

Oltre a dimostrare la sua adattabilità e riconfigurabilità (uno degli elementi cardine dell'economia circolare) tramite la struttura in acciaio che sporge dall'impianto murario ^[2], e tramite l'assemblaggio di elementi prefabbricati "off-site", tutti i materiali di cui è composta sono totalmente disassemblabili e riciclabili, poiché, come precisato all'interno della video intervista a Simon Anson ^[3], uno degli architetti che hanno collaborato al progetto, non contengono alcun agente chimi-

1 Cfr. Zimmann R. et al., 2016.

2 Cfr. sitografia [39].

3 Cfr sitografia [41].

co tossico che, come già visto nel caso del legno, di solito viene applicato per alcuni trattamenti.

L'intero progetto risponde a quasi tutti i punti del concetto Re.S.O.L.V.E ^[1] (vedi capitolo II.2), infatti sfrutta a pieno le risorse di cui è composto.

Alcuni materiali sono in leasing da altre aziende che ne garantiscono il funzionamento e che si occuperanno del loro smaltimento una volta finito il ciclo di vita del componente, come la tappezzeria che è stata fornita in base ad uno schema di ritiro dall'azienda Desso ^[2].

Vengono utilizzati materiali sostenibili come le pareti blu del living room che sono interamente ricavate dal riciclo di bottiglie di plastica e che a loro volta possono essere reimpiegate o riciclate per produrre nuovi oggetti.

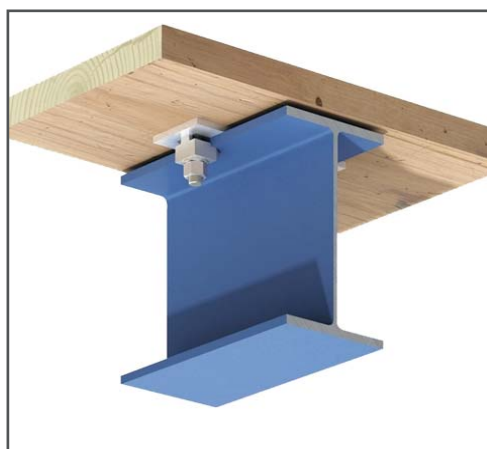
La struttura stessa, che è in acciaio, può essere smontata, reimpiegata o riciclata per produrre altri elementi in acciaio.

Le componenti murarie utilizzate, derivano dal riciclaggio degli scarti del settore agricolo, in particolare derivanti dal grano, che vengono pressati assieme senza l'utilizzo di prodotti tossici e tagliati al laser per formare i pannelli. Questi pannelli, dotati di incastri, formano una struttura scatolare che tramite appositi elementi a morsetto ancorati al telaio in acciaio,

permettono di agganciarli a secco e di rimuoverli facilmente anche per eventuali operazioni di manutenzione [Fig. III.24]. Questo materiale può essere riutilizzato, riciclato, impiegato in produzioni di oggetti di qualità maggiore (upcycle), oppure, al limite, impiegato per produrre biogas o energia, per cui la vita di questo elemento può essere prolungata tramite diversi schemi di loop.

Inoltre sulle pareti del modulo sono stati stampati alcuni schemi che parlano della circolarità dell'edificio, ogni pannello della struttura è stato dotato di un codice QR [Fig. III.25], questo è stato possibile utilizzando un modello BIM in cui venivano registrati tutti i dati di tutti i materiali che componevano l'intero edificio; questi dati sono stati ospitati sul sito Arup come database per renderli consultabili a chiunque volesse conoscere il potenziale di circolarità dei diversi componenti che formano il modulo ^[3].

Al suo interno, un team di ingegneri ha previsto l'inserimento di sensori che possano monitorare lo stato ambiente interno all'edificio, come sensori di temperatura, umidità e scambi d'aria, in modo da ridurre l'apporto di energia necessario al mantenimento di una temperatura confortevole durante tutto l'anno e alcuni sensori che permettano di monitorare la qualità



[Fig. III.24] Morsetti applicati ai pacchetti dell'involucro murario.



[Fig. III.25] Codici QR per identificare i componenti.



[Fig. III.26] Particolari: a sinistra la chiusura del tetto, a destra il telaio imbullonato.

1 Cfr. Zimmann R. et al., 2016.

2 Cfr. sitografia [39].

3 Cfr. sitografia [39].

dell'ambiente interno, come la luminosità, l'inquinamento acustico e pressione dell'aria. E' stato anche realizzato un impianto per l'immissione di aria esterna, realizzato con stampanti 3D e contenente il 90% di plastica PET riciclata [4].

Struttura e concept.

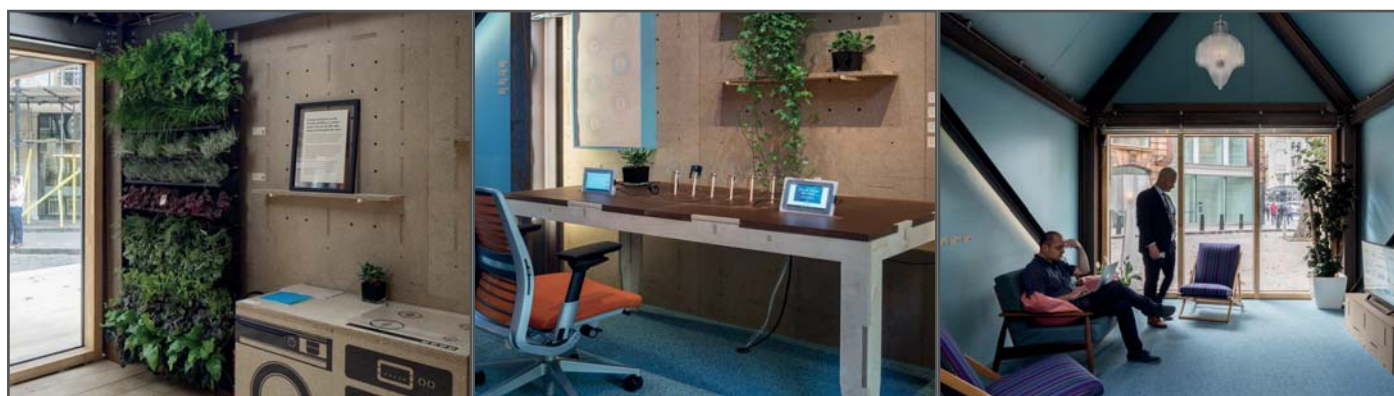
Come già accennato, l'intera struttura dell'edificio è stata progettata per un montaggio a secco, tutti i pezzi infatti presentano diversi tipi di giunture, come nel caso delle pareti e della copertura che, progettate come elementi del tipo WikiHouse, digitalmente e tagliate con macchine a controllo numerico, sono state assemblate e successivamente trasportate in cantiere come elementi finiti.

La struttura in acciaio, che non è saldata ma imbullonata [Fig. III.26, parte destra], è stata quindi studiata per essere smontabile, in questo modo si semplifica il processo di decostruzione e allo stesso tempo dona un aspetto di versatilità all'intero edificio che può subire cambiamenti ed espansioni. Questo concetto viene messo in evidenza oltre che dalla struttura stessa, anche dalla separazione dei diversi ambienti: l'interno è stato pensato per descrivere tre diversi aspetti della vita quotidiana di una persona, ed in che modo l'economia circolare possa influenzarli: il primo ambien-

te che si attraversa entrando è la zona pubblica [Fig. III.27], al centro l'area di lavoro [Fig. III.28] ed in fondo la zona living [Fig. III.29]. Antistante all'ingresso, la struttura esce dall'edificio come fosse uno spazio esterno, un pronao che da un lato è un semplice ambiente di passaggio, ma dall'altro lascia intravedere le sue potenzialità per eventuali espansioni. Alle due estremità dell'edificio sono state lasciate a vista anche le strutture dei pacchetti murari, che vengono chiuse tramite dei pannelli di vetro [Fig. III.26, parte sinistra] montati su appositi sostegni, sempre a secco.

L'intera struttura viene montata su degli appoggi puntuali in legno, anche perché si tratta di un modulo temporaneo per un'esposizione.

Tutto l'involucro composto da pareti e tetto, è stato realizzato con prodotti di scarto della coltivazione del grano, che senza elementi chimici è stato pressato fino a formare dei pannelli e poi è stato tagliato a laser per poter costruire l'elemento scatolare prefabbricato che infine viene trasportato in cantiere e montato. L'isolamento dell'involucro è all'interno di ognuno di essi. La prefabbricazione è vista come un notevole aspetto di economia circolare che assume il termine costruzione con l'accezione di montaggio. Infatti gli elementi realizzati e montati off-site consentono di ridurre notevolmente il quantitativo di rifiuti in cantiere come



[Fig. III.27] Primo ambiente: area pubblica.

[Fig. III.28] Secondo ambiente: area lavoro con postazione munita di sensori ambientali

[Fig. III.29] Terzo ambiente: area living con rivestimento in materiale isolante acustico.

4 Cfr. sitografia [41].

scarti derivanti dalle lavorazioni ed imballaggi ^[1].

La pavimentazione è stata montata su una sottostruttura realizzata con pannelli di legno ad incastro tra i diversi portali di acciaio che ha lo scopo di rafforzare il piano di calpestio. Essa assume diverse conformazioni a seconda dei diversi ambienti che ricopre: se nell'ingresso (zona pubblica) è formata da assi di legno, nell'area di lavoro diventa un tappeto blu che prosegue fino a ricoprire l'intera zona living.

La pavimentazione esterna, realizzata in legno trattato termicamente, consiste in una pedana d'ingresso alla quale è possibile accedere tramite scalini o da una rampa laterale.

Le pareti della zona living, come già accennato, sono anch'esse rivestite di un materiale ottenuto da bottiglie di plastica riciclate che funge da isolante acustico per rendere l'idea di confort che è alla base di uno spazio living, mentre nel resto dell'edificio vengono volutamente lasciati a vista i pannelli degli elementi scatolari con incisioni laser e i segni dei diversi incastri.

L'intera struttura è stata esternamente ricoperta da un telo impermeabilizzante montato tramite viti e rondelle di plastica per garantire la tenuta stagna e quindi evitare infiltrazioni di acqua.

Lo strato più esterno (e che è presente anche nella parte esterna dell'ingresso) è formato da una sottostruttura in legno trattato termicamente sulla quale vengono montate delle assi dello stesso materiale. Lo stesso tipo di legno è stato impiegato anche per i pannelli che vanno a chiudere le due facciate dell'edificio e sui quali vengono inseriti i serramenti.

1 Cfr. Zimmann R. et al., 2016.

III.3 – Facit Homes



[Fig. III.30] Casa realizzata per Celia e Diana Woodward, Hertfordshire, Facit Homes, 2011.

Nel Regno Unito si sono sviluppate altre aziende oltre a Wiki House che mirano alla costruzione di edifici prefabbricati realizzando i diversi componenti tramite tecniche all'avanguardia.

Facit Homes nasce ufficialmente nel 2009, fondata da Bruce Bell che dopo aver studiato Industrial Design ed essersi interessato di contesti riguardanti l'architettura, ha lavorato nello studio di Norman Foster come modellatore BIM. Da subito si è reso conto di come l'utilizzo dei computer stia diventando fondamentale per realizzare edifici in modo da massimizzare le risorse in termini di materiali, tempi e costi.

Una volta lasciato il suo impiego nello studio di Foster Architects, ha iniziato insieme ad altri architetti a sperimentare l'impiego della produzione digitalizzata di componenti prefabbricati per la realizzazione di interi edifici.^[1]

Nonostante a livello progettuale tutto avviene all'interno di un computer, dove si può disporre di una precisione millimetrica, il principale problema della prefabbricazione consiste nel grado di incertezza che vi è tra progettare qualcosa ed il realizzarlo: interpretare disegni altrui porta sempre anche ad un minimo grado di errore, o per realizzare l'oggetto in questione o a livello di montaggio.^[2] Questo sarà il principale

1 Cfr. sitografia [46].

2 Cfr. sitografia [42].

problema che lo studio Facit Homes si propone di risolvere, inventando quello che viene da loro definito il D-Process, che è in grado di unire l'attività manifatturiera alla precisione della produzione tramite macchine a controllo numerico.

Questo processo costruttivo, consta di diversi elementi che sono rivolti alla risoluzione di queste problematiche: i diversi elementi vengono prodotti tramite software Revit e vengono salvati in una banca dati continuamente aggiornabile. I singoli pezzi del progetto che vengono utilizzati, vengono così montati in un modello tridimensionale completo, che grazie alle informazioni BIM (Building Information Model) legate a ciascun oggetto all'evenienza può essere completamente scomposto negli elementi bidimensionali che lo formano e che a loro volta vengono numerati. In questo processo, vengono inclusi tra i dati BIM anche tutte le informazioni riguardanti il passaggio di impianti elettrici ed idraulici, i quali vengono direttamente inseriti in intercapedini ricavate nei diversi scattolari che compongono i solai e le pareti dell'intero edificio.

Una volta ottenute le forme scomposte, viene generato il G-code dei singoli elementi che verrà decodificato dalla macchina CNC per tagliarli sul foglio di compensato, con il minor quantitativo di scarti possibile.^[1] Gli scarti a loro volta saranno rivenduti come

combustibile vper produrre energia.^[2]

E' stato ideato un sistema che porta ad avere un elevato grado di informazione su tutto l'edificio, in questo modo tutto ciò che è progettato e che è leggibile da un monitor rispecchierà la realtà del progetto quasi in maniera scientifica, risolvendo quello che da sempre è stato considerato il principale problema della prefabbricazione, ovvero l'interpretabilità del progetto.

La singolarità di questo processo sta anche nell'idea di Facit Homes di dotarsi di una macchina CNC trasportabile all'interno di un container completamente adattato per ospitarla, e disporne direttamente sul sito di costruzione dell'opera. [Fig. III.31] Questo permette di fare modifiche, nel caso in cui fosse necessario, direttamente in corso d'opera limitando così gli interventi di manodopera che oltre ad avere un impatto sul costo dell'opera, lo avrebbe anche sulle tempistiche di realizzazione. In cantiere, disponendo dei fogli di compensato e della macchina per tagliarli nei diversi componenti e numerarli, viene svolto l'intero lavoro di produzione dei pezzi da assemblare per avere la struttura finita dell'edificio, anche nel caso di componenti mancanti oppure che necessitino modifiche, la soluzione adottata da Facit Homes si rivela vincente. Il locale di produzione mobile, è provvisto di una sola macchina a controllo numerico per il taglio degli elementi, questo comporta il rispetto di una severa tem-

1 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

2 Cfr sitografia [47].



[Fig. III.31] Locale di produzione mobile Facit Homes.

pistica di assemblaggio degli elementi che, nel caso del caso studio qui riportato, si aggira intorno a 4 minuti per ogni scatolare, per rientrare nei tempi previsti di assemblaggio dell'intera struttura.

Come precisato Monica Aimone e Valentina Ronco,^[3] questo sistema è efficace finché la produzione riguarderà il singolo edificio, ma non potrebbe mai essere impiegato nella produzione in serie, nonostante ci sia un reale risparmio in termini di costo dell'affitto del locale in cui effettuare il taglio degli elementi, considerando che avviene in situ e che sia il container della macchina che i pannelli vengono trasportati un'unica volta, quindi facendo risparmiare anche a livello di emissioni di CO2.

Il tema delle emissioni legate ad un edificio Facit Homes oltre ad essere interessante, è anche un aspetto di pregio che viene sottolineato dall'azienda.

Le case realizzate sono principalmente formate da degli scatolari ad incastro su cui sono applicati dei fori per riempirle di materiale isolante insufflato. Esso è

composto da un mix di legna tritata finemente e completamente riciclabile. I materiali che la compongono sono marchiati PEFC o FSC, indicando così di essere dei materiali provenienti da foreste gestite nel rispetto degli standard ambientali. In un articolo di PEFC UK^[4] vengono riportate le parole di Andrew Goodeve, un membro di Facit Homes, che spiega come l'obiettivo dell'impiego di legname certificato sia quello di produrre edifici altamente performanti e con il minor impatto ambientale possibile. Stima infatti che mediamente la realizzazione di un loro edificio permetta di risparmiare circa 47 tonnellate di CO2 rispetto al processo costruttivo di un edificio tradizionale; questo indica un risparmio che equivale al riscaldamento di un loro edificio per 103 anni. Inoltre l'utilizzo di un unico materiale, principalmente il compensato, ed il corretto isolamento dell'intero edificio, portano ad avere un edificio con ottime prestazioni termiche, che permette di avere un basso carico termico sia estivo che invernale.

Edifici realizzati

Facit Homes si è occupata della realizzazione di alcuni edifici residenziali che sono collocati nelle campagne del Regno Unito.

Il primo esempio di edificio realizzato con questa tecnica innovativa nel Regno Unito è situata nell'Herfordshire ed è stata realizzata per Celia e Diana Woodward nel 2011.

I committenti hanno deciso di investire su questa tecnica costruttiva che, oltre ad essere innovativa, poteva comportare un aumento significativo del budget finale speso per realizzarla a causa delle diverse problematiche riscontrate in fase di costruzione.



[Fig. III.33] Schermatura solare.

3 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

4 Cfr. sitografia [43].



[Fig. III.32] Basamento puntuale con travi radice e pittura con vernice bituminosa.

La struttura

L'intera struttura viene realizzata su dei micro-pali che vengono piantati nel terreno ad una profondità di che va da 3 a 6 metri, lasciando fuori dal terreno solo 30 cm circa per sorreggere una struttura di travi radice impermeabilizzate su cui poi verranno posate le travi I-joist per la posa di tutti i componenti scatolari portanti che compongono l'edificio. [Fig. III.32]

Gli scatolari sono pensati e realizzati su misura per garantire una certa libertà progettuale e formale [Fig. III.33]. Essi vengono prima montati fino a formare l'intera struttura e solo successivamente vengono riempiti di isolante mediante insufflaggio, consentendo da un lato di mantenere il sito pulito e dall'altro evitare scarti. Per evitare ponti termici, i fori adibiti all'in-



[Fig. III.34] Inserimento travi i-Joist e blocchi di isolamento nel solaio del piano terra.

sufflaggio del materiale verranno man mano chiusi tramite dei tappi di legno che consentiranno di mantenere uniformità di materiale e di essere facilmente applicati.

Nella copertura e sulle travi radice delle fondazioni, i cassoni di isolante vengono fissati grazie all'ausilio di travi I-joist [Fig. III.34] su cui viene applicato un tappeto di isolante sui lati e che, nel caso della copertura, vengono posate su elementi scatolari appositamente sagomati per ospitarle.

Gli scatolari che compongono la copertura ed i solai, vengono quindi semplicemente appoggiati alle travi e la leggerezza dei diversi pezzi di tutta la struttura garantisce un facile montaggio senza l'ausilio di macchinari per sollevamenti pesanti se non nel momento



[Fig. III.35] Schermatura solare.



[Fig. III.36] Particolare della schermatura.

della posa degli infissi.

Una volta ottenuta l'intera struttura viene ricoperta esternamente da un telo impermeabile che viene fatto risvoltare anche all'interno dei fori lasciati per la posa degli infissi.

Il rivestimento impermeabile viene ricoperto da uno strato di pannelli che fungono da cappotto esterno e che successivamente verrà intonacato.

Dopo aver intonacato il muro esterno si è provveduto all'inserimento dei sistemi di schermatura solare presenti sia al piano superiore che a quello inferiore. Essi sono costituiti da brise-soleil in legno [Fig. III.35; Fig. III.36] montati su elementi d'acciaio che permettono di sorreggerli adeguatamente; la loro presenza consente di massimizzare gli apporti solari nella stagione invernale, elemento di grande rilievo se rapportato alla fascia climatica in cui cade il territorio dell'Inghilterra, e di schermarli nella stagione estiva, in cui sarebbe considerato un apporto negativo nel fabbisogno energetico estivo dell'edificio.

Principali problematiche riscontrate

In questo tipo di struttura insorgono diverse problematiche: ^[1]

Gli infissi hanno bisogno di particolare attenzione nel montaggio perché le strutture scatolari che circondano il foro dedicatogli sono troppo esili per garantire una tenuta salda, per questo motivo vengono rafforzati aggiungendo pannelli che facciano spessore e garantiscano una migliore stabilità. Gli elementi realizzati su misura per la posa degli infissi comportano inoltre una spesa maggiorata per ogni tipologia di infisso impiegato

□ Gli scatolari del solaio verso il terreno non presentano una guaina impermeabile che li protegga dall'umidità di risalita, e nonostante non siano a diretto

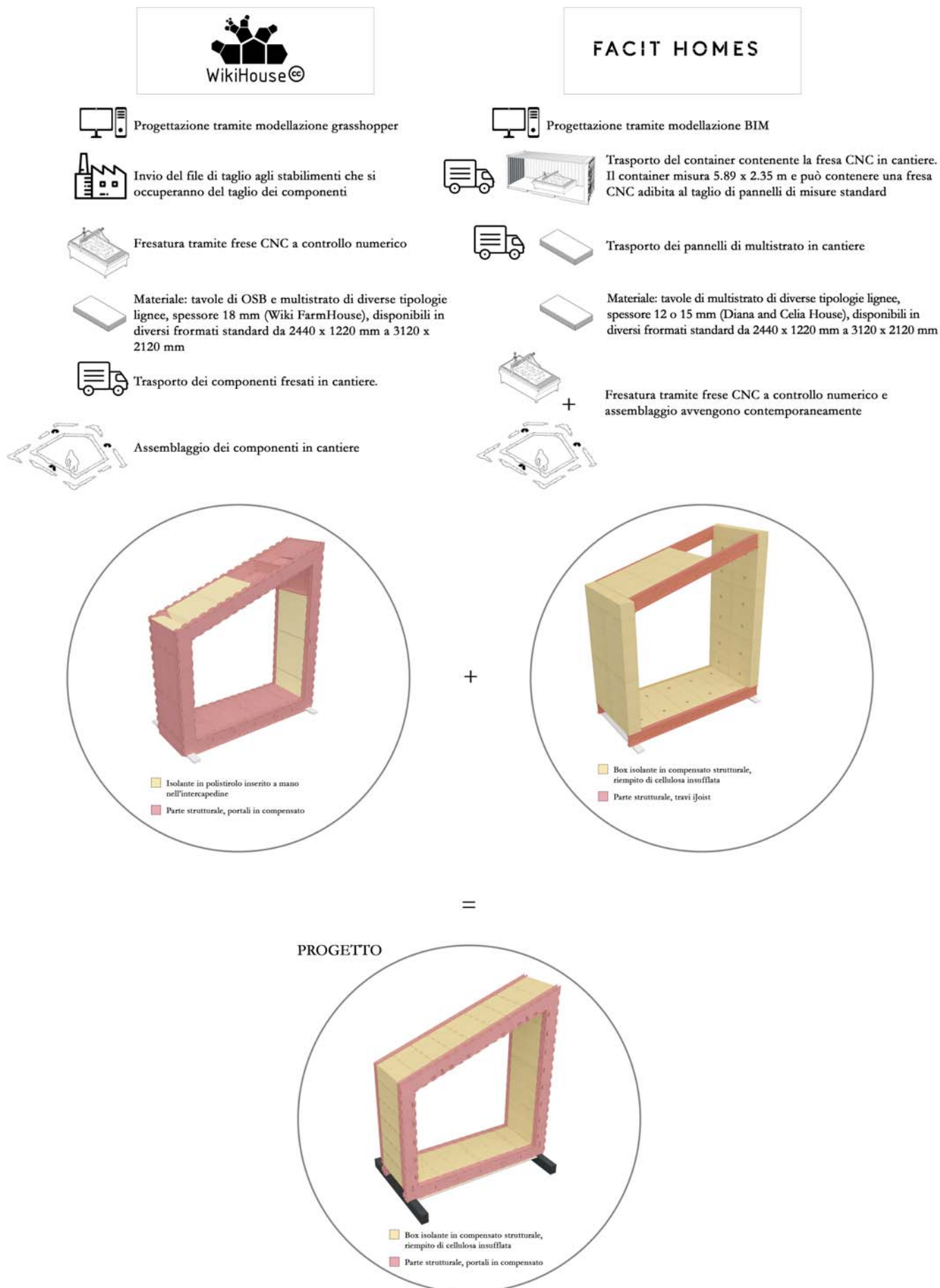
contatto con il terreno, c'è comunque il rischio che si formi condensa che causerebbe la creazione di muffe con conseguente danneggiamento degli elementi.

□ Per l'utilizzo dei micro-pali delle fondazioni servirebbe per ogni edificio una dettagliata analisi della composizione del suolo, poiché in presenza di terreni argillosi o fenomeni sismici, sarebbe compromessa la stabilità dell'intera struttura o il sovraccarico di alcuni nodi rispetto ad altri.

□ I pannelli di compensato portati in situ, se non stoccati in maniera efficace, potrebbero deformarsi e/o rovinarsi nel caso in cui non fossero protetti adeguatamente dall'umidità e dagli agenti atmosferici, soprattutto considerando che nel caso analizzato tagliare tutti i pezzi ed assemblarli ha richiesto 8 settimane.

1 Cfr. Aimone G.M., Ronco V., 2017.

IV – IL PROGETTO



[Fig.1] Viene mostrato il confronto tra il processo costruttivo WikiHouse e Facit Homes. La struttura di WikiHouse e il sistema di isolamento Facit Homes portano all'idea progettuale di creare un ibrido che utilizzi gli aspetti strutturali del primo ed il sistema di isolamento scatolare del secondo caso studio.

In seguito al lavoro di ricerca condotto in questa tesi, sono stati evidenziati alcuni aspetti importanti per lo sviluppo di un'idea progettuale che potesse apportare dei miglioramenti nel campo dell'architettura.

L'idea di impiegare il compensato di pioppo con funzione strutturale, come già osservato nei capitoli III.1, III.2, III.3, è stata già messa in pratica seguendo diverse tipologie tecnologiche create ad hoc e tuttora in via di sviluppo e continuo miglioramento.

Questo materiale si rivela estremamente versatile ed elemento chiave per l'automazione del processo produttivo dei componenti da impiegare nella costruzione di edifici. Il suo ridotto spessore permette un facile stoccaggio e massimizza lo spazio in fase di trasporto. Tuttavia le tecniche adottate per relazionare il compensato al campo architettonico differiscono notevolmente tra loro, e questo è evidente se si paragonano i metodi WikiHouse e Facit Homes. Una sostanziale differenza tra le due tecniche sta proprio nel taglio dei componenti. WikiHouse infatti si basa su un modello Grasshopper, che, a seconda dei valori scelti produce un modello tridimensionale ed intavola il 2D di tutti i componenti. Questo 2D è pronto per essere inviato alla macchina CNC per essere processato, ma l'azienda non si occupa in prima persona del taglio dei componenti. Un vantaggio connesso a questo approccio consiste nel fatto che le macchine CNC sono esterne e potenzialmente dislocate in tutto il mondo nello stesso istante e in questo modo consentono una produzione in serie. Inoltre è possibile in questo modo suddividere il lavoro di taglio tra più frese nel caso in cui lo stabilimento sia dotato di più macchinari, riducendo i tempi di taglio a seconda dei macchinari disponibili. Tuttavia potrebbero verificarsi alcune problematiche in fase di costruzione in caso di pezzi mancanti o di modifiche. Anche Facit Homes, come visto nel capitolo III.3, utilizza un sistema automatizzato per immagazzinare i dati dei propri componenti grazie al software Revit.

A differenza della prima azienda però, Facit Homes si occupa personalmente del taglio delle diverse parti della struttura, portando in cantiere la base di taglio mobile attrezzata con una fresa CNC. Da un lato tale fresa rappresenta una comodità in caso di imprevisti o modifiche in fase di assemblaggio e non comporta costi aggiuntivi per utilizzare macchinari di terze parti. Dall'altro tuttavia essa costituisce un limite rispetto alle tempistiche di lavoro e rispetto alla produzione in contemporanea di più edifici essendo Facit Homes dotata di un solo macchinario adibito al taglio. Inoltre questo pur essendo un aspetto di risparmio sul taglio degli elementi, obbliga a produrre i componenti senza la possibilità di suddividere il lavoro di taglio tra più macchine per accorciare le tempistiche complessive. E' stata riscontrata un'ulteriore problematica riguardo lo spazio per poter inserire il container in cantieri cittadini dove lo spazio a disposizione potrebbe essere molto ridotto.

Come si può evincere dall'immagine, entrambi i sistemi utilizzano il compensato come materiale strutturale, ma, mentre il primo lo utilizza soltanto per la parte riguardante la struttura dell'edificio ed il suo rivestimento, il secondo lo impiega per realizzare la struttura degli scatolari riempiti di fiocchi di cellulosa. Questi ultimi, da soli, andranno a formare l'intero apparato murario, mentre nei solai avranno bisogno del supporto delle travi i-Joist sulle quali verranno posati.

Il sistema WikiHouse affida l'isolamento dell'edificio ad un lavoro manuale di taglio e collocazione del polistirene utilizzato per isolare i portali e l'intercapedine di mura e solai, provocando un maggiore dispendio di tempo ed energie per questa operazione.

Facit Homes predispone i componenti perché ospitino i fiocchi di cellulosa che vengono insufflati al loro interno una volta che l'intera struttura è impermeabilizzata e quindi al riparo da agenti atmosferici che potrebbero danneggiare il materiale. Quest'ultimo meto-

do si rivela ottimale per risparmiare tempo in fase di costruzione dell'edificio e per facilitare la futura fase di decostruzione, punto fondamentale per un'economia circolare che interessa il ciclo di vita di un edificio. Inoltre soltanto nel caso studio analizzato di Facit Homes è presente un sistema esterno per schermare i raggi solari in corrispondenza dei serramenti, elemento di grande importanza per garantire un comfort sia in regime estivo che invernale.

IV.1 Linee guida progettuali e vincoli

Da questa serie di osservazioni in merito ai casi studio analizzati prende così forma l'idea progettuale di realizzare degli elementi scatolari in compensato di pioppo che possano essere montati ad incastro su una struttura derivata dall'esperienza WikiHouse, e che siano predisposti per l'insufflaggio di fiocchi di cellulosa al loro interno.

In corrispondenza dei serramenti è stato inoltre progettato un componente che, agendo come controtelaio, irrobustisce il piano di posa dell'infixo e permette all'isolante di coprirlo, diminuendo così il ponte termico che verrebbe a formarsi. Questo controtelaio infatti presenta una struttura cava che a sua volta può essere riempita di cellulosa insufflata.

Tramite i componenti progettati si avrà come risultato un facile assemblaggio, al termine del quale si otterrà una struttura performante e completamente isolata. In questo modo si agevolerà anche la fase di decostruzione, che consisterà nello smontare gli scatolari in compensato contenenti l'isolante per poterli riciclare come singoli componenti oppure per poterli reimpiegare in altre strutture, prolungandone la vita e riducendo considerevolmente la quantità di rifiuti C&D.

L'impiego di questi componenti permette di rispettare alcuni fattori ambientali derivanti dall'uso di materiale ligneo e di suoi derivati, come lo stoccaggio

prolungato della CO₂ biosequestrata ed immagazzinata nel legno e nella cellulosa che li compongono e lo sfruttamento regolamentato del suolo per produrre il legno impiegato. Questo, come già visto, comporterà un minore inquinamento del suolo, delle falde acquifere e dell'atmosfera.

