

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Architettura, Costruzione e Città**

Tesi di Laurea Magistrale

**Ottimizzazione del processo di prefabbricazione
di pareti intelaiate in legno
attraverso un modulo dimensionale**



Relatore

Prof. Valentino Manni

Correlatore

Ing. Luca Saverio Valzano

Candidato

Giuseppe Guttà

Anno Accademico 2021-2022

Mi è doveroso dedicare questo spazio del mio elaborato alle persone che hanno contribuito, con il loro instancabile supporto, alla mia crescita personale e professionale.

Ringrazio infinitamente i miei genitori che mi hanno sempre sostenuto, appoggiando ogni mia decisione, dall'inizio del mio percorso di studi iniziale fino alla scelta di stravolgere completamente il mio percorso, sia accademico che lavorativo.

Un ringraziamento particolare va al mio relatore Valentino Manni che mi ha seguito, con la sua infinita disponibilità, in ogni step della realizzazione dell'elaborato, fin dalla scelta dell'argomento.

Grazie anche al mio correlatore Luca Saverio Valzano per i suoi preziosi consigli e per avermi suggerito puntualmente le giuste modifiche da apportare alla mia tesi.

Un ulteriore ringraziamento va all'azienda "Abitare. Case e strutture in legno" che mi ha permesso di appassionarmi e crescere professionalmente nell'ambiente della prefabbricazione in legno.

Dedico questo elaborato alle notti insonni, le ansie e le paure, ma anche alle gioie e alle vittorie ottenute durante tutto il mio complesso percorso di studi.

Infine, dedico questa tesi a me stesso, ai miei sacrifici e alla mia tenacia che mi hanno permesso di arrivare fin qui.

Indice

Introduzione.....	8
1 La prefabbricazione.....	9
1.1 Evoluzione storica.....	9
1.2 I materiali impiegati.....	17
1.3 Vantaggi e svantaggi.....	19
1.3.1 I vantaggi.....	19
1.3.2 Gli svantaggi.....	21
1.4 Conclusioni.....	22
2 Diversi approcci dimensionali alla prefabbricazione.....	23
2.1 Prefabbricazione monodimensionale.....	23
2.2 Prefabbricazione bidimensionale.....	25
2.3 Prefabbricazione tridimensionale.....	28
2.4 Digital Prefabrication.....	33
2.5 I diversi sistemi a confronto.....	36
2.6 Le strutture a catalogo per ambienti monofamiliari.....	36
3 Analisi del materiale “LEGNO”.....	39
3.1 Classificazione del legno.....	40
3.2 Proprietà e caratteristiche meccaniche.....	40
3.3 I prodotti del legno.....	44
3.4 Il legno nelle costruzioni.....	48
3.4.1 Il legno nelle costruzioni in Italia.....	50
3.5 Le nuove tecnologie a supporto dei sistemi lignei.....	51
4 Sistema a pareti intelaiate.....	54
4.1 Il sistema statico.....	56
4.2 Basamento, solaio e copertura.....	57
4.3 Connessioni.....	58
5 Definizione di un modulo dimensionale.....	60
5.1 Studio dei pannelli e delle lastre controventanti.....	61
5.2 Definizione della griglia di costruzione e dei pannelli standard.....	62
5.3 Aperture nelle pareti.....	65
5.4 Parametri dimensionali per la progettazione.....	68
6 Applicazione del modulo dimensionale.....	69
6.1 Casa Giacomo (Casa G).....	69
6.2 Casa Luca (Casa L).....	78

6.3	Casa Miriana (Casa M)	85
6.4	Altre applicazioni.....	91
7	Realizzazione delle pareti e possibili variazioni	94
7.1	Montaggio delle pareti standardizzate	96
7.2	Variazione delle pareti in virtù del contesto	98
8	Conclusioni.....	100
8.1	Sviluppi futuri	102
9	Bibliografia.....	103
9.1	Articoli	103
9.2	Normative	103
9.3	Sitografia.....	103
9.4	Testi	108

Per poter promuovere un
cambiamento rivoluzionario,
dobbiamo riuscire a trasformare
l'uomo e la sua coscienza.

[Jurassic World - Il dominio]

Introduzione

Negli ultimi anni lo sviluppo in ambito edilizio, che comprende sia la fase progettuale che quella esecutiva, si è posto due obiettivi principali: massimizzare efficienza e qualità e minimizzare i costi. Tali obiettivi risultano molto difficili da raggiungere ricorrendo unicamente ai processi che caratterizzano l'edilizia tradizionale. Grazie ai nuovi sistemi tecnologici di cui ci si può avvalere, oggi è possibile sia raggiungere questi obiettivi, sia porne nuovi più ambiziosi. Infatti, grazie a tali sistemi è stato possibile avvalersi di processi prettamente industriali che hanno portato alla prefabbricazione, parziale o totale, degli elementi. L'impiego di questi elementi, chiamati anche prefabbricati, consente la risoluzione dei diversi problemi cantieristici in un sito più sicuro e controllato rispetto al cantiere tradizionale.

La parola prefabbricazione, nel gergo comune, viene associata a oggetti e architetture provvisorie, rigide e standardizzate al punto di venir meno a quella che è la componente artistica. La realtà, tuttavia, risulta essere ben diversa: nonostante l'impiego di elementi modulari, tuttavia il risultato finale non esclude un'architettura esclusiva.

Oggi è possibile realizzare un intero edificio fuori opera e, solo in un secondo momento, trasportarlo in cantiere, posarlo e collegarlo ai vari servizi, riducendo al minimo la permanenza del cantiere in loco. Per tale motivo, la tecnologia che si sposa perfettamente con questo nuovo modo di concepire l'architettura risulta essere di tipo a secco, processo costruttivo che non richiede l'impiego dell'acqua. I vantaggi principali del sistema industrializzato in campo edile sono: ottimizzazione dei tempi, contenimento dei costi e minor impatto ambientale. Questi vantaggi risultano essere solo i principali tra i tanti aspetti positivi che caratterizzano l'impiego di un sistema industrializzato e che incrementano la qualità dell'immobile, riuscendo a rispondere contemporaneamente a tutte le esigenze di comfort, sicurezza, efficienza e costi.

In passato, la prefabbricazione si basava su di un modulo dimensionale al fine di standardizzare il maggior numero di elementi e impiegare minor tempo. Oggi, invece, la precisione e la velocità è affidata alle macchine a controllo numerico, il che porta all'abbandono del modulo dimensionale, con conseguente aumento di scarti dovuti a una produzione *hoc*. Tale scelta porta così a un incremento dei costi e dei tempi di progettazione e produzione.

1 La prefabbricazione

Con il termine di prefabbricazione viene inteso un “Procedimento consistente nella **preparazione fuori opera** (cioè in luogo diverso dalla sede definitiva) degli elementi costitutivi di una struttura, nel loro trasporto a piè d’opera e nel loro successivo montaggio in opera”¹.

S’intende, quindi, un processo che comporta la produzione di uno o più elementi, chiamati *fabbricati*, con un livello d’industrializzazione parziale o totale, destinati a un luogo diverso dal sito di produzione. Tale tecnologia permette di scomporre un oggetto complesso in diversi elementi semplici, prodotti singolarmente e assemblati successivamente in sede o nel luogo del futuro utilizzo. Tale approccio nel settore edile risulta molto giovane e in continua evoluzione.

Come anticipato, si possono distinguere due principali livelli di prefabbricazione, quella **totale** e quella **parziale**. Con il termine *prefabbricazione totale* viene indicata un’opera formata completamente da elementi realizzati in stabilimento che possono essere montati in loco o in fabbrica. In quest’ultimo caso verranno realizzati uno o più moduli tridimensionali che necessitano del solo trasporto in loco, allaccio ai servizi ed eventuale finitura esterna. Tale metodologia è stata definita come *prefabbricazione spinta*. Con il termine *prefabbricazione parziale*, invece, si indica un’opera costituita in parte da elementi prefabbricati e in parte realizzati in cantiere. Questo caso viene ulteriormente chiamato *sistema misto*, dove è presente una coesistenza del sistema tradizionale e del sistema industrializzato.

Non esiste una prefabbricazione migliore e una peggiore, ma ogni caso dev’essere studiato al fine di ridurre al minimo le tempistiche e i costi.

1.1 Evoluzione storica

La storia della prefabbricazione non possiede una data di nascita, precisa in quanto è il risultato di una serie di eventi, più o meno casuali, che si sono susseguiti nel tempo. Tuttavia, l’avvento della prefabbricazione viene fatto coincidere con la colonizzazione britannica in paesi come India, Medio Oriente e Africa, ma anche gli attuali Stati Uniti e Canada, avvenuta tra il XVI e il XVII secolo, per una fondata necessità, quella di rispondere a un’elevata richiesta di edifici adeguati necessari per i loro insediamenti. Gli inglesi, non conoscendo le materie prime presenti nei territori da colonizzare, realizzarono diversi elementi che, una volta assemblati, andavano a comporre un edificio di piccole dimensioni ideato per la colonizzazione dei nuovi territori. Questi elementi furono prodotti e trasportati via nave. Il primo insediamento realizzato e registrato con tale sistema risale al 1624, anno in cui prese vita l’insediamento nella piccola penisola di Cape Ann, attualmente una città del Massachusetts a 48 km da Boston, a cui ne susseguirono molteplici altri in diverse neo-colonie britanniche. Tutti gli edifici erano realizzati con lo stesso sistema e con il medesimo materiale, presentandosi come piccoli o medi edifici costituiti interamente in legno².

1 Treccani, “Enciclopedia online: Prefabbricazione”.

2 BAUM Studio (2016), “Prefabbricazione: tra storia e nuovi bisogni”.

I primi cambiamenti consistenti avvennero con le successive colonizzazioni che iniziano dal 1820 verso il Sud Africa. Qui, infatti, gli inglesi inviarono delle strutture molto simili a capannoni, realizzati con elementi lignei costituiti dal solo telaio e da pareti di tamponamento definite in base all'esigenza del luogo, mentre tutte le altre strutture necessarie, come porte e finestre, venivano spedite separatamente e successivamente montati. Queste strutture, differentemente delle prime, risultavano più leggere e più semplici da trasportare e montare. L'evoluzione successiva, a cui è attribuita la **nascita** dalla prima casa prefabbricata, riguarda l'edificio *Manning Portable Colonial Cottage* (Fig.1), struttura ideata e realizzata dal costruttore H. John Manning nel 1830. La nascita del Cottage Manning è da attribuire a una necessità, quella di realizzare una struttura confortevole, leggera e trasportabile senza l'impiego di animali, destinata al figlio che stava per emigrare in Australia³.

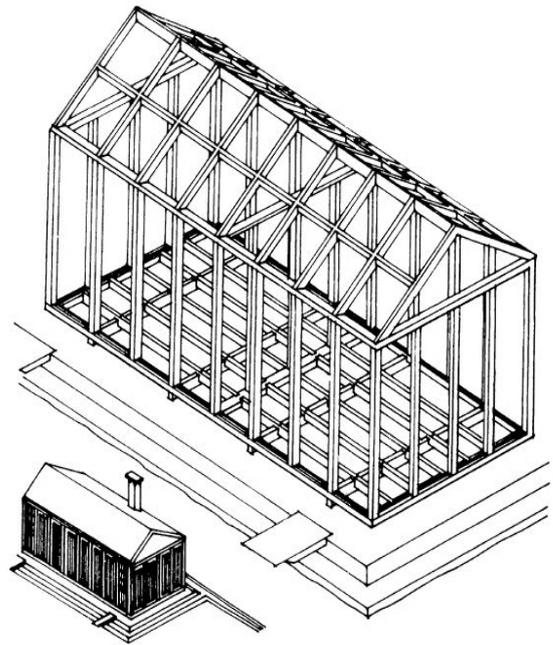


Figura 1: Struttura del Cottage progettato da Manning. U.S. Navy Quonset Hut (2012), "Manning Cottage coloniale portatile per emigranti".

La mancanza di infrastrutture nelle nuove colonie rappresentò la chiave del successo di questo sistema che divenne, in breve tempo, il prefabbricato maggiormente impiegato nelle operazioni di colonizzazione. Oltre al facile trasporto, l'ulteriore vantaggio di questo sistema era rappresentato dalla possibilità di avere una struttura composta da elementi singoli intercambiabili e standardizzati che non richiedevano l'impiego di ulteriori lavorazioni in loco, ma la sola connessione attraverso sistemi meccanici metallici, come piastre e bulloni, dimensionati secondo una chiave standard.

Un ulteriore avanzamento di questa nuova tecnica avvenne in contemporanea con l'avvento dell'era industriale. Qui, tuttavia, entra in gioco un altro materiale, il ferro, caratterizzato da un'alta resistenza meccanica e facilmente modellabile grazie ai nuovi mezzi industriali. Da una parte, la possibilità di stampare le connessioni metalliche risultavano aiutare la progressione delle strutture in legno. Dall'altra, invece, la facile lavorazione del nuovo materiale permetteva la realizzazione di intere strutture in ferro, facendolo preferire al legno. Le nuove fonderie, infatti, riuscivano a realizzare in breve tempo tutte le componenti utili a scopo edilizio come colonne, travi, infissi, piastre ed elementi estetici di dettaglio. I vari elementi realizzati in fonderia venivano trasportati in cantiere e assemblati in base al tipo di progetto e alla tecnologia disponibile. Il nuovo materiale vedeva così un massiccio utilizzo in diversi ambienti che andavano dall'uso civile, come ponti, all'uso residenziale ed espositivo.

³ SMITH R. E. (2010), *Prefab Architecture: A guide to modular design and construction*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (New Jersey), Stati Uniti.

Il primo ponte realizzato con elementi in ferro è l'attuale **Iron Bridge** (Fig.2), eretto a Coalbrookdale sul fiume Severn nel lontano 1779. Per questo ponte sono stati impiegati circa 345 tonnellate di ferro prodotti in 3 mesi attraverso un ciclo di produzione e costruzione continuativo, che includeva anche il trasporto e l'assemblamento in loco. L'Iron Bridge risulta essere il primo dei tantissimi ponti che furono eretti con elementi prefabbricati negli anni successivi⁴.

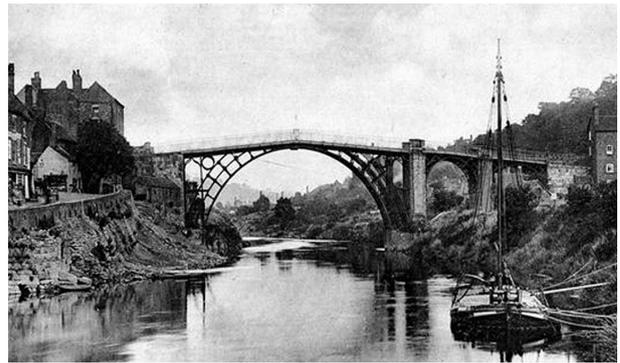


Figura 2: Foto dell'Iron Bridge.
Iron Bridge-George Museum "The Iron Bridge".

Seppur siano molti gli esempi di strutture realizzate con elementi prefabbricati, la realizzazione più emblematica rappresentante la prefabbricazione risulta essere quella del **Crystal Palace** (Fig.3) di Joseph Paxton, realizzata nel 1851 in occasione della Grande Esposizione delle Opere dell'Industria di tutte le Nazioni, fatta a Londra nello stesso anno. Per l'evento era stata richiesta un'ampia struttura espositiva che potesse essere realizzata in un tempo breve. La soluzione di Paxton consisteva in una grande "serra" realizzata con elementi portanti in ghisa che sostenevano grandi lastre di vetro. Tuttavia, l'opera non è da attribuire solamente a Paxton, che principalmente era un giardiniere, ma anche agli ingegneri Fox ed Henderson che hanno aiutato Joseph ad affrontare la progettazione e la realizzazione. Si trattò così di realizzare una vera e propria struttura modulare di 92.000 metri quadrati realizzata con pezzi in serie. Con questo sistema l'intera opera fu costruita in soli 17 settimane, dove furono impiegati quasi 7 mila elementi in ghisa e oltre 18 mila pannelli in vetro⁵.

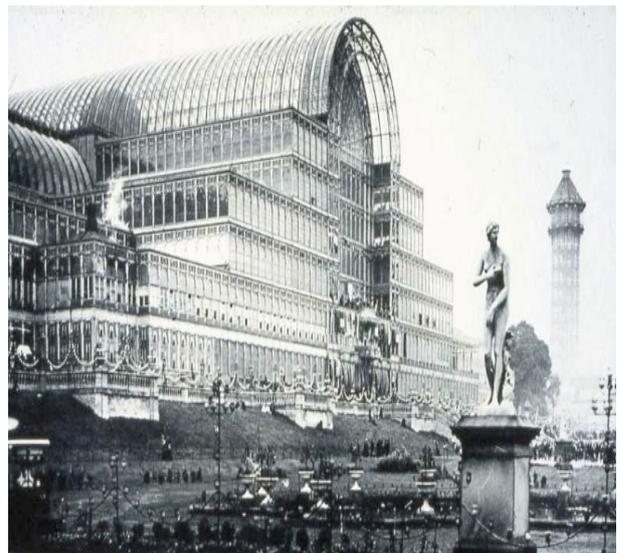


Figura 3: Foto del Crystal Palace.
Encyclopedia Britannica (2022), "Crystal Palace".

L'evoluzione della prefabbricazione vede l'arrivo di un ulteriore materiale che ha dominato l'ambiente edile per diversi anni, il cemento armato. Anche se impiegato nella maggior parte dei casi attraverso il processo del getto in loco, mediante l'impiego di tale materiale, composto da cemento e barre di ferro, fu possibile realizzare in fabbrica pareti, travi e pilastri. Il primo elemento prefabbricato in cemento armato è stato un palo impiegato per le linee elettriche in Russia e realizzato dall'azienda Scar negli anni venti. Seppur non significativo, tale esperimento dimostrò che era possibile realizzare degli elementi prefabbricati in cemento armato.

⁴ Iron Bridge-George Museum "The Iron Bridge".

⁵ Encyclopedia Britannica (2022), "Crystal Palace".

Il primo impiego del cemento armato in campo edilizio è stato registrato nel 1891, con la realizzazione del Casino de Biarritz (Fig.4), progettato dall'architetto Edmond Coignet e costituito da travi in c.a. prefabbricato⁶. Da allora è stato utilizzato nel sistema misto dove solo alcuni elementi, a volte travi e pilastri, a volte solai, risultavano prefabbricati. E' possibile assistere a un massiccio impiego di elementi prefabbricati in zone come la Francia, per fini per lo più sperimentali, e la Russia, dove c'era una vera e propria necessità di realizzare alloggi a prezzi bassi. In Italia si inizia a utilizzare il cemento armato prefabbricato solo dagli anni trenta. All'inizio questa pratica non era molto diffusa ma, nel secondo dopoguerra, moltissimi edifici sono stati realizzati attraverso elementi prefabbricati in cemento armato, grazie alla necessità di ricostruire gli edifici distrutti durante le azioni belliche. Gli elementi maggiormente richiesti venivano impiegati per la realizzazione dei solai, quindi pannelli, travi e travetti, grazie alla facilità di movimentare e posizionare i componenti in cantiere. L'impiego della prefabbricazione del cemento armato prefabbricato riguardava principalmente l'edilizia industriale, coprendo l'85% delle realizzazioni del dopoguerra⁷. Nell'edilizia residenziale risultano essere pochi i casi in cui il cemento armato è stato impiegato sotto forma di elemento prefabbricato.



Figura 4: Casino de Biarritz.
BAUM Studio (2016), "Prefabbricazione: tra storia e nuovi bisogni".

Mentre in Europa si ricorre all'impiego del cemento armato e dell'acciaio, contemporaneamente nel Nord America si hanno i primi casi di standardizzazione degli edifici in legno. Negli Stati Uniti e nel Canada si riscontra un incremento del patrimonio immobiliare attraverso la tecnica del *framing balloon construction*, un sistema ligneo basato su pareti portanti intelaiate con la caratteristica principale di impiegare un minor quantitativo di materiale⁸. Tante sono le idee nate durante questo secolo per ottimizzare tale sistema, tra cui quella di produrre dei veri e propri kit per costruire degli edifici di piccole dimensioni in legno pretagliato. Tra le varie aziende che si sono cimentate in quest'avventura vi sono la **Aladdin Home** e la **Sears Roebuck e Co.**

La Aladdin Home, nata nel 1906 dalla famiglia Sovereign, realizzava i propri prodotti sotto l'ottica di una produzione di massa, che fino ad allora era stata applicata solamente agli oggetti d'arredamento, ai tessuti e all'ambito meccanico. Venne così applicata agli edifici in modo da poter beneficiare di tutti i vantaggi annessi⁹. Il loro sistema, il *Readi-Cut Home*, consisteva nel consegnare all'acquirente tutto il necessario, in termini di legname, fissaggi e istruzioni, al fine

6 BAUM Studio (2016), "Prefabbricazione: tra storia e nuovi bisogni".

7 Toniolo G. (2007), "Cent'anni di prefabbricazione in calcestruzzo", *Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia*, p.1-3.

8 Costantini Legno, "Tecnologia Balloon Frame - Platform Frame".

9 Reiff D. D. (2001), *Houses from Books: Treatises, Pattern Books, and Catalogs in American*, The Pennsylvania State University Press, State College (Pennsylvania), Stati Uniti.

di poter montare l'edificio prefabbricato in completa autonomia. Tale sistema garantiva minor sprechi e maggior velocità di esecuzione, con l'ulteriore possibilità di costruire in autonomia la propria abitazione, risparmiando sui costi di costruzione. Si trattava quindi di un vero e proprio catalogo (Fig.5) attraverso il quale l'acquirente sceglieva l'edificio più adatto alle proprie esigenze che veniva consegnato direttamente sul luogo indicato¹⁰.

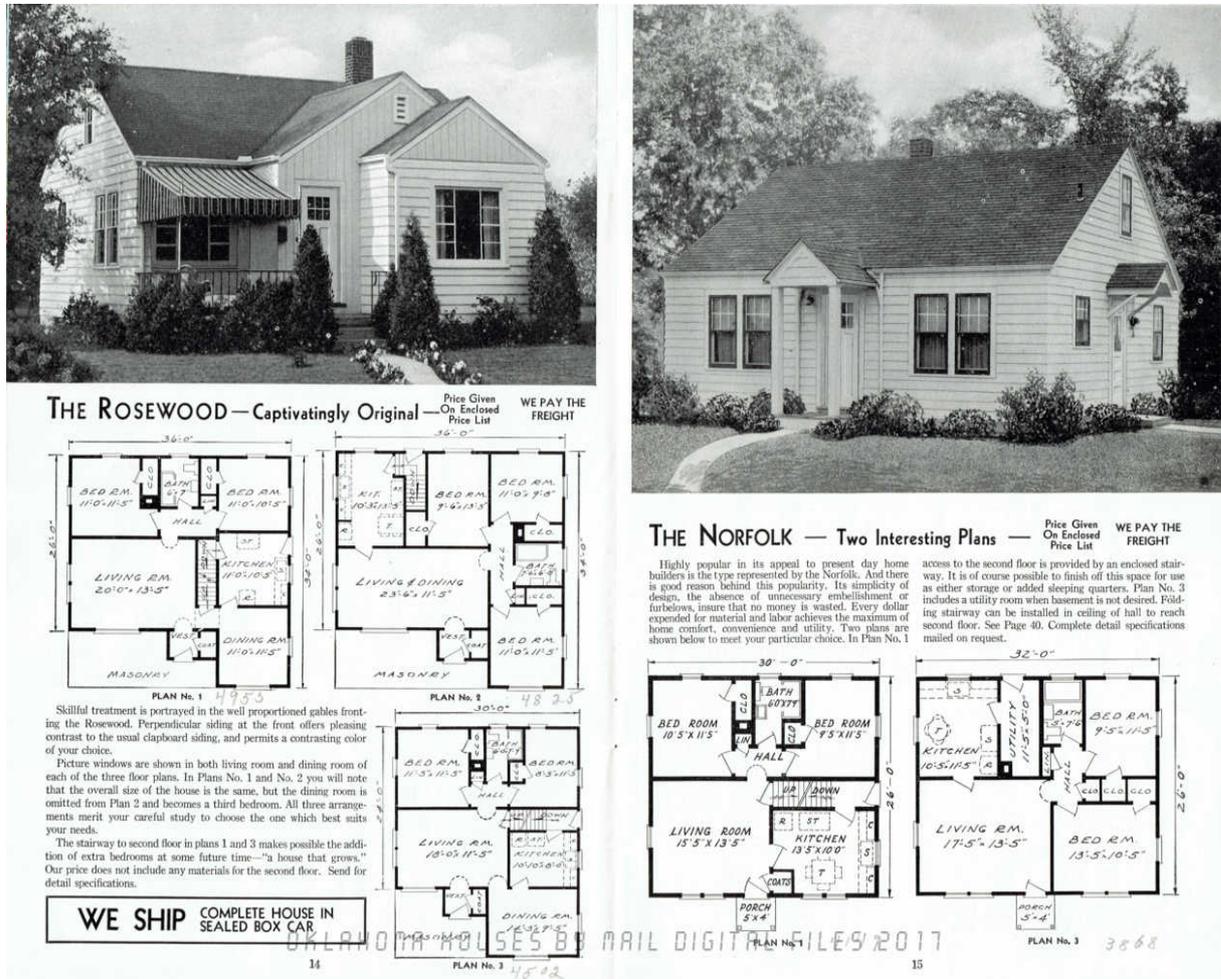


Figura 5: Estratto del catalogo Read-Cut del 49° anno di produzione. Internet Archive, "Aladdin Read-Cut Homes".

La **Sears Roebuck e Co.**, resa famosa grazie al suo servizio di marketing, ha dominato l'economia nel campo della prefabbricazione per tutti gli anni Trenta del Novecento attraverso il proprio programma *Modern Homes*. In poco più di trent'anni l'azienda riuscì a vendere circa 75.000 case corrispondenti a 447 stili abitativi diversi venduti in diverse parti del paese. Il loro successo è da attribuire principalmente ai dettagli artistici, alla grande varietà di case che si adeguavano a tutti i tipi di budget, alla riduzione dei tempi di costruzione che ammontavano al 40% rispetto ad altri sistemi e ai comfort termici garantiti¹¹.

¹⁰ Internet Archive, "Aladdin Read-Cut Homes".

¹¹ Sears Archive (2012), "What is a Sears Modern Home?".

Nei cataloghi (Fig.6), per facilitare la ricerca del cliente, le case erano suddivise in base al budget richiesto in *Honor Built*, *Standard Built* e *Simplex Sectional*.