Uno dei principali aspetti positivi e punti di forza di questi componenti sta nella velocità di assemblaggio, il che porta ad avere delle strutture realizzate in poco tempo e che quindi potrebbero anche essere impiegate in opere che richiedono ridotti tempi di realizzazione come strutture temporanee e di prima emergenza. Tutti gli elementi in multistrato sono appunto ricavati da tavole della serie Tuttopioppo di Panguaneta, di dimensioni 3100 x 1530 mm 18 mm di spessore a 9 strati. Questo spessore è stato adottato in base all'esperienza acquisita analizzando il caso studio Wiki Farm House: in questo modo si ha la certezza che non si stia lavorando con spessori troppo esigui che rischierebbero di cedere sotto il peso degli elementi costruiti.

IV.1.1 Problematiche spaziali

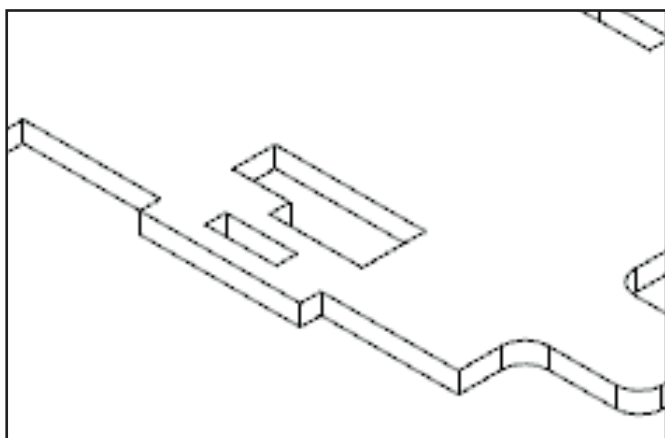
Per realizzare questi componenti in modo che potessero essere parte della struttura, si è deciso di adottare la tecnica costruttiva di tipo WikiHouse e modificare i diversi componenti per fare in modo da poter inserire gli scatolari nell'intercapedine che si sarebbe formata tra i pannelli di rivestimento interno ed esterno. Questo tipo di struttura infatti è progettata per non aver bisogno di elementi come chiodi o viti per il suo assemblaggio. I componenti sono dotati di una serie di incastri a pettine che semplificano notevolmente il processo di assemblaggio predisponendolo così all'autocostruzione.

Su questa tecnica costruttiva open-source è disponibile un maggiore quantitativo di materiale consultabile

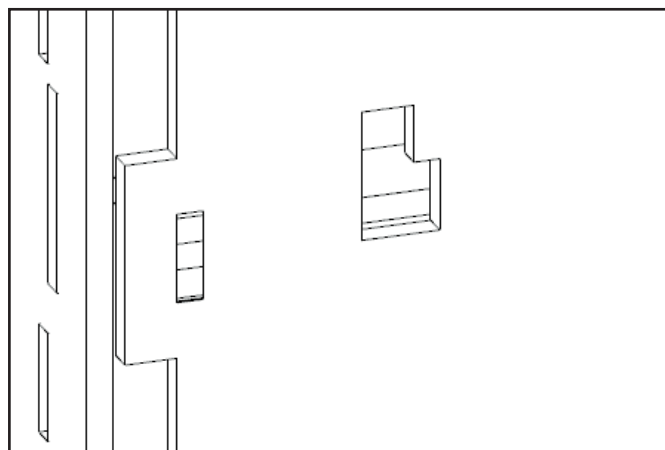
e dal quale trarre insegnamento, per questo motivo si è scelto di approfondirla e cercare di migliorare alcuni suoi aspetti.

La struttura a portali originale non permetteva di agganciare alcunché su di essa se non i pezzi già esistenti ma per l'inserimento degli scatolari di isolamento e del controtelaio per gli infissi sono state necessarie delle modifiche ai singoli elementi in compensato.

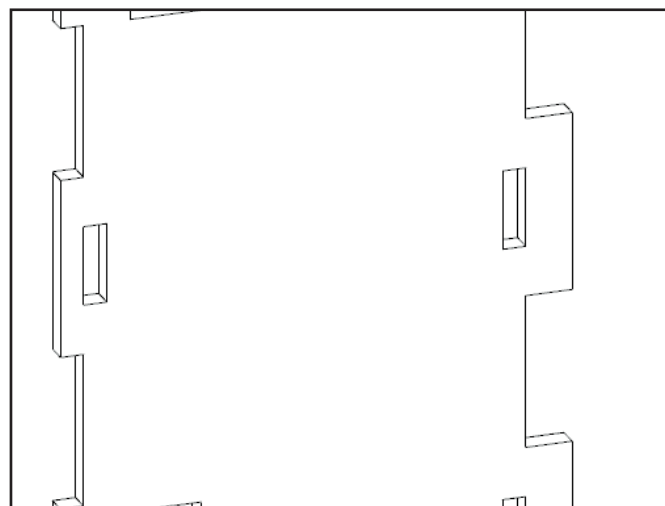
Le modifiche hanno interessato principalmente i componenti dei portali come i connettori, la dentatura esterna delle cornici dei portali, i distanziali interni di rinforzo, i pannelli interni ed esterni di rivestimento in corrispondenza delle finestre, la parte interna delle cornici dei portali sia in corrispondenza degli scatolari isolanti sia in corrispondenza dei serramenti.



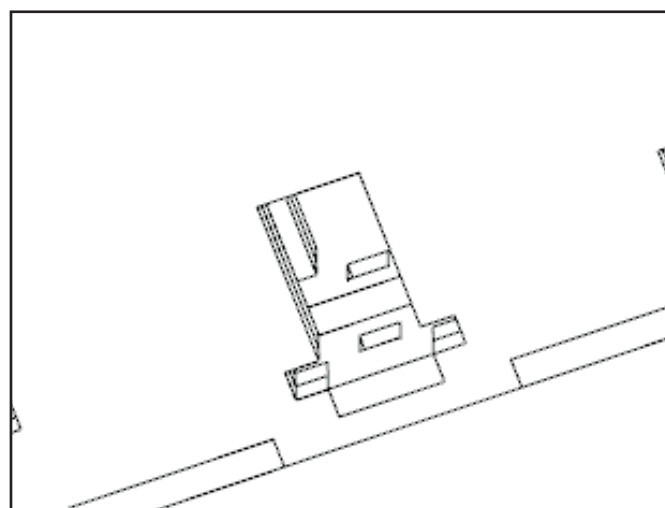
Particolare forature per il posizionamento degli scatolari di isolamento



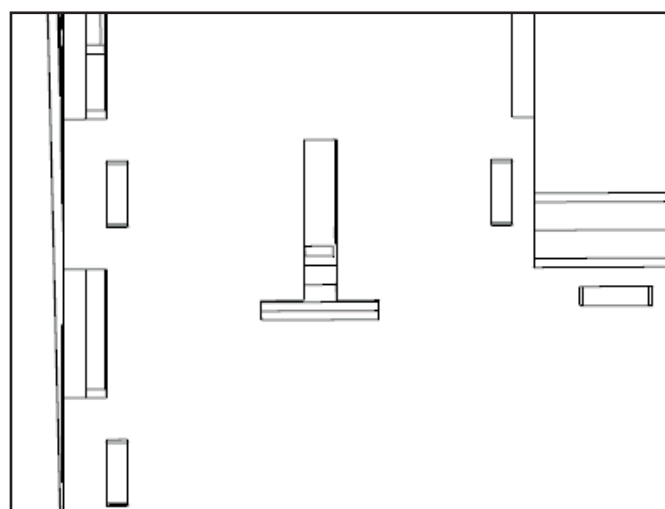
Particolare forature per il posizionamento del controtelaio per infissi



Particolare della dentatura esterna che ha una profondità doppia rispetto a quella interna



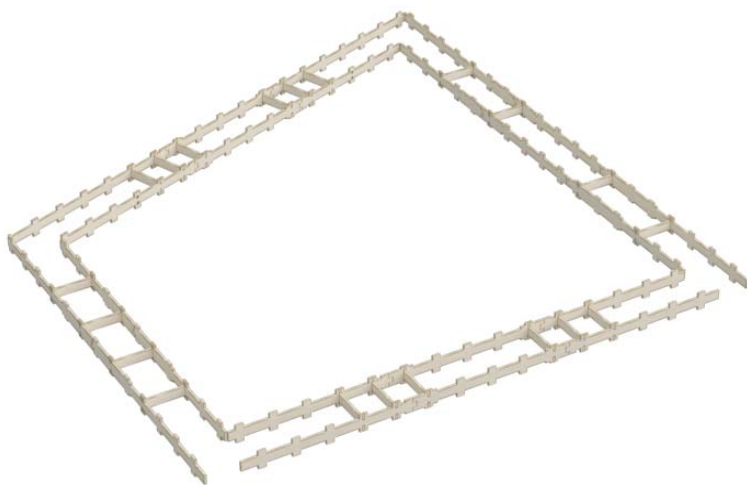
Particolare forature per il posizionamento e bloccaggio dei connettori alti



Particolare forature per il posizionamento dei connettori bassi

IV.2 - Assemblaggio componenti della struttura

Assemblaggio dei distanziali interni di rinforzo sui distanziali a pettine

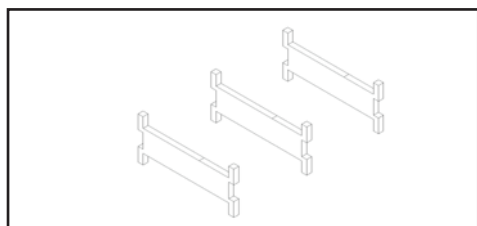


Il primo passaggio prevede il montaggio di questi due componenti che costituiscono la base strutturale di ogni portale.

I componenti vengono tagliati tramite fresa CNC da una tavola di multistrato di pioppo di spessore 18 mm a 9 strati.

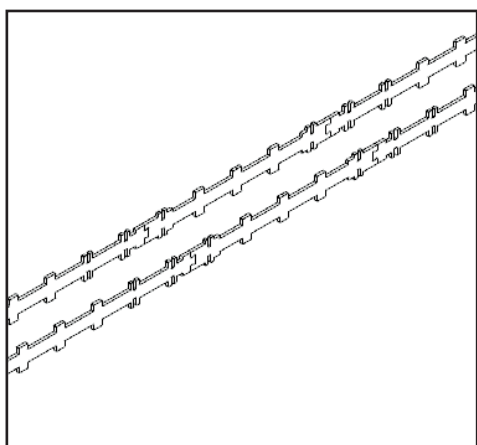
I pezzi vengono sistemati in piano a formare la sagoma del portale per agevolare le fasi successive.

Distanziali interni di rinforzo



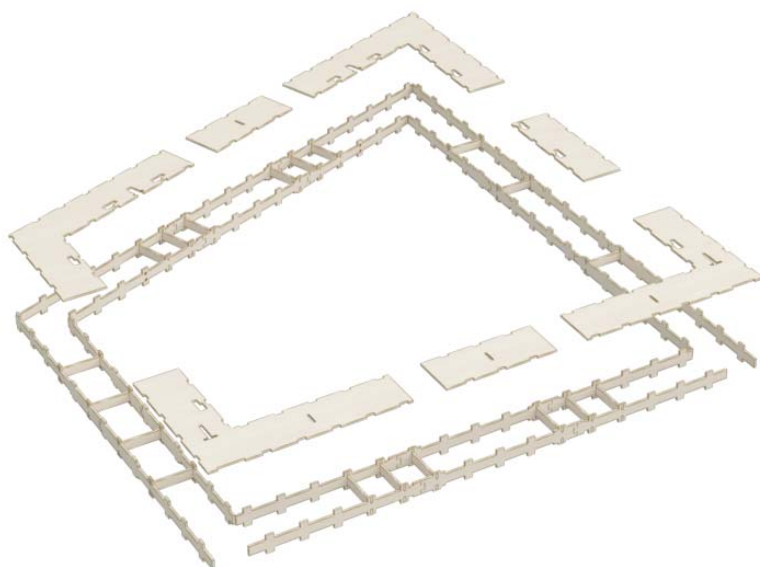
La struttura di ogni portale comprende 20 distanziali di questo tipo. Essi contribuiscono a rafforzare l'intera struttura per evitare che i distanziali a pettine si spostino sotto la forza delle spinte orizzontali o verticali. La loro forma è stata modificata rispetto quella ideata da WikiHouse per permettere di ospitare gli scatolari di isolamento in compensato.

Distanziali a pettine



Questi componenti sono disegnati su misura per ogni lato della struttura sia interno che esterno; la struttura di ogni portale comprende 22 pezzi di questo tipo. Per facilitare il taglio di questi componenti infatti, come ogni componente eccessivamente lungo per un foglio di compensato, sono stati divisi in più pezzi che si montano ad incastro tra loro. Essi presentano un dentatura che servirà poi al posizionamento dei pannelli di rinforzo della cornice ed all'incastro dei pezzi della cornice esterna. La dentatura ha due diverse lunghezze: 18 mm per le parti che non prevedono l'inserimento dei pannelli di rinforzo della cornice ed invece 36 mm per le parti che lo prevedono. Questo tipo di componente è stato ripreso fedelmente dal sistema costruttivo adottato da WikiHouse.

Assemblaggio dei pannelli di rinforzo della cornice

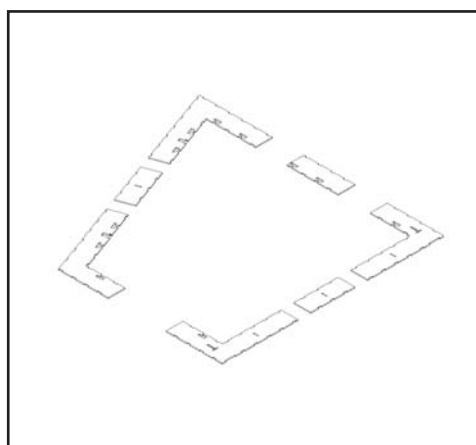


Il secondo passaggio prevede il montaggio di questo componente che costituisce il rinforzo strutturale di ogni portale.

I componenti vengono tagliati tramite fresa CNC da una tavola di multistrato di pioppo di spessore 18 mm a 9 strati.

I pezzi vengono sistemati in piano a formare la sagoma del portale e vengono disposti negli appositi spazi ricavati nella dentatura dei distanziali a pettine.

Pannelli di rinforzo della cornice

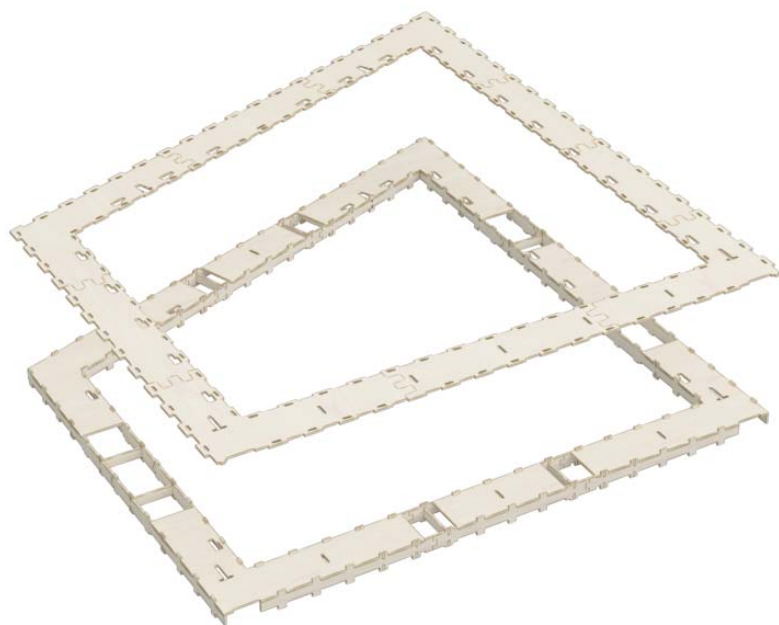


La struttura di ogni portale comprende 14 pannelli di questo tipo. Essi vengono inseriti su entrambi i lati del portale ed hanno la funzione di rafforzare l'intera struttura sia per contrastare l'effetto dei carichi su di essa, raddoppiando lo spessore ogni qualvolta vi è un cambio di geometria, sia per rafforzare i punti di giunzione tra i diversi pannelli che compongono la cornice esterna. La loro forma è stata modificata rispetto quella ideata da WikiHouse per agevolare il l'assemblaggio del portale: essi infatti non vengono incastrati ai distanziali a pettine infilandoli nella dentatura, ma vengono semplicemente appoggiati ad essi per conferire maggiore stabilità di

tutti i componenti nel momento in cui verranno incastrati i pannelli esterni della cornice e stabilizzare l'isolante in lana di pecora che viene inserito all'interno di ogni portale per velocizzare l'intero processo di assemblaggio. Inoltre su di essi sono praticati i diversi fori che serviranno sia all'incastrò dei distanziali di sostegno alla pavimentazione, sia all'incastrò dei connettori ed infine all'incastrò degli scatolari di isolante applicati alla struttura.

Particolare di un pannello di rinforzo e del posizionamento dei pannelli di rinforzo rispetto alla struttura formata dai distanziali a pettine e dai distanziali interni di rinforzo.

Assemblaggio dei pannelli della cornice



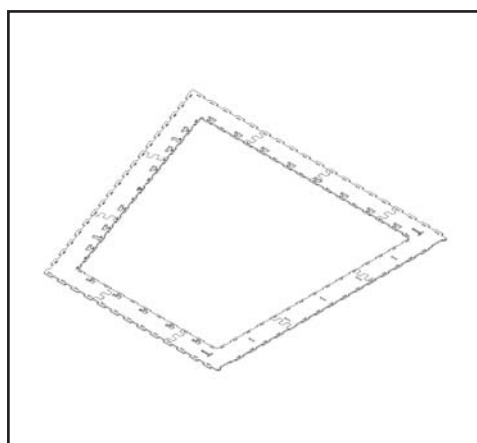
Il terzo passaggio prevede il montaggio di questo componente che costituisce il lato più esterno di ogni portale.

I componenti vengono tagliati tramite fresa CNC da una tavola di multistrato di pioppo di spessore 18 mm a 9 strati.

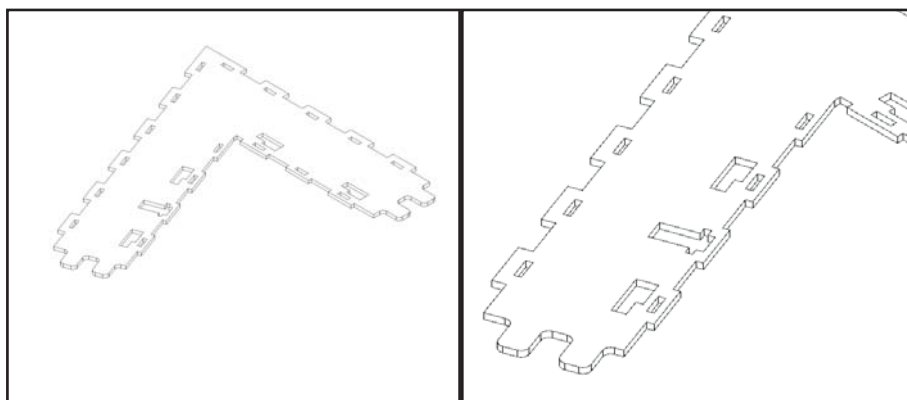
I pezzi vengono montati in piano martellandoli in modo da inserire i denti dei distanziali a pettine all'interno dei fori ricavati nei pannelli per completare la struttura del portale. Terminato un lato della cornice, si capovolge e si procede in sequenza con l'inserimento della lana di pecora e assemblaggio degli

ultimi pannelli di rinforzo e dei pannelli rimanenti per completare la cornice.

Pannelli di rinforzo della cornice



La struttura di ogni portale comprende 18 pannelli di questo tipo. Essi hanno la funzione di rafforzare l'intera struttura e di chiuderla, consolidando la funzione di tutti gli elementi descritti fino a questo momento. La loro forma è stata modificata rispetto quella ideata da WikiHouse: essi infatti presentano le sagomature per l'inserimento dei connettori, dei distanziali a sostegno della pavimentazione e soprattutto degli scatolari di isolamento riempiti di cellulosa insufflata. Per permettere l'incastro di quest'ultimo elemento tecnologico sull'intera struttura sono state raddoppiate le misure di tutta la dentatura esterna da 18 mm a 36 mm. Esattamente come i pannelli di rinforzo della cornice, vengono applicati su entrambi i lati del portale. Tutti gli elementi che compongono la cornice sono incastrati tra loro tramite incastri a pettine smussato per agevolare sia la fase del taglio, per non avere pezzi troppo lunghi per le misure standard dei pannelli di multistrato, che quella del trasporto.



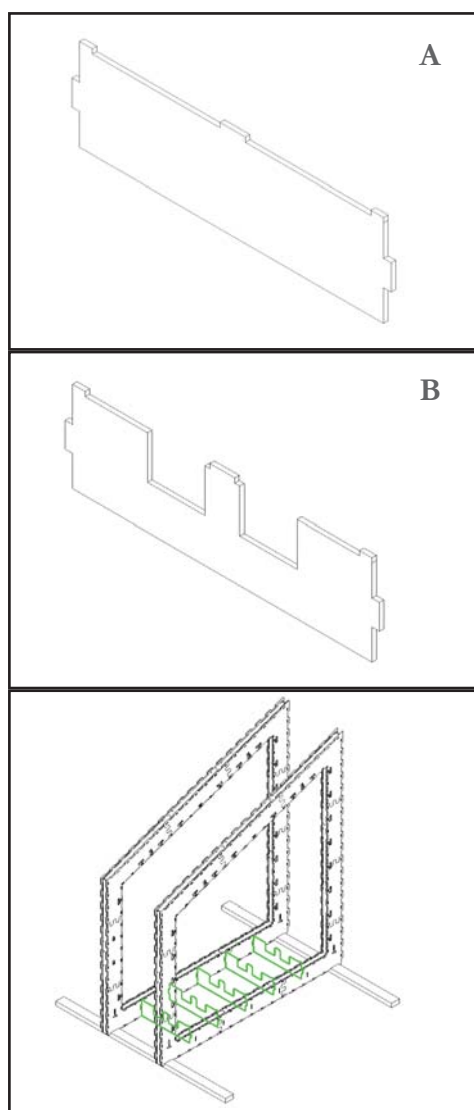
Particolare di un pannello della cornice, del tipo di dentatura esterna e delle sagomature per l'inserimento dei diversi componenti.

Assemblaggio delle cornici



Il quarto passaggio prevede il montaggio dei diversi portali assemblati. L'interasse per un giusto posizionamento viene scandito con l'aiuto dei distanziali di supporto alla pavimentazione, che permettono un veloce montaggio. Essi vengono semplicemente inseriti negli appositi fori praticati sulla cornice. Una volta posizionati i portali, il tutto viene fissato grazie ai connettori che a loro volta, inseriti nelle apposite sagomature, si incastrano tra loro tramite dei chiodi ricavati dal multistrato.

Distanziali di supporto alla pavimentazione

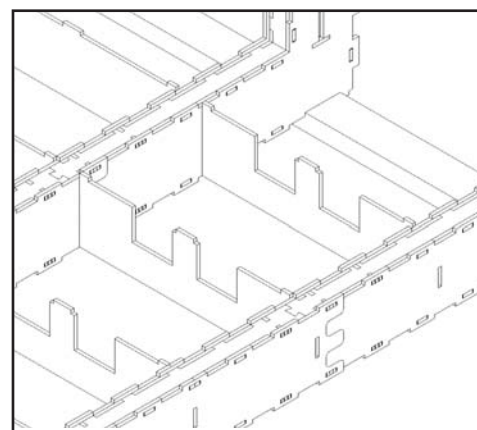


Nell'interasse tra ogni portale vengono inseriti 5 distanziali di questo tipo. Essi oltre ad avere la funzione di agevolare il collegamento tra i diversi portali che compongono la struttura, svolgono principalmente il ruolo di sostegno dei pannelli che andranno a formare il piano di calpestio dell'edificio. Nel lato superiore infatti presentano una dentatura che permette di incastrarvi questi ultimi. Il sistema formato da questi distanziali, sommato ai pannelli di rivestimento della pavimentazione interna che si agganciano direttamente ai portali, costituiscono un ulteriore ancoraggio ed irrobustimento dell'intero edificio.

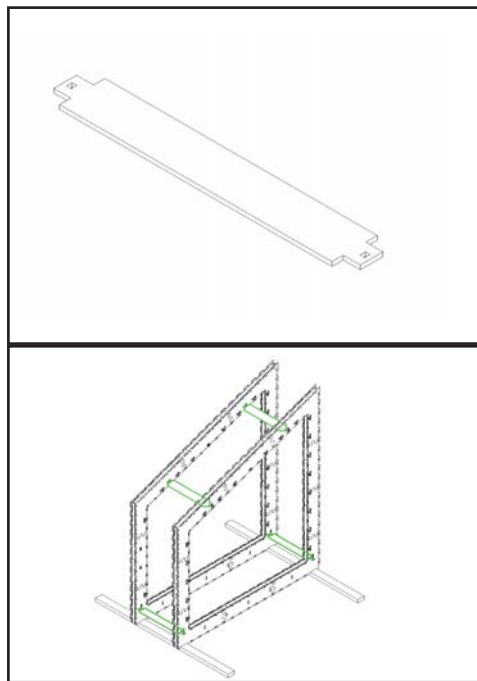
Sono stati progettati due tipi di pannello: uno completamente pieno [A] ed un altro che è stato sagomato in modo da consentire il passaggio dei tubi degli impianti, come le tubature di acqua calda e fredda, scarichi e cablaggi [B].

A sinistra, è rappresentato il particolare del posizionamento dei pannelli all'interno della struttura.

A destra invece, il particolare degli incastri su cui verranno posati i pannelli in multistrato per la pavimentazione interna.



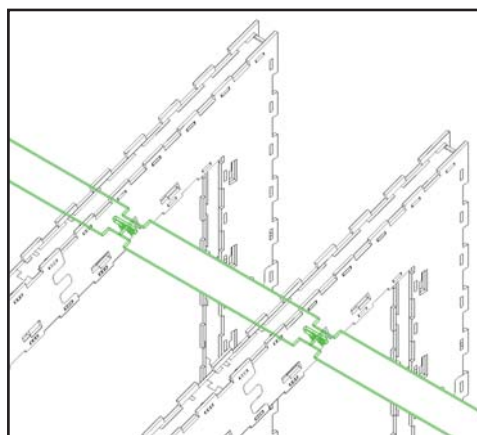
Connettori



Nell'interasse tra ogni portale vengono inseriti 4 connettori di questo tipo.

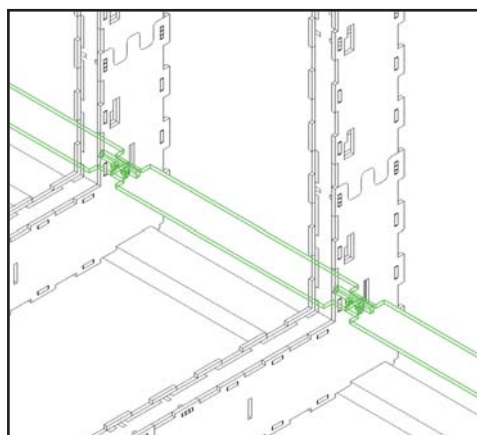
Essi oltre ad avere la funzione di agevolare il collegamento tra i diversi portali che compongono la struttura, collegano tutti i portali conferendogli stabilità ed evitano che la struttura dei portali possa aprirsi sotto l'azione delle forze. Rispetto a WikiHouse sono stati ideati questo tipo di connettori che risultano meno invasivi a livello di ingombro nell'intercapedine sia del soffitto che delle mura. Nel soffitto il connettore viene posizionato al di sotto degli scatolari in multistrato riempiti di fiocchi di cellulosa; nell'intercapedine muraria invece assume una posizione al di sotto degli scatolari, e per mantenere continuità di isolamento verrà inglobato all'interno dei pannelli in fibra di canapa utilizzati per isolare la pavimentazione. Questi connettori sono soltanto una piccola resistenza strutturale che inizialmente semplifica le fasi di assemblaggio e successivamente aiuteranno a rafforzare gli angoli alti e bassi della struttura dei diversi portali.

Connettore inserito nel soffitto: particolari relativi all'inserimento



Il connettore viene sistemato nei fori praticati nei portali ed infilato fino in fondo. Il pezzo è progettato perché funga anche da distanziale per evitare movimenti nella parte alta della struttura. Il posizionamento prima dell'innesto del pannello centrale della cornice è studiato per ridurre le sollecitazioni che forze esterne potrebbero esercitare sugli angoli alti della struttura. Per questo tipo di posizionamento è stato ideato un fermo "a scomparsa" che una volta posizionato non rappresenta un ostacolo per il successivo inserimento degli scatolari di isolamento.

Connettore inserito nell'intercapedine muraria: particolari relativi all'inserimento



Il connettore viene sistemato nei fori praticati nei portali ed infilato fino in fondo. Il pezzo è progettato perché funga anche da distanziale per evitare movimenti nella parte alta della struttura. Il posizionamento negli angoli inferiori della struttura è studiato per ridurre le sollecitazioni che potrebbero essere esercitate da una forza esterna. Per questo tipo di posizionamento è stato ideato un chiodo che una volta posizionato può essere facilmente rimosso grazie ai lati lunghi sporgenti, nonostante siano applicati in una fessura ben più stretta dei precedenti fermi descritti.

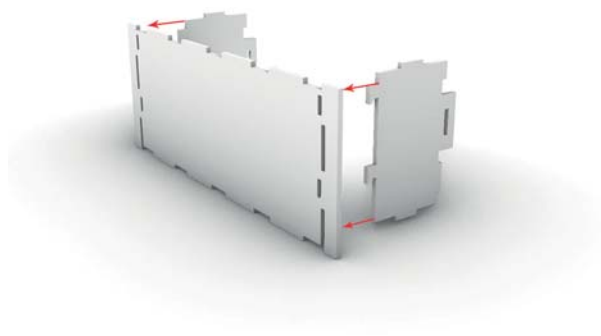
Inserimento degli scatolari in multistrato riempiti di fiocchi di cellulosa



sul pannello esterno e, tramite un gancio in legno multistrato che li fissa alla parte interna dei portali. Tutti gli scatolari vengono inseriti dall'esterno verso l'interno e tutti, meno quelli angolari, possono essere assemblati e montati senza l'uso di viti o chiodi.

Assemblaggio degli scatolari.

Tutti i componenti che formano i diversi scatolari sono disegnati al CAD e tagliati tramite frese CNC, da pannelli di multistrato 18 mm. Uno scatolare è composto in media da 13 pezzi che vengono montati ad incastro tra loro. Fanno eccezione gli scatolari di isolamento angolare che a causa della forma irregolare necessitano di viti per essere assemblati. Per questo motivo verranno illustrati i passaggi per montare le altre due tipologie che adottano la stessa procedura.



Partendo dal pannello di base I1 che presenta gli incastri per l'aggancio alla dentatura esterna delle cornici, vengono inseriti i ganci sagomati nei due pannelli laterali I2. Essi vengono inseriti all'interno degli appositi fori praticati nel pannello I1.