Dal confronto delle due aziende si evince che il loro approccio era pressoché simile, ma il grande successo riscontrato nel programma *Modern Homes* è attribuito a una strategia di marketing intrapresa dall'azienda che portava l'utente a conoscere e apprezzare i prodotti commercializzati.

Sebbene entrambe le case produttrici riscontrarono un grande successo per diversi anni, fallirono a causa della grande depressione e crisi abitativa iniziata nel 1929 che costrinse le aziende a dichiarare fallimento e ritirare i loro cataloghi. Attualmente ci sono dei veri e propri musei digitali online dove si possono consultare i cataloghi. Esistono ancora numerosi edifici nel Nord America, sia della Aladdin Home che della Sears Roebuck e Co.

Tornando in Europa, in particolare in Italia, Francia e Germania, si continuava a perseguire la strada del ferro e del calcestruzzo armato, orientati sulla produzione in serie che privilegiava la razionalizzazione. Uno dei casi emblematici risulta quello della casa *Domino* (Fig.7) pensata da Le Corbusier nel 1914 dopo aver acquisito le competenze tecniche e formali dell'industrializzazione. Si trattava di un sistema strutturale a telaio unico e indipendente dalla planimetria della casa. L'edificio era composto principalmente da un telaio in calcestruzzo armato che veniva consegnato al cliente che lo completava, insieme all'impresa specializzata, con tutti gli elementi necessari a renderlo abitabile¹².

Il principio di produzione di massa si riscontra anche in un altro prototipo di Le Corbusier nel 1920 chiamato *the Citrohan House*. Non a

\$2,065⁰⁰ Completely BUILDS AND FINISHES
This \$3,000.00 Ten-Room Residence

As Proven by Our FREE Plans, Specifications and Complete Itemized Bill of Materials.
 THESE PLANS ARE FREE OF CHARGE TO YOU ON CONDITIONS EXPLAINED ON PAGE 2.

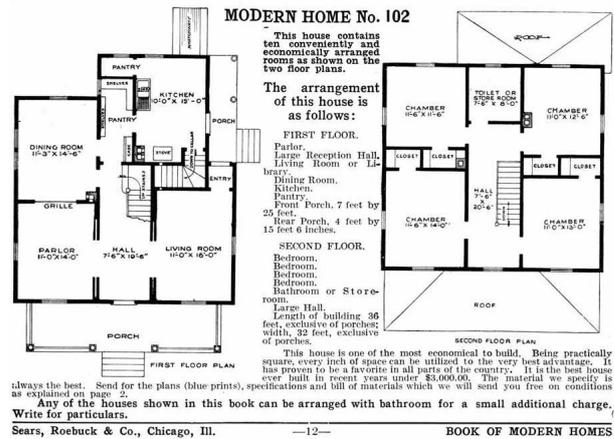
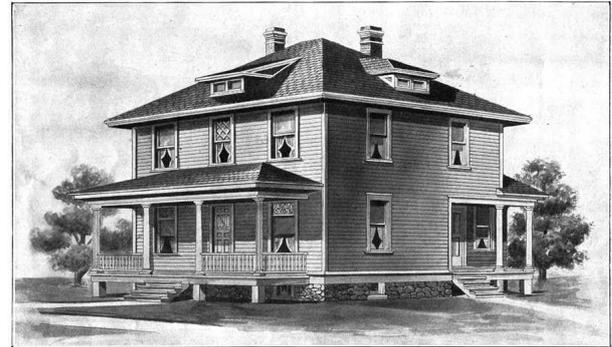


Figura 6: Estratto del catalogo *Modern Homes*. Sears Archive (2012), "What is a Sears Modern Home?"

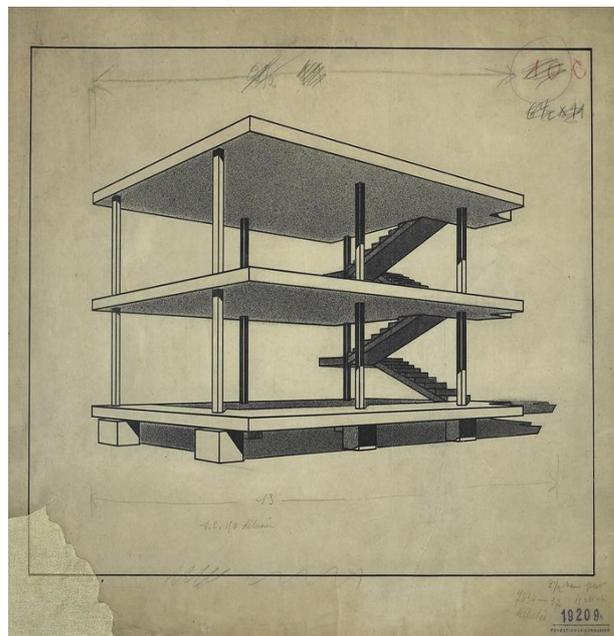


Figura 7: Disegno Casa Domino. Fondation Le Corbusier "Casa Dom-ino".

¹² Fondation Le Corbusier "Casa Dom-ino".

caso, il nome richiama la casa produttrice di automobili francese *Citroën*, per sottolineare la condizione con cui l'edificio disegnato fosse stato pensato per l'industrializzazione.

Un altro contributo che ha favorito, e in qualche modo anche accelerato, l'evoluzione della prefabbricazione è da attribuire al francese Jean Prouvé. La sua struttura modulare, che impiega principalmente acciaio e alluminio, viene realizzata a secco in officina ed è composta da pannelli modulari autoportanti che, una volta trasportati in cantiere, richiedono il solo posizionamento e fissaggio attraverso metodi di connessione meccanica. Il sistema consentiva la rimodellazione dell'edificio nel tempo grazie ai pannelli intercambiabili. Questa possibilità è stata la chiave del successo dell'intero sistema che non era più legato a una forma definitiva ma poteva essere alterata nel tempo. Tuttavia, questo approccio fu interpretato male dalla società del tempo in quanto era visto come un processo per la fabbricazione di padiglioni smontabili. A peggiorare questo aspetto contribuirono ulteriori figure importanti dell'epoca come Wright e Le Corbusier che non avevano una buona opinione del progettista francese, definendolo un "costruttore del medioevo". Per la realizzazione del sistema, Prouvé fece convergere aspetti come necessità, leggerezza ed economicità senza considerare il contesto se non per l'attacco a terra. Il sistema si presentava perfetto sotto il punto di vista tecnico e di fruibilità, ma era mancava di carattere estetico. Lui stesso dichiara "Io non ho mai disegnato forme, ho fatto delle costruzioni che avevano una forma"¹³. Tuttavia, il suo contributo all'evoluzione della prefabbricazione sotto l'aspetto tecnico-costruttivo fu enorme, facendo avvicinare ulteriormente la produzione degli edifici al processo d'industrializzazione. Realizzò una serie di prototipi che si evolvevano nel tempo, perfezionando sempre più il processo di produzione. I progetti di Prouvé si basavano principalmente su due tipologie di sistemi strutturali, quello a telaio esterno e quello a telaio portante centrale (*Fig.8*), entrambi realizzati quasi sempre in acciaio. Una delle sue opere più riuscite è la *Maison du Peuple* a Clichy-la-Garenne, edificio eretto tra il 1936 e il 1939 e realizzato per ospitare diverse funzioni al suo interno. Si tratta di un edificio composto da vari elementi prefabbricati e assemblati in loco con una struttura portante composta da una serie di profilati in acciaio saldati, una facciata vetrata e da chiusure verticali e orizzontali che vedono un massiccio utilizzo della lamiera. La vera opera "smontabile" di Prouvé è rappresentata dal progetto per una caserma smontabile nel 1939 dove, per soddisfare le richieste del committente, ha progettato 3 moduli con larghezza pari a 4 metri e lunghezza rispettivamente di 4, 6 e 12 metri che, assemblandoli in poche ore, componevano un sistema compatto¹⁴. Attraverso questa tecnologia, Prouvé realizzò degli edifici destinati ad abitazione privata che, tuttavia, non ebbero molto successo,

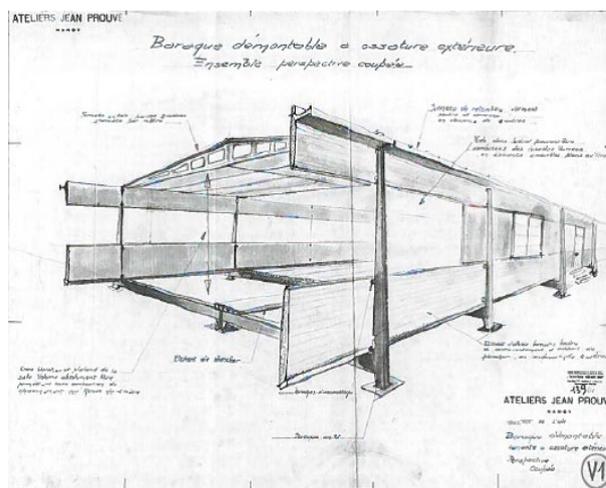


Figura 8: Sistema a telaio portante centrale utilizzato da Jean Prouvé. Kawindhanakoses (2014), "Jean Prouvé".

13 Dichiarazione di Jean Prouvé. PrefArch (2016), "Jean Prouvé e la prefabbricazione".

14 PrefArch (2016), "Jean Prouvé e la prefabbricazione".

sia per la poca attenzione degli aspetti architettonici, sia per la poca propensione di Prouvè per l'aspetto economico-commerciale.

Nello stesso periodo, in Germania ci furono alcuni casi di prefabbricazione, col fine di abbattere i costi e realizzare edifici nel minor tempo possibile per contrastare l'aumento demografico. Un caso emblematico riguarda all'architetto Ernst May che, insieme a Martin Elsaesser e uno staff composto da 50 architetti, col fine di trovare una soluzione che potesse rispondere contemporaneamente alla mancanza di alloggi e agli affitti elevati, realizza il complesso *Das Neue Frankfurt* composto da 15 mila appartamenti. Grazie al sistema di prefabbricazione adottato, i costi sono stati ridotti e gli affitti non superavano il corrispondente di una settimana del salario minimo tedesco¹⁵.

Negli Stati Uniti, patria del *ballon framing*, Frank Lloyd Wright diede un grande contributo all'**evoluzione** della prefabbricazione, attraverso il sistema chiamato *American System-Built Homes*. Gli edifici prefabbricati, realizzati mediante tale sistema, erano composti da elementi standardizzati ripetibili a grande scala. Mediante l'utilizzo del sistema *ballon framing*, tali strutture ebbero un discreto successo in un primo momento, ma gli edifici successivi furono un completo fallimento per diversi motivi, tra cui alcune scelte architettoniche intraprese dal progettista stesso. Infatti, Wright si mostrava molto esigente verso la qualità, opponendosi all'economicità delle strutture. Altro fattore negativo dell'evoluzione del System-Built Homes riguarda l'ingresso degli Stati Uniti nella Prima Guerra Mondiale che provocò una riduzione della disponibilità delle materie prime e relativo incremento dei costi degli alloggi. A oggi esistono circa dieci abitazioni ancora intatte, suddivise tra il Wisconsin, l'Illinois (Fig.9), l'Indiana e l'Iowa¹⁶.



Figura 9: Lewis E. Burleigh Residence in Illinois. FLWright.us, "Lewis E. Burleigh Residence, 330 Gregory Street, Wilmette, Illinois".

Dopo una serie di tentativi che hanno contribuito al perfezionamento del sistema industrializzato, all'inizio degli anni '40 del XX secolo l'edilizia modulare comincia a diffondersi su larga scala all'interno del settore residenziale. Aziende come Lustron e Gunnison creano la loro rete commerciale mediante un sistema *Plug-and-play*, pannelli sandwich da impiegare come tamponamento in un edificio già previsto di telaio strutturale, fabbricando edifici di stampo popolare formati da una serie di telai in acciaio fortemente personalizzabili a seconda delle esigenze.

Il sistema della prefabbricazione con materiali lignei, seppur utilizzato largamente in America, riscontrò un discreto successo in Europa nel XX secolo. Differentemente da quello originale,

15 Wikiwand, "Ernest May".

16 Frank Lloyd Wright, "American System built homes".

che si basava sul *framing balloon*, il sistema europeo si presentava diverso in quanto l'originale non rispettava le normative del continente. Iniziarono a sorgere strutture e infrastrutture, soprattutto nel periodo bellico, sia nella piccola scala dell'ambiente familiare, sia nella grande scala urbana, razionalizzando così i processi produttivi delle costruzioni per contenere quanto più possibile i costi.

Dall'evoluzione e dagli esempi appena descritti si può notare che la maggior parte degli edifici prefabbricati, che hanno riscontrato un grande successo, risultano avere una cosa in comune: un modulo dimensionale. Ogni prototipo ed edificio catalogato veniva modellato secondo un modulo dimensionale che ne garantiva la produzione in serie.

Si evince anche che il grande progresso avvenuto nel campo della prefabbricazione è da attribuire a figure come Le Corbusier, Prouvé e Wright. Negli ultimi anni, soprattutto grazie alle nuove tecnologie che hanno interessato sia il campo della progettazione che quello della produzione, il progresso della prefabbricazione ha avuto un incremento esponenziale, riuscendo oggi a industrializzare i processi produttivi in tutto il loro *iter*. Con i sistemi moderni di prefabbricazione, oggi è possibile ottimizzare tutti i processi, riuscendo a contenere i costi e a ridurre notevolmente le tempistiche, migliorando l'integrazione tra progetto e produzione, riducendo notevolmente gli sprechi di cantiere.

1.2 I materiali impiegati

I materiali che vengono impiegati per la prefabbricazione sono principalmente quattro: il laterizio, il calcestruzzo, il ferro e il legno.

Il **laterizio** è il materiale che più rappresenta l'edilizia tradizionale con cui sono stati costruiti la maggior parte degli edifici, civili e non, in Italia. Si tratta di un materiale artificiale risultato dell'essiccazione dell'argilla al sole o della cottura in fornace del materiale precedentemente sagomato. L'impiego di un materiale tradizionale come il laterizio nella prefabbricazione si traduce nell'adattarlo a sistemi e tecniche costruttive moderne. In questo caso vengono realizzati principalmente delle pareti di tamponamento (*Fig.10*) che vengono integrati in edifici realizzati con altri materiali strutturali come il cemento armato e l'acciaio. L'impiego del laterizio come elemento costituente un vero e proprio prefabbricato, applicato agli edifici di ultima generazione che richiedono elevate prestazioni, trascina con sé tutte una serie di problematiche che ricadono essenzialmente nell'ambito energetico, quindi dispersioni e ponti termici, richiedendo un'elevata coibentazione. Rispetto al sistema tradizionale, col sistema di prefabbricazione s'interviene quasi solamene sulle tempistiche dell'edificio finito¹⁷.



Figura 10: Esempio di pannello prefabbricato in muratura. Lignius (2019), "Case prefabbricate in muratura: prezzi e vantaggi".

¹⁷ Teknoring (2012), "Laterizio-tecnologia".

Il **calcestruzzo** è il secondo materiale principale dell'edilizia tradizionale italiana, anche se spesso e volentieri è presente solo nella struttura portante, insieme all'acciaio formando il calcestruzzo armato. Il calcestruzzo è un materiale composto da cemento, acqua, aggregati di diverse dimensioni e, in alcuni casi, additivi¹⁸. Una volta asciutto riesce a garantire un'ottima resistenza meccanica alla compressione, mentre per resistere alle sollecitazioni di trazione viene integrato l'acciaio. Se però dal punto di vista delle sollecitazioni vengono riscontrati aspetti positivi, dal punto di vista termico rivela diverse carenze, poiché a oggi rappresenta uno dei materiali più termicamente disperdenti del settore edile. Gli edifici realizzati mediante il cemento presentano ponti termici che, se non studiati e integrati con ulteriori materiali isolanti, potrebbero disperdere un quantitativo elevato di energia che andrebbe a incrementare il consumo, e quindi anche il costo, per il riscaldamento invernale e raffrescamento estivo¹⁹. Attraverso il cemento armato è possibile realizzare elementi prefabbricati monodimensionali, come travi e pilastri, bidimensionali, come pareti, e tridimensionali, come moduli abitativi (Fig.11).



Figura 11: Modulo abitativo in calcestruzzo armato. Pianeta Design, Piegari M., "Case prefabbricate in cemento: modelli, vantaggi e costi".

L'**acciaio** è un materiale largamente utilizzato nel campo delle costruzioni grazie alle proprie caratteristiche di resistenza meccanica a tutti i tipi di sollecitazione, che attribuiscono alle strutture un'elevata sicurezza strutturale anche in caso di eventi di natura sismica. È composto da ferro e carbonio, in quantità variabile, secondo il quale viene classificato il materiale. Le caratteristiche principali che caratterizzano questo materiale sono la duttilità, la tenacia, la temprabilità, la durezza e la fragilità²⁰. Solo la struttura portante (Fig.12) potrà essere realizzata in acciaio, che verrà implementata con ulteriori strutture da cui poi dipenderanno le prestazioni effettive dell'edificio finito. In genere è consigliabile completare le strutture in acciaio con sistemi a secco, favorendo l'impiego del legno piuttosto che altri materiali, poiché assicura un ottimo risultato finale soprattutto in termini energetici.



Figura 12: Struttura in acciaio formata da elementi monodimensionali prefabbricati. Calcolo strutturale.com (2018), "L'acciaio".

¹⁸ Weber (2020), "Calcestruzzo: un materiale da costruzione poliedrico da manutenzionare".

¹⁹ Consorzio Poroton (2016), "Ponti termici, pareti con pilastro".

²⁰ Info Acciaio, "Acciaio".

Attraverso l'acciaio vengono realizzare principalmente elementi prefabbricati monodimensionali, come travi e pilastri, che possono essere combinati tra di loro per realizzare telai spaziali.

Il **legno** risulta essere il materiale che, insieme all'acciaio, si integra maggiormente al sistema di prefabbricazione ed è, attualmente, quello più impiegato. Tale materiale naturale, oltre ai vantaggi già accennati della prefabbricazione, comporta ulteriori aspetti positivi sia strutturali che energetici. L'impiego del legno negli edifici è sinonimo di sicurezza strutturale e stabilità dell'edificio sia in ambito sismico che in caso di incendio, ma anche di elevata efficienza energetica e acustica. Le case prefabbricate in legno sono portate così a rappresentare il miglior sistema di costruzione in qualsiasi condizione climatica e sismica. Nell'ambito del legno, inoltre, è possibile utilizzare dei sistemi di costruzione completamente diversi, che sono stati sviluppati nel tempo come il sistema X-LAM o il sistema a pareti intelaiate²¹. Con il legno è possibile avere elementi prefabbricati monodimensionali, come travi e pilastri, bidimensionali, come pareti, e tridimensionali, come moduli abitativi (Fig.13).



Figura 13: Moduli prefabbricati in legno. Aekitecture on web (2020), "Moduli abitativi prefabbricati in legno. Architettura omaggio al paesaggio cileno".

1.3 Vantaggi e svantaggi

L'impiego del sistema di prefabbricazione, come ogni altro sistema, comporta una serie di vantaggi e svantaggi.

1.3.1 I vantaggi

Il costo ridotto risulta essere uno dei vantaggi principali di una casa prefabbricata. Bisogna precisare che si tratta del costo dell'opera finita a essere inferiore e non sempre quello delle varie operazioni da cui un processo costruttivo è composto. Infatti, il costo del trasporto e del coordinamento, sia in fase di produzione che di montaggio, influiscono negativamente poiché richiedono un'elevata attenzione e personale qualificato. Tuttavia, il risparmio del tempo di esecuzione risulta essere così elevato da abbassare il costo finale dell'edificio. L'economicità di una struttura varia da caso a caso e dipende principalmente dal grado di prefabbricazione degli elementi da produrre: una casa su misura che presenta vari elementi diversificati tra di loro, avrà un costo più elevato rispetto a un'abitazione composta da moduli standardizzati. Per quanto appena detto, la prefabbricazione risulta estremamente economica quando si tratta di strutture ricettive, come hotel o social-housing, che si basano su moduli ripetibili, in cui si avrà un risparmio superiore in termini di costi finali. Inoltre, il costo dell'opera non subisce variazioni in corso d'opera, garantito dalla precisione e dall'affidabilità degli elementi in gioco

21 Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

nel sistema industrializzato che eliminano parzialmente o totalmente, eventuali imprevisti che potrebbero portare a un incremento del costo finale dell'opera.

La precisione elevata è garantita dagli strumenti del sistema industrializzato, progettati al fine di produrre elementi con geometrie e caratteristiche precise, poiché destinati a far parte di un sistema strutturale più ampio, al fine di ridurre gli errori²². Ciò significa che questi ultimi sono limitati rispetto ad altri sistemi di costruzione, risultando tanto più ridotti quanto è avanzato il grado di prefabbricazione (Fig. 14).

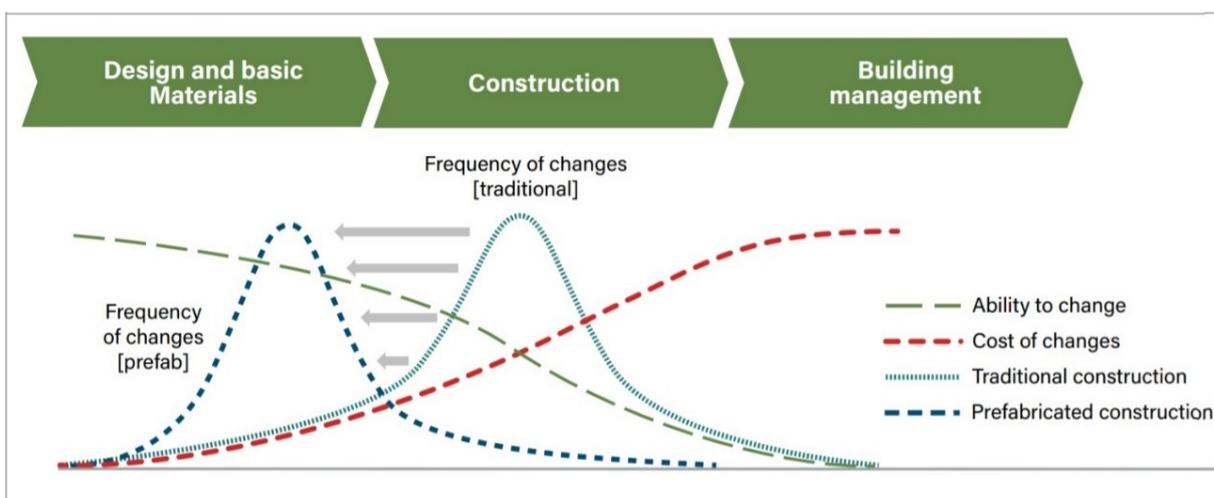


Figura 14: In questo grafico è mostrata la variazione dei costi dovuti ad un cambiamento a seconda della fase in cui ci troviamo, relazionata alla frequenza di cambiamenti per un sistema prefabbricato ed un sistema tradizionale

Ranghino F. e Fucci G. (2020) "Sustainable construction: the prefabrication opportunity", *Ambienta*, pp.1-6.

L'affidabilità elevata del sistema risulta essere un ulteriore fattore positivo. Tale è garantito da un flusso di lavoro continuativo indipendente dalle condizioni meteorologiche, dal coordinamento e dal controllo delle varie fasi di produzione in fabbrica²³. Con questi presupposti, si ha la certezza di un corretto funzionamento del sistema, in virtù delle proprie caratteristiche.

La qualità degli elementi prefabbricati è elevata. Le materie prime e le macchine impiegate per la realizzazione dei prefabbricati sono sottoposte a vari controlli, portando a ottenere prodotti finiti che rispettano tutte le caratteristiche dichiarate dall'azienda produttrice. Infatti, diversamente dai materiali gettati in opera, gli elementi prodotti in fabbrica sono garantiti e certificati dalle aziende produttrici, il che attribuisce un elevato grado di qualità all'opera finita.

Il tempo di realizzazione del sistema di prefabbricazione è ridotto proporzionalmente alla standardizzazione degli elementi impiegati. Infatti, se il tempo di esecuzione risulta dipendere dal numero di elementi da montare, il tempo di produzione dei fabbricati dipende dall'uniformità degli elementi da produrre.

22 Ranghino F. e Fucci G. (2020) "Sustainable construction: the prefabrication opportunity", *Ambienta*, pp.1-6.

23 Crivellaro P. (2012), *Guida alle case di legno*, Aam Terra Nuova Sr, Firenze, Italia.

Gli scarti del sistema di prefabbricazione sono ridotti. Un sistema a secco che fa largo uso di elementi prefabbricati, può produrre un inquinamento ambientale di circa il 5% del materiale impiegato, mentre un sistema tradizionale in umido, può produrre fino al 25%. Tale inquinamento ambientale è dovuto agli scarti prodotti durante le varie operazioni.

Il riciclo dei materiali impiegati è garantito dal sistema a secco di cui fa uso la prefabbricazione. Nel sistema a secco, le unioni avvengono principalmente per mezzi meccanici, come viti, bulloni chiodi e, in alcuni casi, direttamente con sagomature realizzate per creare un vero e proprio incastro, che garantiscono un disassemblaggio futuro. Ciò garantisce un certo grado di **sostenibilità** del sistema, tema molto sensibile soprattutto negli ultimi anni, che ha portato a sostenere numerose ricerche a livello internazionale. Per ogni materiale, infatti, viene valutato il proprio LCA (Life Cycle Assessment) (Fig.15), metodo che valuta l'impatto ambientale durante tutto il suo processo di vita, che parte dall'estrazione a fine vita²⁴.



Figura 15: Schema di riciclo dei materiali da costruzione.

Info Build (2012), "LCA: valutazione del ciclo di vita al centro del design sostenibile".

1.3.2 Gli svantaggi

Seppur presentandosi con numerosi vantaggi, bisogna anche considerare gli svantaggi che l'impiego di un sistema industrializzato può comportare.

Il sistema non è ottimizzato per edifici di piccole dimensioni dove alcune caratteristiche vantaggiose, tra cui principalmente costo e tempo ridotto, vengono a mancare. La poca standardizzazione degli elementi necessari porta a produrre una prefabbricazione ad hoc, facendo aumentare il costo dell'opera e il tempo di realizzazione.

La poca variazione in corso d'opera è un ulteriore svantaggio, dovuto all'alto grado di precisione degli elementi prefabbricati che, una volta prodotti, non permetterebbero ulteriori modifiche. Queste ultime, infatti, comporterebbero un incremento del costo finale in quanto ci si dovrebbe avvalere di una nuova progettazione, dell'impiego di ulteriori materiali e relativo incremento di tempi e costi

La trasmissione del rumore rappresenta un ulteriore nota dolente delle case prefabbricate. In esse, caratterizzate dalla propria leggerezza, il rumore riesce a diffondersi più facilmente rispetto ad altri sistemi che risultano più massicci, riscontrando grossi disagi per i fruitori soprattutto nel campo residenziale. Negli ultimi anni sono state introdotte delle barriere fonoassorbenti che limitano la propagazione del rumore nei sistemi a secco.

24 BioIsoTherm (2018), "Materiali per un'edilizia sostenibile".

1.4 Conclusioni

Dall'analisi storica della prefabbricazione è emerso che la sua nascita e progressione viene attribuita a una serie di necessità economiche e di natura logistica. Come ogni altro sistema di costruzione, il suo impiego comporta sia vantaggi che svantaggi. Risultando a oggi diversi gradi di prefabbricazione e diversi contesti possibili, si ci può avvalere di diverse soluzioni tecnologiche, al fine di risolvere ogni tipo di progettazione. Nel tempo sia aziende che progettisti si sono impegnate nello sviluppo e nell'evoluzione del sistema di prefabbricazione.

Alcune aziende che hanno provato a vendere abitazioni standardizzate a catalogo, riscuotendo anche un certo successo, mentre alcuni dei più grandi progettisti del secolo scorso si sono cimentati nel definire un prototipo di modulo abitativo, al fine di ridurre il costo del prodotto finito. Tutti gli edifici e i sistemi di costruzione, analizzati nell'evoluzione storica, miravano a produrre edifici economici, sfruttando la produzione di massa. Quest'ultima, tuttavia, portava alla definizione di un modulo ripetibile n volte con cui comporre l'edificio. Giorno dopo giorno l'evoluzione e le nuove tecnologie hanno permesso di produrre elementi prefabbricati sempre più dettagliati, facendo così perdere l'approccio di un modulo standard ripetibile, con conseguente aumento di scarti e costi. Tale evento riguarda principalmente l'ambito dell'edificio monofamiliare, dove la casa viene sempre più personalizzata, incrementando i materiali impiegati, i tempi e i costi, a causa di una progettazione ad hoc.

2 Diversi approcci dimensionali alla prefabbricazione

Il campo della prefabbricazione risulta essere molto complesso e presenta diverse soluzioni tecnologiche a seconda del contesto. Potendo utilizzare diversi materiali per le costruzioni, l'ambito della prefabbricazione diviene ancora più ramificato. Attualmente è possibile produrre da alcuni semplici elementi da integrare all'intero edificio, alla realizzazione completa della struttura in fabbrica. È quindi possibile distinguere tre diversi gradi di prefabbricazione: la prefabbricazione monodimensionale, la prefabbricazione bidimensionali, e la prefabbricazione tridimensionale.

2.1 Prefabbricazione monodimensionale

La prefabbricazione meno complessa risulta essere quella monodimensionale, attraverso la quale vengono prodotti principalmente travi e pilastri, al fine di realizzare in loco una struttura tridimensionale. Questa soluzione prevede l'integrazione di ulteriori elementi di tamponamento verticali e orizzontali, che a loro volta possono essere realizzati in loco o in fabbrica. Un esempio di prefabbricazione monodimensionale in legno è il *Blockhaus*, chiamato comunemente anche *Blockbau*, sistema che prevede la sagomatura e l'eventuale taglio di grossi tronchi di legno che, posizionati l'uno sopra l'altro, compongono un setto portante. Tale sistema, oltre alla realizzazione della struttura attraverso i prefabbricati, richiede l'integrazione di molti elementi per far fronte a tutti gli aspetti necessari a rendere confortevole l'abitazione (Fig.16).

In Figura 17, è mostrato un edificio residenziale realizzato a Campobasso e prodotto dall'azienda Daiku situata in provincia di Bolzano. Sono stati impiegati tronchi del Sudtirolo, ripuliti in macchina e intagliati attraverso i soli attrezzi da taglio manuali. A causa della lontananza del cantiere, i componenti principali sono stati montati e verificati in fabbrica al fine di non riscontrare errori in fase di montaggio. In seguito, l'edificio è stato smontato e i diversi componenti sono stati caricati su gomma per il trasporto in cantiere. Per via delle



Figura 16: Edificio completamente realizzato attraverso il sistema Blockhouse.

Case prefabbricate in legno.it (2017), "Coibentare una casa in legno blockhaus".



Figura 17: Edificio realizzato attraverso il sistema Blockbau dall'azienda Daiku a Campobasso. DAIKU, "Casa in Blockbau a Campobasso".

dimensioni, l'intero trasporto è stato effettuato di notte per evitare problemi legati al traffico. Oltre agli elementi già citati, nel carico era compreso tutto il necessario per la realizzazione dei solai, del pavimento e della copertura. In cantiere, l'edificio è stato montato al di sopra di un cordolo in calcestruzzo armato realizzato in precedenza. L'edificio oggi si presenta su due piani e tetto a doppia falda, con pochi elementi trasparenti al pian terreno e delle ampie vetrate al piano superiore sulla facciata esposta a sud²⁵. L'intera progettazione è avvenuta senza l'ausilio di un modulo dimensionale in quanto, considerando il taglio meccanico e la dimensione dell'edificio, il suo impiego non avrebbe apportato grossi benefici, risultando così una realizzazione su misura.

Tabella 1: Tabella riassuntiva della casa privata a Campobasso.

Casa privata a Campobasso	
Collocazione	Campobasso (IT)
Anno di realizzazione	2010
Tipologia di edificio	Residenziale
Prefabbricazione	Monodimensionale
Elementi prefabbricati	Travi e sezioni per comporre le pareti
Materiale	Legno (Massello)
Macchine impiegate per il taglio	Solo strumenti manuali
Modularizzazione della struttura	No
Trasporto eccezionale	No

Un altro sistema che utilizza elementi prefabbricati monodimensionali è quello a telaio spaziale che impiega travi, pilastri e pareti di tamponamento. Si tratta di un metodo simile a quello tradizionale, con l'essenziale differenza d'impiegare elementi prefabbricati. La figura 18 mostra uno degli edifici realizzati all'Aquila in seguito al terremoto del 2009. Si tratta quindi di una realizzazione caratterizzata da una forte emergenza e dalla necessità di ridurre al minimo i tempi di realizzazione.



Figura 18: Struttura portante di un edificio realizzato all'Aquila in seguito al terremoto del 2009. Ille Haus (2010), "Ricostruzione in Abruzzo".

²⁵ DAIKU, "Casa in Blockbau a Campobasso".

Per ottimizzare al meglio il materiale, è stato imposto un passo costante tra i vari pilastri e le travi, in modo da produrre in serie tutte le pareti di tamponamento. Si presenta quindi con elementi portanti monodimensionali lignei sia per la struttura verticale, che per quella orizzontale e inclinata, mentre per i tamponamenti sono stati impiegati pannelli sandwich. L'iter progettuale è risultato semplice e lineare grazie all'impiego di un modulo ripetibile lungo tutta la struttura. La parte di progettazione ha avuto il compito di stabilire le linee guida dimensionali, le variazioni dovute a eventuali aperture e definire i vari aspetti tecnologici-costruttivi, come nodi presenti in tutto l'edificio, le stratigrafie e le sezioni strutturali. Dopo la produzione dei vari elementi, è avvenuto il trasporto in loco dove era già pronto il piano di posa su cui montare l'intera struttura²⁶.

Tabella 2: Tabella riassuntiva della struttura all'Aquila.

Struttura all'Aquila	
Collocazione	Aquila (IT)
Anno di realizzazione	2009
Tipologia di edificio	Emergenza
Prefabbricazione	Monodimensionale e Bidimensionale
Elementi prefabbricati	Travi, pilastri e pareti
Materiale	Legno (Lamellare)
Macchine impiegate per il taglio	CNC
Modularizzazione della struttura	Si
Trasporto eccezionale	Si

2.2 Prefabbricazione bidimensionale

Sempre mediante l'impiego del legno, attraverso la prefabbricazione bidimensionale, è possibile approcciarsi a due sistemi costruttivi che impiegano elementi bidimensionali come i pannelli in X-LAM e le pareti intelaiate. Tali elementi vengono realizzati in fabbrica in modo da produrre un pannello che necessita delle sole connessioni in loco. Il primo sistema impiega dei pannelli realizzati attraverso la sovrapposizione di strati lignei incrociati e viene commercializzato come un vero e proprio elemento bidimensionale che verrà ritagliato in seguito in base alle necessità. Le pareti intelaiate sono, invece, il prodotto della composizione di elementi mono e bi-dimensionali, composto da montanti e traverse interne, racchiusi da due lastre di controventatura. L'intero sistema, che spesso prevede anche l'inserimento di un materiale isolante tra un montante e l'altro, compone un pacchetto che ha una funzione principalmente strutturale. Attraverso questo grado di prefabbricazione, parte della struttura è già realizzata, riconducendo al cantiere l'unione dei vari elementi bidimensionali e l'integrazione dei sistemi previsti che variano dall'eventuale isolamento alla parte impiantistica.

La scuola Materna sita a Carignano risulta essere un edificio di recente realizzazione che presenta una struttura portante, perimetrale e interna, realizzata interamente attraverso pannelli in X-LAM. È composta da tre strutture collegate da una manica di distribuzione che, oltre al grande corridoio, contiene i servizi e il laboratorio. I progettisti, gli architetti dello studio

²⁶ Ille Haus (2010), "Ricostruzione in Abruzzo".

associato Archilogo, si sono affidati alla ATI Gandelli Legnami s.r.l. per la produzione dei vari pannelli²⁷. Questi ultimi, una volta tagliati in stabilimento, sono stati trasportati in cantiere dove è avvenuto il montaggio mediante sistemi metallici. L'impiego di tale sistema ha permesso ai progettisti di avere una completa libertà in pianta, potendo giocare con le forme e realizzare un ambiente dinamico. Per la realizzazione, infatti, non è stato rispettato un vero e proprio modulo dimensionale (Fig.19). Tutti i componenti, strutturali e non, sono collegati mediante piastre, perni, chiodi e viti, al fine da attribuire alla struttura un certo grado di sostenibilità, permettendo uno smontaggio facile e veloce nell'ipotesi che un domani la struttura non risulti più in grado di svolgere la propria funzione²⁸. I pannelli sono stati in un primo momento sagomati attraverso una macchina CNC (Computer Numerical Control) e in secondo momento trasportati per mezzo gommato in cantiere dove è stata necessaria la sola realizzazione di una platea in calcestruzzo armato e relativo inserimento di cordoli di registro in larice, sui quali sono stati poggiati i pannelli in X-LAM.



Figura 19: Realizzazione di una delle maniche dell'edificio.

Homify, "Nuova scuola materna di Carignano".

Questo sistema richiede una serie di operazioni in cantiere ai fini dell'isolamento, termico e acustico, e per le rifiniture. La struttura portante del soffitto, invece, è stata realizzata mediante travi in legno posizionate nelle apposite sagome predisposte nel pannello in X-LAM, anch'essi tagliati attraverso una macchina CNC. La particolarità dei pannelli impiegati in questo progetto risiede nella loro disposizione in verticale, presentando un'altezza superiore rispetto alla larghezza, per far fronte all'altezza dell'edificio. Questa scelta non ha alterato le caratteristiche meccaniche del materiale in quanto, grazie alla sua composizione, presenta delle caratteristiche meccaniche pressoché omogenee lungo le diverse direzioni.

Tabella 3: Tabella riassuntiva della Scuola Materna di Carignano.

Scuola Materna Carignano	
Collocazione	Carignano (IT)
Anno di realizzazione	2016
Tipologia di edificio	Istruzione
Prefabbricazione	Monodimensionale e Bidimensionale
Elementi prefabbricati	Travi e Pareti
Materiale	Legno (Lamellare e X-Lam)
Macchine impiegate per il taglio	CNC
Modularizzazione della struttura	No
Trasporto eccezionale	No

27 Gandelli Group, "Scuola in Xlam, La Materna di Carignano"

28 Imprese Edili (2016), "Scuola in legno ad energia quasi zero".

Un'esempio di prefabbricazione bidimensionale per mezzo di pareti intelaiate è stata impiegata per realizzare l'espansione del Resort CLUB MED di Pragelato. Qui, grazie all'incremento della domanda turistica, la società ha deciso di stanziare 14 milioni di euro per ampliare il complesso con 17 nuovi edifici, corrispondenti a 105 stanze, diventando così il primo resort interamente realizzato in legno in Europa²⁹. Questa impresa ha visto il coordinamento di due aziende principali per la realizzazione, la "Abitare. Strutture e case in legno", responsabile della produzione ed esecuzione delle strutture ricettive in legno, e la "Mi.Ro. Costruzioni Edili S.r.l.", che ha avuto il compito di realizzare in loco i basamenti dei nuovi edifici e l'ampliamento di alcune strutture dedicate agli spazi comuni. L'intera opera è stata modellata sulla base dei progetti architettonici e studiata in tutti i suoi elementi e nodi, portando a ottimizzare e ingegnerizzare ogni componente. Per rispettare le piante originali, non è stato definito e seguito un modulo dimensionale, producendo altresì degli scarti. Tutto il cantiere è stato coordinato in modo da riuscire a rendere continuativo e a massimizzare il lavoro, al fine di raggiungere il completamento dell'opera entro 1 anno e mezzo dall'inizio del primo getto³⁰.

Le strutture sono state progettate e realizzate mediante il sistema a pareti intelaiate, con solai e coperture che impiegano travi e travetti in legno (*Fig.20*). In corrispondenza di carichi

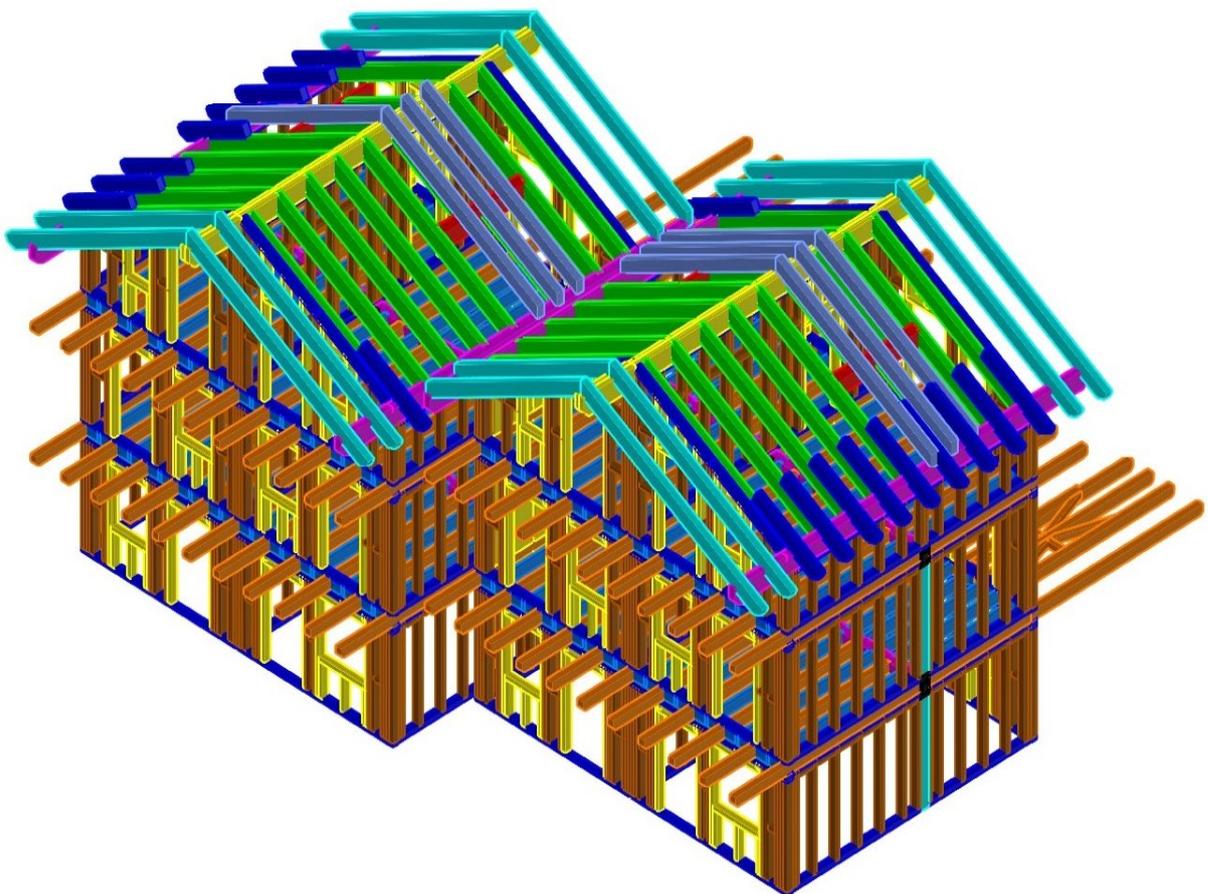


Figura 20: Estrapolazione dal file CAD di una delle strutture ingegnerizzata e pronta per la produzione per mezzo di CNC. (Abitare. Strutture e case in legno)

29 Pinerolo News (2021), "Club Med Pragelato, 14 milioni per l'ampliamento".

30 Le Valli (2021), "Club Med presenta l'ampliamento del Resort di Pragelato".

concentrati è presente una maggiore concentrazione di montanti in legno massiccio che fungono da pilastro. In seguito alla modellazione tridimensionale, i vari elementi sono stati realizzati attraverso una macchina CNC e montati mediante uno schema realizzato dai progettisti del team dello studio tecnico.

Qui ha giocato un ruolo importante la coordinazione tra lo studio tecnico e i responsabili di cantiere: man mano che i vari componenti venivano realizzati all'interno della fabbrica, si procedeva al trasporto in loco e relativo stoccaggio e montaggio, evitando la sovrapposizione delle diverse fasi di cantiere. Le pareti venivano posizionate, per mezzo di gru, al di sopra dei cordoli della piattaforma in calcestruzzo armato realizzata mediante un getto tradizionale. Successivamente venivano montati le travi dei solai, con relativo pacchetto, le pareti dei piani superiori fino a concludere con le travi del tetto e il pacchetto copertura.

2.3 Prefabbricazione tridimensionale

Il grado più elevato della prefabbricazione, che a oggi risulta più completa, è quella tridimensionale, attraverso la quale vengono prodotti moduli abitativi *stand alone* o facenti parte di un complesso più ampio (Fig.21). Il progresso nell'industrializzazione del campo edile ha portato oggi a definire anche una prefabbricazione "spinta", dove il prodotto finito risulta una vera e propria struttura tridimensionale che necessita del solo inserimento nel contesto previsto. Questi moduli tridimensionali realizzati per mezzo di prefabbricazione spinta, infatti, usciranno dalla produzione con diversi gradi di rifinitura, esterna e interna, e con la necessità del solo trasporto in cantiere e allaccio ai servizi idrici, elettrici e fognari.

In genere, i moduli abitativi stand alone si presentano con modeste dimensioni e possono rispettare o meno un modulo dimensionale, grazie al fatto che non necessitano di ulteriori componenti aggiuntivi per essere funzionali. Tuttavia, bisogna considerare gli sfide prodotti

Tabella 4: Tabella riassuntiva del Resort CLUB MED Prigelato.

Resort CLUB MED Prigelato	
Collocazione	Prigelato (IT)
Anno di realizzazione	in corso
Tipologia di edificio	Ricettivo
Prefabbricazione	Monodimensionale e Bidimensionale
Elementi prefabbricati	Travi e Pareti
Materiale	Legno (Lamellare e KVH)
Macchine impiegate per il taglio	CNC
Modularizzazione della struttura	No
Trasporto eccezionale	No

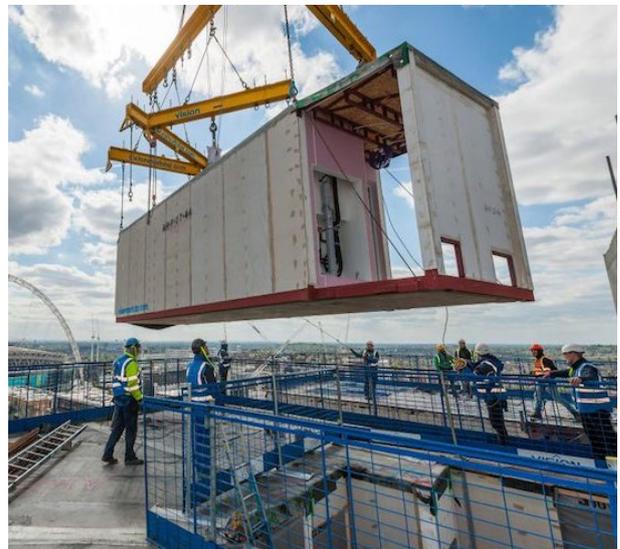


Figura 21: Modulo prefabbricato in movimentazione. Teknoring (2019), "Prefabbricazione e modularità, è il futuro dell'edilizia?".

che, ricondotti a un solo modulo di modeste dimensioni, risultano limitati, Viceversa, i moduli tridimensionali che fanno parte di un complesso più ampio, hanno la necessità di rispettare un modulo dimensionale, al fine di ottimizzare il materiale e ridurre al minimo tempi e costi. In quest'ultima casistica ricadono principalmente le strutture ricettive (Fig.22) dove i vantaggi economici risultano essere significativi tanto quanto risulta considerevole la riduzione dei tempi di produzione e cantierizzazione che possono ammontare fino al 70%³¹.

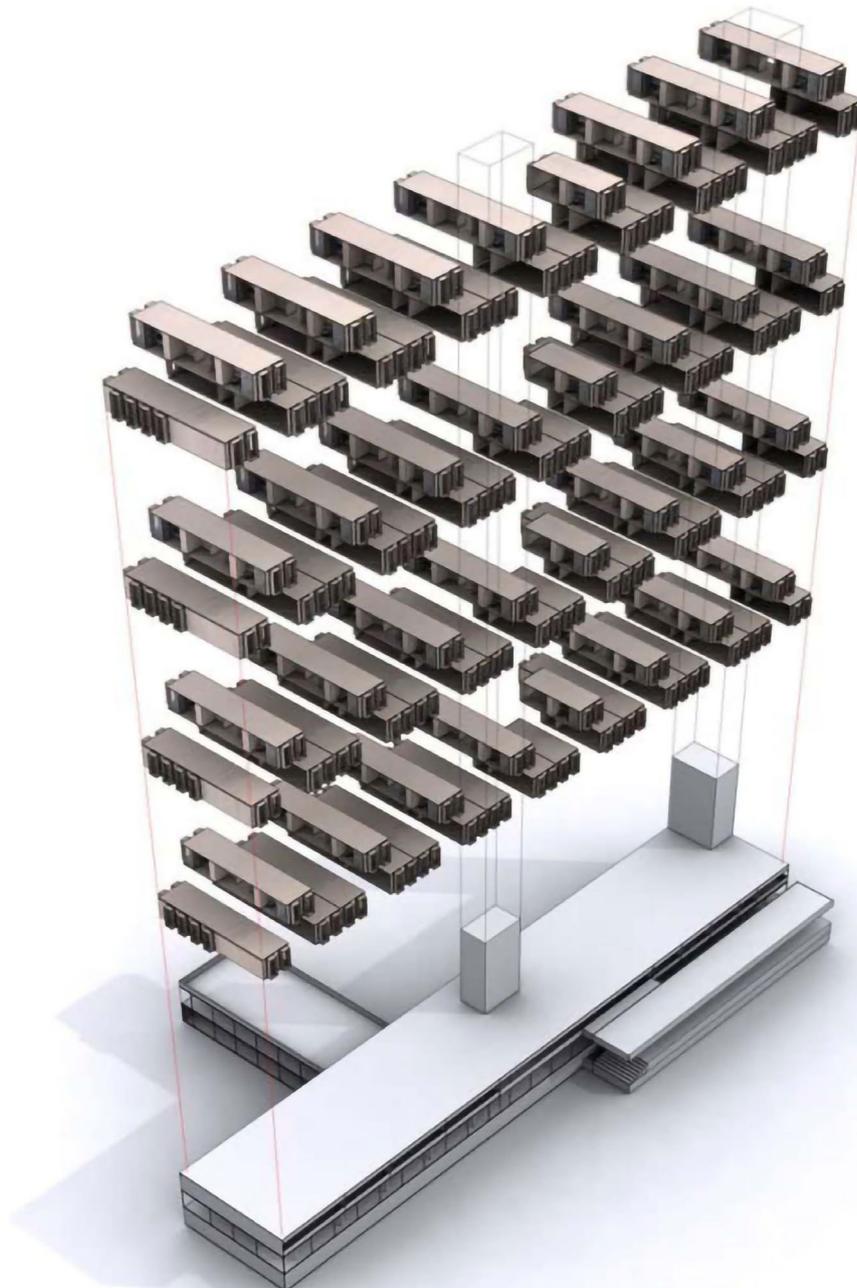


Figura 22: Schema posizionamento moduli prodotti in serie dell'Alpenhotel Ammerwald. ModulArt (2018), "Analogie avec la construction automobile".

31 BMW Group (2009), "Alpenhotel Ammerwald. Inhaltsverzeichnis", BMW Medien-information, pp.1-14.

Il primo esempio riguarda un modulo tridimensionale stand alone, progetto intrapreso dall'azienda "Abitare, case e strutture in legno" destinato all'isola caraibica Martinique. La piccola struttura, ideata come casa vacanza, risulta lunga 8,3 metri e larga 2,8 metri e si compone con due stanze e un servizio. L'intera struttura (Fig.23) è stata modellata sulla base del progetto architettonico del cliente che, basandosi solamente sulle dimensioni minime interne, non ha tenuto in considerazione un modulo dimensionale. Ciò ha causato l'aumento del materiale impiegato e una discreta produzione di scarti. Il modulo è stato realizzato attraverso un telaio in legno massello, confinato da due pannelli, quello interno in gessofibra e quello esterno in fibrocemento, con interposta della lana di vetro, sufficiente a soddisfare i requisiti di isolamento termico del clima tropicale locale. Lo spazio disponibile per la realizzazione degli impianti era limitato. La difficoltà maggiore è stata riscontrata nel bagno dove, in soli 14 cm, era necessaria la compresenza dell'impianto idrico, fognario ed elettrico. Il modulo, infatti, è stato spedito con l'intero impianto predisposto e insieme a infissi, sanitari e arredi principali già installati. Ciò consente che, al proprio arrivo in loco, il modulo abitativo possa necessitare del solo allaccio alla rete elettrica, idrica e fognaria mediante degli innesti predisposti in punti strategici. In loco, oltre a quest'ultima operazione descritta, è stata prevista la realizzazione di una platea con otto punti di appoggio su cui posare l'abitazione. Altro tema importante riguarda la movimentazione e il trasporto del modulo tridimensionale che, vista la distanza e il viaggio, doveva avvenire per mezzo gommato lungo tutto il tragitto. Per la movimentazione è stato studiato un sistema che non danneggi la rifinitura esterna e che poteva essere reimpiegato per i successivi moduli. Tale sistema sfruttava dei ganci fissati alla struttura portante, che potevano essere smontati in seguito al loro impiego e rimontati per un'eventuale movimentazione futura.