Successivamente essi vengono spinti verso il basso terminando l'aggancio al pannello di base. Questo é indispensabile al fine di evitare che i pannelli laterali possano muoversi.

Si procede con l'inserimento di alcuni chiodi, sempre ricavati dal multistrato di pioppo di 18 mm, per bloccare l'incastro dei tre pannelli ed evitare che i componenti si possano muovere.

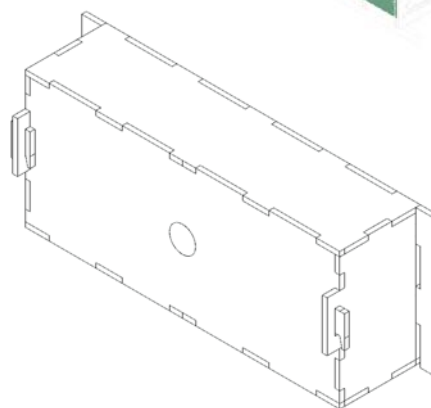
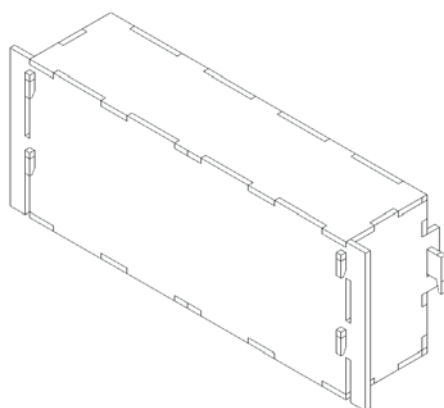
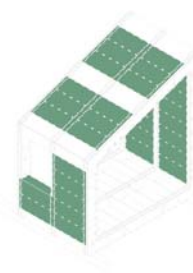
La serie di incastri a pettine che si sono così allineati sulla base e sulla somità permettono l'inserimento di altri due pannelli laterali I3 che vengono incastrati come in figura.

L'ultimo lato che viene incastrato é il coperchio denominato I4, che presenta incastri a pettine per essere martellato e così bloccare l'intero componente.. Anche questo componente non necessita di ulteriori elementi per essere montato e lo scatolare risultante possiede già la resistenza desiderata.

L'ultima fase consiste nel riempire la cavità dello scatolare così ottenuto mediante di fiocchi di cellulosa insufflati a pressione. A seconda della pressione di insufflaggio si avrà una densità maggiore o minore e questo influenza il peso e la trasmittanza termica dell'elemento finito. Dopo questo passaggio si può procedere nell'applicare il tappo in multistrato come illustrato in figura..

Tipologie di scatolare in multistrato

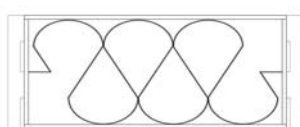
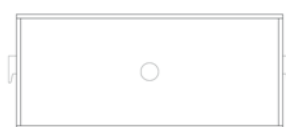
Scatolare di isolamento delle pareti perimetrali e di copertura



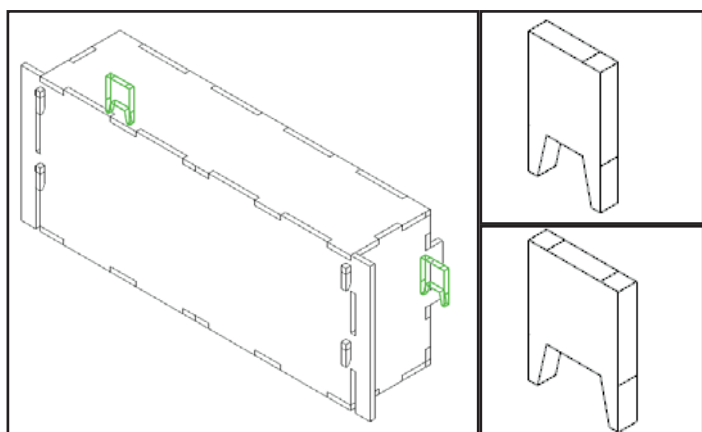
Sezione A-A'

Sezione B-B'

Sezione C-C'



Questo tipo di scatolare viene ripetuto in ogni campata 19 volte. Per realizzarlo sono necessari complessivamente $2,27 \text{ m}^2$ di multistrato di pioppo. Viene agganciato alla struttura tramite i fori praticati nel pannello di base e tramite due tipologie di ganci in compensato che servono a fissarlo nella parte interna dei portali. I due ganci in compensato differiscono tra loro per misura e viene impiegato l'uno o l'altro a seconda dello spessore interno del portale. lo spessore che devono compensare é quello di 18 mm dell'occhiello dello scatolare e 18 mm del lato del portale nel caso in cui non vi sia un doppio spessore a causa dei pannelli di rinforzo della cornice che misurano ulteriori 18 mm. Il peso di questo elemento é di 16 kg a cui si sommano 8.32 kg di cellulosa, raggiungendo un peso complessivo di 25 kg

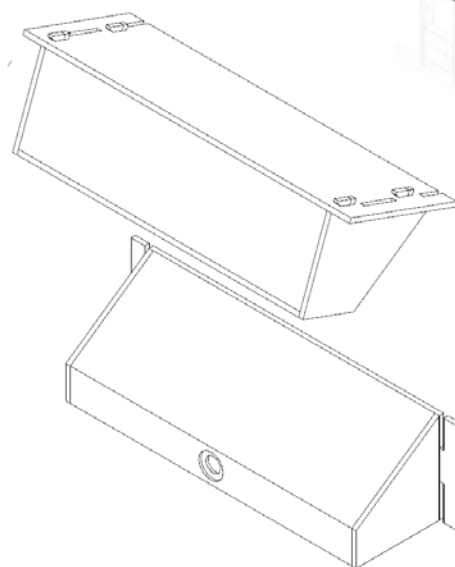
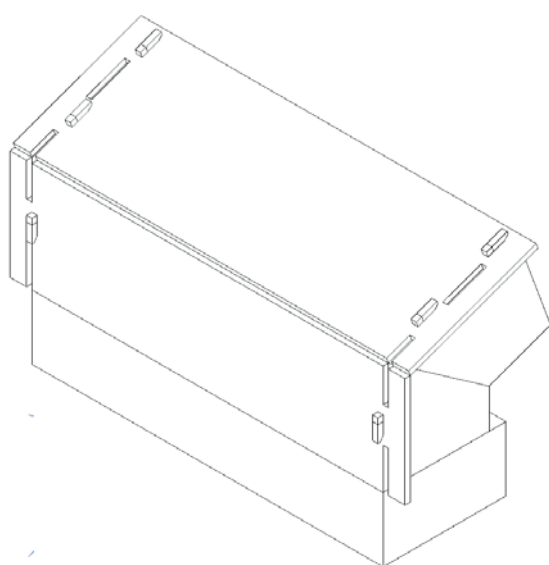


Particolare dell'inserimento dei ganci di bloccaggio in multistrato e della geometria dei due tipi di gancio impiegati.

In alto il gancio che copre uno spessore di 36 mm.

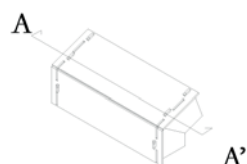
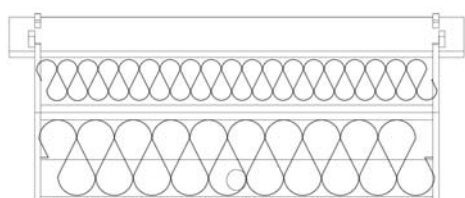
In basso il gancio che copre uno spessore di 54 mm.

Scatolare di isolamento dell'angolo inferiore di copertura

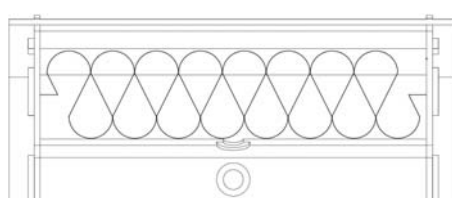


Questo tipo di scatolare viene ripetuto in ogni campata 1 volta. Per realizzarlo sono necessari complessivamente 3.69 m^2 di multistrato di pioppo. Viene agganciato alla struttura tramite i fori praticati nel pannello di base. Esso si compone di due elementi, come è possibile notare in figura: quello inferiore poggia direttamente sul cassone in purenit in cui viene montato il sistema di schermatura solare esterno avvolgibile; quello superiore viene semplicemente inserito tramite le forature presenti nel pannello di base che si aggancia ai portali. Entrambi gli elementi presentano la foratura per l'insufflaggio dei fiocchi di cellulosa al loro interno. A causa della loro irregolarità geometrica, per l'assemblaggio dei loro componenti sono necessarie delle viti per legno, che all'occorrenza agevolano anche l'opera di smontaggio. Il peso di questo elemento è di 27.82 kg a cui si sommano 10.34 kg di cellulosa, raggiungendo un peso complessivo di 38 kg . Esso viene diviso tra i due elementi raggiungendo circa 19 kg ciascuno.

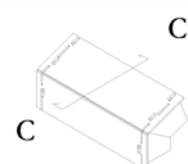
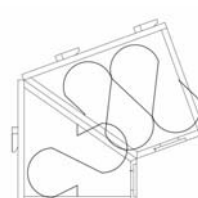
Sezione A-A'



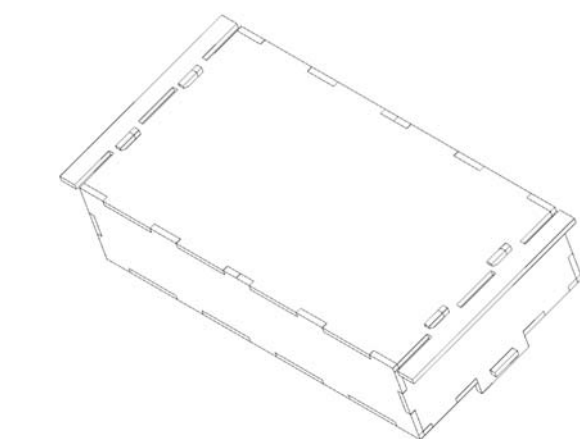
Sezione B-B'



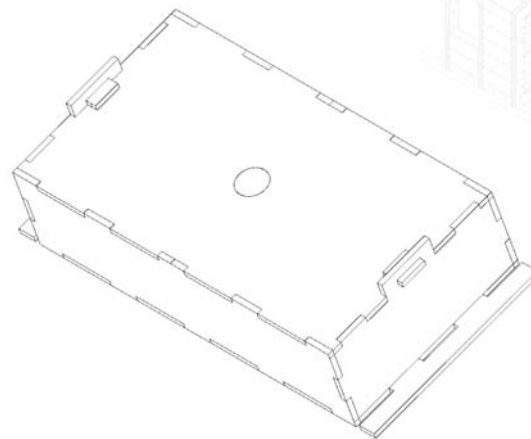
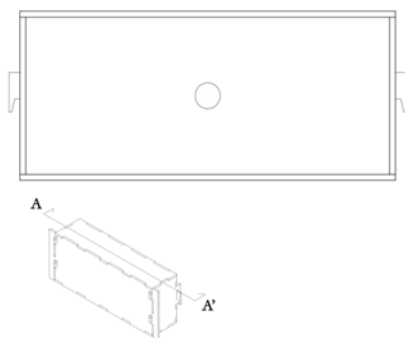
Sezione C-C'



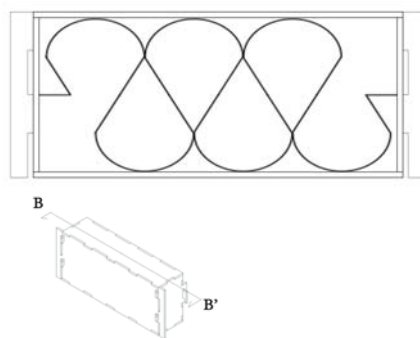
Scatolare di isolamento centrale in copertura



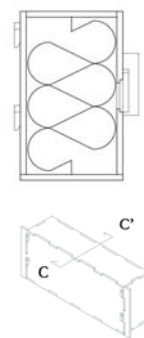
Sezione A-A'



Sezione B-B'

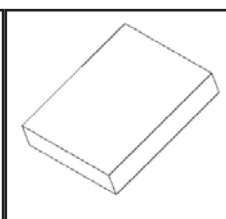
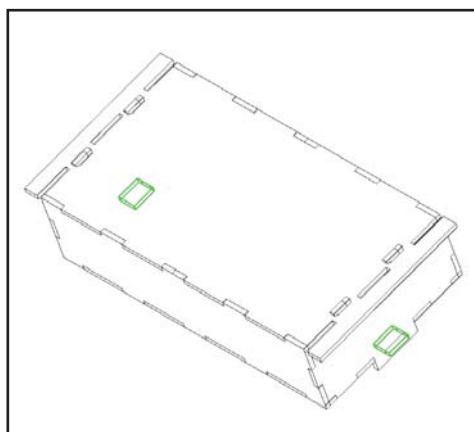


Sezione C-C'



Questo tipo di scatolare viene ripetuto in ogni campata 1 volta. Per realizzarlo sono necessari complessivamente $2,7 \text{ m}^2$ di multistrato di pioppo. Viene agganciato alla struttura tramite i fori praticati nel pannello di base e tramite una terza tipologia di ganci in compensato che serve a fissarlo nella parte interna dei portali.

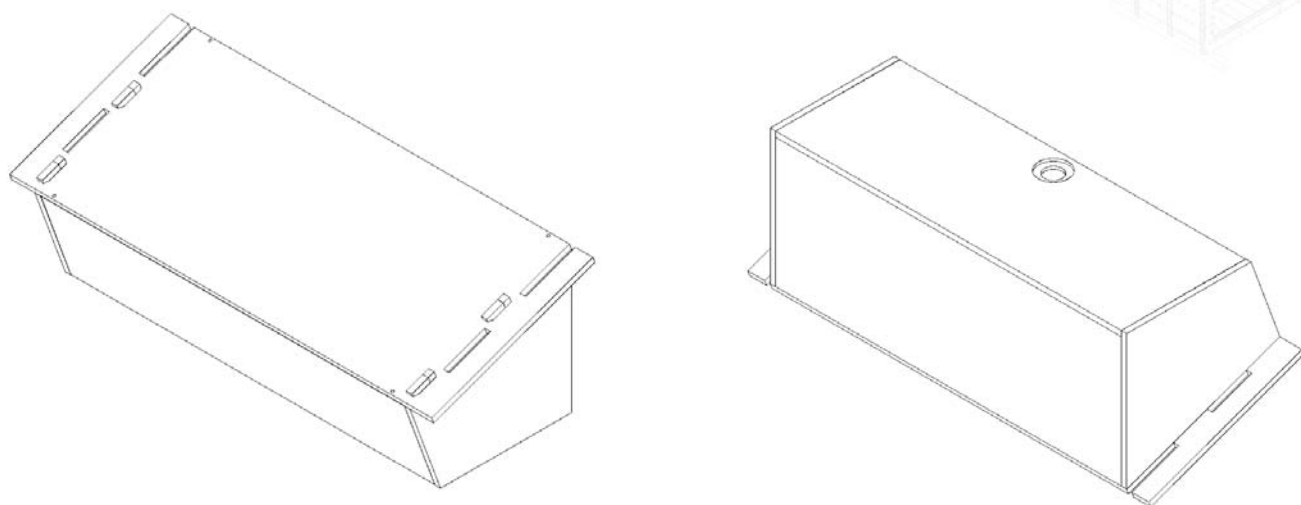
La dimensione di questo scatolare dipende fortemente dallo spazio da colmare al centro della copertura, che rappresenta un formato più grande rispetto agli scatolari utilizzati nelle pareti perimetrali e in una parte di copertura,; uno spazio troppo ampio per un solo scatolare di questo ultimo tipo e troppo stretto per poterne inserire due. Rispetto alla procedura di inserimento degli altri scatolari, questo viene semplicemente infilato dall'altro e funge da elemento di blocco per impedire il movimento di tutti gli altri. Per questo motivo viene montato come ultimo componente isolante nella campata. Il peso di questo elemento é di 19.98 kg a cui si sommano 9.4 kg di cellulosa, raggiungendo un peso complessivo di 29 kg



Particolare dell'inserimento del gancio di bloccaggio in multistrato e della sua geometria

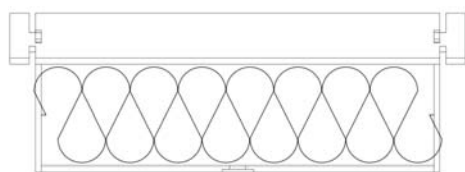
Questa terza tipologia di gancio ha uno spessore di 18 mm.

Scatolare di isolamento dell'angolo superiore di copertura

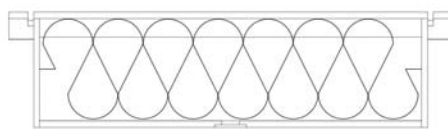


Questo tipo di scatolare viene ripetuto in ogni campata 1 volta. Per realizzarlo sono necessari complessivamente $2,41 \text{ m}^2$ di multistrato di pioppo. Viene agganciato alla struttura tramite i fori praticati nel pannello di base. Esso costituisce una geometria unica, che da solo riesce a colmare il vuoto nell'angolo alto della struttura. Anche quest'ultimo presenta la foratura per l'insufflaggio dei fiocchi di cellulosa al suo interno. A causa della sua irregolarità geometrica, per l'assemblaggio dei suoi componenti sono necessarie delle viti per legno, che all'occorrenza agevolano anche l'opera di smontaggio. Il peso di questo elemento é di $17,98 \text{ kg}$ a cui si sommano $8,46 \text{ kg}$ di cellulosa, raggiungendo un peso complessivo di 26 kg .

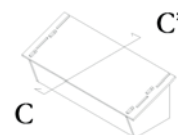
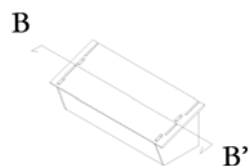
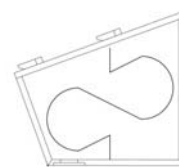
Sezione A-A'



Sezione B-B'

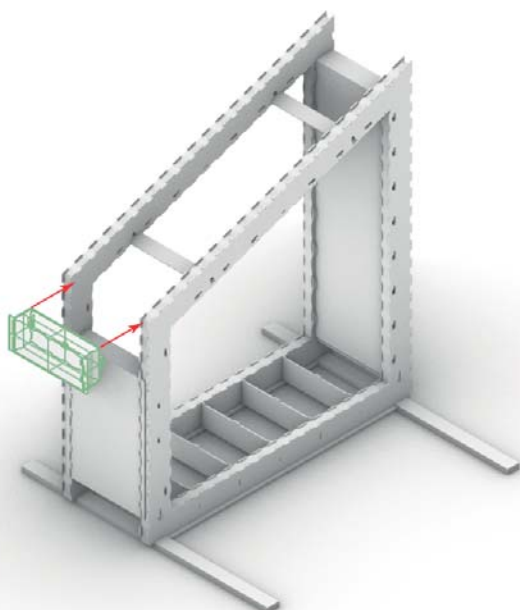


Sezione C-C'

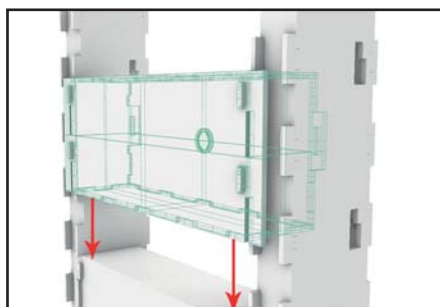
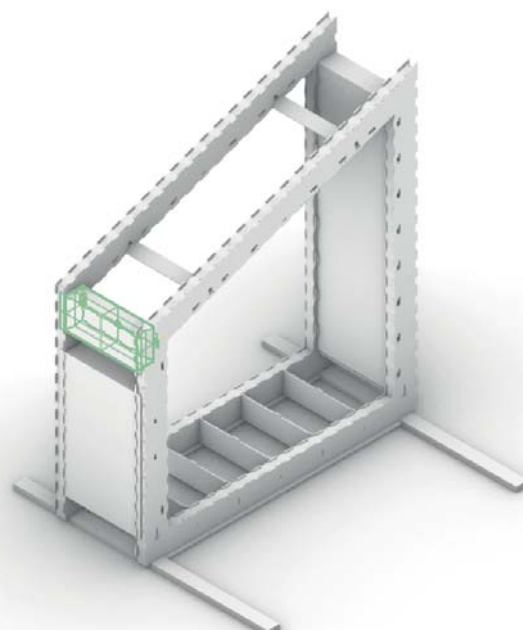


Sequenza di montaggio

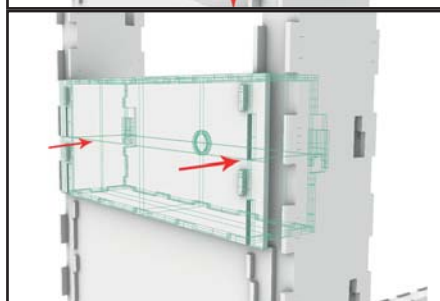
1 -



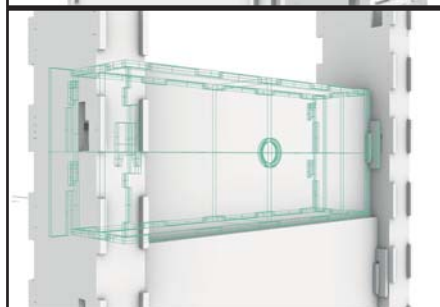
2 -



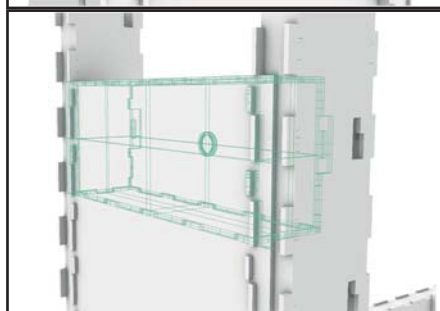
- 3



- 4



- 5



- 6

La fase di montaggio degli scatolari di isolamento alla struttura dei portali si articola principalmente in 4 passaggi fondamentali.

Inizialmente si solleva lo scatolare [1] e lo si inserisce nell'interasse dei due portali [2] in modo da far sfiorare al pannello di base gli incastri a pettine della parte esterna dei portali come in figura 3. Successivamente lo scatolare viene spinto verso il basso [3]: durante questo passaggio vengono inseriti i ganci di bloccaggio che, una volta inseriti permettono di impedire allo scatolare di scendere più di quanto necessario.

Nel momento in cui la discesa viene bloccata, il box viene spinto in avanti [4-5] incastrando la dentatura a pettine dei portali all'interno delle forature praticate nel pannello di base dell'elemento. In questo modo si otterrà una superficie continua che irrobustisce l'intera struttura e forma uno strato continuo di isolamento [6].

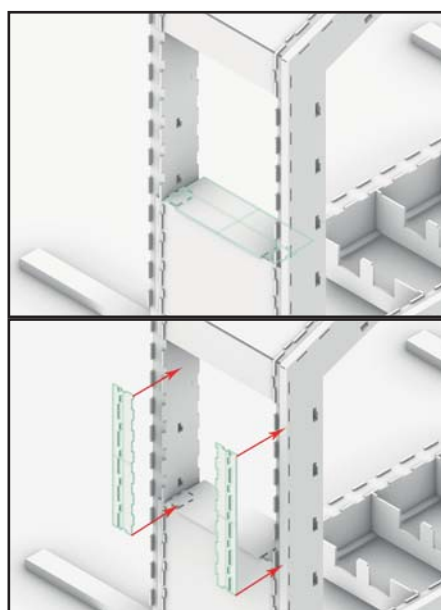
Assemblaggio controtelaio isolato per infisso e pannelli chiusura inferiore.



In questa fase, come si evince dall'immagine, vengono montati i componenti che andranno a formare il controtelaio isolato dell'infisso ed i componenti di chiusura inferiore del solaio contro terra, in modo da potervi inserire i pannelli di isolante in fibra di canapa. Il primo componente montato è stato progettato per consentire di smorzare il ponte termico che altrimenti verrebbe a formarsi in un tradizionale sistema WikiHouse con infissi a raso della facciata. Il secondo componente invece è stato progettato per facilitare l'opera di posa dell'isolante nell'intercapedine che si viene a formare. I pannelli di chiusura denominati E3 ed E4 vengono semplicemente posati tra un distanziale di supporto della pavimentazione e l'altro.

In questo modo sarà facilitata anche l'opera di decostruzione che permetterà di ottenere dei pannelli integri pronti per poter essere reimpiegati per la costruzione di altre strutture o altro.

Schema di assemblaggio controtelaio per infisso



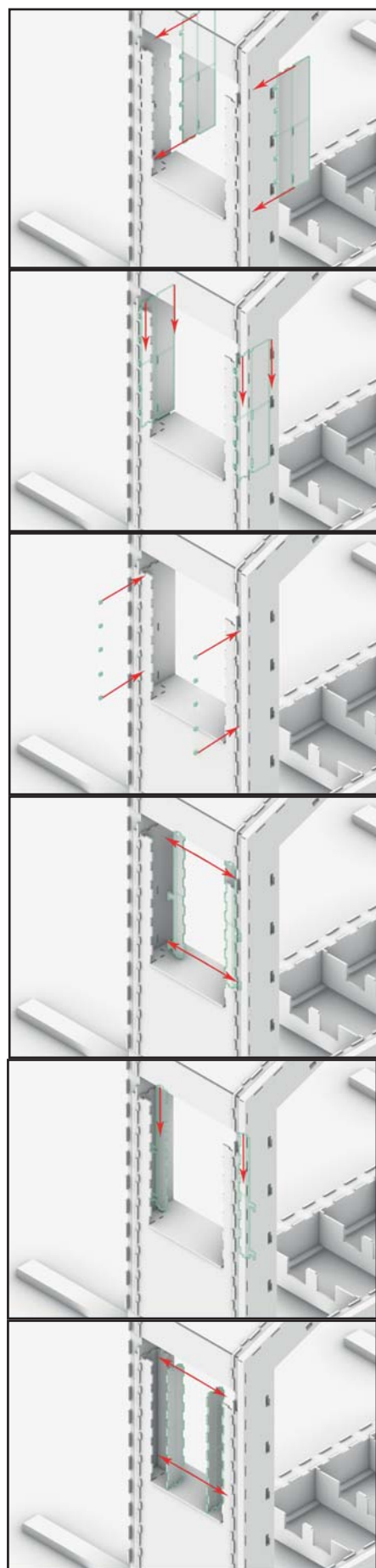
- 1

La fase di montaggio dei componenti del controtelaio isolato si articolano in 10 passi.

Inizialmente si posiziona il primo elemento denominato L1 appoggiandolo sopra lo scatolare di isolamento [1].

- 2

Si procede incastrando nella parte esterna della struttura i due componenti esterni L2 tramite i fori sagomati in cui inserire la dentatura esterna di ciascun portale. [2].



- 3

Successivamente si inseriscono i due componenti laterali L3, paralleli al lato interno dei portali, incastrandone i ganci nei fori dei componenti L2, sagomati per ospitarli [3].

- 4

Questi, una volta inseriti, devono essere spinti verso il basso in modo da incastrare i ganci nei componenti L2 e incastrare gli elementi laterali alla base d'appoggio L1 [4]

- 5

Una volta posizionati possono essere inseriti i chiodi in multistrato per bloccare gli incastri dei due componenti L3 a quelli esterni, così da impedire eventuali movimenti.

- 6

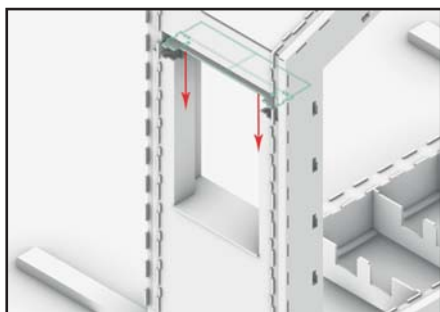
Il seguente passo prevede l'incastrare dei ganci sagomati nei componenti L4 all'interno dei fori praticati nei pannelli della cornice, passanti per i fori dei componenti L3 [6].

- 7

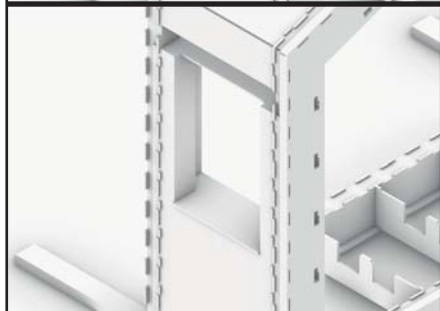
Essi vengono poi spinti verso il basso per incastrare i ganci alla struttura ed incastrare i componenti L4 nei fori praticati su L1 per ospitarli [7].

- 8

Nella parte interna del controtelaio si sono ora allineati gli incastri per poter inserire i componenti L5 [8]. Essi vengono incastrati in modo da formare una cavità all'interno della quale, durante questo passaggio, viene inserito l'isolante in fiocchi di cellulosa.



- 9



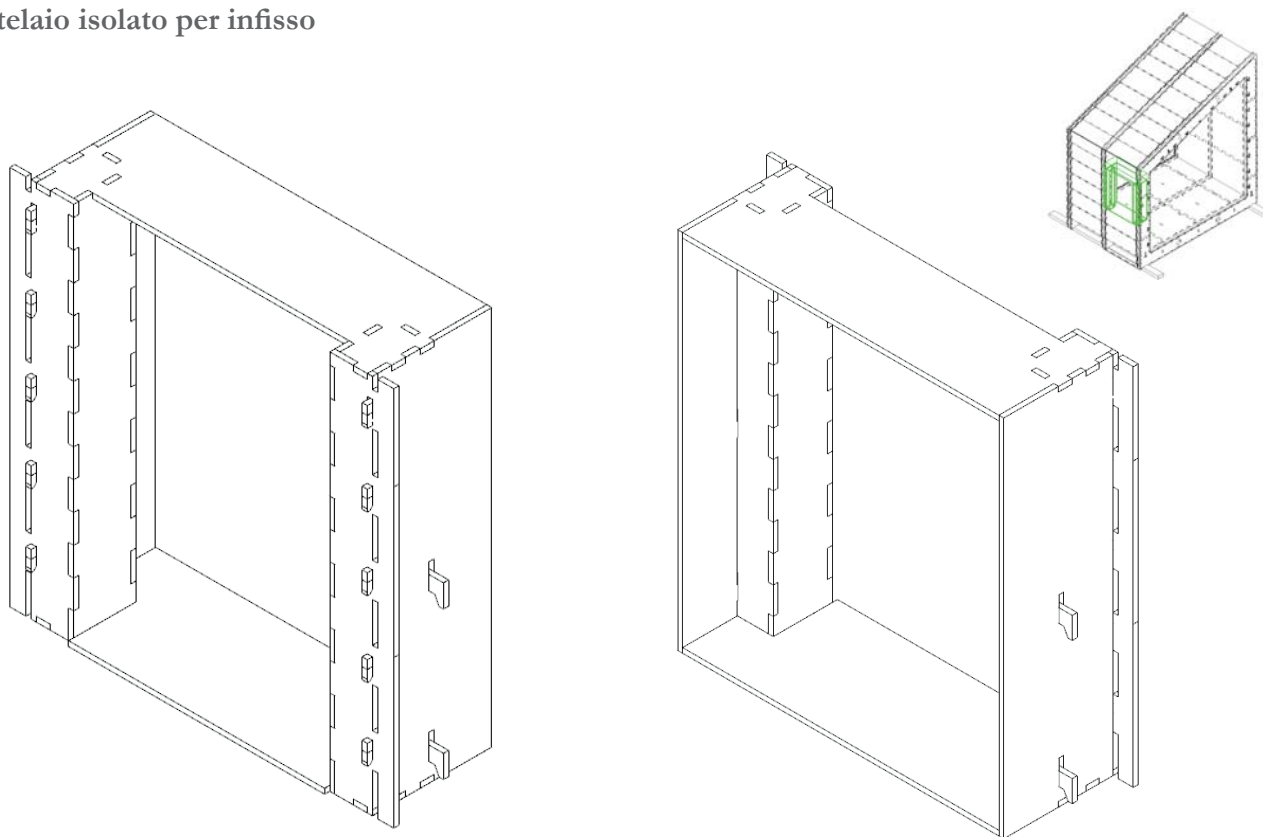
- 10

L'ultimo passaggio prevede l'incastro del pannello L6 che viene martellato sulla serie di incastri che si sono allineati sull'estremità di tutti i componenti.