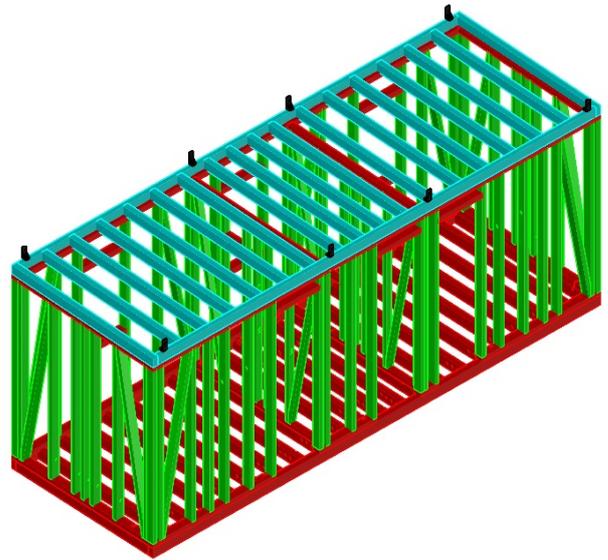


Figura 23: Estrapolazione dal file CAD della struttura lignea ingegnerizzata e pronta per il trasferimento alla CNC. (Abitare. Strutture e case in legno)

Tabella 5: Tabella riassuntiva del modulo abitativo per Martinique.

Edificio privato a Martinique	
Collocazione	Sainte-Luce (MQ)
Anno di realizzazione	2022
Tipologia di edificio	Abitativo
Prefabbricazione	Tridimensionale
Elementi prefabbricati	Modulo tridimensionale
Materiale	Legno (KVH)
Macchine impiegate per il taglio	CNC
Modularizzazione della struttura	No
Trasporto eccezionale	Si

Il secondo esempio, realizzato per mezzo moduli tridimensionali, è l'edificio chiamato Caramel Palace, noto anche come My Micro NY, risultato del concorso AdAPT NYC stanziato dal NYC Department of Housing Preservation and Development. L'intera struttura è nata come monito alle costruzioni future, offrendo diverse soluzioni abitative adatte a nuclei familiari di ridotte dimensioni. I vincitori, gli architetti dello studio nArchitects, hanno progettato un edificio che ospita 55 appartamenti suddivisi in quattro torri affiancate, ognuna con larghezza di 4 metri e con colori differenti che richiamano il contesto newyorkese, al fine di far risaltare i singoli moduli da cui è costituito³². Il Caramel Palace è stato progettato in 3 anni e realizzato in 4 settimane nel 2016 con un sistema di prefabbricazione modulare tridimensionale che ha richiesto la realizzazione di 65 moduli, costituiti da una struttura portante in acciaio, di cui 55 destinati a unità abitativa e i rimanenti 10 destinati a spazi comuni. Tutti i moduli sono stati realizzati nello stabilimento Capsys nel Brooklyn Navy Yard, allestito appositamente ispirandosi a una catena di montaggio, mentre in loco si è provveduto all'allestimento del cantiere, alla realizzazione delle fondazioni e all'installazione dei moduli con i relativi allacci, arredi e finiture previste. Le finiture e gli arredi non sono stati montati in fabbrica per evitare a un eventuale danneggiamento durante il trasporto e il movimento³³. Per comporre la realizzazione dell'edificio sono state previste 7 diverse tipologie di moduli abitativi (Fig.24), risparmiando sui costi dell'opera, ottimizzando il materiale e riducendo i tempi di produzione.



Figura 24: Tipologie di unità micro-abitative previste per il Caramel Palace. Dezeen (2016), A.G.Brake, "Caramel Palace".

32 World-architets.com, "Caramel Palace".

33 ArchDaily, "My Micro NY: The latest architecture and news".

Il punto di forza della realizzazione del My Micro NY è attribuito all’ottima organizzazione e sequenzialità dei vari processi di produzione e montaggio che ha permesso un’elevata riduzione dei tempi di realizzazione con un conseguente impatto positivo in termini economici dell’edificio finito. Tuttavia, a causa della definizione di 7 moduli abitativi che si differenziano sia in larghezza che in lunghezza, il sistema non ha raggiunto un’elevata minimizzazione dei tempi di produzione in quanto, invece di avere un solo modulo tridimensionale ripetibile, erano presenti più moduli che hanno richiesto un ulteriore lavoro aggiuntivo sia nella fase di progettazione, che nella fase produttiva ed esecutiva.

Tabella 6: Tabella riassuntiva del Caramel Palace.

Caramel Palace	
Collocazione	New York City (US)
Anno di realizzazione	2016
Tipologia di edificio	Abitativo
Prefabbricazione	Tridimensionale
Elementi prefabbricati	7 Tipologie di moduli abitativi
Materiale	Acciaio
Macchine impiegate per il taglio	CNC
Modularizzazione della struttura	Si
Trasporto eccezionale	Si

Diversamente è stato trattato quest’ultimo caso di prefabbricazione tridimensionale, l’AC Hotel NoMad, che rappresenta l’esempio migliore di prefabbricazione impiegata al fine di minimizzare costi e tempi. Differentemente dal Caramel Palace, l’AC Hotel NoMad ha impiegato moduli tridimensionali uguali (Fig. 25), realizzati mediante diversi processi in varie parti del mondo. Appartiene alla catena Marriott, compagnia che risulta essere tra le prime a introdurre nuovi sistemi costruttivi per la realizzazione di nuove strutture. Pur non essendo ancora realizzato a causa di problemi esterni, risulta a oggi uno dei progetti più interessanti per il proprio percorso evolutivo. Il progetto è stato realizzato dallo studio newyorchese Fanny Forster & Architecture e sua realizzazione mira a diventare un esempio di prefabbricazione tridimensionale in ambito ricettivo per le future costruzioni, diventando la prima torre alberghiera realizzata quasi completamente con strutture prefabbricate.

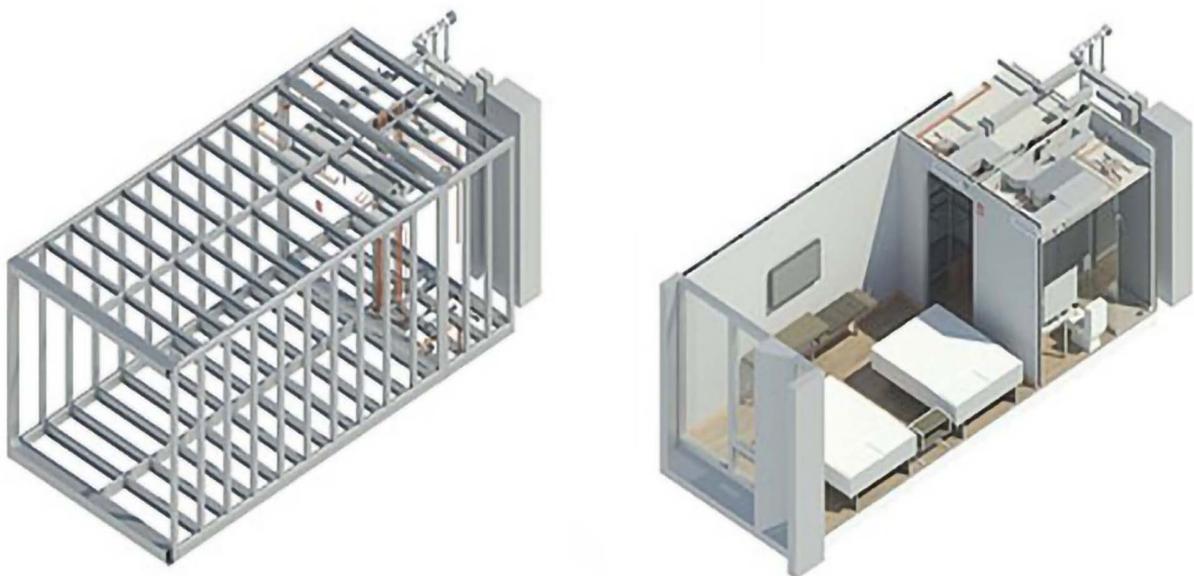


Figura 25: Struttura, impianti e arredo del modulo ricettivo. Danny Forster & Architecture, “Modular AC Hotel NoMad”.

A oggi viene presentato un edificio virtuale a forma di torre alta circa 110 metri e suddivisa in 26 piani, dove i primi 4 livelli sono destinati agli spazi pubblici, mentre i rimanenti piani sono destinati alle 168 camere che si concludono con un tetto piano destinato a bar e terrazza. L'unica operazione necessaria in loco è la realizzazione di un basamento in cemento armato dove, per rispondere meglio alle esigenze strutturali, è risultato il sistema migliore. La rimanente parte che dal primo piano si sviluppa fino alle terrazze dell'ultimo piano sarà realizzata interamente col sistema di prefabbricazione previsto. Ogni stanza si presenta come una struttura scatolare prodotta e montata in fabbrica, con un grado di finitura molto alto che prevede anche il rivestimento esterno. Quest'ultimo è realizzato per mezzo di pannelli in alluminio, con diverse gradazioni di grigio in base all'altezza³⁴. La produzione dei moduli è stata subappaltata alla casa produttrice DMDmodular, leader nel settore della produzione di strutture modulari su larga scala. Le strutture in acciaio, a oggi prodotte in parte dalla STP Elbud a Cracovia, una volta assemblate e verificate strutturalmente, verranno spedite a Skawina, sede della DMDmodular, che si occuperà di completarle con tamponamenti e arredi prodotti in diverse parti dell'America³⁵. Al prodotto finito, una volta realizzato, non rimane che essere trasportato in loco e inserito nel proprio contesto. Le ultime stime dell'azienda prevedono una fase di montaggio in cantiere della durata di 90 giorni. Tuttavia, nel 2020 i lavori si sono fermati al getto delle fondazioni a causa della recente emergenza sanitaria. A oggi si prevede l'inaugurazione alla fine dell'anno 2022³⁶.

Tabella 7: Tabella riassuntiva dell'AC Hotel NoMad.

AC Hotel NoMad	
Collocazione	New York City (US)
Anno di realizzazione	non ancora realizzato
Tipologia di edificio	Ricettivo
Prefabbricazione	Tridimensionale
Elementi prefabbricati	1 Tipologia di modulo abitativo
Materiale	Acciaio
Macchine impiegate per il taglio	CNC
Modularizzazione della struttura	Si
Trasporto eccezionale	Si

2.4 Digital Prefabrication

Negli ultimi anni, grazie all'evoluzione tecnologica, è nato un nuovo sistema di prefabbricazione, la Digital Fabrication, che impiega tecnologie come stampanti tridimensionali o macchine a taglio laser. La Digital Fabrication è impiegata per la produzione di elementi monodimensionali, bidimensionali e tridimensionale e può essere applicata attraverso metodi sottrattivi, additivi o formativi. In edilizia vengono impiegate principalmente metodi sottrattivi, attraverso l'impiego di macchine a controllo numerico o stampanti laser, e additive, mediante l'impiego di stampanti 3D. Queste ultime funzionano mediante estrusione e sovrapposizione di strati, in genere a base cementizia o di terra cruda. Gli elementi prodotti possono essere integrati a ulteriori materiali per migliorare le caratteristiche termiche, acustiche e di sicurezza strutturale. Le macchine a taglio laser, invece, vengono impiegate per sagomare

³⁴ Teknoring (2019), "AC Hotel New York NoMad: la prefabbricazione cresce in altezza".

³⁵ YouTube (2018), "DMDmodular. The World's Tallest Modular Hotel".

³⁶ Skyscrapercenter, "AC Hotel NoMad".

delle forme da un pannello, in genere un compensato, che vengono impiegate insieme ad altri elementi al fine di comporre una struttura. Entrambe le due soluzioni sono ancora da perfezionare e attualmente risultano limitate dimensionalmente. Tuttavia, sono ideali dove si necessita di una soluzione *low-budget*, grazie al possibile impiego di materiali poveri come la terra cruda, e di facile montaggio e smontaggio.

L'azienda WASP, insieme all'architetto Mario Cucinella, ha lanciato un nuovo modello di abitazione creata interamente con materiali riutilizzabili, come la terra cruda, chiamato TECLA. Tale modello (Fig.26) è realizzato mediante l'estrusione di un composto di cui la componente principale risulta essere la terra cruda. In questo modo, l'edificio impiega materiali a costo quasi zero, ideale per i paesi più poveri dove la terra è quasi sempre rintracciabile nel luogo. In questi casi l'edificio stesso risulta essere un modulo dimensionale.



Figura 26: Struttura in terra cruda realizzata con la stampante Crane WASP. Settesere (2021), "Massa Lombarda, la Wasp completa il primo eco-habitat stampato in 3D".

Un'applicazione delle stampanti laser è riscontrata nel progetto AccuPoli intrapreso dall'architetto Lorena Alessio in collaborazione con il Politecnico di Torino. La struttura è stata concepita come un edificio polivalente che potesse rispondere alle necessità post sismiche del terremoto del Centro Italia del 2016. La struttura, realizzata e donata al comune di Accumoli, è stata la prima in Italia a impiegare il compensato come parte strutturale. L'intera progettazione è stata curata dall'associazione H.EL.P.6.5 (Housing in Emergency for Life and People), fondata dall'architetto Alessio che include anche 4 studenti del Politecnico di Torino, con l'ausilio di figure esterne come termotecnici, associazioni e produttori. Il sistema di cui si avvale il progetto AccuPoli non è stato ideato in Italia, bensì in Giappone, dal quale è nata una stretta collaborazione con il professor Hiroto Kobayashi del KMDW (Kobayashi Maki Design

Workshop) di Tokyo³⁷. L'edificio donato alla città, oltre a risultare una costruzione antisismica, ha un'elevata resistenza al fuoco e agli agenti atmosferici. Si presenta con una pianta rettangolare di 14 metri per 13 metri, suddivisa in due maniche di 8 metri e 4 metri di luce netta. Ogni manica è realizzata con 6 portali (Fig.27), realizzati con una doppia struttura affiancata, distanziati da un interasse costante di 2,7 metri. Ogni componente impiegato è progettato con alto grado di precisione e realizzato attraverso una macchina CNC per il taglio di una serie di fogli di compensato okumè ignifugato, aventi dimensioni 3,1 metri per 1,53 metri e spessore da 18 a 30 millimetri in base la necessità strutturale.

Tabella 8: Tabella riassuntiva del progetto AccuPoli.

Progetto Accupoli	
Collocazione	Accumoli (IT)
Anno di realizzazione	2018
Tipologia di edificio	Emergenza
Prefabbricazione	Digital Fabrication
Elementi prefabbricati	bidimensionali
Materiale	Compensato okumè
Macchine impiegate per il taglio	CNC
Modularizzazione della struttura	No
Trasporto eccezionale	Si

L'intera struttura è posata su una platea in calcestruzzo armato di 30 centimetri, dimensione minima prevista dalla normativa per il distanziamento tra elementi portanti lignei e



Figura 27: Struttura portante dell'edificio realizzata in compensato di okumè ignifugo. Info Build, Giacometti S., "Un progetto di origine giapponese fa rinascere la città di Accumoli".

37 Info Build, Giacometti S., "Un progetto di origine giapponese fa rinascere la città di Accumoli".

pavimentazione impermeabile esterna. La copertura, infine, è stata realizzata con un guscio di polycarbonato trasparente ad alte prestazioni con intercapedine d'aria, che consente l'illuminazione naturale³⁸. Vista la tecnologia impiegata per la costruzione, non è stato stabilito un modulo per il taglio, in quanto, attraverso due soli programmi, è stato possibile realizzare l'intera struttura, facendola risultare il prodotto di un piccolo processo di produzione di massa.

2.5 I diversi sistemi a confronto

Dai casi citati si evince che, indipendente dal grado di prefabbricazione, il fine comune risulta quello di produrre in serie il maggior numero di elementi possibili al fine di ridurre tempi e costi complessivi. Inoltre, nei casi dove il materiale strutturale era il legno, è stato necessario realizzare una platea e un cordolo in cemento armato per impedire il contatto diretto degli elementi strutturali con il terreno, poiché l'eventuale presenza di acqua, potrebbe recare danno al materiale.

Si nota altresì che l'applicazione di un modulo dimensionale porta diversi benefici in termini di tempi e costi di produzione, riuscendo a non avere, o almeno a limitare, gli sfridi del materiale. La determinazione del modulo dimensionale dipende direttamente dalla pianta dell'edificio, soprattutto se ci si trova in un contesto vincolato. L'esempio più emblematico della corretta applicazione della prefabbricazione è rappresentato dall'AC Hotel NoMad dove, grazie a uno studio dimensionale, si è stabilito un solo modulo tridimensionale impiegato lungo tutti i piani.

Sono stati descritti alcuni casi dove l'azienda che produce i prefabbricati ha modellato e ingegnerizza il futuro edificio seguendo i disegni tecnici dei clienti, come nel caso del modulo dell'edificio privato a Martinique, dove non è stato definito alcun modulo dimensionale. In tali casi la produzione ha rilevato diversi scarti che hanno aumentato il costo di produzione del modulo abitativo. Tale evento è dovuto alla volontà di realizzare qualsiasi forma, grazie alla precisione e alla velocità delle macchine CNC, senza tenere in considerazione eventuali sfridi e montanti non necessari a livello strutturale.

2.6 Le strutture a catalogo per ambienti monofamiliari

Negli anni, per far fronte al difficile problema della modularizzazione dell'edificio, alcune aziende hanno ideato dei cataloghi dove sono presenti abitazioni modulari al fine di abbattere notevolmente tempi e costi. Queste strutture, infatti, sono quasi sempre studiate mediante un modulo dimensionale per evitare sfridi e ridurre al minimo l'impiego dei materiali da costruzione, necessitando della sola produzione, trasporto e montaggio. Presentano altresì un prezzo fisso che non varia da quello finale, a meno di modifiche da parte dell'acquirente. Questi edifici, tuttavia, possono subire modifiche con un conseguente incremento dei costi che vanificherebbe il processo di standardizzazione, portandoli ad avere un costo finale paragonabile a una casa costruita su misura. Il cliente è portato a scegliere mediante un catalogo la tipologia di edificio che desidera secondo i propri gusti architettonici e superfici interne necessarie, oltre alla disponibilità economica.

38 Alessio L. (2019) "Progetto AccuPoli", *Atti e Rassegna Tecnica della società degli ingegneri e degli architetti in Torino*, Vol. 152, pp.170-178.

Una tra le aziende produttrici è la Costantini Legno. Oltre a mettere a disposizione del cliente un catalogo contenente 31 edifici, l'azienda permette anche di scegliere il pacchetto parete in virtù del budget del cliente. Dispone di tre pacchetti differenti, il pacchetto linea clima, il pacchetto linea clima comfort e il pacchetto linea natur (*Fig.28*), che si distinguono per tipo d'isolante impiegato, determinando differenti caratteristiche di trasmittanza, sfasamento e riduzione del rumore. La struttura portante delle varie abitazioni presentate a catalogo sfrutta il sistema X-LAM, mentre gli isolanti impiegati sono l'EPS per il pacchetto clima, la lana di roccia per il pacchetto comfort e la fibra di legno per il pacchetto natur³⁹.

Parete Esterna *CLIMA NATUR*

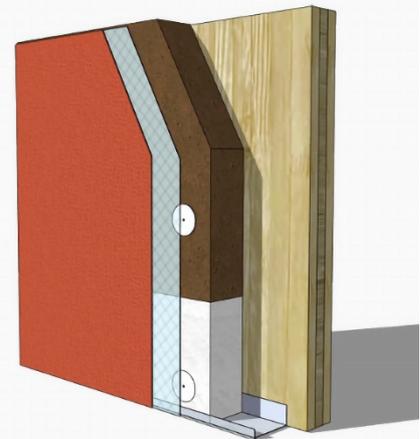
Composizione stratigrafica a partire dall'interno:

- Stuccatura
- Lastra in gesso rivestito da 12,5 mm
- Lastra in gesso rivestito da 12,5 mm
- Freno Vapore
- Fibra di legno da 80 mm
- Pannello X-Lam da 96 mm
- Cappotto in Fibra di legno da 120 mm
- Rasatura
- Intonaco
- Tinteggiatura

Spessore Totale 321 mm

Trasmittanza U 0,169 W/m²K

Trasmittanza periodica 0,007 W/m²K



Isolamento acustico 58 DB

Sfasamento 12h 22'

Figura 28: Pacchetto *CLIMA NATUR* dell'azienda Costantini Legno. Costantini Legno, "Pacchetti linea clima".

Ecosmartbuilding è una tra le più famose aziende produttrici. Mette a disposizione dell'acquirente un catalogo di 24 abitazioni completi di ogni impianto necessario. A queste abitazioni già calcolate in tutti i loro aspetti, vengono rilasciate certificazioni che attestano sicurezza, comfort e classificazione energetica. La stessa azienda produttrice realizza case su misura per rispondere alla richiesta, sempre più diffusa, di effettuare modifiche alle abitazioni presenti nel catalogo⁴⁰. Nelle piante degli edifici pubblicati attraverso il loro catalogo online, si può notare una schematizzazione secondo un modulo dimensionale (*Fig.29*), prova dell'ottimizzazione del materiale al fine di ridurre al minimo gli scarti e i conseguenti costi di produzione.

³⁹ Costantini Legno, "Pacchetti linea clima".

⁴⁰ EcoSmartBuilding, "Case in legno a catalogo".



Figura 29: Pianta dell'edificio catalogato "Trendy Classic" dell'azienda EcoSmartBuilding. EcoSmartBuilding, "Trendy Classic".

Oggi, in commercio, è presente una varietà che va dalle poche unità a centinaia di edifici realizzabili. Attualmente esiste una raccolta online di tutte le case prefabbricate a catalogo messe in vendita da tutte le aziende, dalle più conosciute a quelle meno conosciute, per avere una libera concorrenza indipendentemente dal marchio aziendale⁴¹.

⁴¹ ImmobiliGreen.it, "Costruire".

3 Analisi del materiale “LEGNO”

La scelta del legno come materiale da costruzione è da attribuire ai vantaggi che il suo impiego comporta e alla facilità di lavorazione. Esso rappresenta il **materiale** più antico impiegato per la realizzazione di oggetti ed edifici. Si presenta fibroso e a livello chimico è composto principalmente da due elementi: la cellulosa, che conferisce alla fibra del legno rigidità e resistenza alla trazione, e la lignina, che garantisce alla pianta una certa elasticità.

Il tronco del legno (*Fig.30*) può essere suddiviso in diverse parti: il midollo, che si presenta come un tessuto spugnoso con basse resistenze meccaniche, il durame, composto dal legno più vecchio e quindi più duro e resistente, l'alburno, composto dal legno più giovane che si presenta meno compatto e resistente ma anche più elastico, e la corteccia, che funge da protezione al tronco e non viene impiegata nella produzione.

I vantaggi di tale materiale riguardano l'elevata leggerezza, l'ottima resistenza meccanica nella direzione parallela alle fibre, l'elevata lavorabilità unita al basso consumo energetico di lavorazione, una buona resistenza al gelo, un buon isolamento termico e la possibilità di reimpiegare il materiale. Gli svantaggi, invece, riguardano l'inflammabilità, la propensione a essere attaccato da funghi, parassiti e muffe, l'anisotropicità, l'igroscopicità, l'elevato tempo di stagionatura necessaria ad attribuirgli le massime caratteristiche meccaniche e la presenza di imperfezioni come fenditure, cipollature e nodi che creano discontinuità nella resistenza meccanica⁴².

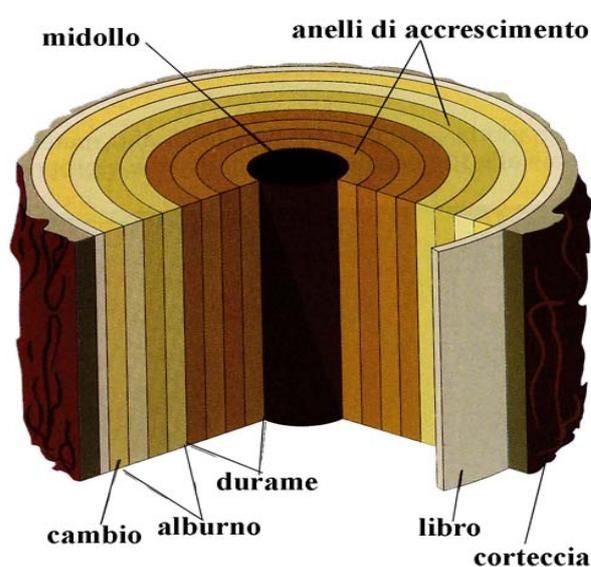


Figura 30: Suddivisione del tronco nei suoi componenti principali. La Repubblica@scuola (2016), “Il legno”.

Il processo di **trasformazione**, da tronco a legno da costruzione, avviene in seguito a una serie di lavorazioni. Il primo step consiste nell'abbattimento della pianta, previa autorizzazione del Corpo Forestale, che in genere avviene durante il periodo invernale quando la pianta è a riposo. Successivamente vengono eliminati i rami e viene tagliato in base alla lunghezza richiesta per il loro futuro impiego. In seguito, i vari tronchi ottenuti vengono trasportati nelle segherie dove sono sottoposti a tre trattamenti principali: la lisciviazione, che consiste nel lavaggio e trattamento per mezzo di getti di vapore acqueo, al fine di eliminare insetti e muffe, il taglio, che consiste nel trasformare i grossi tronchi nelle sezioni desiderate come tavole, travi e assicelle, e la stagionatura, che comporta la perdita d'umidità al fine di ottenere un materiale più compatto e resistente. Quest'ultima può avvenire naturalmente, mediante l'azione naturale del vento e del sole, o artificialmente, attraverso l'impiego di forni essiccatori⁴³.