Questo permette di stabilizzare l'intera struttura e di chiudere l'isolante al suo interno per evitare che si danneggi [9].

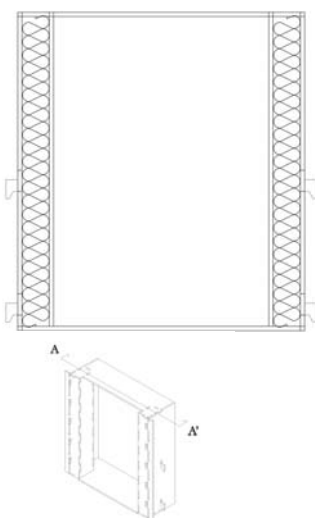
Ora si avrà un controtelaio in linea con i box di isolamento e che sulla sommità presenta un vuoto in cui inserire il cassone per il sistema di schermatura esterna realizzato in purenit, un isolante strutturale che permette intagli e presenta ottime proprietà meccaniche oltre che di isolamento.

Controtelaio isolato per infisso

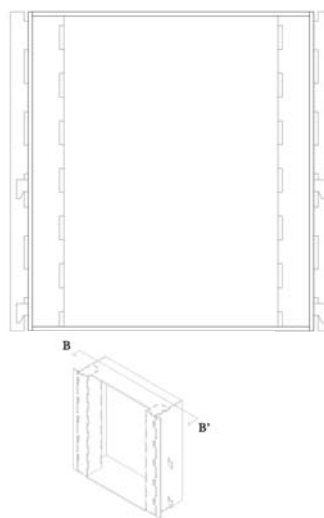


Il controtelaio a cui verrà fissato l'infisso del serramento, è composto principalmente da 10 pezzi e 10 chiodi in multistrato di pioppo 18 mm. Complessivamente vengono impiegati 7.6 m² di multistrato per realizzare ogni controtelaio. Essi si montano direttamente sulla struttura e due ganci di legno per lato assicurano una resistenza maggiore agli sforzi. Come è possibile notare dalle sezioni, nella parte verso l'esterno, vengono ricavate due intercapedini che saranno poi insufflate di fiocchi di cellulosa prima dell'incastro del pezzo finale di chiusura superiore. Queste intercapedini isolate hanno la funzione di smorzare lo sbalzo termico che avremmo in corrispondenza dell'attacco dell'infisso, isolando l'elemento in modo da avere una continuità di isolante ed annullare il ponte termico.

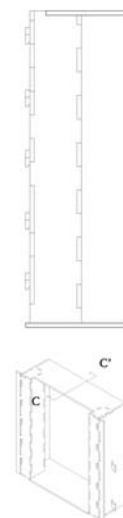
Sezione A-A'



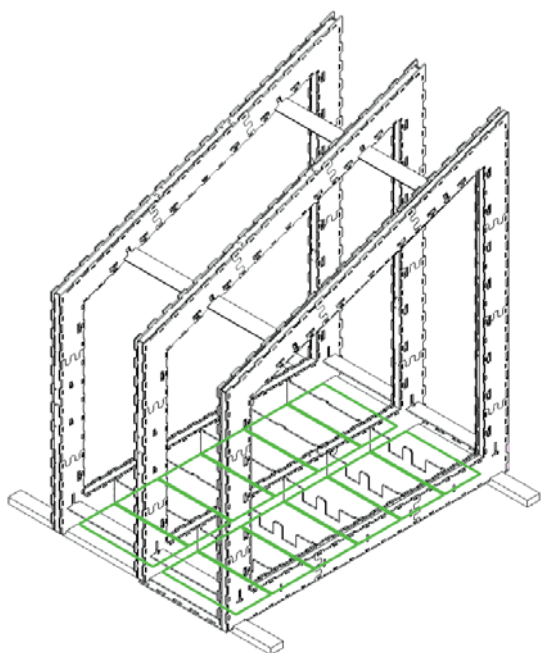
Sezione B-B'



Sezione C-C'



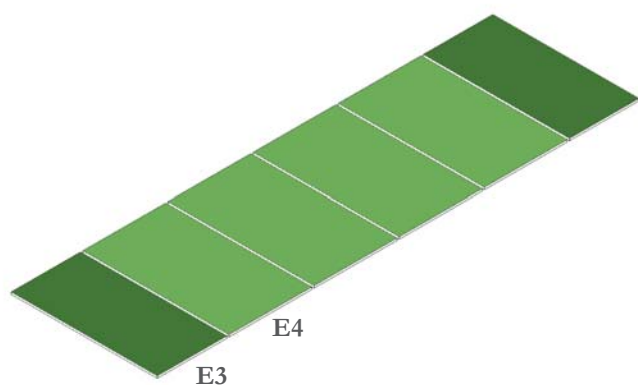
Pannelli di chiusura inferiore



Nell'interasse tra ogni portale vengono inseriti 6 pannelli di chiusura nel lato inferiore del telaio contro terra. Si procede inizialmente con l'incastro dei pannelli di supporto ai pannelli di chiusura inferiore e si prosegue con la posa dei pannelli di chiusura inferiore.

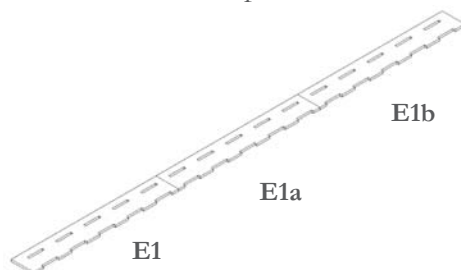
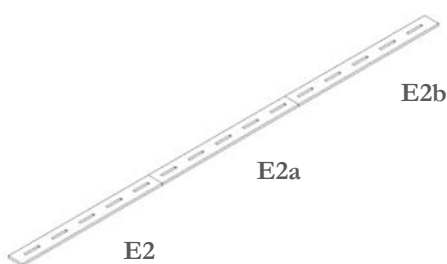
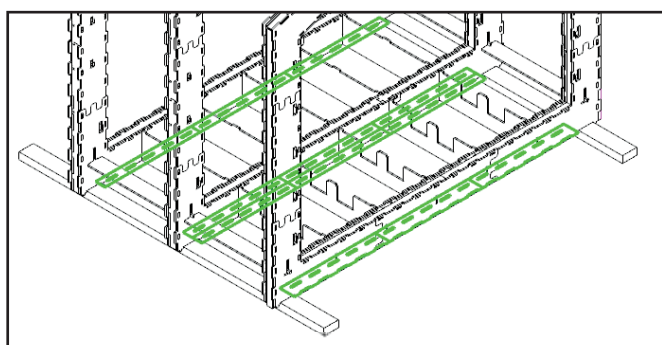
Essi come già accennato, consentono di agevolare la posa dell'isolante in pannelli in fibra di canapa, che verranno soltanto inseriti ed appoggiati su questi pannelli. Anche l'opera di decostruzione viene così semplificata, poiché sarà soltanto necessario sollevare questi pannelli e riporli per poter essere reimpiegati.

Pannelli di chiusura inferiore: tipologie di pannello



Vengono impiegate due tipologie di pannello: una denominata E3 (in figura in verde scuro) che essendo più stretta viene posizionata ai lati esterni, l'altra denominata E4 che invece viene impiegata nella parte centrale. La prima tipologia consente di chiudere la cavità risultante tra i distanziali di supporto alla pavimentazione alle estremità e le travi radice su cui viene poggiata l'intera struttura.

Tipologie pannelli di supporto



Come è possibile notare in figura vengono impiegate due tipologie di pannelli di supporto: la prima tipologia è costituita di pannelli E2, E2a, E2b, che vengono impiegati in tutti i portali eccetto quelli alle estremità; la seconda tipologia è appunto denominata E1, E1a, E1b e viene impiegata nei portali alle estremità della struttura per conferire continuità superficiale e chiudere lo spazio risultante per permettere di fissare le guaine sottostanti la struttura e fissarle adeguatamente.

Assemblaggio pannelli di rivestimento interni ed esterni

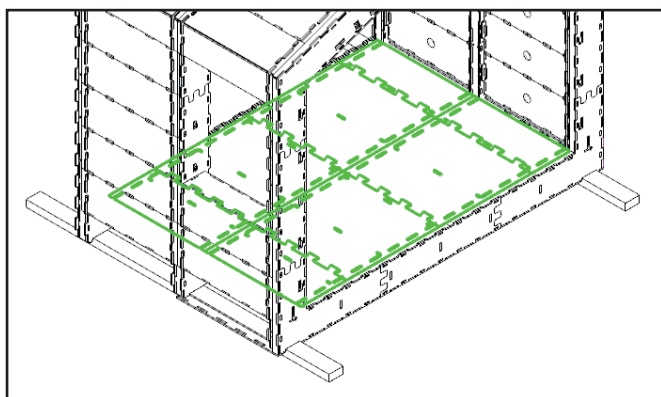
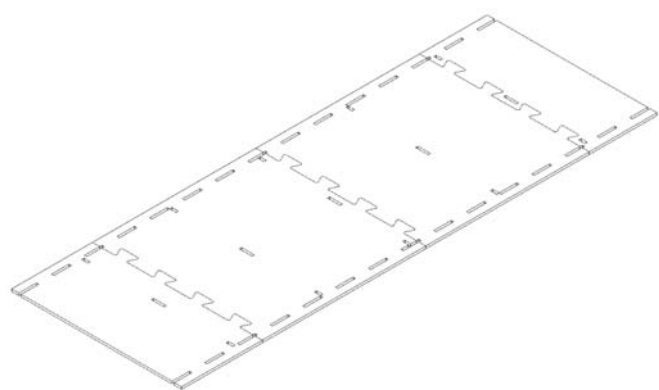


La struttura é pronta per essere rivestita tramite di pannelli in compensato al fine di avere una continuità materica e superficiale. L'assemblaggio di questa serie di pannelli consente poi di proseguire con la stesura ed il fissaggio delle membrane sia esterne che interne, e successivamente con il completamento del rivestimento esterno, ma anche con la posa dei tramezzi interni e dei sistemi di pavimentazione e contropareti per il passaggio degli impianti.

La velocità di questo passaggio e del precedente sono fondamentali per evitare che si possano deteriorare i materiali della struttura in caso di intemperie: il sistema

ad incastro permette di completare l'assemblaggio in pochi passaggi e procedere con la stesura delle membrane protettive in breve tempo.

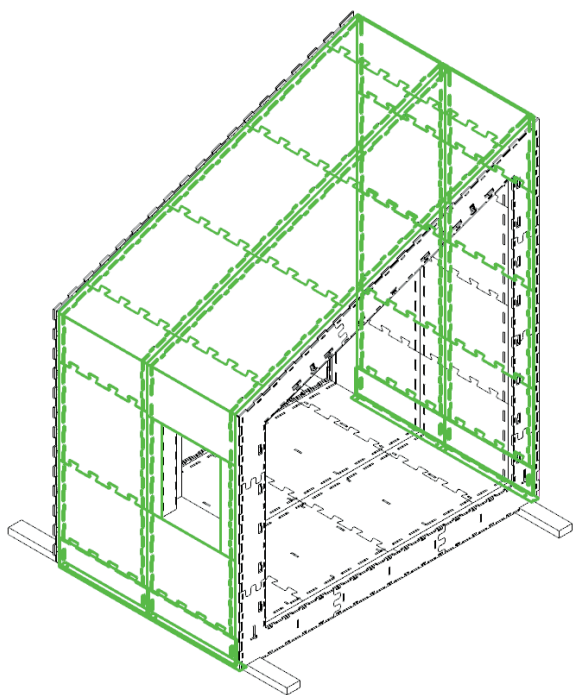
Pannelli per il piano di calpestio



Il primo passo consiste nella stesura di questo strato che formerà la base del piano di calpestio su cui verranno stesi i diversi strati della pavimentazione.

Questa base sarà necessaria per poter procedere con l'assemblaggio di tutti gli altri pannelli interni di rivestimento, e per poter aver facile accesso a tutta la struttura dall'interno. Come si può notare in figura, essi vengono incastrati al piano di dentature che si è formato tra gli elementi distanziali di sostegno per la pavimentazione ed i lati interni dei pannelli che formano della cornice. Essi, come tutti gli elementi strutturali, sono intagliati dal multistrato di pino 18 mm e contribuiscono ad irrobustire l'intero sistema di portali. In ogni campata vengono impiegati 4 pannelli, ma il numero e la dimensione di ciascun pannello dipendono dal tipo di ingombro e maneggiabilità desiderata, oltre che dalle dimensioni del foglio di multistrato da fresare.

Pannelli di rivestimento esterno



A seconda della manodopera disponibile, questo passo viene fatto contemporaneamente o successivamente alla posa dei pannelli per il piano di calpestio.

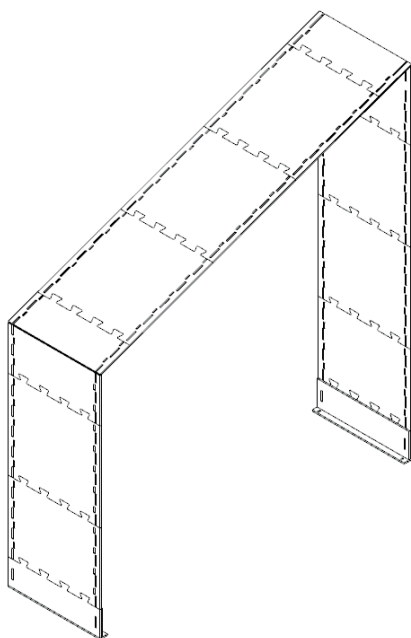
Questi componenti sono ricavati dal multistrato di pioppo 18 mm e contribuiscono alla solidità e stabilità strutturale di tutti i portali: infatti fungono da “collante” tra i portali e gli stessi scatolari di isolamento.

Come si può notare in figura, essi vengono incastrati al piano di dentature che si è formato tra gli scatolari di isolamento ed i lati esterni dei pannelli che formano della cornice. In ogni campata vengono impiegati 18 pannelli, ma il numero e la dimensione di ciascun pannello dipendono dal tipo di ingombro e maneggiabilità desiderata, oltre che dalle dimensioni del foglio di multistrato da fresare. A seconda

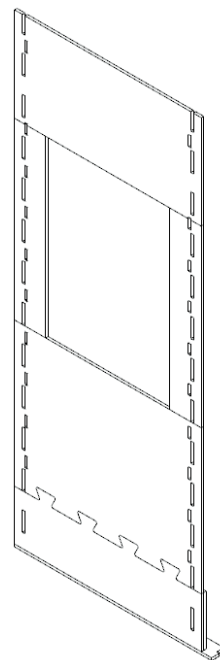
del tipo di campata desiderata sono previste due tipologie di pannellatura di rivestimento, come si può notare in figura.

Pannelli di rivestimento esterno: tipologie di pannello

- 1



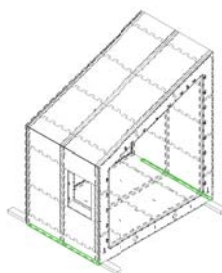
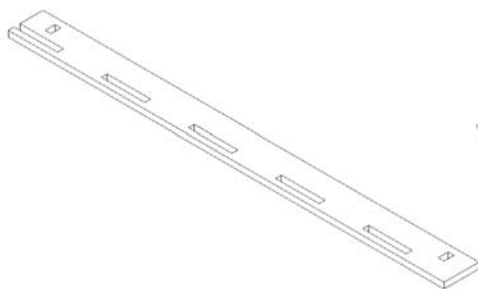
- 2



L'inserimento del rivestimento esterno è profondamente influenzato dal tipo di campata. Se siamo in presenza di una campata cieca verranno impiegati i componenti di fig.1 che provvedono a chiudere l'intera struttura conferendo una continuità materica e geometrica, oltre che a rafforzare e consolidare l'intero sistema tenendo al riparo gli scatolari di isolamento. Nel caso in cui invece si sia in presenza di una campata con serramento, verranno impiegati i pannelli in fig.2 che allo stesso modo rafforzano la struttura e la rendono solidale con il box dell'infisso.

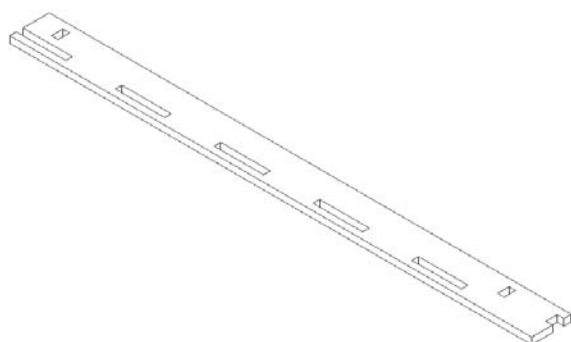
Pannelli di rivestimento esterno: particolare elementi

- 1



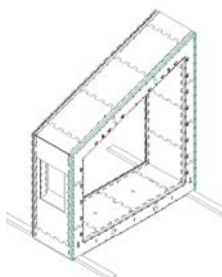
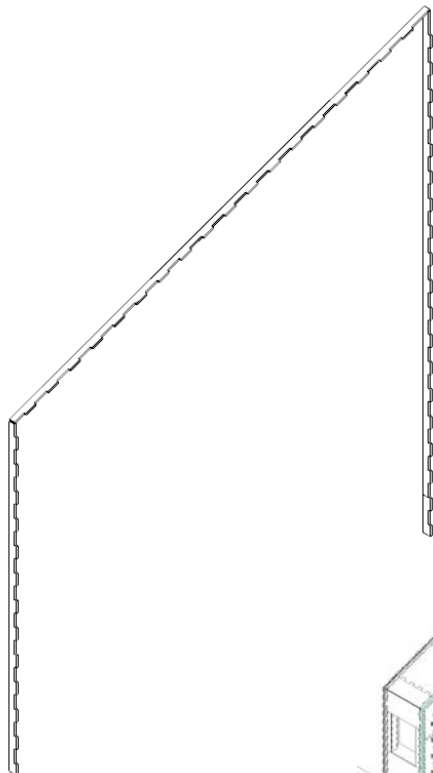
In questa serie di pannelli impiegati per il rivestimento del lato esterno, ve ne sono alcuni ideati essenzialmente per chiudere ogni lato della struttura al fine di predisporre i lati esterni ad ospitare la guaina impermeabilizzante e tutto il sistema di facciata. Questo avviene mediante l'impiego di alcuni elementi che contribuiscono a rendere uniforme la superficie esterna come possiamo osservare dalle figure accanto.

- 2



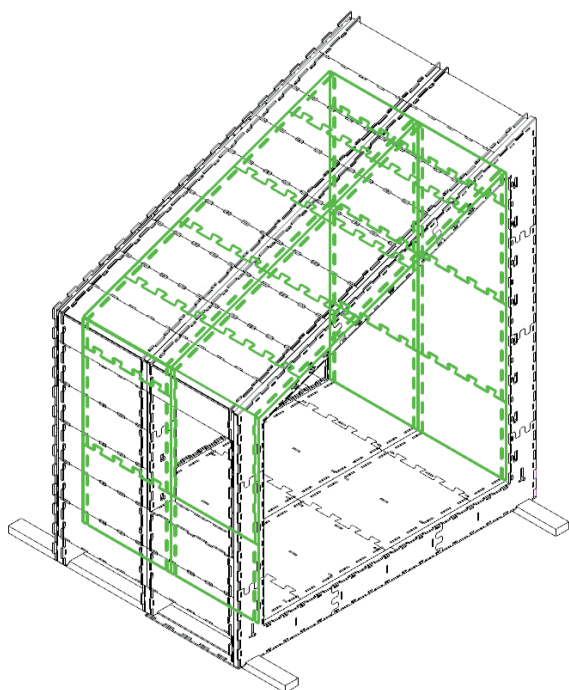
L'elemento in fig.1 come evidenziato in verde nel navigatore è situato nella chiusura inferiore, e serve a chiudere lo spazio tra la trave radice e gli angoli inferiori della cornice. Questo elemento viene impiegato per tutte le campate meno quelle agli estremi della struttura. In quel caso infatti vengono impiegati componenti come quello in fig.2, che presenta un prolungamento che permette di agganciare la cornice fino alla sua estremità.

- 3



In fig.3 è rappresentato il sistema di pannelli di bordo esterni, che viene utilizzato appunto alle estremità della struttura, per colmare lo spazio rimanente dalla posa dei pannelli di rivestimento esterni. Essi sono suddivisi in più pezzi per ogni lato per esigenze legate alle dimensioni dei pannelli di compensato utilizzati per la fresatura. Una volta montati questi pannelli, la parte esterna dell'intera struttura è terminata e si può procedere all'impermeabilizzazione e rivestimento esterno.

Pannelli di rivestimento interno

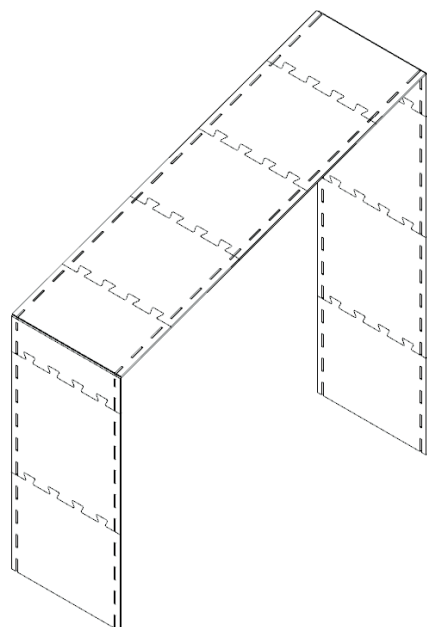


In questa fase si procede con l'assemblaggio dei pannelli di rivestimento interno.

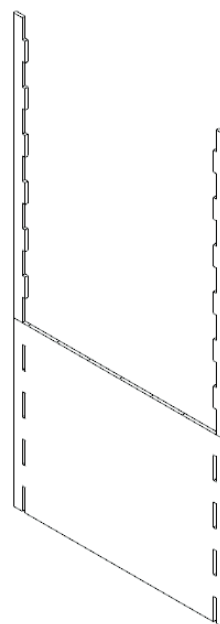
Questi componenti sono ricavati dal multistrato di pioppo 18 mm e contribuiscono alla solidità e stabilità strutturale di tutti i portali. Come si può notare in figura, essi vengono incastrati nelle dentature interne delle cornici montate su ogni portale. In ogni campata vengono impiegati 12 pannelli, ma il numero e la dimensione di ciascun pannello dipendono dal tipo di ingombro e maneggiabilità desiderata, oltre che dalle dimensioni del foglio di multistrato da fresare. A seconda del tipo di campata desiderata sono previste due tipologie di pannellatura di rivestimento, come si può notare in figura.

Pannelli di rivestimento esterno: tipologie di pannello

- 1



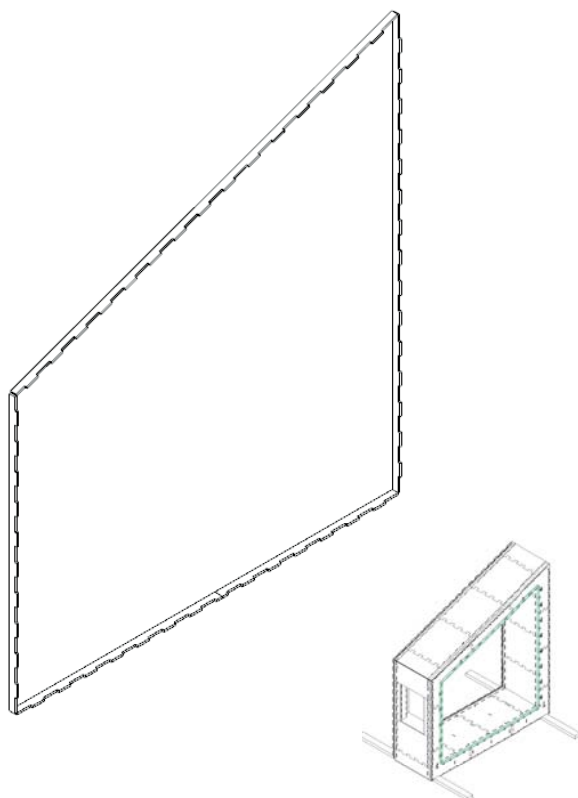
- 2



Anche l'assemblaggio del rivestimento interno viene influenzato dal tipo di campata. Se siamo in presenza di una campata cieca verranno impiegati i componenti di fig.1 che provvedono a chiudere l'intera struttura conferendo una continuità materica e geometrica, oltre che a rafforzare e consolidare l'intero sistema tenendo al riparo gli scatolari di isolamento. Nel caso in cui invece si sia in presenza di una campata con serramento, verranno impiegati nel lato del serramento i pannelli in fig.2 che permettono di ospitare il box della finestra rendendo uniforme la superficie.

Pannelli di rivestimento esterno: particolare elementi

- 1



In questa serie di pannelli impiegati per il rivestimento del lato interno, ve ne sono alcuni ideati essenzialmente per chiudere ogni lato della struttura al fine di predisporre i lati interni ad ospitare la barriera al vapore e l'intero sistema di tramezzi, contropareti e pavimentazione. Questo avviene mediante l'impiego di alcuni elementi che contribuiscono a rendere uniforme la superficie interna come possiamo osservare dalle figure accanto.

In fig.1 é rappresentato il sistema di pannelli di bordo interni, che viene utilizzato appunto alle estremità della struttura per colmare lo spazio rimanente dalla posa dei pannelli di rivestimento interni. Essi sono suddivisi in più pezzi per ogni lato per esigenze legate alle dimensioni dei pannelli di compensato utilizzati per la fresatura.

Una volta montati questi pannelli, la parte interna dell'intera struttura é terminata e si può procedere a sigillarla con la barriera al vapore che viene fissata tramite un nastro a tenuta stagna nei nodi tra pareti e solai e in corrispondenza dei controtelai per la posa degli infissi.

Inserimento pareti terminali e tramezzi

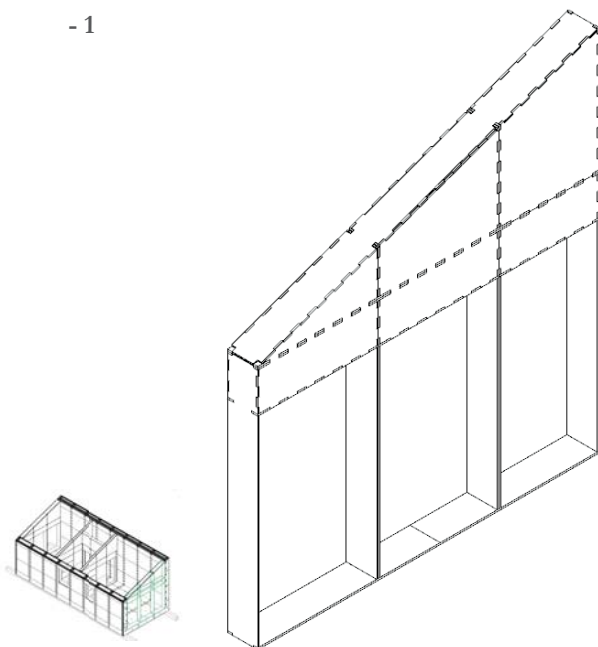


Completata la costruzione di tutto l'impianto strutturale come in figura, si procede con l'inserimento di barriere al vapore e membrane impermeabilizzanti. Nel lato interno, da subito viene montata la barriera al vapore in modo da poter procedere con l'assemblaggio dei tramezzi e delle pareti terminali di chiusura della struttura.

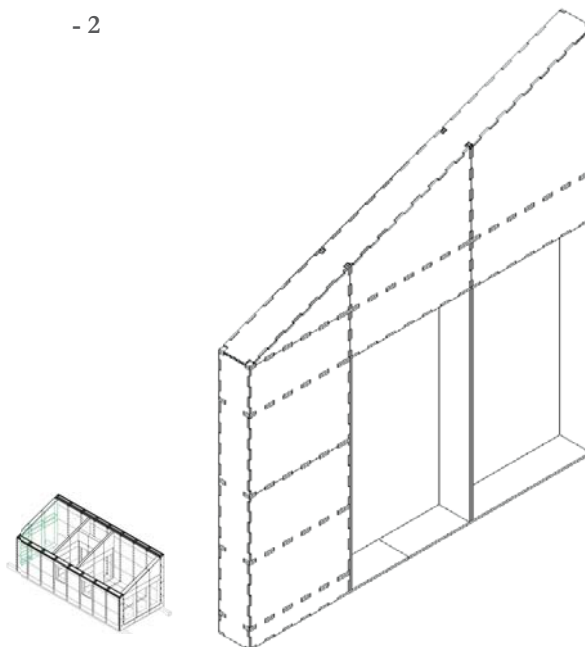
Una volta ultimato il sistema di pareti vengono impermeabilizzate dall'esterno ed è possibile montare i serramenti per evitare infiltrazioni d'acqua che potrebbero causare danni alla struttura in multistrato.

Pareti terminali

- 1



- 2



Le pareti terminali progettate per la struttura in esame sono di due tipologie.

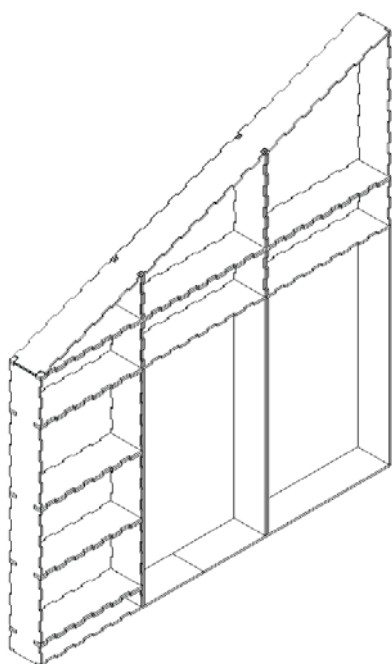
In fig.1 è rappresentata la parete di chiusura che nel progetto viene utilizzata nel lato dell'ingresso. Essa dispone di tre aperture per ospitare due porte finestre a doppia anta scorrevole e la porta d'ingresso. Tutti i componenti della parete sono in multistrato 18 mm per un totale di 21.29 m² e presentano degli incastri per un facile montaggio a secco. Essa è progettata per ospitare al suo interno uno strato di isolante di pannelli in fibra di canapa di spessore

30 cm per isolare adeguatamente il lato di ingresso alla struttura.