42 Varvelli R. (2014), *Che cos'è il legno*, Mind Edizioni, Milano, Italia.

43 Il Dolimiti (2020), “Il processo di produzione del legname:dall'albero al prodotto finito”

3.1 Classificazione del legno

La necessità di distinguere gli alberi impiegati nel campo delle costruzioni, è da attribuire alle diverse caratteristiche fisiche e meccaniche che ogni tipologia di albero presenta. Per distinguere i vari tipi di albero, ogni nazione ha stabilito dei fascicoli. In Italia sono stati redatti i fascicoli della UNI 2853 che distinguono le specie legnose nazionali, della UNI 2854, con le specie legnose esotiche coltivate in Italia, e della UNI 3917, con le specie esotiche d'importazione⁴⁴. Nel campo delle costruzioni viene impiegato il gruppo delle **Conifere**, a cui fanno parte gli alberi che presentano un legno "dolce" come abete, larice, pino, sequoia e cipresso, e quella delle **Latifoglie**, a cui appartengono alcuni alberi che presentano un legno "duro" come rovere, frassino, leccio, pioppo, sughero, acero e castagno. La differenza principale tra questi due gruppi è rilevata nella loro composizione chimica che, seppur con percentuali simili (Tab.9), presentano delle differenze che ne alterano la durezza, il colore, l'aggressività verso altri materiali e altre caratteristiche fisiche e meccaniche, che incidono sulla scelta. Infatti, un maggior quantitativo di lignina rispetto alla cellulosa, si traduce in una maggiore durezza e compattezza del materiale.

Tabella 9: Composizione chimica delle Conifere e delle Latifoglie.
I prodotti di legno per la costruzione (Promolegno, 2005)

	Cellulosa	Lignina	Emicellulose	Altre
Conifere	50%	18%	26%	6%
Latifoglie	47%	27%	22%	4%

3.2 Proprietà e caratteristiche meccaniche

Il primo aspetto importante è il rapporto massa/volume. Tale rapporto dipende direttamente dalla composizione chimica della pianta e dalla presenza di umidità all'interno del materiale. Inoltre, la massa del legno può subire variazioni a causa di imperfezioni interne del materiale che ne fanno alterare la massa reale. Per questo motivo, nei manuali vengono forniti 3 valori, la massa allo stato fresco, valore misurato con umidità superiore al punto di saturazione, la massa a umidità normale, caratterizzato da un'umidità che varia dal 12% al 15%, e la massa allo stato anidro, dove il materiale non presenta acqua interstiziale. La variazione d'umidità può alterare le resistenze meccaniche del materiale, in quanto esso tende a ritirarsi proporzionalmente alla diminuzione dell'umidità, causandone una rottura parziale. Il passaggio dallo stato fresco allo stato anidro comporta in media una variazione dimensionale inferiore all'1% nella direzione assiale alle fibre, dal 3% al 6% nella direzione radiale e dal 5% al 12% nella direzione tangenziale⁴⁵.

44 Giordano G. (1999), *Tecnica delle costruzioni in legno*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, Italia.

45 Giordano G. (1999), *Tecnica delle costruzioni in legno*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, Italia.

Altra caratteristica fondamentale del legno riguarda il comfort **termo-igrometrico**. Questo materiale presenta un coefficiente di conducibilità termica (λ), relativamente basso rispetto ad altri materiali da costruzione (Fig.31)⁴⁶. Tale valore dipende principalmente dalla composizione chimica e, per quanto detto in precedenza, nel legno risulta variabile. Tuttavia, il valore attribuito al materiale è definito pari a 0,13 W/mK, giocando un ruolo fondamentale nella progettazione energetica dell'edificio. Altro valore importante del legno è il calore specifico (C). Il legno possiede un valore relativamente alto, pari a 2090 J/KgK per il massiccio di abete, variabile secondo la composizione chimica, che contribuisce a implementare i tempi di sfasamento in regime estivo.

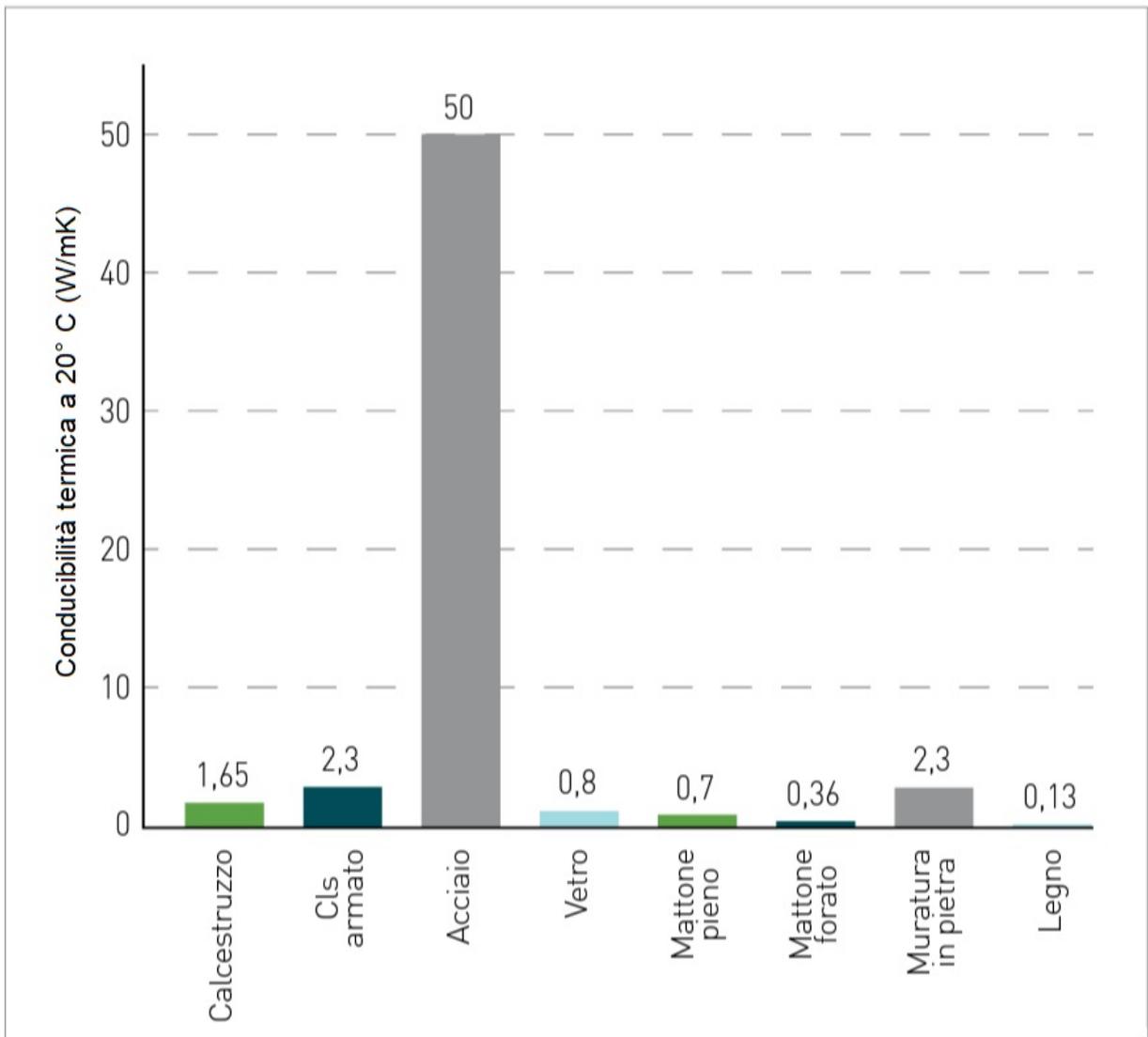


Figura 31: Confronto della conducibilità termica dei diversi materiali.
Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

46 Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

Per poter impiegare il legno come materiale da costruzione, è molto importante comprendere il suo comportamento in presenza del **fuoco**. Prima d'innescare la combustione nel materiale, l'elemento dev'essere privato della propria umidità interna. Durante la fase di combustione, la sezione dell'elemento sottoposto a tale evento viene ridotta con una velocità di circa 1 millimetro al minuto per lato, a seconda dell'esposizione alla fiamma e del tipo di legno utilizzato. Tale valore risulta non eccessivo grazie alla carbonizzazione che limita la propagazione della fiamma (Fig.32). Ai fini della sicurezza dell'edificio, sia strutturale che per salvaguardare gli utenti dai fumi, bisogna garantire un certo grado di sicurezza del materiale, proteggendo la parte lignea con materiali o sostanza ignifughe⁴⁷.



Figura 32: Trave in legno in seguito ad un evento incendiario.

Antincendio Italia (2019), "Gli effetti del fuoco sugli elementi costruttivi"

La **resistenza meccanica** è la caratteristica fondamentale per il fine strutturale e dipende direttamente dalla composizione chimica e dalla direzione delle fibre, rendendo il materiale anisotropo. Infatti il legno possiede un comportamento diverso a seconda della direzione delle sollecitazioni (Tab.10).

Tabella 10: Classi di resistenza secondo EN 11035, tabella 18-3.

Proprietà		Abete / Nord			Abete / Centro Sud			Larice / Nord			Douglasia / Italia		Altre Conifere / Italia		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2/S3	S1	S2	S3
Flessione (5-percentile), MPa	$f_{m,k}$	29	23	17	32	28	21	42	32	26	40	23	33	26	22
Trazione parallela alla fibratura (5-percentile), MPa	$f_{t,0,k}$	17	14	10	19	17	13	25	19	16	24	14	20	16	13
Trazione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), MPa	$f_{t,90,k}$	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Compressione parallela alla fibratura (5-percentile), MPa	$f_{c,0,k}$	23	20	18	24	22	20	27	24	22	26	20	24	22	20
Compressione perpendi-colare alla fibratura (5-percentile), MPa	$f_{c,90,k}$	2.9	2.9	2.9	2.1	2.1	2.1	4.0	4.0	4.0	2.6	2.6	4.0	4.0	4.0
Taglio (5-percentile), MPa	$f_{v,k}$	3.0	2.5	1.9	3.2	2.9	2.3	4.0	3.2	2.7	4.0	3.4	3.3	2.7	2.4
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (medio), MPa ($\times 10^3$)	$E_{0,mean}$	12	10.5	9.5	11	10	9.5	13	12	11.5	14	12.5	12.3	11.4	10.5
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (5-percentile), MPa ($\times 10^3$)	$E_{0,05}$	8	7	6.4	7.4	6.7	6.4	8.7	8	7.7	9.4	8.4	8.2	7.6	7
Modulo di elasticità perpen dicolare alla fibratura -(medio), MPa ($\times 10^2$)	$E_{90,mean}$	4	3.5	3.2	3.7	3.3	3.2	4.3	4	3.8	4.7	4.2	4.1	3.8	3.5
Modulo di taglio (medio), MPa ($\times 10^2$)	G_{mean}	7.5	6.6	5.9	6.9	6.3	5.9	8.1	7.5	7.2	8.8	7.8	7.7	7.1	6.6
Massa volumica (5-percentile), kg/m ³	r_k	380	380	380	280	280	280	550	550	550	400	420	530	530	530
Massa volumica (media), kg/m ³	r_{mean}	415	415	415	305	305	305	600	600	600	435	455	575	575	575

47 Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

Altri fattori che incidono sulle resistenze meccaniche del legno derivano principalmente dal contesto. Le caratteristiche meccaniche variano principalmente in virtù della temperatura e dell'umidità. Maggiori saranno questi ultimi e minore sarà la resistenza meccanica del materiale. Tale affermazione non è valida per temperature troppo basse, dove avverrebbe il congelamento del materiale che assumerebbe un comportamento prettamente fragile⁴⁸.

Per comprendere la resistenza del legno, bisogna soffermarsi su una resistenza paragonabile al fine di avere un confronto con altri materiali da costruzione. Per far ciò, è necessario analizzare il rapporto fra resistenza a compressione e massa volumica, poiché risulta fondamentale in campo sismico. Il legno presenta un rapporto paragonabile solamente a quello all'acciaio (Tab.11)⁴⁹. Trattandosi di un materiale leggero, e al tempo stesso resistente, gli edifici realizzati risultano a loro volta molto leggeri, portando ad avere un'azione sismica inferiore rispetto a edifici realizzati con altri materiali. Inoltre, nella maggior parte dei sistemi a secco che impiegano il legno, le azioni orizzontali del sisma sono assorbite dai collegamenti in acciaio, evitando quanto possibile il danneggiamento dei componenti lignei. Secondo quanto definito, i sistemi a telaio, o a pareti portanti a telaio, risultano più resistenti in caso di eventi sismici rispetto a sistemi come il blockbau che fa un uso ridotto di connessioni metalliche⁵⁰.

Tabella 11: In tabella è riportato il peso specifico di ogni materiale e il relativo rapporto tra resistenza e peso.

	Legno	Cemento Armato	Acciaio	Muratura
Peso specifico (kg/mc)	500	2500	7850	800/1000
Rapporto resistenza/peso specifico	0,311	0,036	0,204	0,016

Altro tema fondamentale per la progettazione riguarda il rapporto tra **energia sonora** e legno. Questo materiale presenta un potere fonoassorbente relativamente basso che difficilmente rispetta i limiti normativi. Questo aspetto è molto studiato e, in genere, viene risolto con l'ausilio di materiali fonoassorbenti che hanno il compito di incrementare il potere fonoassorbente complessivo e riuscire a soddisfare i requisiti minimi di legge⁵¹.

Infine, il comportamento con l'**elettricità** è limitato al punto da essere considerato nullo con un'umidità inferiore al 10%. Infatti, l'unico modo per far sì che l'elettricità si propaghi all'interno di esso, è quello di sfruttare l'umidità presente al suo interno.

48 Piazza M., Tomasi R. e Modena R. (2005), *Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, Italia.

49 Piva F. (2013), *Legno...Costruire...Abitare...La casa di legno fatta a regola d'arte, Realizzato privatamente in collaborazione con RoofRox, Riwega e3 Therm*, Ergodomus (stampa privata), Pergine Valsugana (TN), Italia.

50 Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

51 Giordano G. (1999), *Tecnica delle costruzioni in legno*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, Italia.

3.3 I prodotti del legno

Il tronco del legno, oltre a poter essere impiegato senza ulteriori processi, può essere sottoposto a ulteriori lavorazioni, al fine di produrre degli elementi da commercializzare. Squadrando le facce del tronco si possono ottenere due sezioni particolari, quella che prende il nome di “uso Trieste”, quando la squadratura meccanica segue la rastremazione del tronco, e quello a “uso Fiume”, quando la squadratura meccanica viene fatta continua e parallela sulle quattro facce a spessore costante. In entrambi i casi il risultato finale si presenta con smussi e contenente il midollo⁵².

Dal taglio longitudinale dei tronchi, parallelamente alle fibre, si ottiene il legno **massiccio**, identificato con la sigla **MH**, elemento impiegato prevalentemente nella carpenteria edilizia. Risulta essere un prodotto senza incollaggio né giunzioni di altro tipo. In base alla dimensione, l’MH può essere suddiviso in ordine crescente in listello, tavola, tavolone e legname squadrato. In questi casi, sia per questioni di trasporto che per disponibilità, le dimensioni lungo tutti i 3 assi sono limitati e risultano non adatti a strutture di grandi dimensioni o sottoposti a eccessive sollecitazioni.

Per ovviare alle dimensioni limitate dell’MH, vengono realizzate altre sezioni successivamente unite tra di loro attraverso un giunto a pettine che prevede l’impiego di collanti, andando a formare il legno massiccio per costruzione, identificato con la sigla **KVH**. Il massiccio da costruzione KVH si distingue dal massiccio classico MH poiché, oltre alla squadratura della sezione, dev’essere sottoposto a un processo di essiccazione artificiale e piallatura, classificato secondo la resistenza e composto da elementi ottenuti da tagli fuori cuore o da cuore spaccato (Fig.33)⁵³. La differenza sostanziale ricade nei criteri più stringenti da rispettare per il proprio utilizzato come elemento strutturale.

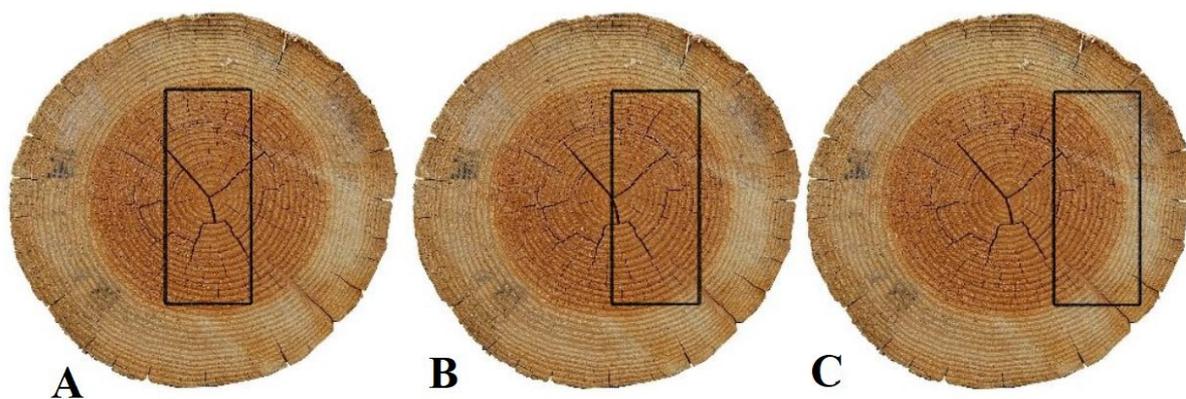


Figura 33: Tipologie di tagli nel tronco. Taglio a cuore vivo (A), taglio a cuore spaccato (B), taglio fuori cuore (C). Teknoring (2014), “Il taglio del legno: tipologie e sezioni”.

Dagli stessi tagli è possibile ricavare le travi **Duo** e **Trio** e le travi **Lamellari**. I primi due sono ottenuti tramite incollaggio lungo il lato lungo di rispettivamente due e tre elementi singoli messi in verticale, mentre le travi lamellari presentano un incollaggio orizzontale. Questi ultimi si trovano in commercio con altezze che variano a step di 4 centimetri, poiché tale è lo spessore

52 TraviUF, “Travi in legno massiccio: uso fiume e uso trieste”.

53 Teknoring (2014), “Il taglio del legno: tipologie e sezioni”.

dei singoli elementi incollati, e risulta, insieme al KVH, il prodotto più utilizzato per la realizzazione delle strutture portanti nell'edilizia italiana⁵⁴.

Come prodotti del legno risultano esserci anche elementi bidimensionali come i **pannelli**. Ne esistono di diversa composizione, trattamento e dimensioni e vengono classificati in base al materiale di partenza e alla destinazione d'uso che sia portante, non portante o isolante. Essi sono il risultato di una sovrapposizione di diversi strati dove, se questi ultimi vengono incrociati col fine di ottenere fibre perpendicolari da piano a piano, si avrà una minore resistenza lungo la direzione principale delle fibre, un minor ritiro e una maggiore resistenza nella direzione svantaggiata. Quindi risulterà un materiale più omogeneo rispetto a quello di partenza. Viceversa, quando i diversi strati vengono sovrapposti con fibratura parallela, le resistenze meccaniche saranno simili a quelle del legno massello. In base al materiale di partenza i pannelli possono essere composti da tavole, piallacci, trucioli e fibre di legno. I vari elementi bidimensionali consentono la realizzazione di solai, coperture e pareti resistenti all'aria, al vento ma anche in grado di sostenere carichi in direzione parallela e perpendicolare alle fibre.

Uno dei pannelli maggiormente impiegati è prodotto impiegando la **fibra di legno** ottenuta mediante sfibratura della materia prima. I fasci di fibre ottenute vengono intrecciati e incollati mediante l'azione adesiva della resina del legno stesso o con l'aggiunta di sostanze esterne. Attraverso la fibra di legno è possibile ottenere dei pannelli con diversa densità, che possono essere impiegati sia per fini strutturali, sia per fini non strutturali, sia per isolare. I pannelli in fibra di legno a bassa densità vengono impiegati come isolanti termo-acustici. I pannelli che presentano una media densità, chiamati anche MDF, hanno un peso specifico tra i 540 kg/m³ e 650 kg/m³ e sono considerati dalle normative come pannelli non strutturali, impedendone l'impiego nelle parti strutturali. Tuttavia risultano largamente impiegati per la produzione di arredi. I pannelli con densità alta, o medio-alta, presentano buone resistenze alle sollecitazioni al punto da essere considerati come elementi strutturali ma che, a causa della norma DIN 1052:2004, possono essere impiegati come elementi strutturali solamente nelle pareti.

Un'altra categoria di pannelli è realizzata mediante pressatura a caldo di trucioli derivanti da altre lavorazioni, particelle di lignocellulosa e colla. Di questa categoria fanno parte i pannelli di trucioli lunghi, stretti e orientati, chiamati semplicemente OSB. Sono realizzati mediante sovrapposizione di tre strati, posizionati perpendicolarmente tra di loro, che a loro volta sono prodotti attraverso l'impiego di trucioli piatti e lunghi. Si presentano esternamente con i trucioli orientati parallelamente, per facilitare la loro lavorazione, e sono commercializzati con varie dimensioni. Grazie all'omogeneità dei pannelli, le resistenze meccaniche e le varie caratteristiche fisiche, tra cui il ritiro, risultano simili lungo le due direzioni principali. I pannelli di OSB sono suddivisi in 4 categorie, differenziate per le caratteristiche e il relativo impiego: l'OSB/1, adatto a impieghi generici e ambienti asciutti, l'OSB/2, destinato a impieghi strutturali in zone asciutte, l'OSB/3 studiato per impieghi strutturali in ambienti umidi, e l'OSB/4, che grazie alla propria composizione, possiede un'elevata resistenza meccanica, che ne garantisce l'utilizzo in ambienti umidi.

54 Bernasconi A., Schickhofer G. e Traetta G. (2005) "*I prodotti di legno per la costruzione*", Promolegno.

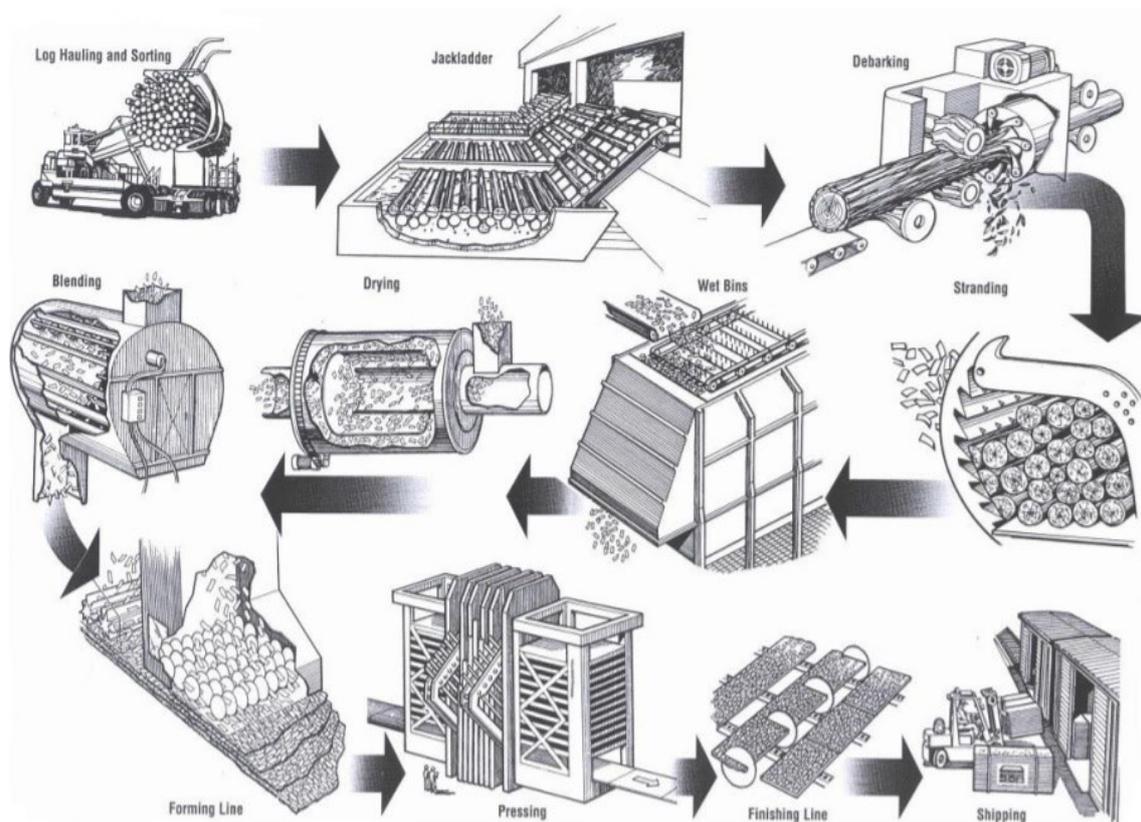


Figura 34: Rappresentazione schematica e diagramma di flusso di un ciclo produttivo discontinuo per la produzione di pannelli OSB.

Bernasconi A., Schickhofer G. e Traetta G. (2005) "I prodotti di legno per la costruzione", Promolegno.

Un'altra categoria di pannelli vede invece l'impiego dei piallacci. Essi risultano il prodotto della pressatura di elementi ottenuti mediante sfogliatura del legno. Di questa categoria ne fanno parte i **microlamellari** (LVL), ottenuti mediante sovrapposizione di piallacci orientati con fibre parallele. Tale caratteristica ne attribuisce un'alta resistenza lungo la direzione delle fibre e una limitata resistenza lungo la direzione ortogonale, portandoli a essere impiegati come elementi lineari piuttosto che planari⁵⁵. Da recenti studi si è notato che il risultato ottimale per questo tipo di pannelli, risulta essere il caso in cui i piallacci vengono disposti obliquamente da strato a strato con spessori sottili. Tale disposizione incrementa la resistenza a flessione mentre gli spessori sottili rendono il prodotto finito più omogeneo⁵⁶.

I pochi elementi descritti nel loro processo di produzione, rappresentano i principali prodotti a oggi impiegati nel campo delle costruzioni. Grazie alle nuove tecnologie di produzione e alle ricerche effettuate su questo materiale, è possibile avvalersi di un quantitativo elevato di elementi che si distinguono principalmente per i processi di realizzazione, le caratteristiche fisiche e le resistenze meccaniche. Tale quantità risulta essere ideale nell'impiego vero e proprio in quanto è possibile trovare sempre un elemento, che sia monodimensionale o bidimensionale, adatto a ogni esigenza e budget.

⁵⁵ Nord Tex, "Legno Microlamellare".

⁵⁶ Bernasconi A., Schickhofer G. e Traetta G. (2005) "I prodotti di legno per la costruzione", Promolegno.

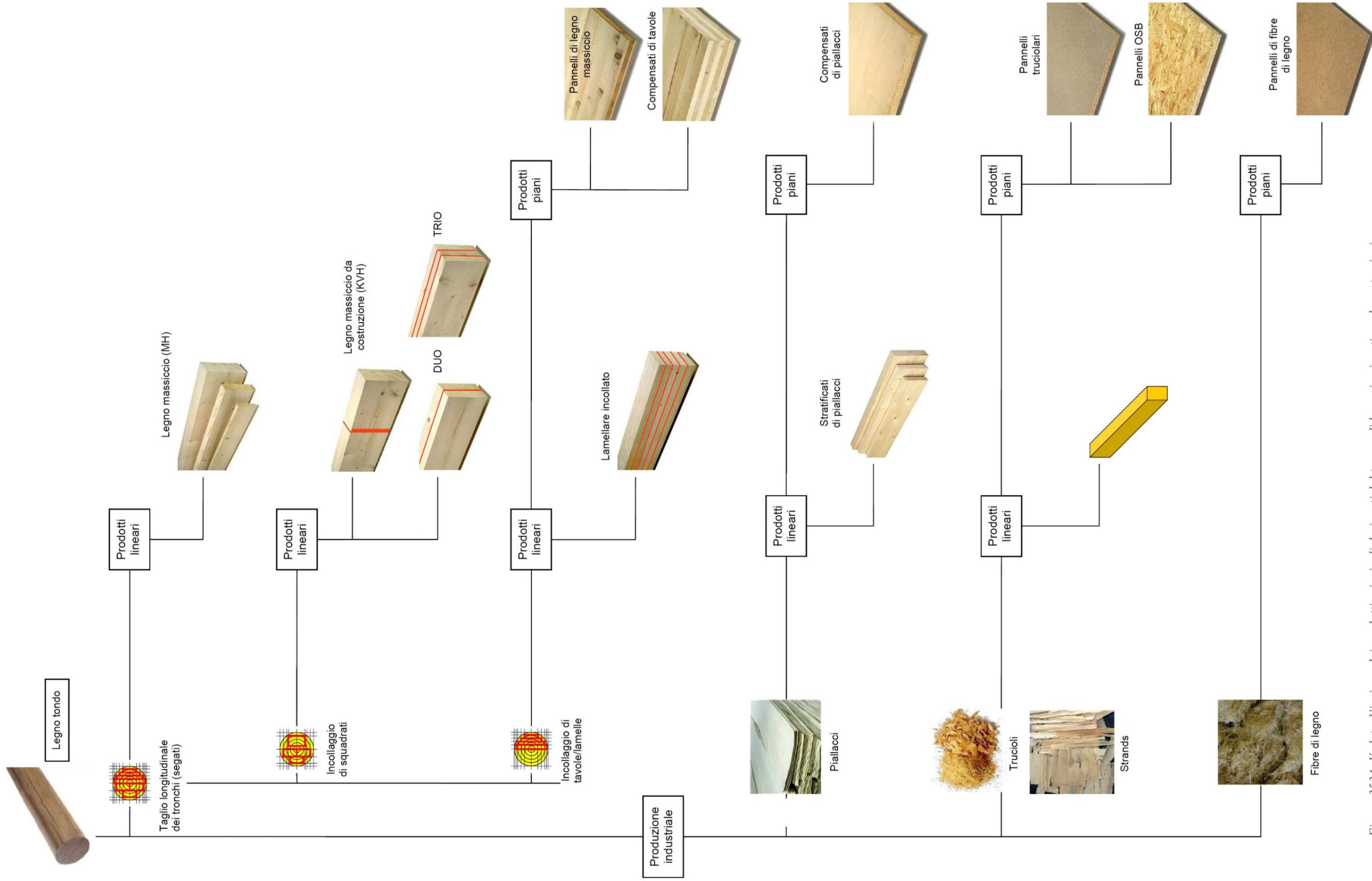


Figura 3534: Veduta d'insieme dei prodotti principali derivanti dal tronco di legno impiegati per le costruzioni. Bernasconi A., Schichhofer G. e Traetta G. (2005) "I prodotti di legno per la costruzione", Promolegno.

3.4 Il legno nelle costruzioni

Quando l'uomo ha iniziato a costruire le prime **strutture** per ripararsi dagli agenti atmosferici, ha impiegato il legno in qualità di materiale facile da reperire e lavorare. Nel corso tempo, la cultura delle costruzioni in legno è rimasta legata principalmente a zone come Cina, Antica Persia, Nord Europa e America, mentre in Italia, Grecia, Spagna e Francia, tale materiale era impiegato come complementare ad altri, quali cemento e mattone⁵⁷. A oggi la testimonianza di strutture in legno del passato è legata a documenti e reperti trovati nel tempo. Le strutture più antiche in legno, che ancora sono parzialmente o totalmente intatte, risalgono al Medioevo, grazie alle quali è stato possibile studiare la tecnologia e l'architettura del tempo legata al materiale. Seppur riscontrando una grande varietà di sistemi strutturali lignei, è possibile suddividerle in due macro categorie, il sistema a setti (*Fig.36, immagine sinistra*), a cui appartengono le strutture realizzate attraverso pareti portanti e solai, che vanno a costituire la struttura portante e contemporaneamente quella di tamponatura, e il sistema a gabbia (*Fig.36, immagine destra*), a cui appartengono gli edifici nei quali la struttura portante è rappresentata da elementi lignei disposti al fine di formare una griglia strutturale, a cui dev'essere aggiunto un ulteriore elemento di tamponamento.

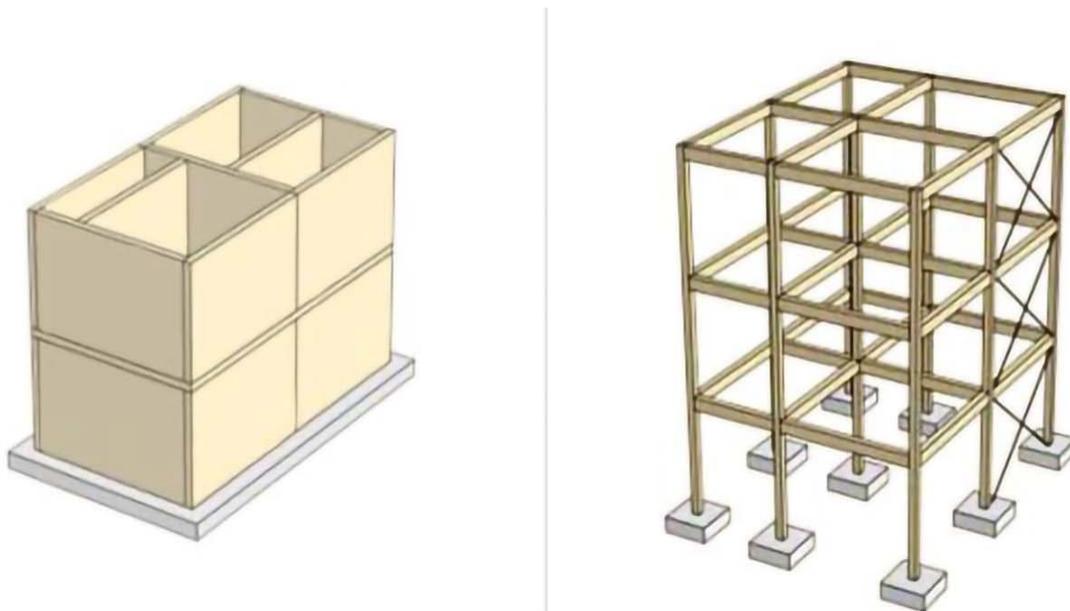


Figura 3635: Schematizzazione sistema a setti (sinistra) e a gabbia (destra).

Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

Uno dei primi sistemi impiegati è stato il *blockbau*, appartenente alla categoria che impiega setti portanti dove, questi ultimi, sono realizzati attraverso la sovrapposizione di tronchi scortecciati e sagomati in modo da incastrarsi l'uno sull'altro e realizzare il setto. Tale sistema veniva impiegato nelle zone dove il materiale era presente in gran quantità, mentre dove c'era scarsità di materia prima, venivano impiegate delle tavole sovrapposte secondo uno schema specifico, ottenendo lo stesso risultato.

⁵⁷ Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

Il sistema a griglia era a sua volta suddiviso in telaio piano e telaio spaziale. Nel primo sistema era presente una gerarchia strutturale, dove gli elementi convergevano in punti chiamati nodi, nei quali avveniva la distribuzione delle forze, creando così una gerarchia strutturale. Tale sistema era diffuso nella tradizione inglese col *cruck e bay system*, e norvegese col *grind*. Il sistema a griglia con telaio spaziale, invece, non si avvaleva della gerarchia, ma della collaborazione simultanea di diversi elementi. Il telaio spaziale è riscontrabile nella tradizione inglese con il *box frame*, in quella tedesca con il *fachwerk* e francese con il *colombage*.

La scelta del sistema da adottare era dettata dalla disponibilità della materia prima e della conoscenza della tecnica di costruzione.

In seguito alla rivoluzione industriale, grazie al progresso tecnologico, nuovi sistemi iniziano a diffondersi. I tre principali, da cui in seguito prenderanno forma moltissime altre soluzioni, sono stati: il *ballon frame*, protagonista della ricostruzione di Chicago in seguito al Grande Incendio, il *modern braced frame* e il *platform frame*. Quest'ultimo vedrà il proprio impiego nell'America Settentrionale per i successivi 200 anni⁵⁸.

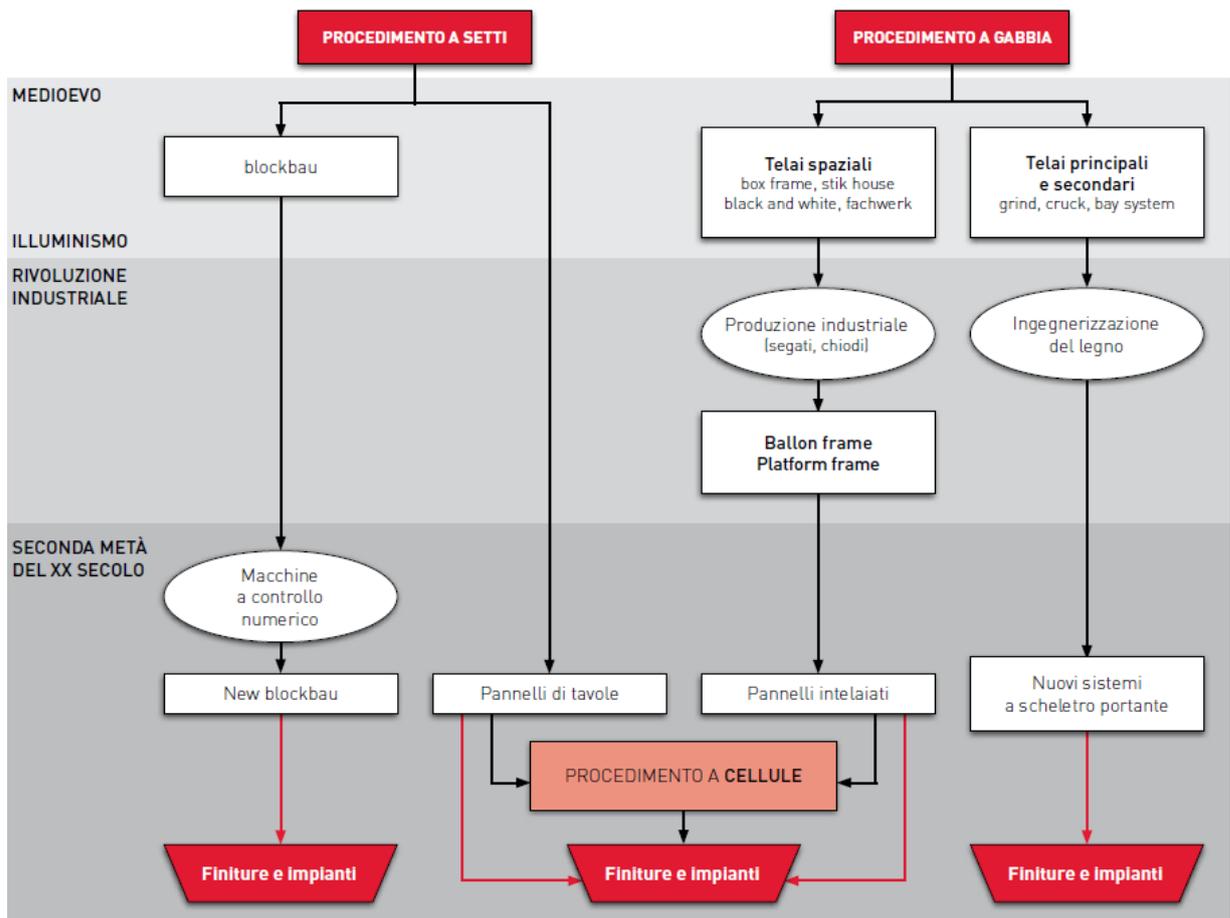


Figura 3637: Evoluzione storica dei sistemi costruttivi in legno.

Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

58 Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

3.4.1 Il legno nelle costruzioni in Italia

La progressione della casa in legno in Italia risulta essere stata sempre **limitata** dalla cultura del mattone, portandola a essere identificata come un'edilizia prettamente montana. Questo pensiero oggi sta cambiando grazie alla sensibilità ecologica e alla comprensione delle caratteristiche meccanica e durabilità nel tempo di un materiale che è stato sempre sottovalutato.

Seppur in maniera limitata, anche nella penisola italiana si costruiva col legno. Principalmente erano le aree alpine le zone che garantivano l'impiego del legno poiché risultava difficile reperire altri tipi di materiali. La considerazione di tale materiale matura solo nel nuovo millennio grazie a numerosi eventi, tra cui l'esperienza positiva delle costruzioni post sisma all'Aquila, dove il 70% delle nuove realizzazioni sono state fatte con strutture lignee. Il binomio che ha portato a questa rivalutazione è rappresentato dalla struttura e dalla finitura. Il legno, oltre a essere strutturalmente resistente, è anche esteticamente apprezzabile grazie alla propria **texture naturale**. Un ulteriore fattore che ha garantito la rivalutazione del legno riguarda la resistenza termica del materiale che riduce l'impiego di isolanti. Nel 2005 le costruzioni in legno in Italia risultavano essere poche, circa 1000, mentre solo 5 anni dopo, nel 2010, la quota è arrivata a 5000 unità⁵⁹. A oggi i numeri sono incrementati notevolmente e ogni giorno sorgono nuove strutture interamente, o parzialmente, realizzate in legno. Si stima che nel 2020 le strutture realizzate interamente in legno in Italia ammontavano a 3000, di cui circa 800 privati (Fig.38) e i rimanenti pubblici. Questi risultavano essere il 3% in più rispetto all'anno precedente, per un totale di 1,39 miliardi di euro di produzione, portando l'Italia al quarto posto per produzione di edilizia in legno nella classifica europea⁶⁰. I sistemi maggiormente impiegati per la loro realizzazione risultano essere l'**X-LAM**, al 45%, e le pareti intelaiate, anche loro al 45%. Gli altri due sistemi impiegati risultano essere il **nuovo blockbau** e il sistema a **trave e pilastri** che costituiscono il restante 10%.

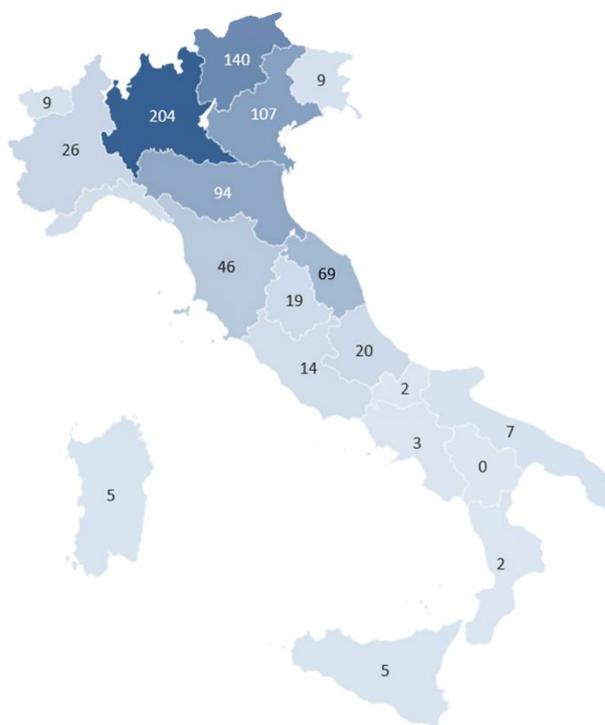


Figura 38: Gli edifici privati in legno, suddivisi per regione, costruiti nel 2020. Assolegno (2021), Marchetti A. L., "6° Rapporto Edilizia in Legno".

Il sistema a **pareti intelaiate**, che oggi viene impiegato in Italia, rappresenta l'evoluzione del **platform frame**. I due, seppur molto simili, si distinguono solo per il sistema di assemblaggio. Le pareti intelaiate sono realizzate mediante la prefabbricazione, arrivando in cantiere già composti dal telaio interno e dai pannelli controventanti. Viceversa, il platform frame prevede

59 Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

60 Info Build Energia (2021), "Case in legno: Italia realtà europea dell'edilizia sostenibile".

la realizzazione del telaio direttamente in cantiere a cui, in un secondo momento, vengono applicati i pannelli controventanti. Il sistema **X-LAM**, invece, fa uso di pannelli strutturali realizzati mediante l'incollaggio di tre, o più, strati di tavole. L'attuale sistema *blockbau* si distingue da suo predecessore in quanto fa uso di macchine CNC per tagli e sagome e impiega elementi monodimensionali incollati come il bi-lama e il tri-lama. Per tali differenze, oggi è stato rinominato **nuovo blockbau**. Il sistema, che vede l'impiego dei classici **travi e pilastri**, è rimasto invariato nel tempo se non per l'impiego di macchine CNC per la produzione e l'impiego di nuovi sistemi metallici per i collegamenti⁶¹.

Nell'immagine seguente (Fig.39) è rappresentato lo stesso edificio realizzato nelle quattro tecnologie impiegate nella penisola italiana. L'edificio virtuale fa emergere le diverse stratigrafie impiegate per ogni soluzione.

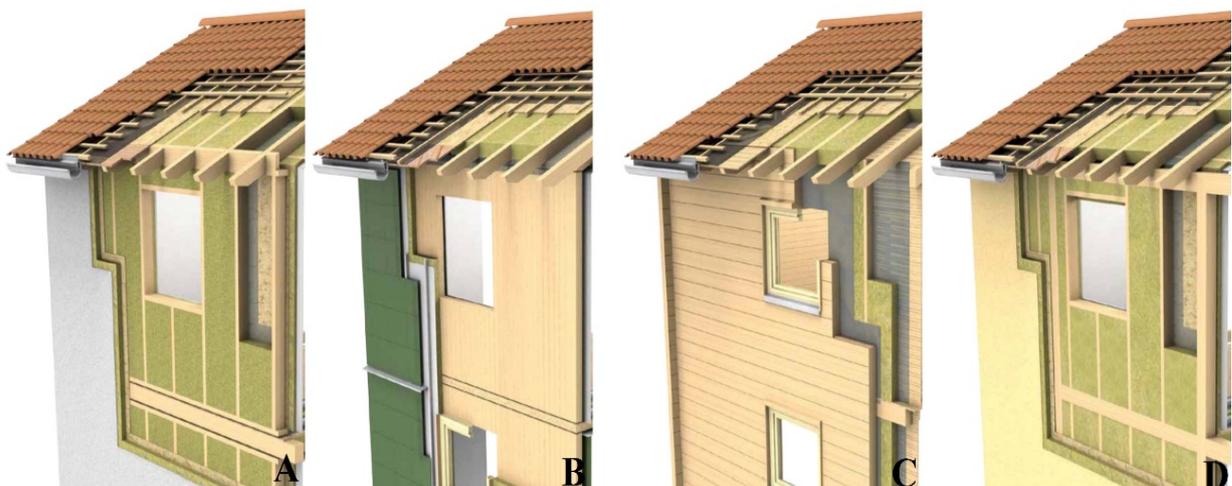


Figura 39: Sistema a pareti intelaiate (A); Sistema X-LAM (B); Sistema nuovo blockbau (C); Sistema a travi e pilastri (D). Frattari A. (2015), Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

3.5 Le nuove tecnologie a supporto dei sistemi lignei

L'evoluzione delle strutture in legno negli ultimi anni è stata garantita dall'ingegnerizzazione del materiale, dai nuovi approcci tecnologici, come il BIM, e dall'impiego di strumenti automatizzati, come le macchine CNC.

Con il termine **ingegnerizzazione** s'identificano una serie di processi che portano a estrapolare da un disegno o modello architettonico, un disegno o modello da officina, permettendo altresì di passare dal concetto di *on-site* al concetto di *off-site*, ottimizzando il materiale e riducendo gli scarti e lavorazioni. Tale approccio ha richiesto un nuovo flusso di lavoro come il **BIM** (Build Information Modeling), che permette di associare delle informazioni trasferibili a oggetti virtuali tridimensionali. Attraverso questo sistema, le informazioni codificate vengono elaborate e trasmesse per ulteriori passaggi successivi, che siano di coordinamento, di computazione o per la produzione. Quest'ultima voce permette lavorare il materiale sagomandolo, tagliandolo e fresandolo in modo da potersi inserire in un complesso più ampio

61 Frattari A. (2015), Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

senza complicazioni. Quest'operazione viene effettuata attraverso delle macchine CNC (Computer Numerical Control) (Fig.40) o attraverso i moderni bracci robotici. Tuttavia, l'alta precisione di questo sistema ha avuto anche un effetto negativo nelle strutture. La prefabbricazione è nata per permettere di avvicinarsi a una produzione di massa e risparmiare sui tempi e costi di produzione ed evitare gli eccessivi sfridi dei materiali. Per raggiungere quest'ultimo scopo, era necessario stabilire un modulo dimensionale proporzionale alle dimensioni commerciali degli elementi impiegati. Nel contesto reale, l'alta precisione del processo produttivo fa sì che, durante la progettazione preliminare, non si tenga più in considerazione alcun modulo dimensionale, portando a dimensionare e posizionare ogni elemento che andrà a costituire il futuro edificio, secondo i principi della normativa e la volontà del cliente. Ne consegue che nelle future fasi progettuali, seppur con l'obiettivo di ottimizzare il materiale, venga impiegato un maggior quantitativo di elementi a parità di superficie.



Figura 37: Macchina CNC sullo sfondo e Cantonali già lavorati in legno lamellare in primo piano. (Abitare. Case e strutture in legno).

Il flusso BIM permette di trasmettere informazioni associate a modelli geometrici tridimensionali. Il suo impiego comporta alcuni aspetti negativi come il costo, rappresentato dagli investimenti, la complessità, rappresentata dalla difficoltà nell'utilizzo del flusso, e la non completa interoperabilità che non permette ancora il corretto trasferimento delle informazioni. Per ovviare in parte a questo problema, sono stati introdotti i file .IFC (Industry Foundation Classes) che rappresentano i file esportati con maggiore interoperabilità. Esistono tuttavia diversi vantaggi, tra cui l'elevata precisione nel coordinamento e nella stima dei costi già in fase preliminare, la possibilità di trovare interferenze tra la parte architettonica, strutturale e impiantistica, e i tempi complessivi di progettazione ridotti. A ogni elemento di un progetto è possibile associare delle informazioni come nome, tipo di oggetto, volume, superficie, materiale, caratteristiche fisiche e lavorazioni. In questo modo è possibile realizzare facilmente diverse tipologie di simulazioni, come quelle annesse al comfort interno o alla sicurezza strutturale. Ciò permette di progettare l'intero sistema, che sia strutturale, architettonico o impiantistico, verificando in tempo reale il corretto comportamento dell'edificio. Attraverso il flusso di lavoro BIM sarà quindi possibile ottimizzare i costi, riuscendo a verificare il quantitativo di materiale da utilizzare e possibili ulteriori soluzioni, al fine di rendere la struttura più economica.

Uno dei software realizzati per la progettazione specifica di strutture in legno è *HSBcad*, estensione basata su tecnologia Autodesk, che permette di creare modelli tridimensionali con qualsiasi tipologia costruttiva che fa uso del legno. Una volta realizzato il modello

tridimensionale (Fig.41), è possibile esportare dei file .BTL, formato impiegato per trasferire le informazioni dal formato di Autodesk alle macchine CNC.

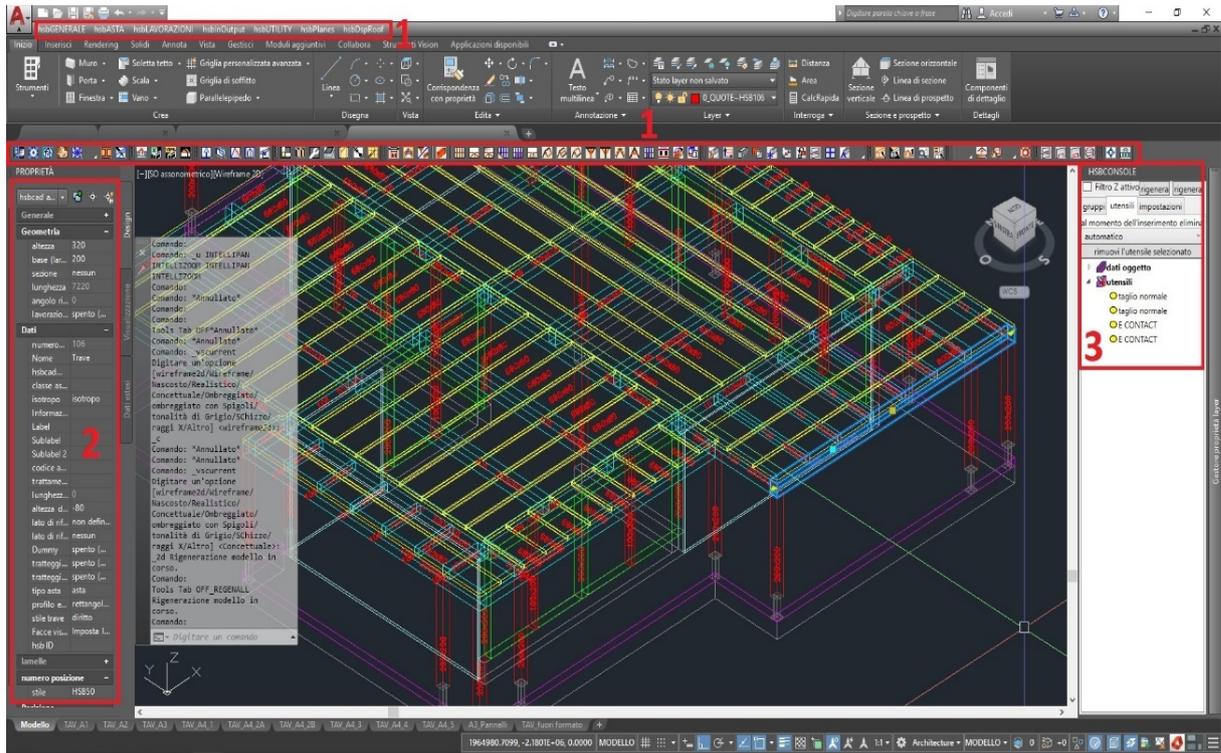


Figura 38: Schermata di un modello aperto con AutoCAD Architecture dov'è installata l'estensione HSBcad. Presenta ulteriori funzioni (1), attribuzione di informazioni come geometria, materiale e sezioni (2) e attribuzione lavorazioni (3). (Abitare. Strutture e case in legno)

Le macchine a controllo numerico, dette comunemente **CNC**, sono strumenti automatizzati che impiegano utensili come fresatrici, piegatrici, punzonatrici, lame e punte, che si muovono e ruotano lungo un asse X, Y e Z per lavorare e modellare il materiale. Nello specifico viene impiegato un software che, analizzando il modello virtuale tridimensionale degli elementi da produrre, restituisce tutto il processo di lavorazione sotto forma di codici macchina. Si tratta di un linguaggio standardizzato per tutte le macchine CNC, con riferimento alla normativa ISO 6983, e risulta indipendente dal tipo di controllo impiegato. Tuttavia, l'operatore manterrà il controllo totale su tutto il processo di lavorazione, potendo altresì modificare i parametri delle lavorazioni. In genere vengono impiegati software **CAD** (Computer Aided Design), per modellare gli elementi da produrre, e **CAM** (Computer Aided Manufacturing), che hanno il compito di tradurre il linguaggio tridimensionale del CAD in linguaggio macchina G-code⁶².