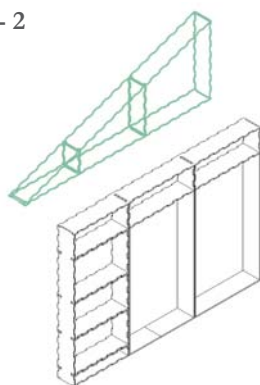
In fig.2 é rappresentata la parete di chiusura che nel progetto viene utilizzata nella zona notte, nella parte confinante con l'esterno. Essa dispone di due aperture per ospitare due porte finestre a doppia anta scorrevole. Tutti i componenti della parete sono in multistrato 18 mm per un totale di 27.4 m² di materiale, e presentano degli incastri per un facile montaggio a secco. Essa é progettata per ospitare al suo interno uno strato di isolante di pannelli in fibra di canapa di spessore 30 cm per isolare adeguatamente il lato di ingresso alla struttura.

Pareti terminali: particolare elementi strutturali

- 1



- 2



La struttura dell'intera parete é formata da elementi orizzontali ed elementi verticali che presentano degli incastri per essere combinati tra loro. La struttura in figura 1 rappresenta la parete della camera da letto. Essa simile per tipologia di componenti a quella del lato dell'ingresso, ma a causa del ridotto numero di aperture presenta un maggior numero di componenti per colmare il vuoto.

I componenti orizzontali vengono incastrati a quelli verticali in modo da conferire stabilità e rigidità all'intero pacchetto murario. In fig. 3 e fig. 4 si possono osservare le due tipologie di pannello verticale impiegate, sulle quali sono sagomati gli incastri necessari all'inserimento di tutti gli elementi.

Come rappresentato in fig.2 la parte evidenziata in verde viene inserita in un secondo momento per facilitare l'assemblaggio del modulo di base e solo una volta in posizione si potrà procedere con l'incastrare dei pannelli di rivestimento. Una volta montata l'intera griglia di pannelli vengono fissati con delle viti tutti quelli che formano la cornice esterna del pacchetto murario i pannelli di rivestimento interno della struttura per impedirne il movimento orizzontale (fig.5)

Dopo aver posato questi ultimi su un lato si potrà procedere con l'inserimento dei pannelli di isolante in fibra di canapa nei vuoti della griglia della struttura

Per realizzare la parte inclinata evidenziata di verde in fig.2, vengono impiegati dei pannelli verticali accoppiati. Essi presentano due diverse altezze, come é possibile notare in fig.6, che consentono di seguire l'inclinazione della falda del tetto.

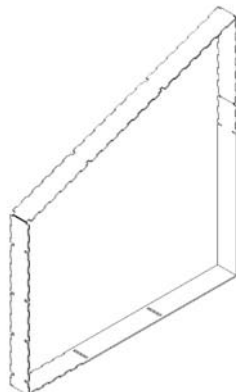
- 3



- 4



- 5

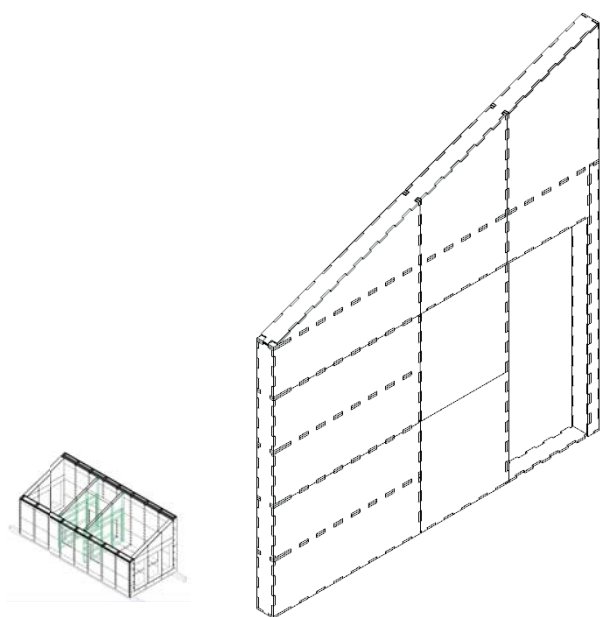


- 6



Parete interna trasversale

- 1



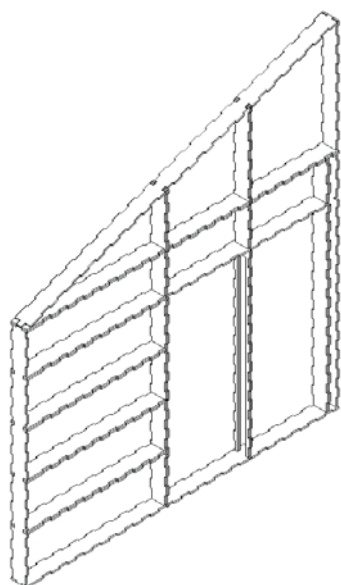
In fig.1 è rappresentata la parete interna disposta trasversalmente rispetto all'asse longitudinale della struttura. Essa dispone di un'unica apertura predisposta ad ospitare una porta scorrevole. Tutti i componenti della parete sono in multistrato 18 mm per un totale di 32.25 m² di materiale, e presentano degli incastri per un facile montaggio a secco. E' progettata per ospitare al suo interno uno strato di isolante di pannelli in fibra di canapa di spessore 15.4 cm per isolare adeguatamente gli ambienti interni della casa sia termicamente che acusticamente.

Essa può, come le altre pareti, essere montata direttamente all'interno della struttura, grazie alle ridotte di-

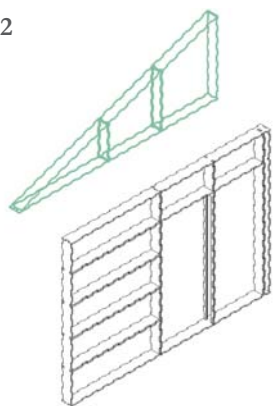
mensioni dei suoi componenti ed alla versatilità del sistema ad incastro di cui è dotata.

Parete interna trasversale: particolare elementi strutturali

- 1



- 2

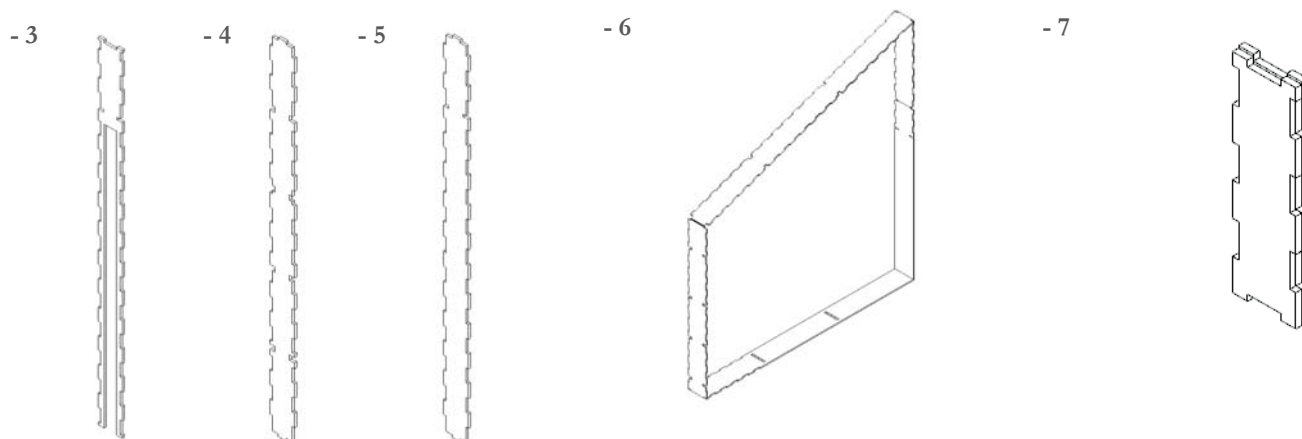


La struttura dell'intera parete è formata da elementi orizzontali ed elementi verticali che presentano degli incastri per essere combinati tra loro. La struttura in figura 1 rappresenta la parete interna trasversale. Essa è simile per tipologia di struttura a quella del lato dell'ingresso ed a quella della camera da letto. I componenti orizzontali vengono incastrati a quelli verticali in modo da conferire stabilità e rigidità all'intero pacchetto murario. Si possono osservare le tre tipologie di pannello verticale impiegate, sulle quali sono sagomati gli incastri necessari all'inserimento di tutti gli elementi: in fig. 3 è rappresentato l'elemento verticale sagomato per introdurre il telaio della porta scorrevole. Come si nota in fig.1 viene lasciato uno spazio perché il telaio possa essere incassato direttamente all'interno del pacchetto murario. In fig.4 e fig.5 sono invece rappresentati gli ulteriori elementi verticali che differiscono tra loro solo per il numero di incastri presenti lungo il lato maggiore.

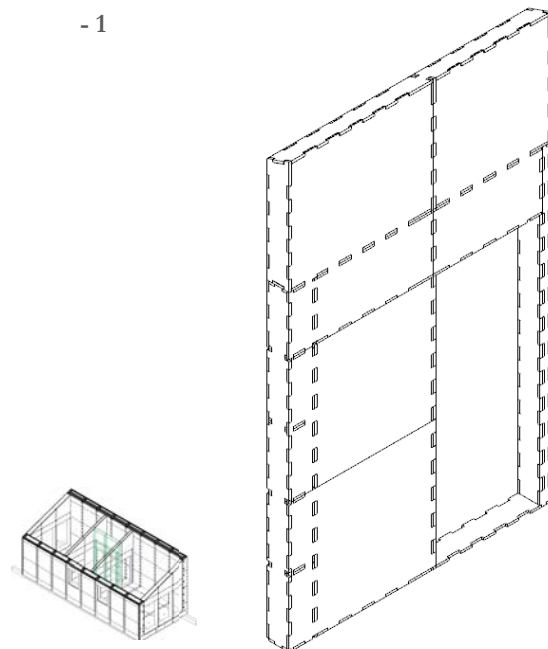
Come rappresentato in fig.2 la parte evidenziata in verde viene inserita in un secondo momento per facilitare l'assemblaggio del modulo di base e solo una volta in posizione si potrà procedere con l'incastro dei pannelli di rivestimento. Una volta montata l'intera griglia di pannelli vengono fissati con delle viti tutti quelli che formano la cornice esterna del pacchetto murario i pannelli di rivestimento interno della struttura per impedirne il movimento orizzontale (fig.6)

Dopo aver posato questi ultimi su un lato si potrà procedere con l'inserimento dei pannelli di isolante in fibra di canapa nei vuoti della griglia della struttura

Per realizzare la parte inclinata evidenziata di verde in fig.2, vengono impiegati dei pannelli verticali accoppiati. Essi presentano due diverse altezze, come é possibile notare in fig.7, che consentono di seguire l'inclinazione della falda del tetto.



Parete interna longitudinale

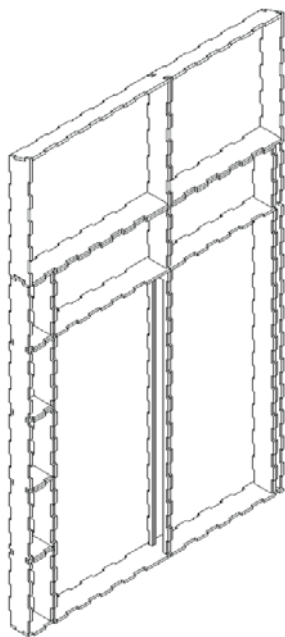


stema ad incastro di cui é dotata.

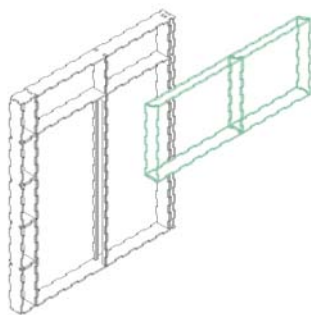
In fig.1 é rappresentata la parete interna disposta parallelamente all'asse longitudinale della struttura. Essa dispone di un'unica apertura predisposta ad ospitare una porta scorrevole. Tutti i componenti della parete sono in multistrato 18 mm per un totale di 17.74 m² di materiale, e presentano degli incastri per un facile montaggio a secco. E' progettata per ospitare al suo interno uno strato di isolante di pannelli in fibra di canapa di spessore 15.4 cm per isolare adeguatamente gli ambienti interni della casa sia termicamente che acusticamente. Essa può, come le altre pareti, essere montata direttamente all'interno della struttura, grazie alle ridotte dimensioni dei suoi componenti ed alla versatilità del sistema ad incastro di cui é dotata.

Parete interna longitudinale: particolare elementi strutturali

- 1



- 2



La struttura dell'intera parete é formata da elementi orizzontali ed elementi verticali che presentano degli incastri per essere combinati tra loro. La struttura in figura 1 rappresenta la parete interna longitudinale. Essa differisce dalla struttura delle altre pareti per il modo in cui si adatta alla falda inclinata. I componenti orizzontali vengono incastrati a quelli verticali in modo da conferire stabilità e rigidità all'intero pacchetto murario. Si possono osservare le tre tipologie di pannello verticale impiegate, sulle quali sono sagomati gli incastri necessari all'inserimento di tutti gli elementi: in fig. 3 é rappresentato l'elemento verticale sagomato per introdurre il telaio della porta scorrevole. Come si nota in fig.1 viene lasciato uno spazio perché il telaio possa essere incassato direttamente all'interno del pacchetto murario. In fig.4 e fig.5 sono invece rappresentati gli ulteriori elementi verticali che differiscono tra loro solo per il numero di incastri presenti lungo il lato maggiore.

Come rappresentato in fig.2 la parte evidenziata in verde viene inserita in un secondo momento per facilitare l'assemblaggio del modulo di base e solo una volta in posizione si potrà procedere con l'incastro dei pannelli di rivestimento. Una volta montata l'intera griglia di pannelli vengono fissati con delle viti tutti quelli che formano la cornice esterna del pacchetto murario i pannelli di rivestimento interno della struttura per impedirne il movimento orizzontale (fig.6)

Dopo aver posato questi ultimi su un lato si potrà procedere con l'inserimento dei pannelli di isolante in fibra di canapa nei vuoti della griglia della struttura

Per realizzare la parte sulla sommità evidenziata di verde in fig.2, vengono impiegati dei pannelli verticali con un'estremità inclinata per consentire l'aggancio al pannello longitudinale sulla sommità come é possibile osservare nel particolare di fig.7.

- 3



- 4



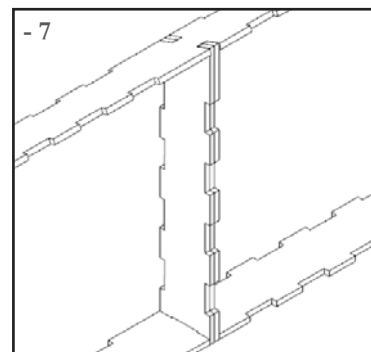
- 5



- 6



- 7



IV.3 - Il modulo abitativo



I numerosi vantaggi che questo sistema costruttivo ibrido comporta, hanno portato a pensare un modulo abitativo che permetta di essere autocostruito anche da un gruppo di operai non esperti, almeno per ciò che riguarda la struttura principale, e che permetta di avere ridotte tempistiche di posa in opera. La prefabbricazione gioca un ruolo fondamentale poiché alcuni elementi come gli scatolari di isolamento possono essere condotti in cantiere già assemblati ed isolati. La possibilità di prefabbricare i componenti permette anche di poterli stoccare in dei depositi ed utilizzarli in un secondo momento come potrebbe accadere in situazioni di emergenza. Per questo motivo l'idea di progetto si è focalizzata nella realizzazione di moduli abitativi compatti con un'estensione inferiore ai 40 mq.

I materiali impiegati in questo progetto permettono di avere una struttura che si possa adattare a cicli di vita

brevi o lunghi, con ottime prestazioni e basso impatto ambientale. Infatti come sarà analizzato in seguito, i risultati in materia di CO₂ equivalente e CO₂ biosequestrata ed immagazzinata nei materiali che compongono l'edificio, sono un dato di rilievo specialmente se si paragona alla stessa struttura ma isolata secondo la tecnica costruttiva WikiHouse tradizionale.

Oltre alla struttura ed al sistema di isolamento, anche molte altre componenti scelte per il progetto, come il sughero del cappotto esterno, il legno del rivestimento, l'alluminio presente nel lato esterno degli infissi, i pannelli in cartongesso delle contro pareti, l'acciaio della struttura di fondazione, sono tutti elementi che è possibile riciclare o riutilizzare riducendo i consumi di energia e l'utilizzo di materie prime causati dalla produzione ex novo di questi materiali o componenti. Il sistema di posa in opera proposto inoltre è totalmente a secco, aiutato dall'impiego di elementi meccanici

come viti per legno.

La disposizione degli ambienti é stata scelta in base all'orientamento del modulo rispetto i punti cardinali. Per ottenere i benefici dagli apporti solari e una migliore illuminazione dalla luce naturale durante le ore diurne, sono state posizionate delle aperture sul lato sud, est ed ovest.

Nel lato est sono presenti due porte finestre a doppia anta scorrevole, con doppio vetrocamera per limitare le dispersioni. Esse permettono di illuminare la zona giorno che misura circa 17 mq.

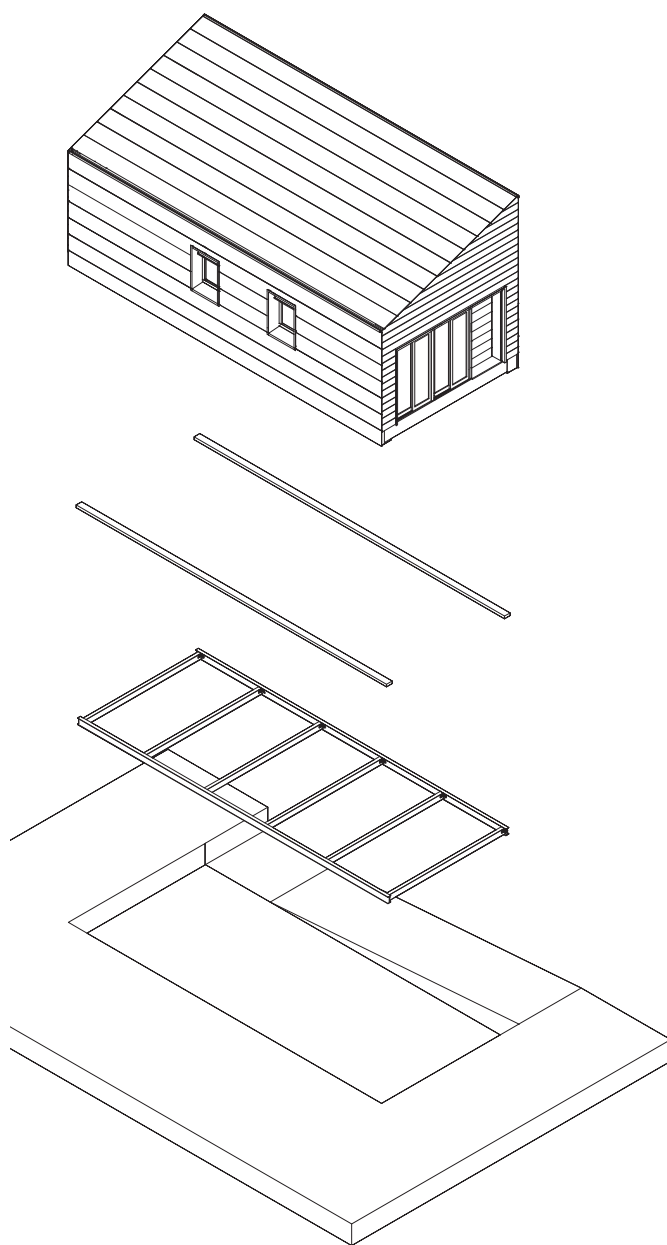
Nella parete sud sono state praticate due aperture in cui sono state collocate due finestre mono anta: una nella parete del soggiorno, per assicurare un sufficiente ed una seconda in quella del bagno. Esse sono state dotate di un sistema di schermatura esterno che consente di non subire gli apporti solari negativi nella stagione estiva, e di usufruirne invece in quella invernale.. Nella parete esposta ad ovest sono state inserite due porte finestre a doppia anta scorrevole, con doppio vetrocamera per limitare le dispersioni come in quella d'ingresso.

Riguardo al lato nord si é potato per una facciata cieca per massimizzare le prestazioni dell'involucro contro i flussi d'aria fredda provenienti da nord ed a causa dell'assenza di apporti diretti di luce solare.

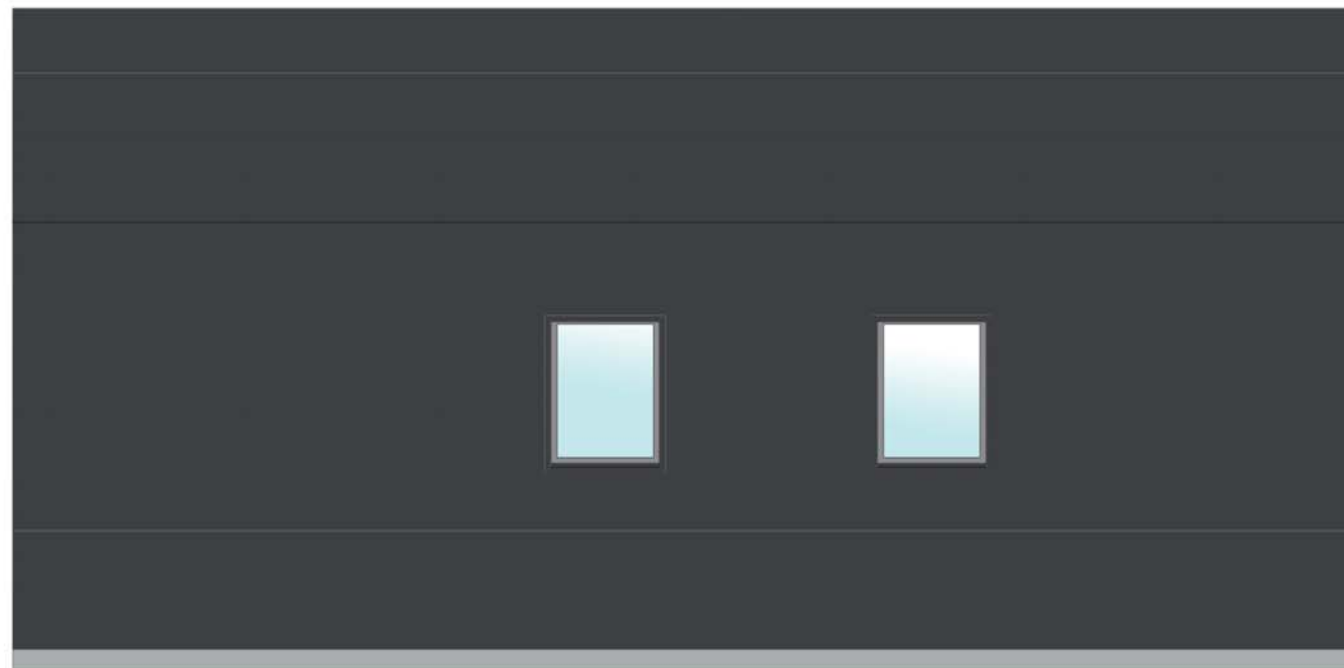
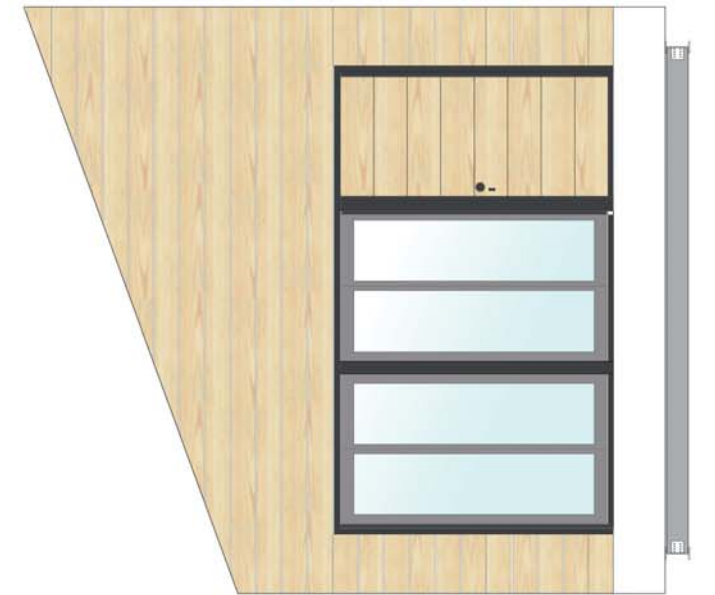
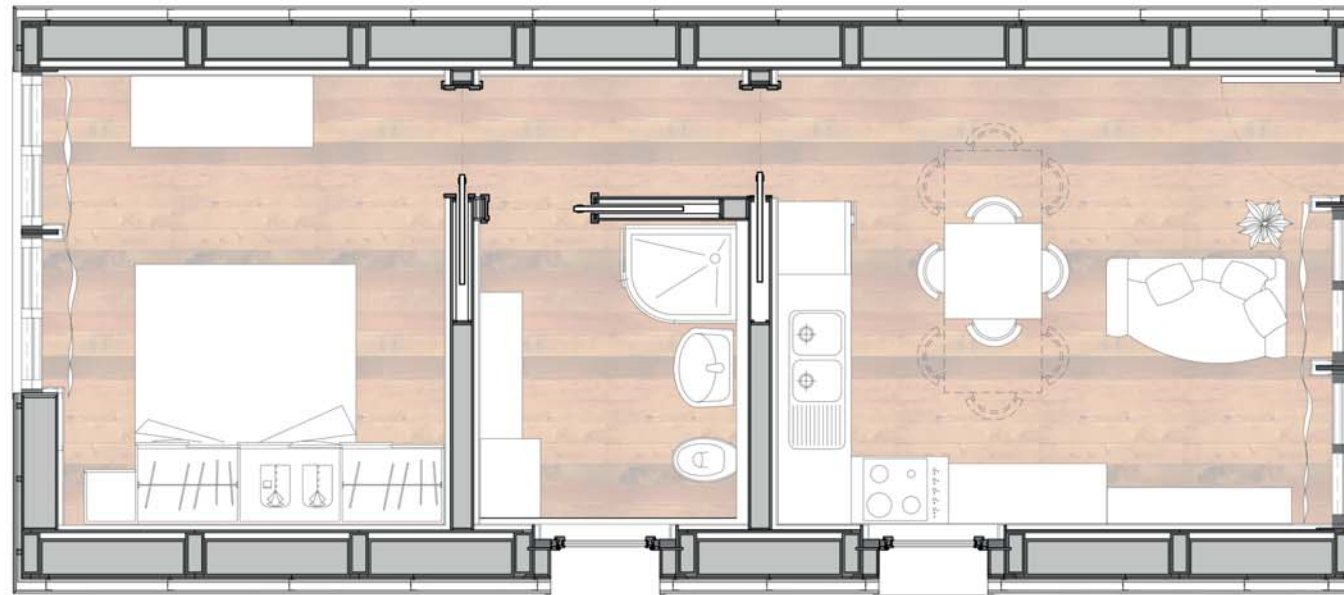
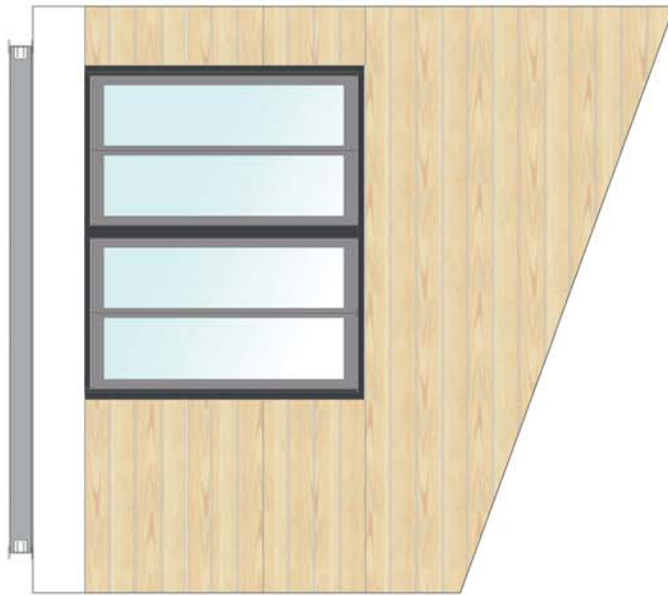
L'intera struttura é stata posizionata su una platea formata da travi d'acciaio IPE 20 e IPE 18, disposte perpendicolarmente tra loro a formare un reticolo. La scelta di questo materiale, nonostante sia più costoso in termini di energia incorporata, permette di riutilizzare gli elementi una volta dismesso l'edificio, oppure riciclarli tramite fusione per ottenere la materia prima. Su di esse vengono montate le travi radice in legno che vengono ricoperte di una vernice bituminosa per impermeabilizzarle ed evitare un loro danneggiamento o dilatazione, che andrebbero a compromettere i

componenti dei portali su cui vengono incastrate.

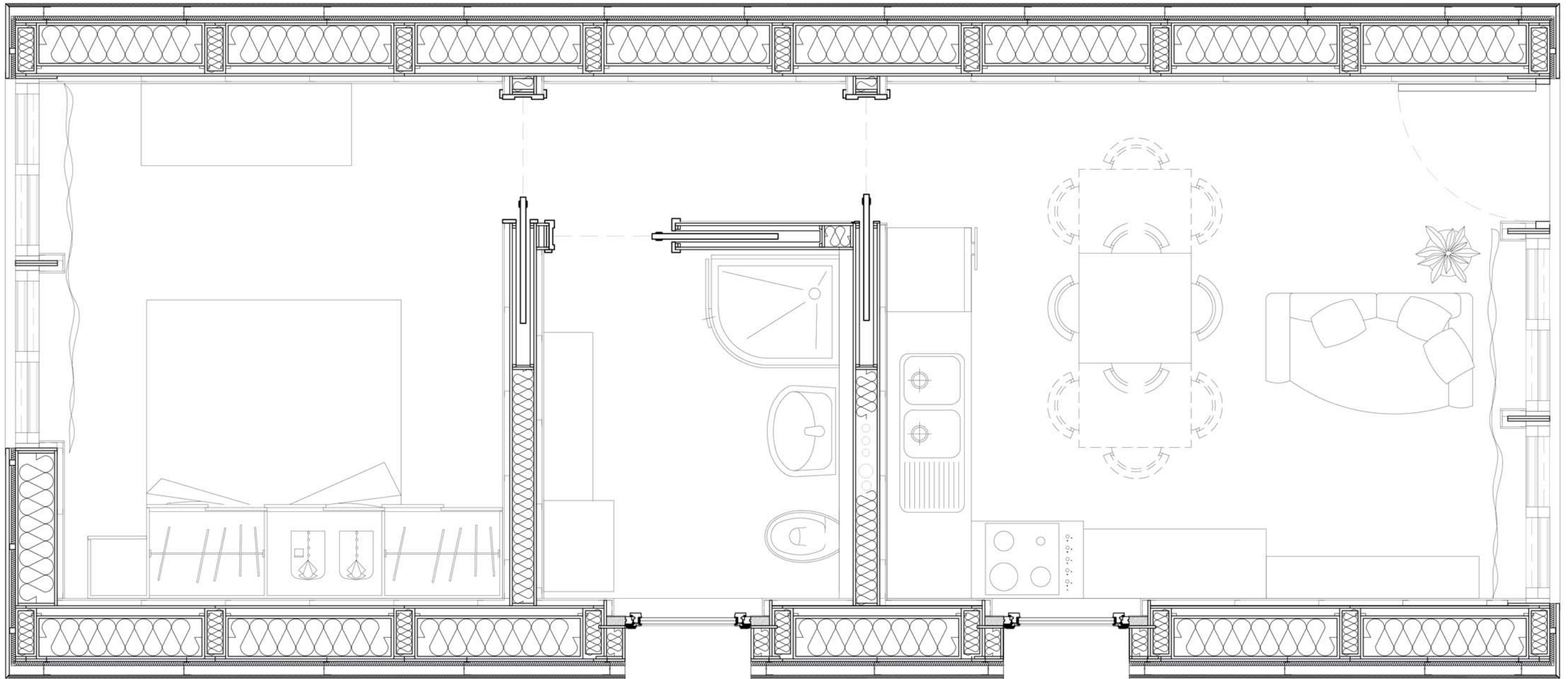
Le travi radice in legno vengono impermeabilizzate nonostante non siano a contatto diretto col terreno, poiché come già precisato il legno può assorbire umidità dall'aria dell'ambiente in cui si trova .