4 Sistema a pareti intelaiate

Tra i vari sistemi elencati precedentemente, il sistema a pareti intelaiate è quello che potrebbe essere ottimizzato maggiormente attraverso un modulo dimensionale, poiché composto da diversi elementi commercializzati con dimensioni standard. Inoltre, il loro impiego risulta la migliore scelta per gli edifici monofamiliari che non si sviluppano per diversi piani. Tale sistema, nato dal *platform frame*, è realizzato mediante un telaio leggero, composto da montanti e traverse, racchiuso tra due lastre o pannelli controventanti di base legnosa o gessosa (Fig.42). Grazie alla possibilità d'impiegare qualsiasi pannello e lastra, la finitura esterna può avere diverse soluzioni in relazione all'impiego. Lo spazio interno si presenta vuoto per oltre i due terzi del volume, offrendo la possibilità di poter allocare eventuali isolanti e impianti. Le pareti possono essere realizzati sia in loco che in stabilimento a seconda delle esigenze; tuttavia, nella maggior parte dei casi, sono realizzati come prefabbricati.

I montanti e le traverse presentano una sezione con base che va da 6 a 8 centimetri e altezza che va da 10 a 18 centimetri. Molto importante risulta essere questo ultimo valore che ne determina lo spessore delle pareti. In alcuni casi, come a esempio nella realizzazione di case in paglia, per motivi legati alla dimensione delle balle di paglia, si possono avere dei montanti con altezze fino a 50 centimetri (Fig.43). In prossimità di una maggiore sollecitazione verticale è necessario affiancare ulteriori montanti, in modo da creare un pilastro. Inoltre, questi elementi servono a delimitare il foro strutturale per porte, finestre e porte finestre.

La scelta dei pannelli e delle lastre controventanti non è casuale, ma basata in virtù dell'esigenza strutturale. Questi, infatti, hanno il compito di contrastare i carichi

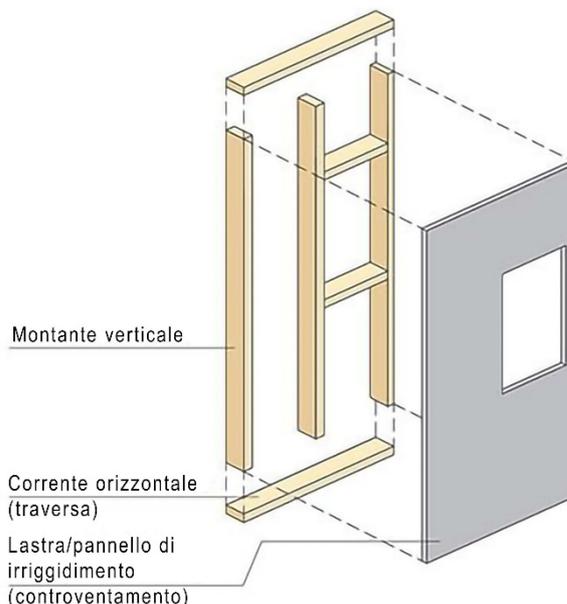


Figura 39: Sistema a pannelli intelaiati. InfoBuild (2020), "Tecniche costruttive in legno: le più diffuse, dal Blockbau all'X-lam"



Figura 40: Processo di montaggio di pareti a telaio con l'impiego di balle di paglia come isolante interno. La sezione dei montanti in questo caso è 6x40 cm. (Abitare.Case e strutture in legno)

orizzontali della struttura, quali vento ad azioni sismiche. Vengono utilizzati principalmente pannelli in OSB, pannelli di fibra di legno, lastre (o pannelli) di conglomerato cementizio alleggerito e lastre (o pannelli) di gessofibra, che presentano caratteristiche dimensionali, meccaniche e fisiche diverse (Fig.44).

Lastre	Dimensioni tipiche			Proprietà fisiche				Comportamento al fuoco	
	Larg. [mm]	Lung. [mm]	Sp. [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	μ [-]	C [kJ/kgK]	Resistenza al fuoco*	Velocità di carbonizzazione
Pannelli OSB	2500/ 5000	607 - 2500	8 - 40	650	0,13	30/50	1700	D-s2,d0*	0,9
Pannelli di particelle	2800/ 5610	2070	6 - 40	300	0,07	10/50	2500	D-s2,d0*	0,9
				600	0,12	15/50			
				900	0,18	20/50			
Pannelli di particelle legati con cemento	2800/ 5610	1250	8 - 40	1200	0,23	30/50	2000	B-s1,d0	-
Pannelli MDF	675- 1250	2500 - 2800	13/15	400	0,07	5/10	1700	D-s2,do*	0,9
				600	0,10	12/20			
				800	0,14	20/30			
Pannelli in cartongesso	1200	2000/ 2500/ 300	10/12,5/ 15	900	0,21	8	1050	A2/B-s1,d0	0,9
Pannelli in gessofibra	1200/ 1250	2000/ 2500/ 300	10/12,5/ 15/18	1150	0,32	13	1100	A2-s1,d0	-

* In conformità alla decisione 2007/348/EC della Commissione Europea, per quanto riguarda i pannelli a base di legno; per i pannelli in cartongesso e gessofibra si fa riferimento alla letteratura corrente.

Figura 41: Caratteristiche principali delle lastre impiegate nei pannelli intelaiati.

Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

Oltre a pannelli e lastre è possibile utilizzare anche delle tavole a larghezza mista posizionate solitamente a 45° (Fig.45) che, in base allo sfrido prodotto, possono essere più o meno economiche⁶³.

In una struttura a pareti a telaio, la risposta meccanica alle sollecitazioni è garantita dai molteplici percorsi di trasmissione dei carichi, attribuendo un grado alto di sicurezza strutturale anche in caso di cedimenti locali. Al sistema, infatti, è attribuito un alto valore di resistenza sismica, chiamato fattore di comportamento nell'ultimo NTC18, pari a 5. Ciò è garantito dall'elevato numero di elementi in metallo



Figura 42: Parete a telaio con tavole a 45° posizionate sul lato esterno. (Abitare.Case e strutture in legno)

impiegati per i vari fissaggi che contribuisce a smorzare l'azione sismica. Per avere un valore di confronto, al sistema X-LAM è attribuito il valore 2 come fattore di comportamento⁶⁴.

63 Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.

64 SoftLab (2019), "Il fattore di comportamento: un parametro fondamentale per l'analisi sismica delle strutture".

4.1 Il sistema statico

Per fare in modo che il sistema a pareti intelaiate adempia staticamente alla propria funzione, è necessario fare alcune considerazioni riguardo la posizione dei montanti che, se non registrati correttamente, comprometterebbero la sicurezza strutturale dell'edificio. Tali elementi hanno la necessità di avere una sequenza continua lungo i diversi piani, senza presentare discontinuità (Fig.46). Infatti, quest'ultima richiesta sta alla base della statica del sistema a pareti intelaiate, dove al montante è dato il compito di sostenere i carichi verticali da cui ne deriva la continuità lungo i piani, mentre i carichi orizzontali vengono contrastati dai pannelli, e lastre, controventanti. Se un montante venisse disallineato rispetto a quelli ai piani inferiori, andrebbe a scaricare il proprio carico agente in falso, rendendo necessario

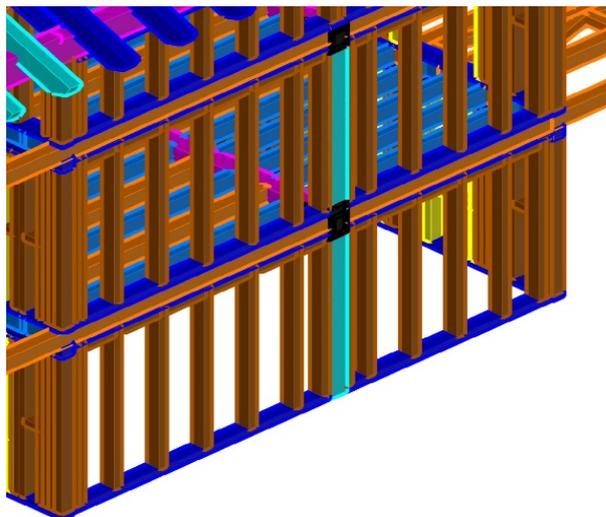


Figura 43: Estrapolazione dal file CAD della struttura lignea ingegnerizzata e pronta per il trasferimento alla CNC. (Abitare. Strutture e case in legno)

l'inserimento di una trave sottostante al fine di ripartire i carichi, o la non considerazione ai fini strutturali. Inoltre, la razionalizzazione del materiale comporta un'adeguata ridefinizione del sistema strutturale. Quindi, i pannelli e le lastre citate in precedenza, hanno un compito **strutturale** importante. Da ciò ne consegue una grande considerazione della loro rigidità, dipendente dalla tipologia impiegata, che avrà il compito di resistere alle sollecitazioni causate dal vento e dagli eventi sismici. L'ultimo aspetto importante delle pareti intelaiate riguarda le connessioni. Queste ultime fanno sì che montanti, travi, pannelli e lastre, siano considerate un tutt'uno. Il loro dimensionamento risulta così essere essenziale al fine del corretto funzionamento del sistema.

Ogni apertura nella parete rappresenta un'interruzione del sistema, un punto debole che deve essere studiato in tutti i suoi aspetti. Nella maggior parte dei casi viene inserita un **architrave** di rinforzo (Fig.47) che permette la redistribuzione dei carichi nei montanti laterali. L'impiego di un architrave non è l'unica conseguenza di un'apertura nella parete. Negli edifici a più piani, il contributo strutturale di eventuali pareti che presentano un'apertura ai piani inferiori, viene annullato poiché, il tetto risulterebbero scaricare i propri carichi in falso. Per tale motivo gli edifici realizzati con questo sistema necessitano aperture allineate lungo i vari piani, al fine di ridurre al minimo l'impatto sulla sicurezza strutturale dell'edificio.

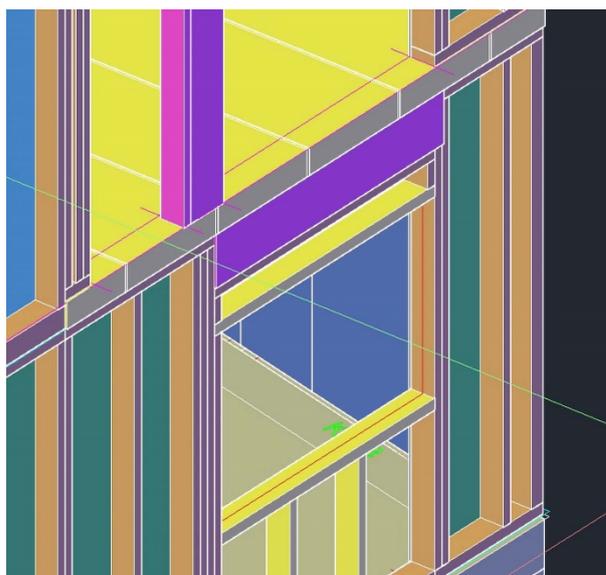


Figura 44: Estrapolazione dal file CAD della struttura lignea ingegnerizzata, pronta per la CNC. (Abitare. Strutture e case in legno)

4.2 Basamento, solaio e copertura

Oltre alle pareti, l'edificio è composto anche delle chiusure orizzontali e/o oblique, quindi basamento, solaio e copertura.

Il piano d'appoggio dei sistemi lignei non può coincidere con la quota del pavimento esterno e non può risultare a contatto con ambienti o materiali umidi come il terreno. Esistono diversi sistemi per la realizzazione delle fondazioni, dipendente principalmente dal contesto in cui ci si trova e delle normative vigenti. Tuttavia, per il sistema a pareti intelaiate, risulta necessario avere un piano continuo su cui poggiare tali elementi in modo uniforme. In genere, in Italia seguendo la normativa vigente NTC18, si realizza una platea di fondazione su cui vengono realizzati dei cordoli (Fig.48) dimensionati in base alle sollecitazioni presenti. Le regole da seguire in questo caso sono semplici: la base delle pareti deve stare ad almeno a 30 centimetri dal piano esterno se non drenante e almeno a 15 centimetri dal piano esterno se drenante.

Anche i solai possono presentarsi attraverso diverse soluzioni che portano all'impiego di altrettanti materiali. Per le pareti intelaiate, la soluzione migliore è rappresentata dalla realizzazione di un solaio rigido composto da travi in lamellare sdraiato (Fig.49) di dimensione variabile, appoggiate direttamente sulle pareti. Altro sistema, che vede l'impiego delle travi, si ottiene realizzando una struttura su cui verrà appoggiato il pacchetto solaio. La differenza ricade principalmente nei nodi da studiare e dal posizionamento dei montanti rispetto alle travi del solaio.

Infine, la copertura si può presentare piana o inclinata. Per la copertura piana valgono le considerazioni appena fatte sui solai mentre per la copertura inclinata il sistema cambia. La scelta ideale è rappresentata dall'impiego di una banchina al di sopra della parete strutturale intelaiata su cui vengono appoggiati puntoni ed eventuali cantonali. Il colmo, invece, può essere appoggiato sulle pareti, prevedendo la compresenza di diversi montanti, o l'inserimento di un pilastro, per sostenere il carico verticale concentrato.

Tuttavia, volendo realizzare una copertura inclinata, si verrà a creare una geometria non regolare, dove la standardizzazione delle pareti in altezza verrà a mancare.



Figura 45: Foto del basamento delle strutture lignee. Si possono notare i cordoli, dove verranno posizionate in seguito le pareti, più alti della quota del terreno. Prigelato (Abitare. Case e strutture in legno)



Figura 46: Lamellare sdraiato impiegato per la realizzazione di solai rigidi. Presenta sagomature nei lati e una superiore dove inserire un elemento d'irrigidimento. Hasslacher, "Elementi per solaio in lamellare".

4.3 Connessioni

Nel sistema a pannelli intelaiati le connessioni risultano essere uno degli aspetti principali. Queste avvengono principalmente per mezzo di elementi metallici come piastre, viti e chiodi, e vanno a collegare i vari pannelli al contesto, che sia interno o esterno al loro sistema strutturale.

La prima connessione riguarda il nodo **parete-sistema fondale** (o pavimento in c.a.). Questa risulta essere la più importante in quanto collega la struttura al contesto che in genere corrisponde alla platea o al cordolo in calcestruzzo armato. Le pareti sono soggetti al ribaltamento dovuto ad azioni orizzontali che loro stessi non sono capaci di contrastare. Vengono così posizionate all'interno della struttura, e in corrispondenza di aperture, delle piastre chiamate *hold-down* (Fig.50A). Si tratta di piastre angolari allungate nella parte superiore, in modo da aderire nel legno tramite chiodatura ed alla struttura di base in cemento mediante delle barre in acciaio resinato o tasselli. Tuttavia, le pareti sono sottoposti a un'azione di taglio dove, per evitare lo scorrimento trasversalmente alla loro superficie, vengono impiegate ulteriori piastre angolari (Fig.50B), con ali corte e larghe, posizionate tra un hold-down e l'altro. Se il cordolo risulta eccessivamente alto rispetto alle suddette piastre, esistono delle versioni planari (Fig.50C) che, al posto di essere prodotte con una geometria ad L, vengono realizzate mediante una geometria piana, al fine di poter essere fissate direttamente al cordolo stesso o a un'eventuale parete in c.a. o muratura.



Figura 47: Piastre impiegate nel nodo tra parete e platea di fondazione/cordolo. In figura A sono mostrati gli hold-down, in figura B le piastre a taglio "titan" ed in figura C i loro corrispettivi plate per l'impiego nei cordoli Piastre e connettori per il legno (Catalogo Rothoblaas, 2019).

Quando si parla del nodo **parete-pavimento** in legno, le piastre da impiegare sono le medesime con una piccola variazione: invece di avere dei grossi fori nella parte inferiore dove inserire il tassello, presentano numerosi fori piccoli, come nella parte superiore, in quanto bisogna fissarli a un'elemento ligneo mediante viti o chiodi.

I fissaggi da impiegare nel nodo tra **parete-parete** dipendono principalmente dal tipo di setto impiegato. Il fine è quello di realizzare un sistema rigido, composta dai vari setti portanti, per

resistente in caso di sollecitazioni orizzontali, e impedire al contempo il movimento di una parete rispetto a un'altra. Bisogna scegliere la connessione più efficace e al contempo meno invasiva. In genere si utilizzano delle piastre angolari e planari che necessitano dell'applicazione di viti per il fissaggio. Si tratta di piastre ad L e planari che contrastano le azioni di taglio, simili a quelle impiegate nel nodo parete-pavimento, con l'essenziale differenza che vengono previsti fori per le viti in entrambi i lembi.

Anche il fissaggio **parete-solaio** varia in base al tipo di solaio previsto. In presenza di travi, possono esserci diverse soluzioni, a vista o meno. Se il contesto lo consente, si può appoggiare la trave direttamente in un foro previsto dentro la parete. Se tale operazione non fosse possibile, le principali alternative, che vedono l'impiego di piastre metalliche, sono rappresentate dall'inserimento di piastre in alluminio a scomparsa (*Fig.51A*) o di scarpe metalliche a vista (*Fig.51B*). La scelta dipende dal risultato estetico che si vuole ottenere. Inoltre, l'inserimento delle piastre a scomparsa in alluminio prevede alcune lavorazioni in testa alla trave di cui bisogna tener conto. Nel caso in cui il solaio venisse realizzato mediante l'impiego del lamellare sdraiato, quest'ultimo verrà appoggiato direttamente sulle pareti strutturali, rimandando il loro fissaggio all'inserimento di viti e/o di angolari per il taglio.

L'ultima connessione riguarda la connessione **parete-copertura** che può impiegare diverse soluzioni in virtù della casistica. La copertura, infatti, può presentarsi a una o più falde inclinate o in piano, e può essere realizzata mediante pannelli o elementi monodimensionali. Con coperture inclinate, se la parte strutturale fosse composta da puntoni appoggiati a una banchina, quest'ultima rappresenterebbe l'elemento da collegare alle pareti attraverso piastre metalliche planari e/o viti. Se, viceversa, la banchina non è prevista, sarà necessario fissare i puntoni direttamente nelle pareti. Nel caso in cui la copertura risulta piana, valgono tutte le considerazioni precedentemente fatte per il nodo parete-solaio.

Da questa breve analisi s'intuisce la varietà delle connessioni presenti in una struttura a pareti intelaiate. Tali connessioni, che vedono l'impiego sia di piastre metalliche che viti e barre, dipendono principalmente dalle sollecitazioni presenti, oltre al risultato estetico desiderato.



Figura 48: Piastre impiegate nel nodo tra parete e travi. In figura A è mostrata una piastra in alluminio a scomparsa, in figura B una scarpa metallica a vista.. Piastre e connettori per il legno (Catalogo Rothoblaas, 2019)

5 Definizione di un modulo dimensionale

La presente tesi partiva col presupposto di voler sviluppare di un sistema di prefabbricazione che potesse essere prodotto in serie e applicato all'ambiente mono e bi-familiari, applicando altresì un modulo dimensionale, al fine di ridurre ulteriormente tempi e costi. Dagli studi fatti risulta che la vera massimizzazione dei materiali avviene quasi sempre nella produzione di edifici legati all'ambito ricettivo. Anche negli edifici mono e bi-familiari si cerca di ottimizzare il più possibile la struttura, ma con risultati non ottimali. Infatti, le aziende produttrici di case prefabbricate cercano sempre di impiegare al meglio il materiale a disposizione, riducendo gli sprechi e rendendo meno dispendiosa la realizzazione. Ma come mai è presente questa diversità pur impiegando la stessa tecnologia? La risposta è stata accennata diverse volte nei capitoli precedenti e risiede nell'approccio della progettazione dell'edificio. Volendo riprendere i casi studio citati in precedenza nel capitolo terzo, si può notare come negli edifici a uso ricettivo, sia stato definito un modulo dimensionale su cui i progettisti si sono basati per la progettazione e la produzione. Anche gli edifici a catalogo citati nello stesso capitolo sono realizzati secondo uno schema preciso che impiega un modulo dimensionale per ridurre costi e tempi. Questo approccio, legato a una dimensione standard che viene scelta di volta in volta a seconda dei materiali da impiegare, è utilizzato in pochi casi in ambito mono e bi-familiare, a causa della precisione con cui i materiali vengono prodotti e lavorati, che consente ai progettisti architettonici di avere piena libertà nel progettare gli ambienti interni. Tuttavia, approcciarsi alla progettazione attraverso un modulo dimensionale definito, non comporta la perdita della libertà architettonica, infatti basterebbe adattare gli spazi secondo dei moduli dimensionali stabiliti per evitare di avere troppi sfridi.

Un esempio semplice è quello di confrontare una parete con larghezza pari a 2,5 metri e una con larghezza pari a 2,3 metri, usufruendo di pannelli da 1,25 metri: per la produzione si impiegheranno gli stessi pannelli e solo una piccolissima parte di traverse in più, in quanto il numero dei montanti rimane uguale. La differenza ricade negli scarti prodotti, poiché nella parete da 2,5 metri non saranno presenti, mentre nella parete da 2,3 metri verrà riscontrato un quantitativo modesto di sfridi. Un ulteriore esempio potrebbe essere rappresentato dalla posizione di una finestra: se il progettista non tenesse in considerazione la posizione di tale apertura in virtù dei montanti necessari ai fini strutturali, potrebbe essere necessario l'impiego di un quantitativo superiore di materiale, rappresentato da ulteriori elementi al solo scopo di comporre il foro strutturale dell'infisso. Tuttavia, quest'ultima casistica è legata anche a eventuali disposizioni interne, dove il compito del progettista sarà essenziale per poter sfruttare il modulo dimensione al meglio, senza alterare la posizione degli arredi interni.

Da quanto analizzato nasce l'idea di impiegare delle pareti intelaiate realizzati attraverso l'impiego di una griglia di costruzione, creata mediante un modulo dimensionale. Il fine è quello di progettare correttamente un edificio, ottimizzando il materiale già nella fase preliminare della progettazione. La scelta di un modulo dimensionale, inoltre, garantirà la continuità dei montanti lungo gli eventuali piani della struttura. Ovviamente, l'impiego della griglia strutturale non esclude le verifiche strutturali ed energetiche. Infatti, a causa di quest'ultima affermazione, non è possibile stabilire una parete a telaio valida per ogni contesto, in quanto essa dipenderà dalla zona climatica e sismica in cui l'edificio dovrà sorgere.

5.1 Studio dei pannelli e delle lastre controventanti

Per poter identificare un modulo dimensionale corretto per la realizzazione delle pareti intelaiate, bisogna analizzare il *modus operandi* per la loro realizzazione. Dalle varie letture e dall'analisi dei pannelli e lastre impiegati nei diversi casi studio, è risultato che il passo dei montanti si aggira sempre intorno ai 60 centimetri. Questo valore dipende sia dalla statica della struttura che delle dimensioni dei pannelli e lastre da impiegare. Dato che l'analisi strutturale sarà diversa da zona a zona, per la definizione del modulo dimensionale è possibile avvalersi della sola dimensione dei pannelli.

Ai fini strutturali, la lastra impiegata deve avere un interasse massimo pari a 50 volte lo spessore della lastra o pannello impiegato. Dato che la maggior parte dei pannelli e delle lastre in commercio per fini strutturali viene prodotta con uno spessore pari o superiore a 12,5 millimetri, comporterà che l'interasse massimo dovrà aggirarsi intorno ai 625 millimetri. Trovando dei pannelli e delle lastre con larghezza variabile, bisognerà analizzarli, al fine di trovare una misura comune a tutti. In realtà, anche l'altezza incide nella realizzazione delle pareti, poiché ne determina la presenza delle traverse orizzontali. La scelta di una dimensione comune è dovuta alla possibilità di poter scegliere il pannello più adatto in virtù del contesto. Per massimizzare il risultato sarà necessario trovare dei pannelli e delle lastre con larghezza pari a 1,25 metri e lunghezza (altezza) pari a 3 metri. La scelta di quest'ultima dimensione risiede nel rispondere alle normative riguardo le altezze minime interne delle abitazioni italiane che, a meno di casi particolari, si attestano a 2,7 metri. In questo modo verranno lasciati 30 centimetri per poter realizzare il pacchetto pavimento e un eventuale controsoffitto.

La lastra in **gessofibra**, prodotta dell'azienda Fermacell, è impiegata principalmente nella faccia interna delle pareti. Trattandosi di fibra di gesso, risulta essere ignifuga ed è classificata come A2-s1, d0 e A1⁶⁵ secondo normativa UNI EN 13501-1. Tale caratteristica risulta molto importante, soprattutto se si utilizza un isolamento interno infiammabile come la fibra di legno. È commercializzato con una varietà di dimensioni standard, tra cui le dimensioni definite in precedenza per massimizzare il risultato.

Sempre prodotto dall'azienda Fermacell, la lastra **Powerpanel H20**, pensata principalmente per essere posizionata all'esterno, è composta da conglomerato cementizio alleggerito e armato attraverso una rete in fibra di vetro. Anche questa lastra risulta ignifuga ed è classificata come A1 secondo normativa UNI EN 13501-1⁶⁶. Come nel caso della lastra in gessofibra, anche la lastra Powerpanel H20 è commercializzata con dimensioni standard, tra cui le dimensioni definite in precedenza.