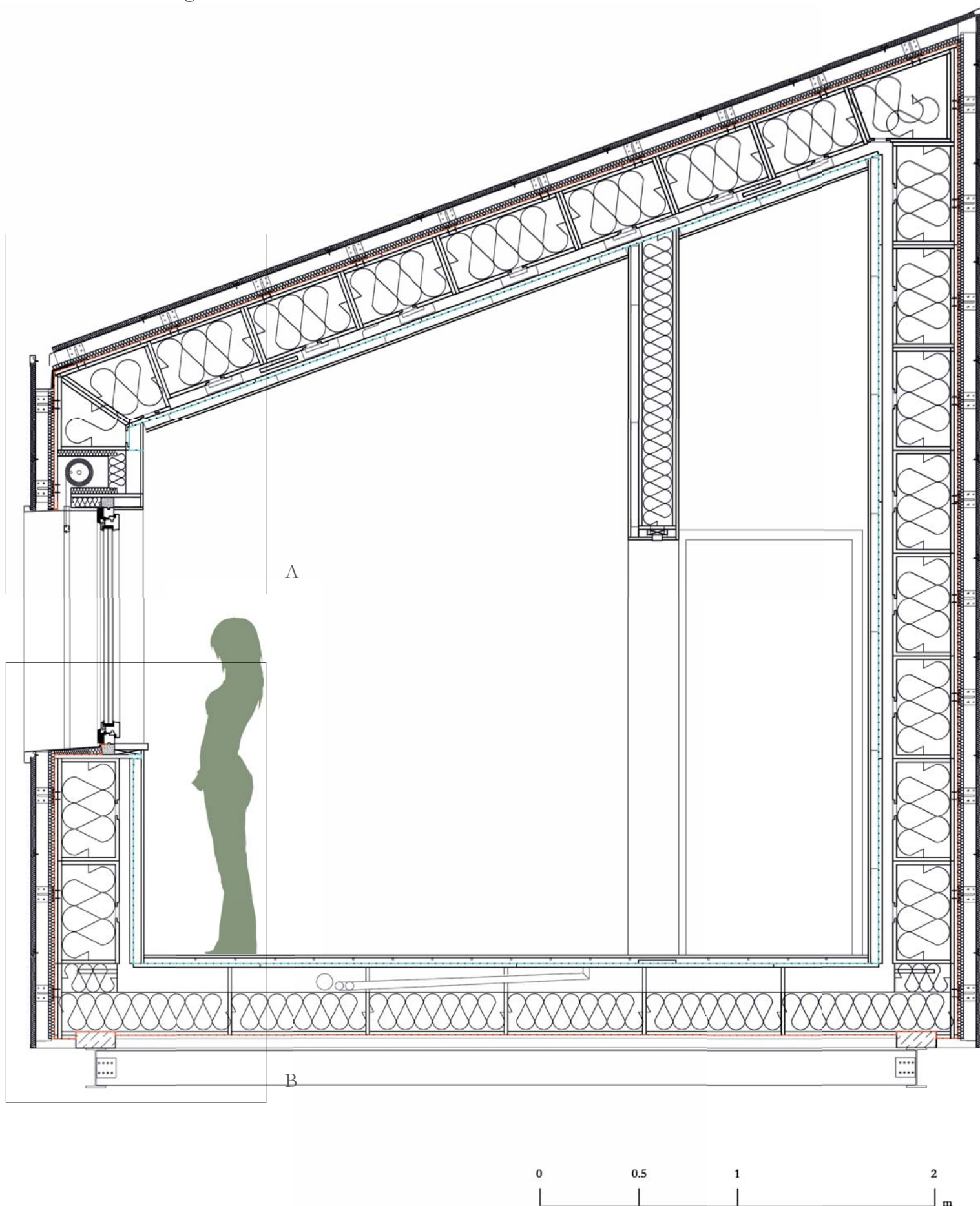
Pianta e prospetti



0 0.5 1 2
m



Sezione tecnologica



Spaccati tecnologici e stratigrafie: nodo parete-copertura.

Stratigrafia A: parete/copertura.



INTERNO

Pannello in cartongesso 12 mm

Intercapedine impianti 105 mm

Barriera al vapore 1mm

Pannello di rivestimento interno in compensato 18mm

Intercapedine d'aria 54 mm

Pannello in compensato, box isolante 18 mm

Fiocchi di cellulosa 272 mm

Pannello in compensato, box isolante 18 mm

Pannello di rivestimento esterno in compensato 18mm

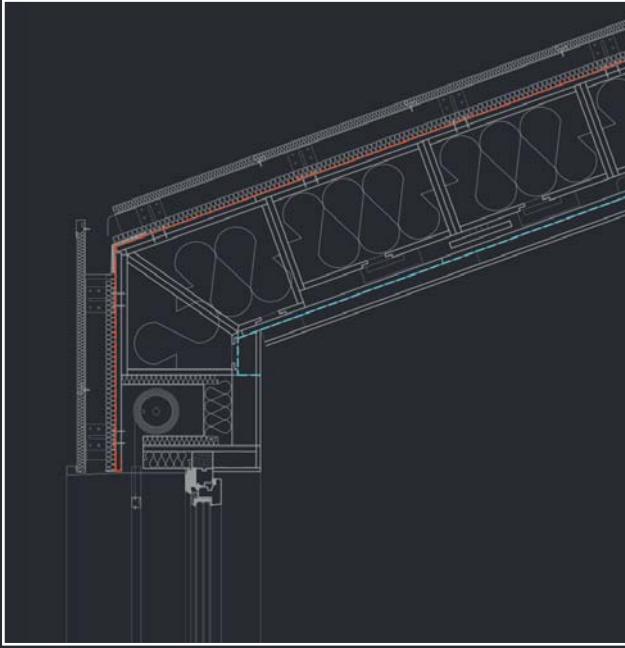
Membrana impermeabilizzante 1mm

Intercapedine parete ventilata 50 mm, 70 mm (parete)

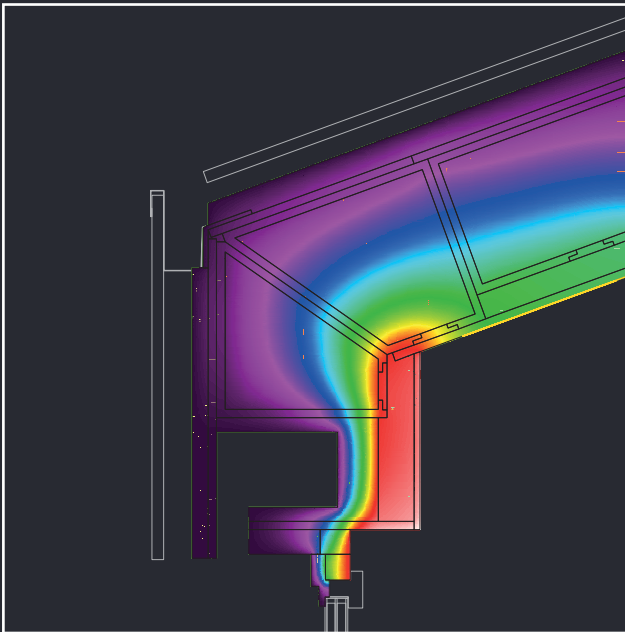
Pannello isolante in sughero 50 mm (copertura), 30 mm (parete)

Pannelli di rivestimento in alluminio coibentati Easy Wand 25mm

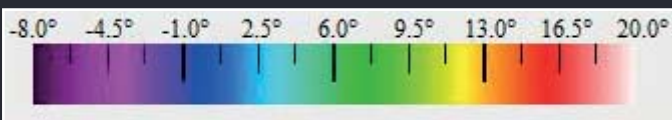
ESTERNO



Schema infrarossi parete in sezione



Legenda



Nel nodo parete-copertura vengono riportate le diverse stratigrafie che compongono il pacchetto murario che è simile al solaio di copertura. All'interno del pacchetto murario vengono impiegati gli scatolari di isolamento in compensato con isolante in cellulosa insufflata al suo interno. I suoi valori di conducibilità termica (in questo caso $\lambda = 0.038 \text{ W/m}^2\text{K}$) Consentono di avere sin dal primo montaggio elevati valori di trasmittanza termica $U = 0.099 \text{ W/m}^2\text{K}$ un valore calcolato prima di aggiungere i pannelli di sughero esterni. Accanto viene inoltre riportato uno schema ad infrarossi con relativa legenda, sulle relative temperature all'interno del pacchetto murario. In questo modo è possibile notare che le temperature più basse non raggiungono l'interno dell'edificio.

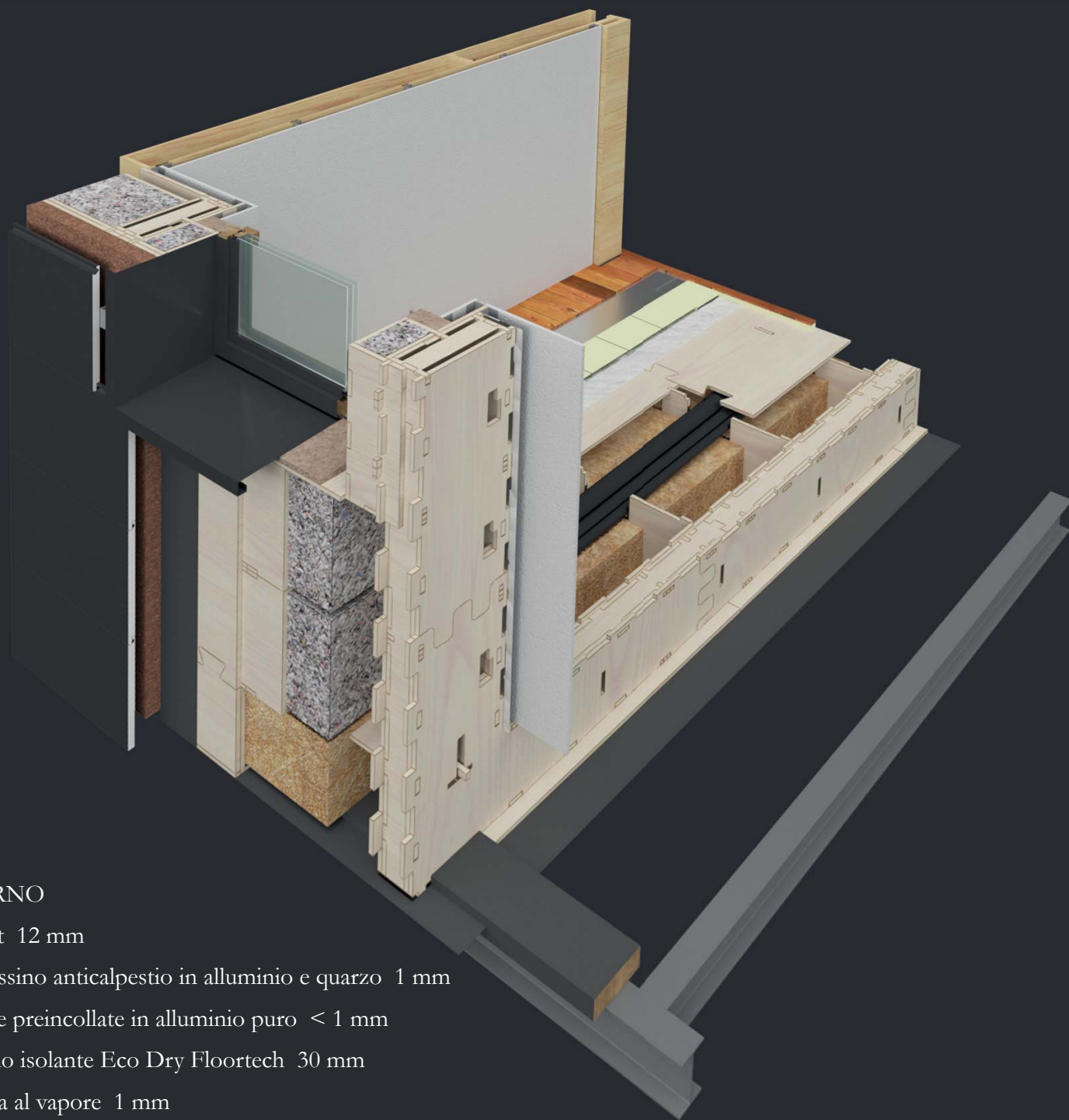
Il cappotto esterno di 3 cm di sughero in pannelli ($\lambda = 0.039 \text{ W/m}^2\text{K}$) garantisce una maggiore uniformità di isolamento della struttura ed impedisce il ristagno di umidità essendo il sughero un materiale idrofobo. In copertura, dato il differente comportamento del passaggio ascensionale del calore, le temperature rimangono più basse. per questo motivo di è deciso di aumentare lo spessore del cappotto esterno in sughero a 5 cm in modo da contrastare questo fenomeno ed evitare temperature interne troppo basse.

Si noti come il cassone del sistema di schermatura esterna in purenit abbia delle ottime prestazioni che permettono di mantenere alti valori di temperatura nel lato interno dell'edificio.

Il calcolo per questi schemi è stato effettuato impostando la temperatura esterna di progetto -8°C che è la condizione peggiorativa per Torino che ricade in zona termica E, e temperatura interna di progetto 20°C .

Spaccati tecnologici e stratigrafie: nodo parete-solaio

Stratigrafia B: solaio



INTERNO

Parquet 12 mm

Materassino anticalpestio in alluminio e quarzo 1 mm

Lamelle preincollate in alluminio puro < 1 mm

Pannello isolante Eco Dry Floortech 30 mm

Barriera al vapore 1 mm

Pannelli per pavimentazione in compensato 18mm

Intercapedine d'aria 126 mm

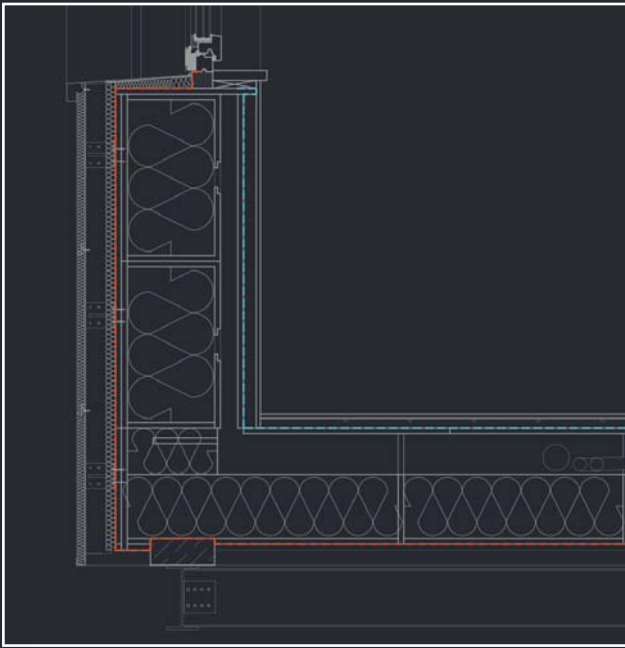
Pannelli isolanti in fibra di canapa 200 mm

Pannelli di chiusura inferiore in compensato 18 mm

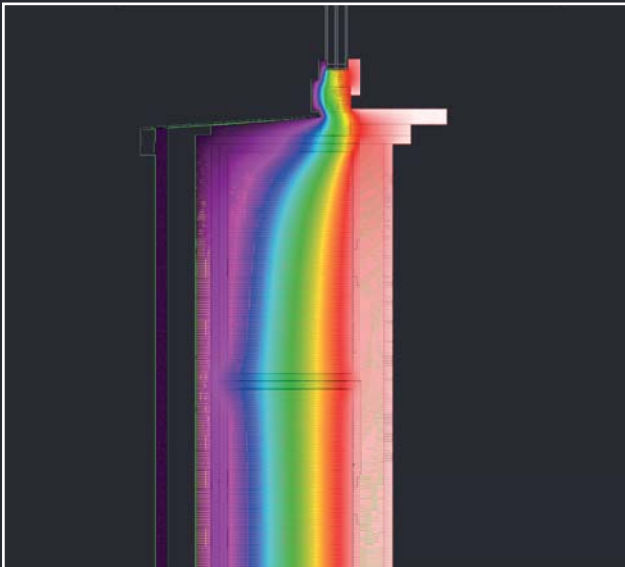
Membrana impermeabilizzante 1 mm

Platea in travi IPE 200 e 180

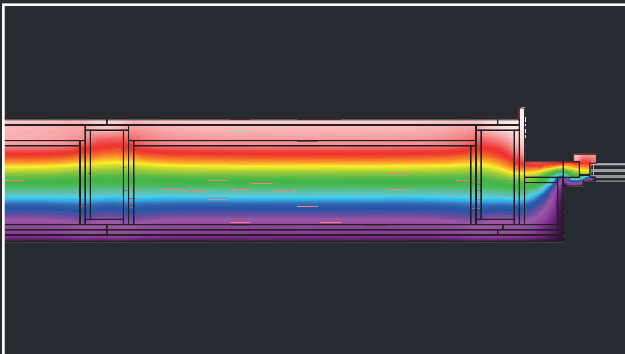
ESTERNO



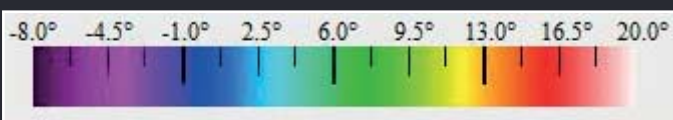
Schema infrarossi parete in sezione



Schema infrarossi parete in pianta



Legenda



Nel nodo parete-solaio vengono riportate le diverse stratigrafie che compongono il pacchetto del solaio del piano di calpestio. Per quest'ultimo è stato selezionato un isolante in pannelli in fibra di canapa, dati i suoi valori di conducibilità termica (in questo caso $\lambda = 0.038 \text{ W/m}^2\text{K}$) e data la sua conformazione in pannelli morbidi che rende semplice l'applicazione in modo da riempire tutte le intercapedini anche sovrapponendo più strati.

Il pacchetto della pavimentazione invece è composto da un sistema di riscaldamento a pavimento con posa a secco, che come ampiamente dimostrato, è molto più efficiente in termini di prestazioni e funzionamento rispetto ad uno con applicato su un massetto tradizionale gettato in opera. Inoltre esso è molto più veloce da installare, non richiede tempi di asciugatura ed in caso di decostruzione è semplice rimuovere e separare tutti i materiali, che come già detto nel capitolo sul riuso e riciclo, è fondamentale per poterli reimpiegare o per riciclarli.

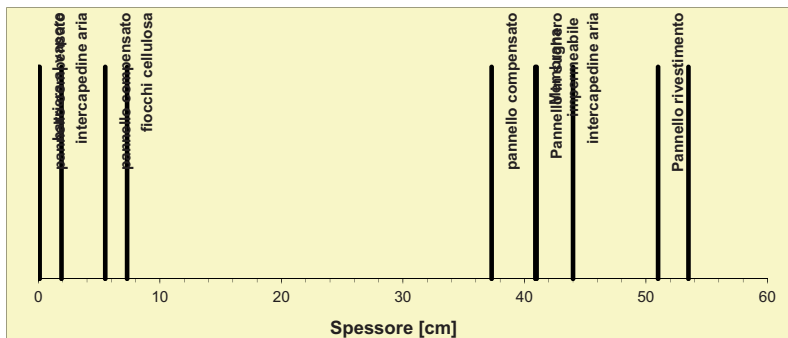
Accanto viene inoltre riportato uno schema ad infrarossi con relativa legenda, sulle relative temperature all'interno del pacchetto murario. In questo modo è possibile notare che le temperature più basse non raggiungono l'interno dell'edificio.

In pianta possiamo notare allo stesso modo come si relazionano i diversi tipi di isolanti (nei portali lana di pecora $\lambda = 0.0318 \text{ W/m}^2\text{K}$ e nel setto murario $\lambda = 0.38 \text{ W/m}^2\text{K}$) nonostante le discontinuità causate dalla struttura in legno che essendo un pessimo conduttore riduce la possibilità di ponti termici. Si noti dall'immagine in pianta che la distribuzione delle curve termiche rimane omogenea. Il cappotto esterno di 3 cm di sughero in pannelli ($\lambda = 0.039 \text{ W/m}^2\text{K}$) garantisce una maggiore uniformità di isolamento della struttura ed impedisce il ristagno di umidità essendo il sughero un materiale idrofobo.

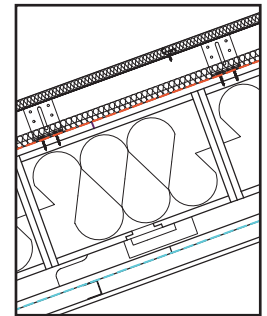
Stratigrafia: trasmittanza termica e sfasamento. - solaio di copertura

Tipo di componente		Chiusura verticale						
Stratigrafia (int-est)		s [cm]	ρ [kg/m ³]	μ [-]	c [J/kg°C]	λ [W/m°C]	R [m ² C/W]	opz. $\lambda \rightarrow R$
Strato liminare interno								0.13
I	barriera al vapore	0.1	900	10000	1900	0.150		
II	pannello compensato	1.8	350	50	1700	0.120		
III	intercapedine aria	3.6	1	1	1000	0.026		
IV	pannello compensato	1.8	350	50	1700	0.120		
V	fiocchi cellulosa	30.0	50	2	2544	0.038		
VI	pannello compensato	3.6	350	50	1700	0.120		
VII	Membrana impermeabile	0.1	320	280	1800	0.300		
VIII	Pannello in sughero	3.0	110	20	1900	0.039		
IX	intercapedine aria	7.0	1	1	1000	0.026		
X	Pannello rivestimento	2.5	37	51	1250	0.032		
Strato liminare esterno								0.04

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammettenza termica interna (Y_{ti})	1.069 W/(m ² K)	3.77 h
Ammettenza termica esterna (Y_{te})	0.254 W/(m ² K)	1.51 h
Trasmittanza termica periodica (Y_{ie})	0.001 W/(m ² K)	4.03 h
Capacità termica areica interna (κ_i)	14.7 kJ/(m ² K)	
Capacità termica areica esterna (κ_e)	3.5 kJ/(m ² K)	
Resistenza termica (R)	14.298 (m ² K)/W	
Trasmittanza termica (U)	0.070 W/(m ² K)	
Fattore di attenuazione (f)	0.019	
Spessore (s)	53.5 cm	
Massa superficiale (m)	46 kg/m ²	
Sfasamento (φ)	19.97 h	



LEGENDA	
s	= spessore
ρ	= massa volumica
μ	= fattore di resistenza al vapore
c	= calore specifico
λ	= conducibilità termica
R	= resistenza termica



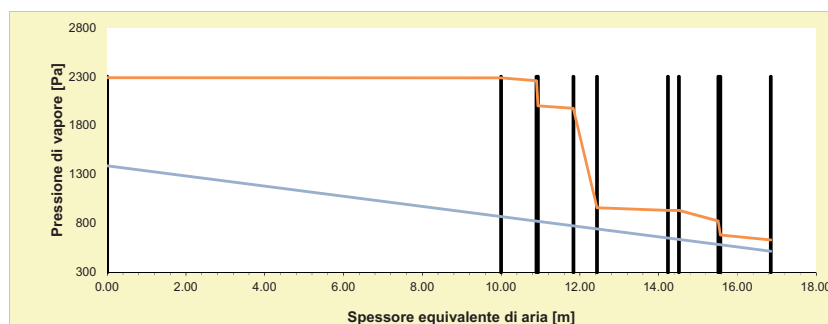
In questa tabella sono riportate le stratigrafie del solaio di copertura. Esso viene calcolato dalla barriera al vapore interna fino ai pannelli di rivestimento della parete ventilata. Tale configurazione consente di avere una trasmittanza ter-

mica $U = 0.071 \text{ W/m}^2\text{K}$ ed uno sfasamento di 20 ore. Tale trasmittanza rispetta i valori imposti dal D.Lgs 311/6 allegato C, che in zona climatica E dal 2017 impone un valore limite $U = 0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ per gli elementi opachi.

Verifica condensa superficiale e diagramma di Glaser nel mese di gennaio: - solaio di copertura

			Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	
Temperatura esterna	$\theta_{e, \text{mese}}$	[°C]	0.4	3.2	8.2	12.7	16.7	21.1	23.3	22.6	18.8	12.6	6.8	2.0	
Pressione di vapore esterna	$p_{e, \text{mese}}$	[Pa]	516	606	583	804	1235	1702	1837	1953	1504	1180	841	606	
Umidità relativa esterna	$\varphi_{e, \text{mese}}$	[%]	82%	79%	54%	55%	65%	68%	64%	71%	69%	81%	85%	86%	
Temperatura interna	$\theta_{i, \text{mese}}$	[°C]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	21.1	23.3	22.6	20.0	20.0	20.0	20.0	
Differenza pressione di vapore	Δp_{mese}	[Pa]	794	680	478	296	134	0	0	0	49	300	535	729	810 Δp_{max}
Pressione di vapore interna	$p_{i, \text{mese}}$	[Pa]	1389	1354	1109	1129	1382	1702	1837	1953	1557	1510	1429	1408	
Umidità relativa interna	$\varphi_{i, \text{mese}}$	[%]	59%	58%	47%	48%	59%	68%	64%	71%	67%	65%	61%	60%	
Temperatura superficiale min.	$\theta_{s, \text{min}}$	[°C]	15.1	14.7	11.7	11.9	15.0	18.3	19.6	20.6	16.9	16.4	15.6	15.3	
Fattore di temperatura minimo	$f_{R, \text{min}}$	[-]	0.75	0.69	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.66	0.74	NO COND. SUP.
Massa di vapore condensata	m_{cond}	[g/m ²]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NO COND. INT.

Mese



In questa tabella sono riportati i valori riguardanti le condizioni climatiche statistiche della città di Torino durante tutto l'anno e mostra che non c'è rischio di condensa interstiziale per la stratigrafia scelta. Sotto, il grafico di Glaser permette

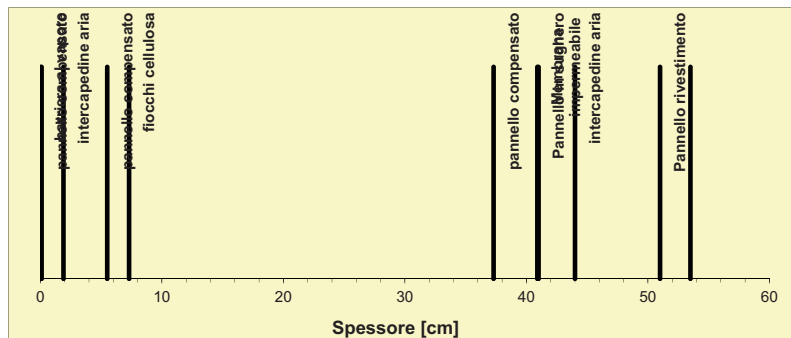
di osservare l'andamento della pressione del vapore sui vari strati nel mese più svantaggioso, ovvero gennaio.

Stratigrafia: trasmittanza termica e sfasamento. - parete esterna

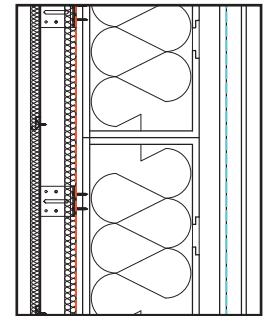
Tipo di componente		Chiusura verticale						
Stratigrafia (int-est)		s	ρ	μ	c	λ	R	opz.
		[cm]	[kg/m ³]	[-]	[J/kg°C]	[W/m°C]	[m ² °C/W]	$\lambda \rightarrow R$
Strato liminare interno							0.13	
I	barriera al vapore	0.1	900	10000	1900	0.150		
II	pannello compensato	1.8	350	50	1700	0.120		
III	intercapedine aria	3.6	1	1	1000	0.026		
IV	pannello compensato	1.8	350	50	1700	0.120		
V	fiocchi cellulosa	30.0	50	2	2544	0.038		
VI	pannello compensato	3.6	350	50	1700	0.120		
VII	Membrana impermeabile	0.1	280	33	1800	0.300		
VIII	Pannello in sughero	3.0	110	20	1900	0.039		
IX	intercapedine aria	7.0	1	1	1000	0.026		
X	Pannello rivestimento	2.5	37	51	1250	0.032		
Strato liminare esterno							0.04	

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammettenza termica interna (Y_{ti})	1.069 W/(m ² K)	3.77 h
Ammettenza termica esterna (Y_{te})	0.254 W/(m ² K)	1.51 h
Trasmittanza termica periodica (Y_{ie})	0.001 W/(m ² K)	4.04 h
Capacità termica areica interna (κ_i)	14.7 kJ/(m ² K)	
Capacità termica areica esterna (κ_e)	3.5 kJ/(m ² K)	
Resistenza termica (R)	14.298 (m ² K)/W	
Trasmittanza termica (U)	0.070 W/(m ² K)	
Fattore di attenuazione (f)	0.019	

Spessore (s)	53.5 cm
Massa superficiale (m)	46 kg/m ²
Sfasamento (φ)	19.96 h



LEGENDA	
s	= spessore
ρ	= massa volumica
μ	= fattore di resistenza al vapore
c	= calore specifico
λ	= conducibilità termica
R	= resistenza termica



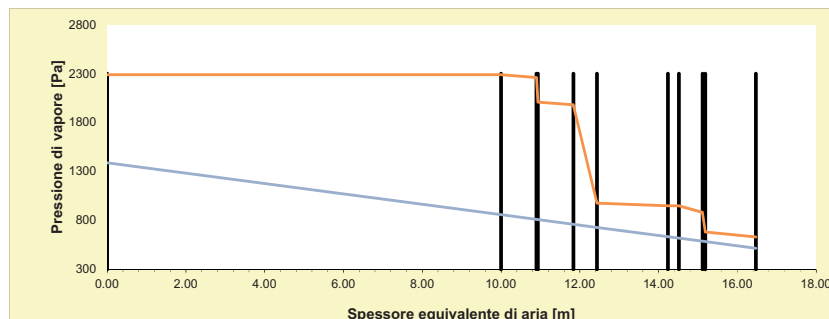
In questa tabella sono riportate le stratigrafie delle pareti comprese nell'interasse tra i portali. Esso viene calcolato dalla barriera al vapore interna fino ai pannelli di rivestimento della parete ventilata. Tale configurazione consente di avere una

trasmittanza termica $U = 0.070 \text{ W/m}^2\text{K}$ ed uno sfasamento di 19.96 ore. Tale trasmittanza rispetta i valori imposti dal D.Lgs 311/6 allegato C, che in zona climatica E dal 2017 impone un valore limite $U = 0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ per gli elementi opachi.

Verifica condensa superficiale e diagramma di Glaser nel mese di gennaio: - parete esterna

		Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	
Temperatura esterna	$\theta_{e,}$	[°C]	0.4	3.2	8.2	12.7	16.7	21.1	23.3	22.6	18.8	12.6	6.8	2.0
Pressione di vapore esterna	$p_{e,}$	[Pa]	516	606	583	804	1235	1702	1837	1953	1504	1180	841	606
Umidità relativa esterna	$\phi_{e,}$	[%]	82%	79%	54%	55%	65%	68%	64%	71%	69%	81%	85%	86%
Temperatura interna	$\theta_{i,}$	[°C]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	21.1	23.3	22.6	20.0	20.0	20.0	20.0
Differenza pressione di vapore	$\Delta p_{,}$	[Pa]	794	680	478	296	134	0	0	0	49	300	535	729
Pressione di vapore interna	$p_{i,}$	[Pa]	1389	1354	1109	1129	1382	1702	1837	1953	1557	1510	1429	1408
Umidità relativa interna	$\phi_{i,}$	[%]	59%	58%	47%	48%	59%	68%	64%	71%	67%	65%	61%	60%
Temperatura superficiale min.	$\theta_{s,min}$	[°C]	15.1	14.7	11.7	11.9	15.0	18.3	19.6	20.6	16.9	16.4	15.6	15.3
Fattore di temperatura minimo	$f_{R,min}$	[-]	0.75	0.69	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.66	0.74	NO COND. SUP.
Massa di vapore condensata	m_{cond}	[g/m ²]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NO COND. INT.

Mese
Gennaio



In questa tabella sono riportati i valori riguardanti le condizioni climatiche statistiche della città di Torino durante tutto l'anno e mostra che non c'è rischio di condensa interstiziale per la stratigrafia scelta. Sotto, il grafico di Glaser permette

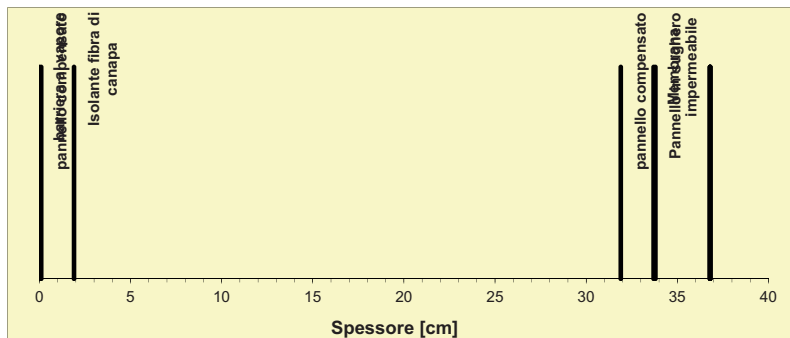
di osservare l'andamento della pressione del vapore sui vari strati nel mese più svantaggioso, ovvero gennaio.

Stratigrafia: trasmittanza termica e sfasamento. - parete di chiusura

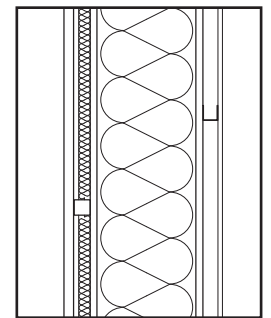
Tipo di componente		Chiusura verticale						
Stratigrafia (int-est)		s [cm]	ρ [kg/m ³]	μ [-]	c [J/kg°C]	λ [W/m°C]	R [m ² C/W]	opz. $\lambda \rightarrow R$
Strato liminare interno							0.13	
I	barriera al vapore	0.1	900	10000	1900	0.150		
II	pannello compensato	1.8	350	50	1700	0.120		
III	isolante fibra di canapa	30.0	30	1	1700	0.040		
IV	pannello compensato	1.8	350	50	1700	0.120		
V	Membrana impermeabile	0.1	320	280	1800	0.300		
VI	Pannello in sughero	3.0	110	20	1900	0.039		
VII								
VIII								
IX								
X								
Strato liminare esterno							0.04	

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammettenza termica interna (Y_{ti})	1.106 W/(m ² K)	4.38 h
Ammettenza termica esterna (Y_{te})	0.974 W/(m ² K)	2.98 h
Trasmittanza termica periodica (Y_{ie})	0.054 W/(m²K)	-8.79 h
Capacità termica areica interna (κ_i)	15.9 kJ/(m²K)	
Capacità termica areica esterna (κ_e)	14.1 kJ/(m ² K)	
Resistenza termica (R)	8.745 (m ² K)/W	
Trasmittanza termica (U)	0.114 W/(m²K)	
Fattore di attenuazione (f)	0.474	

Spessore (s)	36.8 cm	
Massa superficiale (m)	26 kg/m²	
Sfasamento (φ)	8.79 h	



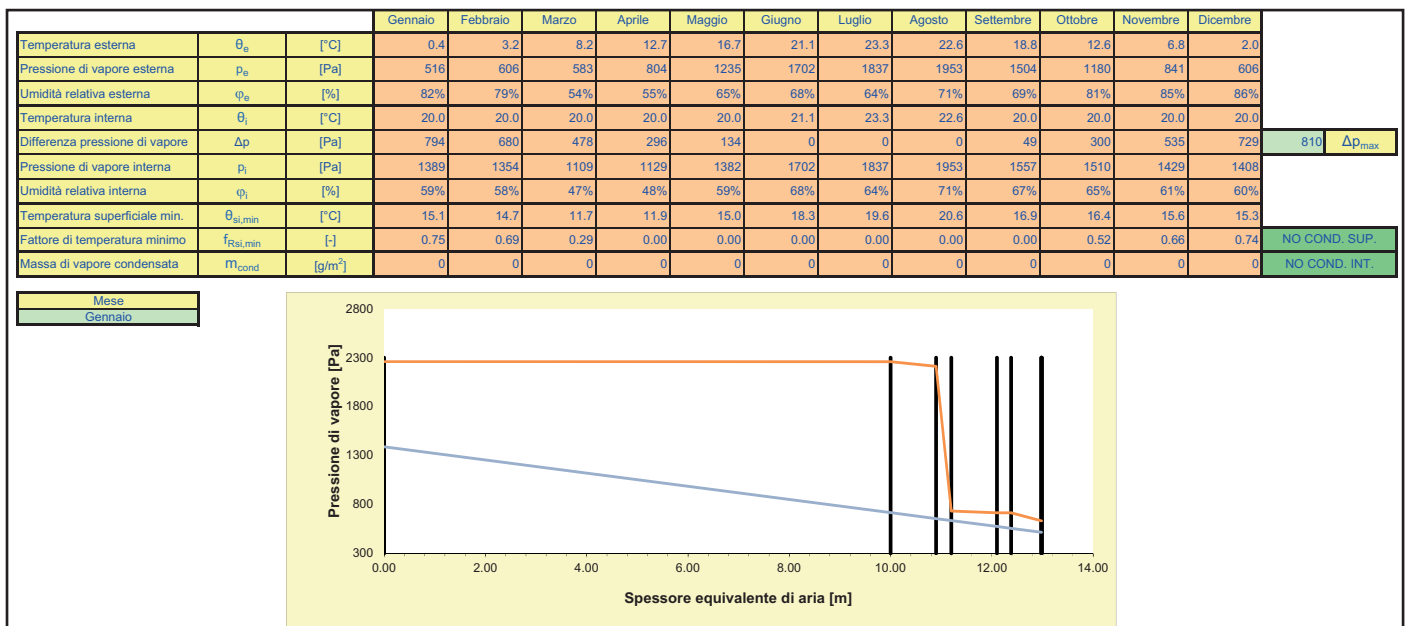
LEGENDA	
s	= spessore
ρ	= massa volumica
μ	= fattore di resistenza al vapore
c	= calore specifico
λ	= conducibilità termica
R	= resistenza termica



In questa tabella sono riportate le stratigrafie delle pareti di chiusura nel lato corto dell'edificio. Esso viene calcolato dalla barriera al vapore interna fino ai pannelli di rivestimento della parete ventilata. Tale configurazione consente di avere una

trasmittanza termica $U = 0.114 \text{ W/m}^2\text{K}$ ed uno sfasamento di 8.79 ore. Tale trasmittanza rispetta i valori imposti dal D.Lgs 311/6 allegato C, che in zona climatica E dal 2017 impone un valore limite $U = 0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ per gli elementi opachi.

Verifica condensa superficiale e diagramma di Glaser nel mese di gennaio: - parete di chiusura



In questa tabella sono riportati i valori riguardanti le condizioni climatiche statistiche della città di Torino durante tutto l'anno e mostra che non c'è rischio di condensa interstiziale per la stratigrafia scelta. Sotto, il grafico di Glaser permette

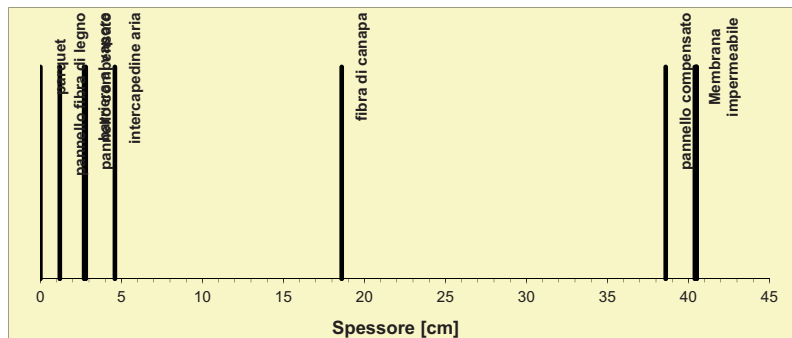
di osservare l'andamento della pressione del vapore sui vari strati nel mese più svantaggioso, ovvero gennaio.

Stratigrafia: trasmittanza termica e sfasamento. - solaio inferiore

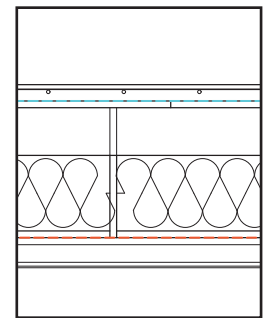
Tipo di componente Chiusura orizzontale inferiore							
Stratigrafia (int-est)	s [cm]	ρ [kg/m ³]	μ [-]	c [J/kg°C]	λ [W/m°C]	R [m ² C/W]	opz. $\lambda \rightarrow R$
Strato liminare interno						0.17	
I parquet	1.2	350	50	1700	0.120		
II pannello fibra di legno	1.5	400	3	2100	0.085		
III barriera al vapore	0.1	900	10000	1900	0.150		
IV pannello compensato	1.8	350	50	1700	0.120		
V intercapedine aria	14.0	1	1	1000	0.026		
VI fibra di canapa	20.0	50	2	1700	0.038		
VII pannello compensato	1.8	350	50	1700	0.120		
VIII Membrana impermeabile	0.1	320	280	1800	0.300		
IX							
X							
Strato liminare esterno						0.04	

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammettenza termica interna (Y_{ti})	1.799 W/(m ² K)	3.47 h
Ammettenza termica esterna (Y_{te})	1.149 W/(m ² K)	4.44 h
Trasmittanza termica periodica (Y_{ie})	0.033 W/(m ² K)	-9.68 h
Capacità termica areica interna (κ_i)	25.2 kJ/(m ² K)	
Capacità termica areica esterna (κ_e)	16.2 kJ/(m ² K)	
Resistenza termica (R)	11.444 (m ² K)/W	
Trasmittanza termica (U)	0.087 W/(m ² K)	
Fattore di attenuazione (f)	0.374	

Spessore (s)	40.5 cm
Massa superficiale (m)	34 kg/m ²
Sfasamento (φ)	9.68 h



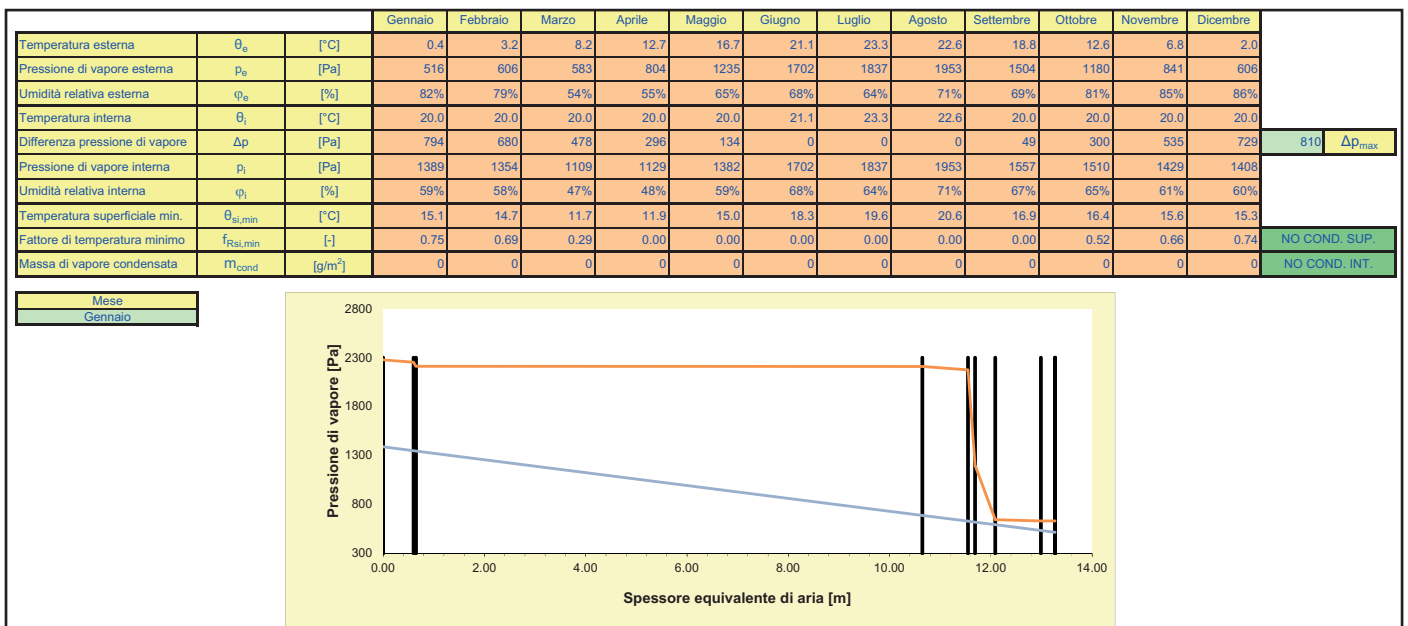
LEGENDA	
s	= spessore
ρ	= massa volumica
μ	= fattore di resistenza al vapore
c	= calore specifico
λ	= conducibilità termica
R	= resistenza termica



In questa tabella sono riportate le stratigrafie del solaio del piano di caplestio. Esso viene calcolato dalla barriera al vapore interna fino ai pannelli di rivestimento della parete ventilata. Tale configurazione consente di avere una trasmittanza

termica $U = 0.087 \text{ W/m}^2\text{K}$ ed uno sfasamento di 9.68 ore. Tale trasmittanza rispetta i valori imposti dal D.Lgs 311/6 alelgato C, che in zona climatica E dal 2017 impone un valore limite $U = 0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ per gli elementi opachi.

Verifica condensa superficiale e diagramma di Glaser nel mese di gennaio: - solaio inferiore



In questa tabella sono riportati i valori riguardanti le condizioni climatiche statistiche della città di Torino durante tutto l'anno e mostra che non c'è rischio di condensa interstiziale per la stratigrafia scelta. Sotto, il grafico di Glaser permette

di osservare l'andamento della pressione del vapore sui vari strati nel mese più svantaggioso, ovvero gennaio.

IV.4 Problematiche ambientali

L'idea di realizzare dei componenti in compensato di pioppo e cellulosa nasce dall'esigenza di impiegare materiali naturali e metterli al servizio del progetto architettonico.

Utilizzare risorse legnose, come già detto nel capitolo II.3 permette di avere un materiale duraturo ottenuto senza deturpare il suolo da cui viene prelevato, al contrario, attuando le giuste scelte di cloni e metodi di pioppicoltura, l'ambiente non può che risentirne positivamente.

L'obiettivo principale di questo progetto sta nel realizzare un componente che possa essere impiegato in campo architettonico in modo da massimizzarne l'impiego e prevederne i futuri scenari di decostruzione. La previsione degli scenari di fine vita dei componenti legnosi, come si è visto nel capitolo II.3, è un aspetto fondamentale: essi comprendono un possibile riutilizzo per realizzare altre strutture oppure un riciclaggio per la produzione di altri pannelli come OSB o similari, o come ultima possibilità la combustione per ricavarne dell'energia. La combustione deve essere l'ultimo passo della catena di utilizzo di un prodotto in legno, poiché tramite combustione rilascerebbe lo stesso quantitativo di CO_2 biosequestrata sotto forma di albero. Si pensi che in 1 m^3 di legno di pioppo sono contenuti circa 550 Kg di anidride carbonica^[1].

I componenti progettati, come si può evincere dallo schema permettono di sequestrare un discreto quantitativo di CO_2 dall'ambiente, specie se si considerano tutti i componenti utilizzati in un singolo modulo e lo si moltiplica per più moduli. [Fig.1].

Per l'intera struttura vengono utilizzati circa 19.04 m^3 di multistrato di pioppo 18 mm a 9 strati di cui 10.95 m^3 per i componenti di tutta la struttura di portali e pannelli di rivestimento, connettori e distanziali, 2.25 m^3 per tutti i tramezzi interni e setti murari di chiusura dei lati minori, 5.84 m^3 per tutti gli scatolari di isolamento impiegati. In

11.65 Kg CO_2

14.5 Kg CO_2

13.16 Kg CO_2

11.8 Kg CO_2

[Fig.1] Quantità di anidride carbonica in ogni scatolare di isolamento considerando struttura in compensato e cellulosa insufflata.

1 Cfr. sitografia [53]

totale, se si considera che in ogni m³ di legno di pioppo sono biosequestrati circa 550 kg di CO₂^[2], in totale permette di stoccare 10473 kg di CO₂.

Inoltre, la cellulosa che riempie gli scatolari progettati è presente in ogni campata del modulo abitativo in esame. Calcolando i m³ totali si può infatti ricavare anche il quantitativo di CO₂ contenuta in ogni campata considerando 1.4 kg di CO₂/ kg^[3].

In ogni campata risultano stoccati circa 261 kg di CO₂ per un totale di circa 2088 kg di CO₂ di soli fiocchi di cellulosa per l'intera struttura.

Infine il multistrato e la cellulosa dell'intero modulo abitativo, permettono di immagazzinare un totale di 12561 kg di CO₂ che sono stati sottratti all'atmosfera e che rimarranno stoccati al suo interno per tutto il ciclo di vita della struttura e/o dei suoi componenti.

Per questo motivo, una volta decostruito il modulo, il riutilizzo degli scatolari di isolamento è cruciale per un prolungato stoccaggio dell'anidride carbonica al loro interno, ed evitare così il rilascio in atmosfera che avverrebbe nel momento in cui dovessero essere utilizzati come combustibile per la produzione di energia.

L'industria della cellulosa legata alla produzione di carta è un elemento chiave di questo processo. La carta utilizzata all'interno degli scatolari infatti può provenire da scarti di giornale finemente tritati.

Nel caso di un'azienda nata proprio dal Politecnico di Torino, Nesocell, l'isolante da insufflare nelle intercapedini proviene dalle fibre lunghe di scarto dell'industria cartacea. Questo è un ulteriore scenario di impiego di questo prodotto, cercando di massimizzare l'utilizzo di questa materia prima ed evitando scarti. Trattandosi di

fibre vergini, non sono trattate con nessun tipo di prodotto chimico, costituendo un prodotto naturale da tutti i punti di vista.

Un ulteriore aspetto analizzato consiste nel raffronto con una tradizionale struttura WikiHouse, che nelle intercapedini inserisce direttamente blocchi di EPS.

Sono stati confrontati i GWP della struttura progettata, confrontando i m³ occupati dalla cellulosa dell'intera struttura con la stessa quantità di EPS.

Sono state considerate le volumetrie dei due materiali rapportate alle diverse densità che assumono sotto forma di isolante.

EPS: $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$

Cellulosa: $\rho = 52 \text{ kg/m}^3$ (negli scatolari delle pareti)

Cellulosa: $\rho = 47 \text{ kg/m}^3$ (negli scatolari in copertura)

Considerando il totale di m³ utilizzati = 4.37 a campata

Considerando inoltre:

GWP EPS: 3.5 kg CO₂/ Kg materiale^[4]

GWP cellulosa: 0.819 kg CO₂/ Kg materiale^[5]

Si ottiene che per la stessa struttura, utilizzando la cellulosa vengono prodotti 1216 kg CO₂ eq. nei processi di produzione del materiale, invece utilizzando l'EPS si produrrebbero 2448 kg CO₂ eq., ovvero più del doppio [Fig.2].

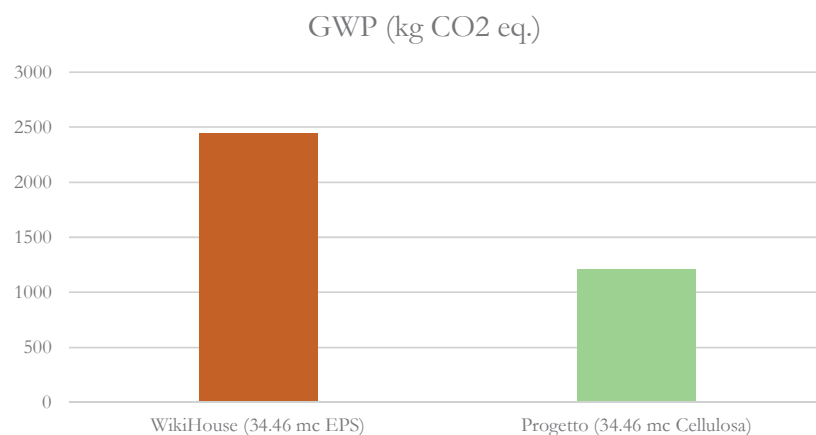
Da questi calcoli si può evincere come l'impiego di cellulosa come materiale isolante sia da preferire ai materiali derivati dall'industria petrolchimica, poiché permettono di ridurre sensibilmente l'impatto ambientale ad essi associato.

2 Cfr. sitografia [53]

3 Cfr. sitografia [51]

4 Cfr. sitografia [52]

5 Cfr. sitografia [52]



[Fig.2] GWP a confronto.

IV.5 Aspetti strutturali

Il sistema costruttivo WikiHouse impiegato in questo progetto è formato principalmente da portali che vengono sostenuti in un primo momento, in fase di costruzione, da dei connettori che aiutano a mantenere chiusi i portali stessi, evitando che sotto le spinte dei carichi facciano aprire i loro incastri. Successivamente l'intera struttura viene rinforzata e controventata dal posizionamento di tutti gli scatolari di isolamento che vengono agganciati in quattro punti alla struttura stessa dei portali. Essi impediscono che possano sfilarsi o traslare grazie ai ganci in legno di bloccaggio. Infine il tutto viene chiuso dai pannelli di rivestimento interni ed esterni che agiscono da collante tra tutti gli elementi impedendo qualunque tipo di movimento. Questo consente di avere una stabilità complessiva molto maggiore rispetto ai tradizionali sistemi WikiHouse e Facit Homes analizzati, con la possibilità di apporre su di essa un carico maggiore e rendendola adatta anche a sostenere più di un piano.

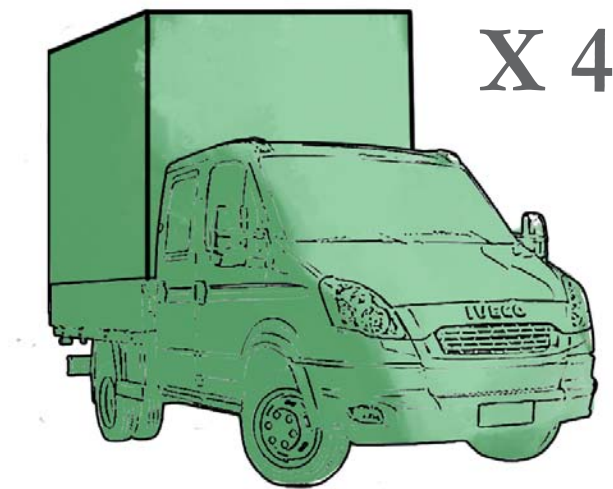
Facit Homes, impostando tutta la parte strutturale sugli scatolari di isolamento in compensato, rischia di sollecitare eccessivamente questi ultimi, e nel caso di forze laterali impresse all'edificio rischierebbe il danneggiamento di elementi se non il collasso della struttura che cederebbe sotto il suo stesso peso. Si ricordi che le travi I-Joist che sorreggono la copertura pog-

giano esse stesse sugli scatolari; sebbene questi abbiano degli elementi di acciaio per formare l'incastro dei suoi componenti la struttura principale rimane quella in compensato, e senza controventature adeguate risultano fragili.

WikiHouse, utilizza una struttura a portali che vengono in parte controventati dai connettori tra un portale e l'altro, ed in parte dai pannelli di rivestimento, sebbene essi risultino fragili nel momento in cui la forza laterale applicata fosse intensa.



IV.6 Aspetti logistici: trasporto



Per ciò che riguarda il trasporto della struttura è stato considerato un mezzo di trasporto leggero su strada, di dimensioni contenute in modo da poter trasportare i pezzi della struttura agevolmente anche su terreni impervi.

Il calcolo è stato condotto considerando un furgone IVECO Daily, che oltre ad avere bassi consumi, può ospitare nel suo cassone oggetti di lunghezza massima 4.8 m e larghezza massima 2.2 m, per un'altezza del carico totale 2.2 m.

La capienza risultante corrisponde quindi a 23 m^3 , un valore sufficiente a garantire pochi viaggi per le diverse parti della struttura da trasportare.

Per avere un riscontro pratico con i mq di legno da trasportare, innanzitutto sono state considerate le misure dei pannelli in multistrato considerati, $3100 \times 1530 \text{ mm}$ per uno spessore di 18 mm. Essi totalizzano un'area di 4.74 m^2 . Questo valore è stato utilizzato per dividere il totale dei mq dei componenti dell'intera struttura esclusi gli scatolari di isolamento, che ammonta a 719 m^2 .

$719 \text{ m}^2 : 4.74 \text{ m}^2 = 151$ pannelli di multistrato di pioppo.

Successivamente vengono calcolati mc totali da trasportare, non trattandosi di pannelli interi ma di elementi già tagliati ed in alcuni casi irregolari, sono stati calcolati i mc totali da trasportare e rapportati ai mc di carico del furgone che ammontano a 23 m^3 .

$719 \text{ m}^2 \times 0.018 \text{ m} = 13 \text{ m}^3$ di materiale da trasportare

La portata di un furgone ammonta ad un massimo di 4900 kg e considerando 7.4 kg/m^2 dei pannelli Panguaneta scelti, si avrà un totale di 5320 kg per tutta la struttura esclusi gli scatolari di isolamento. Per rimanere in condizioni di sicurezza e affidandosi ai dati del furgone scelto saranno necessari due furgoni per poter caricare tutta la struttura.

Il trasporto degli scatolari di isolamento viene considerato con degli scatolari già assemblati ed insufflati, che per ogni campata raggiungono un peso totale di 568 kg. Questo valore lo si moltiplica per tutte le campate e si ottiene 4544 kg totali di materiale da trasportare.

Si procede col calcolo dei mc occupati dagli scatolari prendendo come riferimento l'ingombro di quello presente in maggiore numero ovvero lo scatolare che si ripete sia nelle pareti che in copertura ovvero 0.25 m^3 .

Si divide la portata massima di un furgone per l'ingombro di uno scatolare:

$23 \text{ m}^3 : 0.25 \text{ m}^3 = 92$ scatolari di isolamento

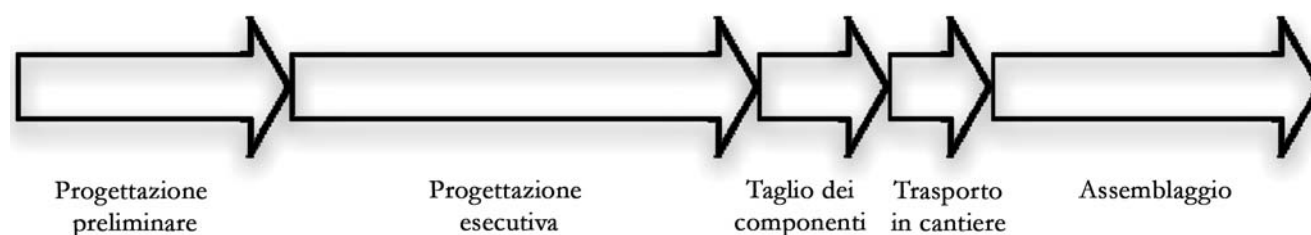
Su un massimo di 176 scatolari totali presenti nella struttura, si rivelano necessari due furgoni per trasportarli in cantiere, raggiungendo un massimo di 4 furgoni non a pieno carico per l'intero modulo abitativo.

IV.7 - Processi costruttivi a confronto

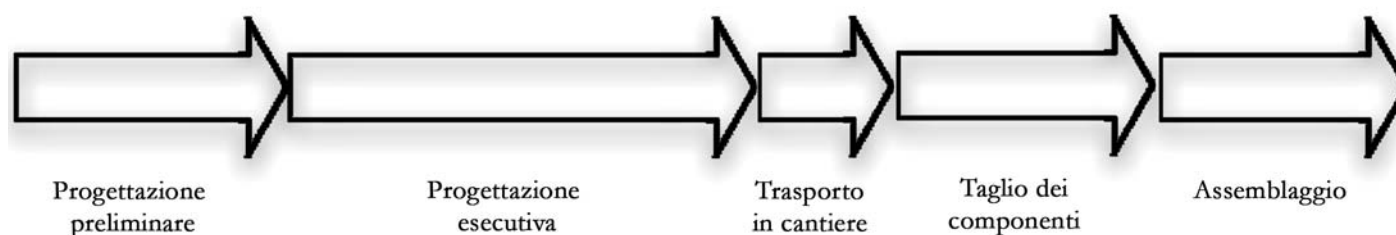
PROGETTO



WIKIHOUSE



FACIT HOMES



I questi schemi viene mostrato un diagramma approssimativo in termini di settimane di lavoro a seconda delle diverse fasi progettuali. La fase di progettazione preliminare e progettazione definitiva hanno la stessa lunghezza perchè è difficile quantificare in modo esatto diversi processi progettuali attuati con diverse tecniche e per costruire oggetti riproducibili in serie o meno. Nel caso di Facit Homes il trasporto in cantiere è stato anticipato rispetto al taglio proprio perchè il taglio nel loro caso viene eseguito in cantiere ed occupa più o meno tutto il tempo di costruzione dell'edificio, infatti le frecce temporali di queste due fasi assumono la medesima lunghezza. Hanno una durata maggiore poichè il montaggio non risulta comunque veloce do-

vedo assemblare scatolare per scatolare in cantiere. Wikihouse invece differisce dal processo produttivo progettuale per i tempi di assemblaggio in cantiere, che si dilatano molto per isolare tutte le intercapedini manualmente. Il processo costruttivo applicato nel progetto in questione affida la velocità di assemblaggio della struttura isolata, al fatto che gli scatolari possono essere degli scatolari provenienti dal riutilizzo di una struttura precedente e che possono giungere in cantiere pronti da montare, riducendo notevolmente tutto il processo di assemblaggio grazie anche agli incastri che permettono di svolgere il lavoro velocemente. Il taglio degli elementi nel caso progettuale e in WikiHouse, viene eseguito per conto di terzi, per-

mettendo di tagliare contemporaneamente anche in più macchinari, riducendo di molto le tempistiche. Il trasporto risulta molto breve poiché questi due sistemi permettono di avvicinare la produzione quanto più possibile al cantiere, in qualsiasi parte del mondo, mentre nel caso Facit Homes si deve sempre affrontare il problema logistico del trasporto del container in cantiere, ovunque esso sia locato.

V - CONCLUSIONI

Il sistema costruttivo adottato ed adeguato ad ospitare il sistema di isolamento a scatolari in compensato insufflati con fiocchi di cellulosa si è rivelato un ottimo sistema sotto molteplici aspetti.

Partendo dalla sua composizione, ovvero il compensato e la cellulosa che può provenire da scarti dell'industria della carta o dal riciclo di giornali tritati, il sistema si inserisce già in un'ottica di economia circolare e di sostenibilità ambientale. La coltivazione del pioppo per produrre i pannelli, in Italia andrebbe ad alimentare un'economia di filiera che ha la possibilità di crescere e fortificarsi, apportando anche dei benefici a livello economico e di impiego. Le coltivazioni di pioppo, anche tramite l'impiego di nuove tipologie di cloni, sono in sé un elemento positivo per l'ambiente, per la depurazione del suolo, per la ridotta quantità d'acqua impiegata, per non essere una pratica che sottrae materie prime direttamente al terreno e per la sottrazione di CO₂ dall'atmosfera durante la crescita degli alberi.

Queste caratteristiche fanno del compensato di pioppo un elemento di straordinaria valenza tecnologica e ambientale, specie se impiegato in campo architettonico in sostituzione ad altri materiali derivanti da processi non sostenibili o da risorse limitate.

La realizzazione di elementi scatolari in multistrato di pioppo per isolare strutture di tipo WikiHouse è stato riscontrato che sia una soluzione valida sotto

molti aspetti analizzati. Essi migliorano la tecnica costruttiva conferendole maggiore stabilità e robustezza poiché fungono da controventi per una struttura altrimenti fragile. Migliorano inoltre tutto il processo costruttivo, velocizzandolo: questo aspetto può aprire la strada all'impiego di queste strutture anche in situazioni di emergenza oltre che a favorire l'autocostruzione, poiché i componenti possono essere prodotti in serie e pronti ad essere impiegati.

Le verifiche condotte sulla stratigrafia risultante hanno permesso di osservare che i diversi pacchetti murari utilizzati hanno ottime prestazioni e senza il rischio di condensa interstiziale, con valori di trasmittanza termica compresi tra $U = 0.07$ e $U = 0.114$.

Gli incastri progettati nella struttura stessa permettono sia un assemblaggio totalmente a secco che un veloce disassemblaggio degli scatolari per poterli reimpiegare in altre strutture prolungandone il ciclo di vita. È stato calcolato inoltre il ridotto GWP dell'impiego dell'isolante in fiocchi di cellulosa rispetto all'EPS di una tradizionale struttura WikiHouse concludendo che il secondo ha un impatto ambientale di più del doppio del primo che, al contrario, permette di stoccare nelle sue fibre insieme all'intera struttura progettata un totale di 12561 kg di CO₂.

Infine questa tipologia di struttura permette sia un facile stoccaggio nel caso di produzione in serie di moduli, grazie alla suddivisione dei diversi componenti che vengono montati ad incastro, sia un trasporto agevolato senza l'impiego di mezzi pesanti, in modo da permetterne la costruzione anche in luoghi remoti e/o di difficile fruizione.

BIBLIOGRAFIA:

- Agenzia internazionale dell'energia, 2016: "CO2 Emissions from Fuel Combustion": IEA, Parigi, Francia.
- Assopannelli, 2012. La pioppicoltura in Italia. Assopannelli/Federlegno-Arredo, Milano, Italia.
- Commissione Europea, 2015: "L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare" : Comunicazione della commissione al Parlamento Europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni ; Bruxelles, 2/12/2015, COM(2015) 614 final.
- Comunicazione della commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale Europeo e al Comitato delle regioni, 2013: "A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector", Bruxelles, France.
- Conferenza Ministeriale sulla protezione delle foreste in Europa. Helsinki, 1993.
- FAO, 2010 (Food and Agricultural Organization of the United Nations). "What Wood Fuels Can Do to Mitigate Climate Change".
- ISPRA, 2016. Rapporto Rifiuti Speciali - Edizione 2016. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Rome, Italy.
- Lucon O., Ürge-Vorsatz D., Zain Ahmed A., Akbari H., Bertoldi P., Cabeza L.F., Eyre N., Gadgil A., Harvey L.D.D., Jiang Y., Liphoto E., Mirasgedis S., Murakami S., Parikh J., Pyke C., Vilariño M.V., 2014: "Buildings, climate change 2014: mitigation of climate change" In: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, New York, New York, USA.
- ONU, Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015. "Trasformare il nostro mondo: l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile" ; 21 ottobre 2015.
- Pagliolico S., a: slides sulla gestione sostenibile dei rifiuti: Politecnico di Torino.
- Pagliolico S., b: Dispense del corso di Sostenibilità di processi e prodotti nei materiali per l'architettura del Corso Di Laurea Magistrale In Architettura Per Il Progetto Sostenibile : Politecnico di Torino .
- Pearson T., Swails E., Brown S., 2012: "Wood product accounting and climate change mitigation projects involving tropical timber": Winrock international report to the international tropical timber organization. Report, Winrock International.
- Zimmann R., O'Brien H., Hargrave J., Morrell M., Pearsall M., Martins R.I., zu Dohna F., van Grimbergen N., Blackbourn M., 2016: "The circular economy in the built environment" : Arup, settembre 2016

Libri

- Castro G., Fragnelli G., Zanuttini R., 2014: "La pioppicoltura e il compensato di pioppo dell'industria Italiana"; Lampi di Stampa, Italia.
- Corona P., Bergante S., Castro G., Chiarabaglio P.M., Coaloa D., Facciotto G., Gennaro M., Giorcelli A., Rosso L., Vietto L., Nervo G., 2018: "Linee di indirizzo per una pioppicoltura sostenibile". Rete Rurale Nazionale, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Roma, ISBN: 978-88-99595-96-8

- Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows; Jørgen Randers; William W. Behrens III, *The Limits to Growth*, 1972.
- Giordano R., 2010: “I prodotti per l’edilizia sostenibile: la compatibilità ambientale dei materiali nel processo edilizio”: Esselibri, Napoli.
- McDonough, William e Braungart, Michael, *Dalla culla alla culla. Come conciliare tutela dell’ambiente, equità sociale e sviluppo*, Torino, Blu Edizioni, 2003, pp. 208. ISBN 9788887417722
- Natterer J., Herzog T., Volz M., 1998: “Atlante del legno” : Grande atlante di architettura, Utet editore, 01/01/1998.
- RUnioncamere e Symbola, 2018: “GreenItaly rapporto 2018: una risposta alla crisi, una sfida per il futuro”: I S B N: 978-88-99265-43-4

Tesi

- Aimone G.M., Ronco V., 2017: “Architettura in compensato, il caso Wiki House: studio della fattibilità economica e ambientale finalizzato alla progettazione di un modulo per cicloturisti realizzato con elementi piani” Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- Deidda A., 2018: “Il pioppo come materia prima per l’edilizia.”, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- Edward F.A. David, 2018: “Building Open-Source: To what extent does WikiHouse apply the open-source model to architecture?” : Master of Architecture Dissertation Module AR602, School of Architecture, University of Kent.
- Ghietti A., 2018: “Soluzioni innovative per migliorare gli impatti ambientali di una poltrona”, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- Levarato G., Pra A. e Pettenella D., 2018: “Quale futuro per la pioppicoltura? Indagine sul quadro attuale e le prospettive d’impiego industriale del legname di pioppo”. ETIFOR Srl – Spin-off dell’Università di Padova. Padova, Italia.
- Ragazzi M., 2016: “Criticità della combustione del legno trattato” : Università degli studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica.

Articoli

- Allwood J.M., 2014: “Squaring the Circular Economy: The Role of Recycling within a Hierarchy of Material Management Strategies”: *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*, Elsevier Science; pp. 753-809.
- Arrigoni A., Zucchinelli M., Collatina D., Dotelli, G., 2018: “Life cycle environmental benefits of a forward-thinking design phase for buildings: the case study of a temporary pavilion built for an international exhibition”: *Journal of Cleaner Production* ; 187, pp. 974-983.
- Arslan H., 2007: “Re-design, re-use and recycle of temporary houses”: *Building and Environment* ; 42 (1), pp. 400-406.

- Assefa G., Ambler C., 2017: “To demolish or not to demolish: life cycle consideration of repurposing buildings”: *Sustainable cities and society* ; 28, pp. 146-153.
- Cabeza L.F., Rincón L., Vilariño V., Perez G., Castell A., 2014: “Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ; 29, pp. 394-416.
- Dadoo A., Gustavsson L., Sathre R., 2014: “Recycling of Lumber” : *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*, Elsevier Science; pp. 275-297.
- Duan H., Qiu T., Guo L., Ye J., Li X., 2015: “The microcapsule-type formaldehyde scavenger: The preparation and the application in urea-formaldehyde adhesives” : *Journal of Hazardous Materials*; 293, pp. 46–53.
- Esposito M., Tse T., Soufani K., 2015: “L’avanzata dell’economia circolare”: *Harvard business review*; pp. 94-97.
- Fujimoto T., Hirabayashi Y., Kuga Y., Magara K., Yamanaka S., 2017: “Reduction of formaldehyde emission from plywood using composite resin composed of resorcinol– formaldehyde and urea-modified scallop shell nanoparticles”; *Wood Sci Technol*; 51:297–308, DOI: 10.1007/s00226-016-0868-3
- Gangi M., Tabarsa T., Sepahvand S., Asghari J., 2013: “Reduction of formaldehyde emission from plywood” : *Journal of Adhesion Science and Technology*; 27:13, 1407-1417, DOI: 10.1080/01694243.2012.739016
- Gao W., Ariyama T., Ojima T., Meier A.. “Energy impacts of recycling disassembly material in residential buildings”: *Energy and Buildings* ; 33 (6), pp. 553-562.
- Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana, 2017, a: “Criteri ambientali minimi per l’affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici”; 259, pp. 27-44.
- Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana, 2017, b: “Criteri ambientali minimi per la fornitura e il servizio di noleggio di arredi per interni”; 23, pp. 3-24.
- Girods P., Dufour A., Rogaume Y., Rogaume C., Zoulalian A., 2008: “Pyrolysis of wood waste containing urea-formaldehyde and melamine-formaldehyde resins” : *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*; 81(1), pp.113-120.
- Gustavsson L, Sathre R., 2006: “Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials”: *Building and Environment.* ; 41(7) : pp. 940–951.
- Gustavsson L, Sathre R., 2011: “Energy and CO2 analysis of wood substitution in construction”: *Climatic Change* ; 105 (1–2) : pp. 129–153.
- Haberl H., Geissler S., 2000: “Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource” : *Ecological Engineering* 16 ; pp. S111–S121.
- Indrawan S.E., 2017: “Design for environment and form findings through digital fabrication” : *Dimensi: Journal of Architecture and Built Environment* ; 44(2):171-178.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the IPCC* Geneva, Switzerland: IPCC; 2007.
- McDavitt J., Grigsby W., 2014: “Life Cycle Assessment of Bio- and Petro-Chemical Adhesives Used in Fiber-

board Production” : Journal of Polymers and the Environment,22(4), pp.537-544

- Ming L., Yan W., Yiqiang W., Zhongqi H., Hui W., 2018: “Greener” adhesives composed of urea-formaldehyde resin and cottonseed meal for wood-based composites” : Journal of Cleaner Production; 187, 361-371.
- Parvin A., 2013: “Architecture (and the other 99%): Open-Source Architecture and Design Commons” : Architectural Design ; 83 (6), pp. 90-95
- Ramage M.H., Burrridge H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D.U., Wu G., Yu L., Fleming P., Densley-Tingley D., Allwood J., Dupree P., Linden P.F., Scherman O., 2017: “The wood from the trees: The use of timber in construction”: Renewable and Sustainable Energy Reviews ; 68, pp. 333–359.
- Rau A., Crawford R.H., 2015: “Building service life and its effect on the life cycle embodied energy of buildings”. Energy ; 79, pp. 140-148.
- Sujatha D., Nath S. K. , Pandey C. N., 2011: “Reduction of formaldehyde release from panel products”: J Indian Acad Wood Sci ; 8(2), pp. 136–138.
- Thormark C., 2006. “The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building”: Building and Environment ;41 (8), pp. 1019-1026.
- Valerio F., 2012: “Impatti ambientali e sanitari prodotti dalla combustione di biomasse legnose per la produzione di calore ed elettricità” : Epidemiol Prev; 36 (1): pp. 16-26.

Normative

- CEN, 2002. EN 1990. Eurocode - Basis of Structural Design, 2002.
- DIRETTIVA 2008/98/CE : Direttiva relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive; 19 novembre 2008
- Direttiva 75/442/Cee : Direttiva relativa ai rifiuti; 15 luglio 1975
- DM 03/08/2005 : Definizione dei criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica.
- DM 10 ottobre: 2008. “Disposizioni atte a regolamentare l'emissione di aldeide formica da pannelli a base di legno e manufatti con essi realizzati in ambienti di vita e soggiorno”
- DM 203/2003 : Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo; 8 maggio 2003.
- UNI EN 120: 1995. “Pannelli a base di legno. Determinazione del contenuto di formaldeide. Metodo di estrazione detto metodo perforatore.”
- UNI EN 13986: 2015. Pannelli a base di legno per l'utilizzo nelle costruzioni - Caratteristiche, valutazione di conformità e marcatura.
- UNI EN 313-1:1996. Pannelli di legno compensato – Classificazione e terminologia – Classificazione.
- UNI EN 313-2:1996. Pannelli di legno compensato – Classificazione e terminologia – Terminologia.
- UNI EN 315:2000. Pannelli di legno compensato – Tolleranze dimensionali.
- UNI EN 335-1:2006. Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno – Definizione delle classi di utilizzo – Parte 1: generalità.
- UNI EN 350-1:1996. Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno – Durabilità naturale del legno massicc-

cio Guida ai principi di prova e classificazione della durabilità naturale del legno.

- UNI EN 635-1:1996. Pannelli di legno compensato - Classificazione in base all'aspetto delle facce - generalità.
- UNI EN 635-2:1996. Pannelli di legno compensato - Classificazione in base all'aspetto delle facce - latifoglie.
- UNI EN 717-1: 2004. "Pannelli a base di legno - Determinazione del rilascio di formaldeide - Parte 1: Emisione di formaldeide con il metodo della camera"
- UNI EN 717-2: 1996. "Pannelli a base di legno. Determinazione del rilascio di formaldeide. Rilascio di formaldeide con il metodo dell'analisi del gas."

SITOGRAFIA:

- [1] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?qid=154395888571&uri=CELEX:41993X0517> consultato il 04/12/2018
- [2] M. Morabito, http://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/597_2008_80_1960.pdf consultato il 10/12/2018
- [3] "<http://www.materialflows.net/circular-economy/>" consultato il 20/10/2018
- [4] <https://www.evivaenergia.com/news/2017/12/produzione-di-energia-da-biomasse/> consultato il 5/01/2019
- [5] <http://www.simamspa.it/it/la-biomassa-legnosa/> consultato il 5/01/2019
- [6] <http://www.fao.org/docrep/013/i1756e/i1756e00.htm> consultato il 12/12/2018 [FAO]
- [7] <http://www.federlegnoarredo.it/it/associazioni/assopannelli/approfondimenti-news/riciclo-e-economia-circolare-dal-recupero-di-materia-allo-sviluppo-sostenibile> consultato il 15/12/2018
- [8] <http://gestione-rifiuti.it/smaltimento-legno> consultato il 7/01/2019
- [9] <http://propopulus.eu/en/challenge/poplar-efficiency-value/> consultato il 18/01/2018
- [10] https://onedrive.live.com/?authkey=%21AK7_hSjY-dAV0cY&cid=D15F513C0951A719&id=D15F513C0951A719%215595&parId=D15F513C0951A719%215594&o=OneUp (intervista paolo fantoni)
- [11] http://www.nextville.it/Biogas/554/La_digestione_anaerobica consultato il 12/02/2019
- [12] <https://www.pefc.it/about-pefc/cosa-fa-il-pefc>
- [13] http://www.greenadvisor.it/certificazioni_news/1555.htm
- [14] C. Garrone, Milano, 2012. http://www.federlegnoarredo.it/ContentsFiles/0000189391_AP0011-12pioppicoltura.pdf (LA PIOPPICOLTURA IN ITALIA PDF) consultato il 15/12/2018
- [15] <http://www.federlegnoarredo.it/it/associazioni/assopannelli/approfondimenti-news/pioppicoltura/> consultato il 15/12/2018
- [16] <http://dati-censimentoagricoltura.istat.it/Index.aspx> consultato il 11/02/2019 (DATI ISTAT CGA 2010)
- [17] <http://www.federlegnoarredo.it/it/associazioni/assopannelli/approfondimenti-news/> consultato il 15/12/2018
- [18] <https://www.panguaneta.com/it/news/677-pioppo-eccellenza-da-valorizzare> consultato il 15/12/2018
- [19] <https://www.agriopendata.it/> consultato il 20/02/2019

- [20] <http://propopulus.eu/wp-content/uploads/2018/07/Argumentaire-IT-web.pdf> (LIBRO SUL PIOPPO DEL 21 SECOLO PDF) consultato 20/02/2019
- [21] http://www.woodlab.polito.it/wp-content/uploads/2012/05/scheda_compensato_pioppo_definitiva_13_aprile_2012.pdf (PDF SUL COMPENSATO DI PIOPPO) consultato 20/02/2019
- [22] <https://www.panguanetaplywood.com/it/caratteristiche-tecniche/classificazione> consultato il 15/12/2018 consultato 23/02/2019
- [23] <http://www.magcommerciale.it/> consultato 22/02/2019
- [24] <https://www.kmamax.com/plymetals.html> consultato 23/02/2019
- [25] <https://www.ideegreen.it> consultato 23/02/2019
- [26] <http://www.tuttolegno.eu/informazioni/legnami/42-legno-paniforte.html> consultato 20/02/2019
- [27] <https://www.costantinilegno.it> consultato 24/02/2019
- [28] <https://catas.com/uploads/media/formaldeideita.pdf> consultato il 28/03/2019
- [29] <https://www.estambiente.it/formaldeide-cancerogena-dal-1-gennaio-2016/> consultato il 28/03/2019
- [30] <http://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-in-europa> consultato il 28/03/2019
- [31] <http://risponde.promolegno.com/domanda/data/che-differenza-ce-fra-incollaggio-fenolico-e-incollaggio-melaminico/> consultato il 4/04/2019
- [32] <https://www.ambientesicurezzanews.it/sicurezza/formaldeide-settori-rischi-salute-sicurezza.php> consultato il 4/04/2019
- [33] <https://www.arb.ca.gov/regact/2007/compwood07/apph.pdf> 9/04/2019
- [34] http://lombardia.confagricoltura.it/file_upload/lombardia/files/libretto_pioppicoltura.pdf consultato il 4/04/2019
- [35] <https://wikihouse.cc> consultato il 10/04/2019
- [36] <https://awikifarmhouse.wordpress.com> consultato il 02/03/2019
- [37] https://www.youtube.com/watch?time_continue=330&v=4fB3SFgKPog (video Alastair Parvin) 02/03/2019
- [38] https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/scoreboard2018/indicators/19._Construction_and_demolition_waste.pdf consultato il 14/11/19
- [39] <https://archello.com/project/the-circular-economy-building> consultato il 5/05/2019
- [40] <https://earthbound.report/2016/09/12/the-resolve-framework-for-a-circular-economy/> consultato il 5/05/2019
- [41] <https://www.youtube.com/watch?v=Tbkr20OIIDw&t=2s> consultato il 5/05/2019
- [42] <http://facit-homes.com> consultato il 12/08/2019
- [43] <http://pefc.review.llamadigital.net/system/resources/W1siZiIsIjIwMTUvMDEvMTUvNWZrazFhemY2OF9GYWNpdEhvbWVzLnBkZiJdXQ/FacitHomes.pdf?sha=70b00642ca0067aa> PEFC documento con dati sul risparmio Co2 consultato il 12/08/2019

- [44] <https://www.theguardian.com/business/2015/aug/23/digital-fabrication-housebuilding-headaches-facit-homes> consultato il 12/08/2019
- [45] <https://vimeo.com/53932758> Video Grand Designs puntata 19 settembre consultato il 12/08/2019
- [46] <https://vimeo.com/20103388> Video D-Process.(anche immagini) consultato il 12/08/2019
- [47] <https://vimeo.com/59581274> Video Bruce Bell consultato il 12/08/2019
- [48] <https://www.digitalengineering247.com/article/snap-fit-construction-from-facit-homes> consultato il 12/08/2019
- [49] <https://www.ellenmacarthurfoundation.org> consultato il 12/08/2019
- [50] <http://www.arup.com> consultato il 18/07/2019
- [51] <http://www.centroisolamento.it/wp-content/uploads/2019/10/20180130-ecologia-isofloc.pdf> consultato il 29/09/2019
- [52] http://analizebasilicata.altervista.org/blog/wp-content/uploads/2016/03/Uso_Del_Polistirene_Espanso_724-policoro.pdf consultato il 29/09/2019
- [53] <http://www.confagricolturamantova.it/public/files/Situazione%20generale%20della%20pioppicoltura%20italiana%20-%20Fabio%20Boccalari-762.pdf> consultato il 29/09/2019

RIFERIMENTI IMMAGINI

▫ I INTRODUZIONE

▫ II STATO DELL'ARTE

- Fig. II.1 <http://allvectorlogo.com/pefc-logo/>
- Fig. II.2 <https://it.fsc.org/it-it/certificazioni/i-marchi-fsc>
- Fig. II.3 <http://www.vita.it/it/blog/facciamolo-verde/2016/09/12/prodotti-ecolabel-perche-scegliere/4184/>
- Fig. II.4 <https://www.ecolabel.dk/en/become-certified/what-does-it-cost>
- Fig. II.5 https://de.wikipedia.org/wiki/Blauer_Engel
- Fig. II.6 <https://www.acial.com/en/certification/commitment-to-the-environment>
- Fig. II.7 <http://canali.kataweb.it/kataweb-consumi/2017/02/01/simboli-di-riciclo-sembrano-tutti-uguali-quali-sono-le-differenze/>
- Fig. II.8 <https://www.bioespansi.it/>
- Fig. II.9 <http://eurepack.eu/eventi-convegni/life-cycle-assessment-lca-e-sviluppo-delle-figure-professionali-esperienze-aziendali-a-confronto/>
- Fig. II.10 <https://slideplayer.it/slide/608563/>
- Fig. II.11 <http://www.ibl.it/it/aspetti-tecnici/classi-di-qualita/>
- Fig. II.12 elaborazione personale
- Fig. II.13 elaborazione personale
- Fig. II.14 elaborazione personale
- Fig. II.15 elaborazione personale
- Fig. II.16 elaborazione personale
- Fig. II.17 elaborazione personale
- Fig. II.18 elaborazione personale
- Fig. II.19 Panguaneta
- Fig. II.20 Panguaneta
- Fig. II.21 Panguaneta
- Fig. II.22 <https://architettorisponde.wordpress.com/tag/sfogliatura-del-legno/>
- Fig. II.23 Panguaneta
- Fig. II.24 Panguaneta
- Fig. II.25 Panguaneta
- Fig. II.26 Panguaneta
- Fig. II.27 Panguaneta
- Fig. II.28 Panguaneta
- Fig. II.28b Panguaneta
- Fig. II.29 Panguaneta

- Fig. II.30 Panguaneta
- Fig. II.31 Panguaneta
- Fig. II.32 Panguaneta
- Fig. II.33 Panguaneta
- Fig. II.34 Panguaneta
- Fig. II.35 <http://www.plywoodforlife.com/images/download/catalogo-gen-ita-lores.pdf>
- Fig. II.36 Rielaborazione da Levarato G et al., 2018
- Fig. II.37 Rielaborazione da Levarato G et al., 2018
- Fig. II.38 Rielaborazione da Levarato G et al., 2018
- Fig. II.39 Rielaborazione da Levarato G et al., 2018
- Fig. II.40 <https://www.juzaphoto.com/galleria.php?t=2836232&l=it>
- Fig. II.41 http://www.crpa.it/nqcontent.cfm?a_id=4051
- Fig. II.42 <http://www.mazzucchivivai.it/viticultura/Gallerie/GalleriaVivai>
- Fig. II.43 <http://www.vivaitomasoni.eu/pioppelle.htm>
- Fig. II.44 <http://www.vita.it/it/article/2015/05/29/leroy-merlin-oltre-la-csr-contro-la-poverta/135279/>
- Fig. II.45 <http://www.vita.it/it/article/2015/05/29/leroy-merlin-oltre-la-csr-contro-la-poverta/135279/>
- Fig. II.46 elaborazione personale
- Fig. II.47 <http://www.abbattimentopiantepedrinazzi.it/>
- Fig. II.48 <https://italian.alibaba.com/product-detail/urea-formaldehyde-glue-powder-plywood-production-urea-formaldehyde-resin-price-60087500089.html>
- Fig. II.49 <https://www.gyproc.it/caratteristiche>
- Fig. II.50 <https://www.glamlaminates.com/product/silver-acrylic-sheet/>
- Fig. II.51 <http://www.wallcovering-achilles.jp/functions/>
- Fig. II.52 rielaborazione **McDavitt J. et al., 2014**
- Fig. II.53 <http://www.materialflows.net/circular-economy/>
- Fig. II.54 Zimmann R. et al., 2016.
- Fig. II.55 Zimmann R. et al., 2016.
- Fig. II.56 rielaborazione da <https://www.oneclicklca.com/low-carbon-refurbishment/>
- Fig. II.57 <http://ask-us.pro/question/it/?q=software+di+trattamento+dei+rifiuti&s=4>
- Fig. II.58 <http://www.materialflows.net/circular-economy/>
- Fig. II.59 <http://galya-greenery.com/more/ecology-sustainability/upcycling-draft/>
- Fig. II.60 ISPRA 2018
- Fig. II.61 ISPRA 2018
- Fig. II.62 ISPRA 2018
- Fig. II.63 rielaborazione personale su fonte sitografica https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/scoreboard2018/indicators/19._Construction_and_demolition_waste.pdf
- Fig. II.64 <https://www.bimag.it/mercati-fiere/internazionalizzazione/la-sostenibilita-secondo-il-brasi->

le-a-expo-il-22-e-23_367244/

□ III CASI STUDIO

- Fig. III.1 rielaborazione da <http://i.bnet.com/blogs/wikihouse-assembly-steps.jpg>
- Fig. III.2 Edward F.A. David, 2018
- Fig. III.3 <https://www.flickr.com/photos/impacthubbirmingham/23004370374/>
- Fig. III.4 <https://www.flickr.com/photos/impacthubbirmingham/23004371374/in/photostream/>
- Fig. III.5 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.6 <http://www.demodiv.org/blog>
- Fig. III.7 elaborazione personale
- Fig. III.8 elaborazione personale
- Fig. III.9 elaborazione personale
- Fig. III.10 <https://wikihausenl.cc/excursie/wh-excursie-londen/>
- Fig. III.11 <https://www.infobuild.it/progetti/wikihouse-4-0/>.
- Fig. III.12 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.13 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.14 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.15 <https://www.flickr.com/photos/impacthubbirmingham/23004371944/>
- Fig. III.16 https://live.staticflickr.com/5688/23005461903_e6fb79a505_o_d.jpg
- Fig. III.17 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.18 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.19 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.20 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.21 <https://www.flickr.com/photos/impacthubbirmingham/23005466733/>
- Fig. III.22 Inviata da Janet Mobbs
- Fig. III.23 <https://assemblepapers.com.au/2019/04/04/circular-thinking-zero-waste-buildings/>
- Fig. III.24 http://www.lindapter.com/Case_Studies/Arups_Circular_Building
- Fig. III.25 <https://www.youtube.com/watch?v=TbkR20OIIDw&t=2s>
- Fig. III.26 <http://globalhop.indiaartndesign.com/2017/04/from-take-make-waste-to-sustainability.html#gsc.tab=0>
- Fig. III.27 <https://archinect.com/aruparchitects/project/the-circular-building>
- Fig. III.28 <https://archinect.com/aruparchitects/project/the-circular-building>
- Fig. III.29 <https://www.archdaily.com/868121/arup-designs-prototype-building-based-on-circular-economy-principles/58db25ace58ecee4390000de-arup-designs-prototype-building-based-on-circular-economy-principles-photo>
- Fig. III.30 <https://www.homebuilding.co.uk/innovative-low-energy-home/>
- Fig. III.31 <https://newatlas.com/digitally-fabricated-homes-facit/23844/#gallery:20>
- Fig. III.32 <https://www.netflix.com/search?q=grand%20designs&jbv=80160755&jbp=0&jbr=0>

- Fig. III.33 <https://newatlas.com/digitally-fabricated-homes-facit/23844/#gallery:20>
- Fig. III.34 <https://www.netflix.com/search?q=grand%20designs&jbv=80160755&jbp=0&jbr=0>
- Fig. III.35 <https://newatlas.com/digitally-fabricated-homes-facit/23844/#gallery:20>
- Fig. III.36 <https://newatlas.com/digitally-fabricated-homes-facit/23844/#gallery:20>

- TABELLE

- Tab. II.1 tratto da UNI EN 1995-1-1
- Tab. II.2 tratto da UNI EN 335-1
- Tab. II.3 tratto da Levarato G et al., 2018
- Tab. II.4 tratto da Levarato G et al., 2018