Passando all'azienda FINSA, il pannello **Superpan Build**, composto da fibra di legno compressa, risulta avere dimensioni diverse da quelle standard⁶⁷. Tuttavia, un confronto diretto con l'azienda ha portato alla luce la realizzazione di pannelli con altezza pari a 3,05 metri e larghezza 1,25 metri. Tale dimensione, seppur non coincidente per i 5 centimetri in altezza rispetto alla dimensione definita in precedenza, si è ritenuta più che valida sotto l'aspetto

65 Fermacell, "Lastre in gessofibra".

66 Fermacell, "Powerpanel H2O".

67 FINSA, "Superpan".

economico rispetto alla richiesta di realizzazione di lastre su misura, che avrebbero incrementato notevolmente il costo. Differentemente dei precedenti pannelli, il Superpan non ha un'elevata resistenza al fuoco, classificandolo come D-s2, d0 secondo la normativa UNI EN 13501-1.

L'ultimo pannello individuato è l'**OSB**. Le tipologie da poter impiegare sono essenzialmente due, l'OSB3 o l'OSB4, che presentano buone caratteristiche meccaniche e una buona tenuta all'aria. Si tratta di pannelli impiegati principalmente all'interno della parete grazie alla loro tenuta all'aria, seppur non ignifughi. Infatti sono classificati D-s2, d0 secondo la normativa UNI EN 13501-1⁶⁸. Differentemente dagli altri pannelli descritti, l'OSB è prodotto da diverse aziende con una larghezza pari a 1,25 metri, misura dettata dalla macchina che produce l'elemento, che permette di trovare facilmente la dimensione 3 metri per 1,25 metri.

Oltre ai vari pannelli e lastre descritte, è possibile impiegare delle **tavole** posizionate a 45° rispetto ai bordi della parete (Fig.52). Questo sistema risulta più economico in termini di costo del materiale, ma anche più dispendioso per quanto riguarda tempi e sfridi. Esistono casi, seppur limitati, dove questa controventatura viene fatta due volte per attribuire maggiore resistenza. Lo spreco del materiale, seppur limitato, è sempre certo a causa della posizione che le tavole devono assumere. La presenza di diversi elementi provoca una discontinuità del materiale e la presenza di varie fessure che possono permettere l'infiltrazione di acqua e aria. Dimensionalmente si adattano a qualsiasi forma, inclusa quella definita in precedenza.

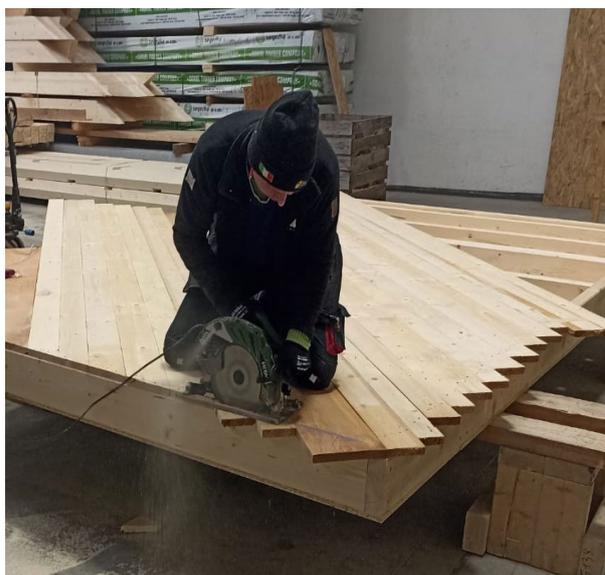


Figura 49: Inserimento della parte controventante in tavolato di abete in una parete intelaiata. (Abitare.Case e strutture in legno)

Dall'analisi effettuata, si è giunti alla conclusione che è possibile adottare una dimensione comune con larghezza pari a 1,25 metri, lunghezza pari a 3 metri. Lo spessore minimo di 12,5 millimetri non è stato definito in quanto ogni pannello e lastra presentava un valore pari o superiore a esso.

5.2 Definizione della griglia di costruzione e dei pannelli standard

Avendo stabilito le **dimensioni** dei pannelli e delle lastre da impiegare, la definizione del modulo dimensionale è automatica. Il valore scelto, infatti, coincide con la metà della larghezza dei pannelli, quindi 0,625 metri, che coinciderà con l'interasse massimo dei montanti. Grazie al suddetto modulo dimensionale sarà possibile schematizzare un'edificio già in fase preliminare.

⁶⁸ Egger, "OSB bordo dritto".

Per impiegarlo in modo rapido è possibile realizzare una griglia di costruzione (Fig.53) attraverso dei quadrati da 0,625 metri per lato. In questo modo sarà possibile definire immediatamente la dimensione dei pannelli da inserire e la dimensione dei fori per gli infissi. Definita la griglia, bisogna identificare le pareti da impiegare attraverso il modulo dimensionale. Si possono definire tre pareti standard: uno piccolo da 0,625 metri, dimensione del modulo dimensionale, uno medio da 1,25 metri e uno grande da 2,5 metri, dimensione di un multiplo del modulo. Grazie a queste dimensioni, i pannelli e le lastre di controventatura da impiegare per la realizzazione delle pareti, saranno ottimizzati al fine di non avere sprechi. La scelta di stabilire il limite in larghezza pari a 2,5 metri è dovuta alla volontà di non incomberne a trasporti eccezionali, in quanto corrisponde alla larghezza del cassone di un camion. Tuttavia, rimane un tema in sospeso, il comportamento negli angoli. In questo caso possono esserci due soluzioni: inserire un pilastro o realizzare un pannello angolare. Dovendo impiegare un sistema che sfrutta le pareti a telaio, la scelta migliore ricadrebbe sull'ultima, quindi la realizzazione di pareti angolari da inserire nella griglia, sia nel caso in cui l'angolo risulti sporgente che rientrante. Vengono così definiti cinque pareti dalle dimensioni standard con cui realizzare i progetti (Fig.54).

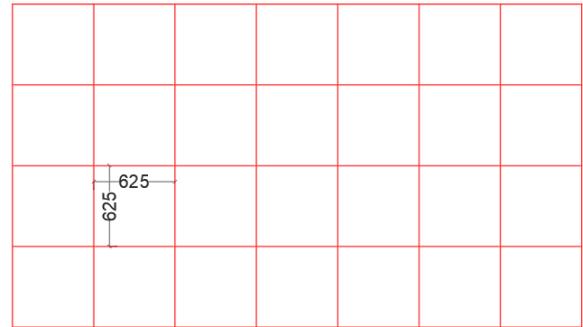


Figura 53: Griglia di costruzione composta da quadrati aventi lato pari a 0,625 metri.

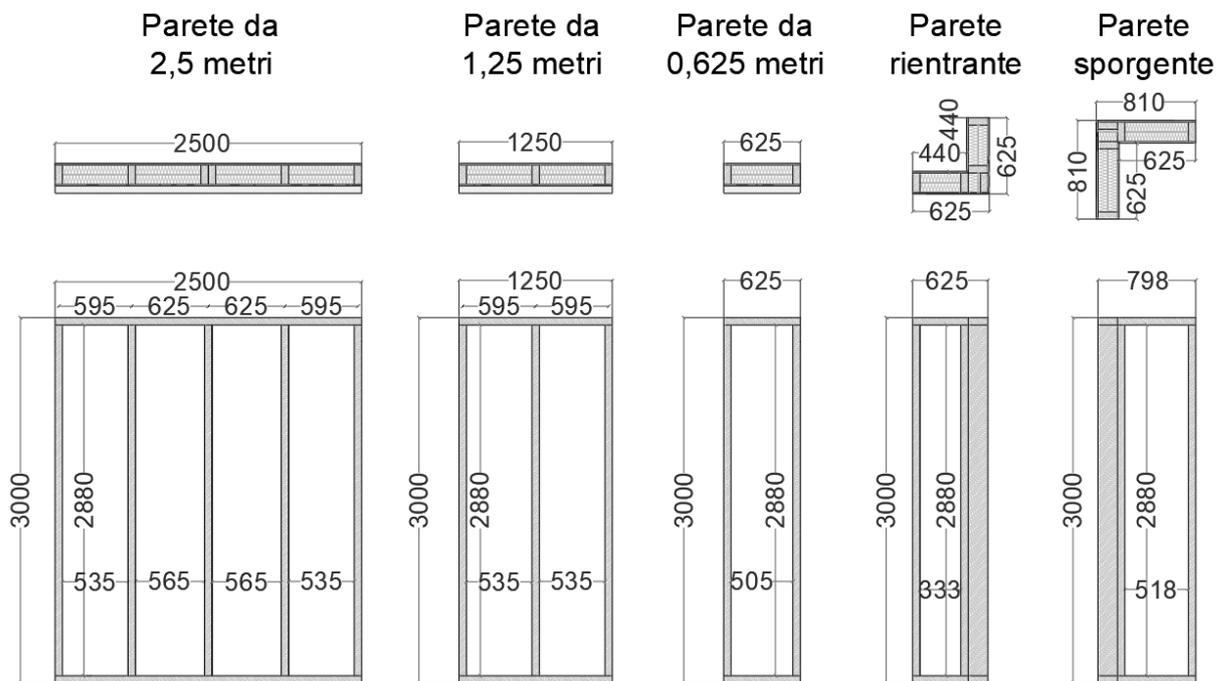


Figura 54: Dimensione dei pannelli da impiegare nella griglia di costruzione. Misure in millimetri.

La definizione di cinque pannelli standard producibili in massa consente la riduzione dei tempi di progettazione, in quanto il numero di disegni da produrre viene ridotto, e di esecuzione, riducendo il quantitativo d'informazioni che variano da parete a parete. Infatti, a meno di modifiche particolari come le aperture, la loro realizzazione può avvenire in serie.

Le cinque pareti sono state studiate dimensionalmente per rispondere a qualsiasi forma geometrica, da quelle regolari a quelle non regolari (Fig.55), al fine di poter concedere al progettista architettonico un certo grado di libertà per ideare un'edificio unico.

Per poter impiegare la griglia di costruzione in modo corretto, è necessario seguire una regola per il posizionamento delle pareti all'interno della griglia di costruzione. Si è scelto di allineare sempre il bordo interno della parete alle linee guida della griglia, in modo da non causare interferenze al sistema negli angoli e poter impiegare le stesse pareti intelaiate standard all'interno dell'edificio. Inoltre, questa considerazione implica che la superficie interna dovrà essere ulteriormente ridotta mediante l'impiego delle contropareti interne, ed eventuali rifiniture ingombranti, che variano a seconda dell'ambiente e delle scelte architettoniche. La scelta di non tenere in considerazione questi due elementi ricade nella volontà di poter sfruttare al meglio la superficie interna, dimensionandola in virtù della casistica.

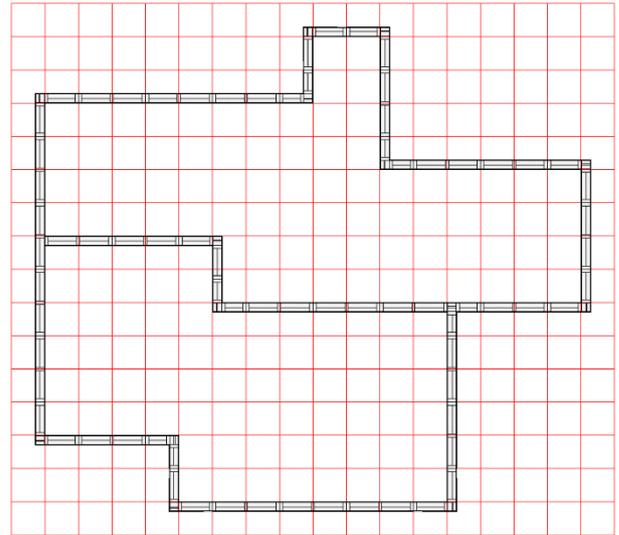
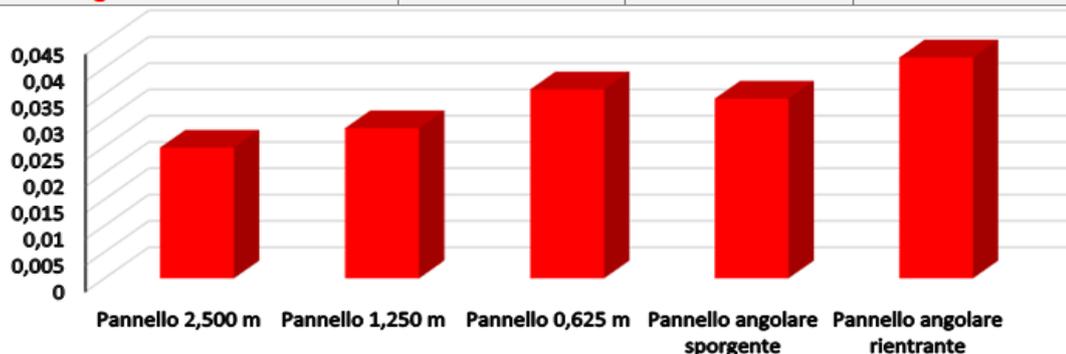


Figura 5550: Test della griglia di costruzione attraverso una struttura geometrica irregolare.

Oltre la suddetta regola ci sono alcune accortezze da tenere in considerazione al fine di massimizzare il risparmio dei montanti interni. La prima riguarda la geometria dell'edificio: esso deve risultare più uniforme e regolare possibile poiché, una pianta irregolare, porterebbe a utilizzare diverse pareti angolari che, a parità di superficie, contengono un quantitativo maggiore di montanti rispetto alle pareti lineari (Tab.12).

Tabella 12: Analisi dell'ottimizzazione dei pannelli. Per avere un valore da confrontare, è stato calcolato il

Tipologia	Materiale (mc)	Superficie coperta (mq)	Rapporto materiale impiegato/superficie coperta
Pannello 2,500 m	0,186	7,5	0,025
Pannello 1,250 m	0,107	3,75	0,029
Pannello 0,625 m	0,067	1,875	0,036
Pannello angolare sporgente	0,166	4,86	0,034
Pannello angolare rientrante	0,159	3,78	0,042



La seconda accortezza si concentra sull'impiego delle pareti lineari: seppur ideati tre tipologie, è necessario che vengano impiegati quanti più possibili pareti da 2,5 metri, cercando di non utilizzare, o almeno di ridurre al minimo, le pareti da 0,625 metri. Questo perché, analizzando la superficie coperta che si ottiene mediante pareti con altezza pari a 3 metri e il rapporto tra materiale strutturale impiegato e superficie coperta, la parete che risulta maggiormente ottimizzare è quella da 2,5 metri.

L'ultima accortezza riguarda le aperture dei vari pannelli: seppur previsto un adattamento della parete a qualsiasi dimensioni dell'infisso, ci sono alcune misure che comportano un impiego inferiore di materiale. Tale differenza ricade nell'impiego di montanti aggiuntivi per la delimitazione dell'infisso, da inserire quando la dimensione di quest'ultimo risulta essere diversa dalla luce netta tra due montanti. Il materiale risparmiato in questo caso è limitato: si riduce a uno o massimo due montanti per ogni disallineamento. Tuttavia, se venisse considerato su tutto l'edificio, tale accortezza potrebbe portare a un notevole risparmio. Di tali aperture se ne parlerà nel paragrafo successivo al fine di approfondire meglio il tema.

Ci sono degli edifici in cui non è possibile mantenere una forma geometrica regolare a causa del contesto irregolare su cui ci si deve progettare. Nei suddetti casi è possibile sfruttare solamente il modulo dimensionale, e non più la griglia da costruzione, e bisogna studiare gli angoli diversi da 90° al fine di risolvere al meglio il nodo.

5.3 Aperture nelle pareti

Pur avendo definito dei pannelli standard, il loro impiego non elimina la possibilità di inserire aperture, che siano porte, porte finestre o solo finestre. Per poterli inserire, è necessaria una modifica dei pannelli precedentemente ideati, implicando l'inserimento di ulteriori montanti, traverse e l'eventuale architrave. L'inserimento di quest'ultimo non è una scelta estetica, bensì la conseguenza di alcune considerazioni strutturali: se la parete dove è presente il foro ha anche il compito di sostenere i carichi sovrastanti, essa risulta necessaria, viceversa, se non ha alcun compito strutturale, l'architrave non è richiesto. Ciò è reso necessario per trasferire i carichi sovrastanti ai montanti laterali in modo da non recare danno all'infisso. Per quanto affermato, è sempre necessario dimensionare correttamente tale elemento al fine da non riscontrare problemi in seguito alla realizzazione dell'edificio, dove ogni elemento sarà sollecitato dai carichi dell'abitazione. Nella parete, il foro finestra è da considerare una tolleranza dimensionale per l'inserimento dell'infisso, al fine di non riscontrare problemi durante il montaggio. Tale tolleranza è pari a 2 centimetri per lato. Tuttavia, è possibile lasciare uno spazio superiore nell'eventualità che fosse necessario inserire un taglio termico o altro tipo di materiale previsto per quel caso specifico.

Nei tre esempi mostrati (*Fig. 56*), le finestre devono essere scelte con una larghezza tale da poter essere inserite nel foro strutturale ipotizzato tra i montanti. Nella medesima *Figura* è possibile notare che la parete a destra, l'unica larga 1,25 metri, non presenta alcun architrave in quanto, posizionando lo stretto infisso tra due montanti prossimi, non viene compromessa la distribuzione delle forze, permettendo di non intervenire con l'inserimento del supporto superiore aggiuntivo ma solo con due traverse per delimitare il contorno dell'infisso. Se in larghezza risulta necessario dimensionare correttamente l'infisso per di ridurre il numero di montanti impiegato, la dimensione in altezza risulta essere ininfluenza a tale scopo.

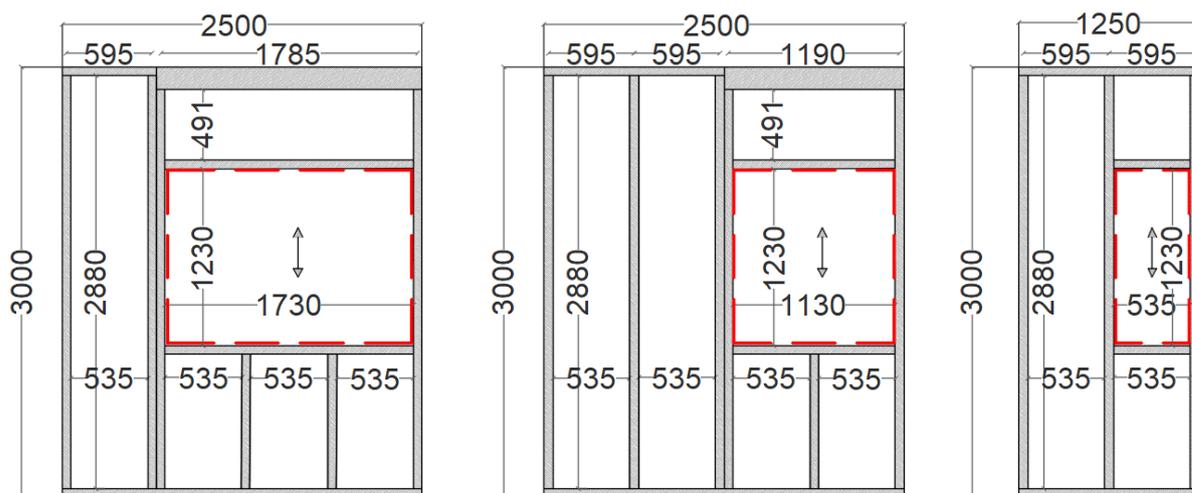


Figura 56: Possibile inserimento di finestre all'interno delle pareti standard. Misure in millimetri.

Anche per l'inserimento di porte e porte finestre (Fig.57) valgono le stesse considerazioni. Inoltre, grazie alla dimensione standard delle porte in commercio, è possibile ottenere delle luci nette conformi alle normative, che in genere non possono essere inferiori a 75 centimetri per gli ambienti serviti, avendo a disposizione un interasse tra due montanti di 1,13 centimetri. Infatti, la porta richiede circa 5-6 centimetri per lato, considerando sia il telaio dell'infixo che la tolleranza, che, venendo confrontata con l'interasse da 1,13 (Fig.57-centro), risulta inserirsi perfettamente. Bisogna altresì ricordare che, trattandosi di pareti strutturali o perimetrali di tamponamento, si tratta di porte esterne ed eventualmente qualche porta interna. Le rimanenti porte interne non sono soggette a dei limiti dimensionali in quanto non sfruttano le pareti intelaiate standard. Anche in questo caso, sia le porte che le porte finestre, risultano vincolati in larghezza dall'interasse dei montanti, ma non hanno vincoli in altezza, lasciando piena libertà lungo quest'ultima dimensione.

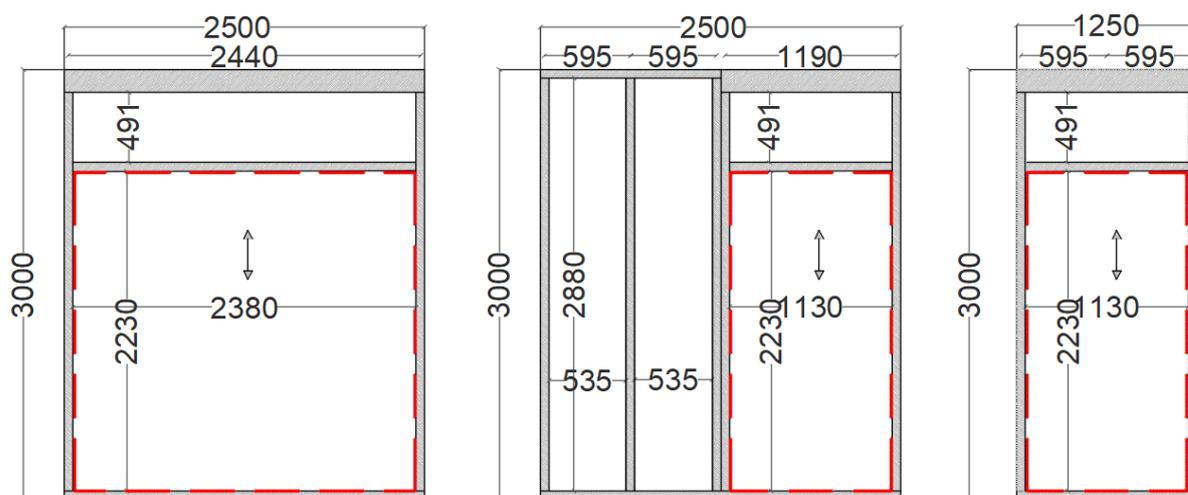


Figura 57: Possibile inserimento di porta all'interno della pareti standard. Misure in millimetri.

Quanto detto detta delle linee guida per l'inserimento degli infissi nelle pareti, ma non rappresentano una regola fissa. Infatti, il contesto e la disposizione interna potrebbero richiedere l'inserimento di infissi con dimensioni o posizioni diverse. Tuttavia, bisogna tenere in considerazione l'inserimento di montanti e traverse aggiuntive per realizzare il foro strutturale. In figura è possibile notare la differenza del telaio strutturale di una parete con un foro finestra inserito secondo le linee guida (*Fig.58-sinistra*) e senza le linee guida (*Fig.58-destra*). Ipotizzando di realizzare una struttura mediante l'impiego di sezioni in KVH da 6x16 centimetri e un'architrave da 16x16 centimetri, il telaio realizzato mediante le linee guida risulta avere un quantitativo pari a 0,214 mc di materiale strutturale. Impiegando le stesse sezioni in KVH, la parete ideata senza l'utilizzo delle linee guida presenta 0,242 mc di materiale strutturale. La differenza risulta essere minima, 0,028 mc di materiale, che se moltiplicata al numero di fori strutturali necessari in un edificio e considerati i vantaggi della produzione standardizzata, il risparmio inizia a essere considerevole.

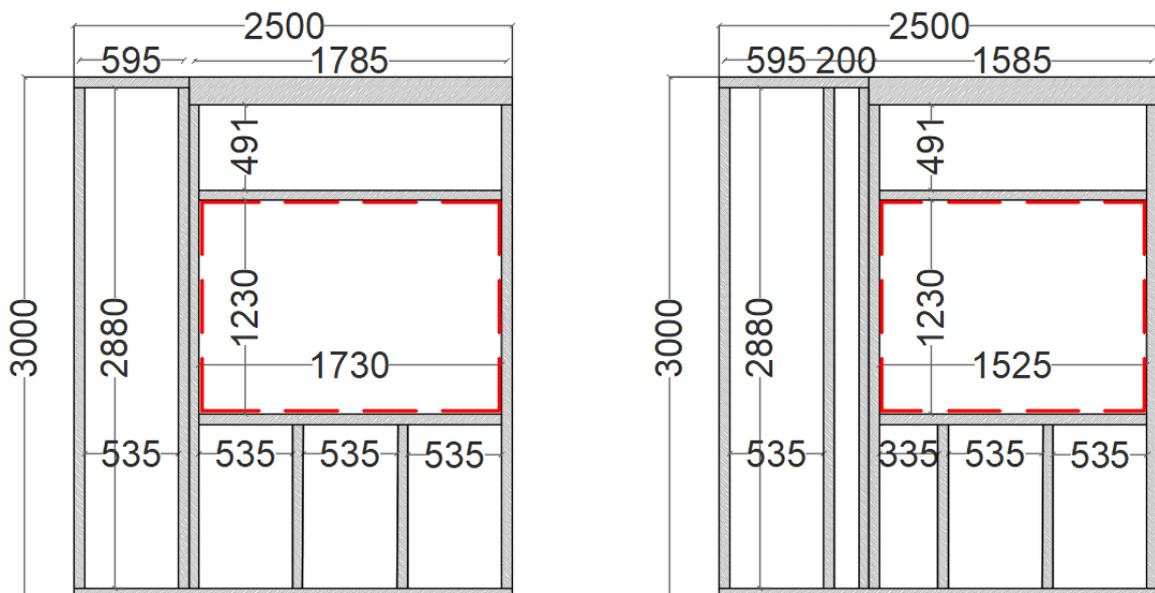


Figura 58: Inserimento di un infisso nel pannello da 2,5 metri: a sinistra mediante il posizionamento tra montanti già posizionati. a destra senza considerare tali montanti. Misure in millimetri.

5.4 Parametri dimensionali per la progettazione

Il sistema fino a ora definito, che impiega un modulo dimensionale, dovrà seguire una serie di parametri per la definizione del progetto. Ogni dimensione sarà frutto della volontà di ottimizzare tutto il processo di prefabbricazione. Nell'esempio (*Fig. 59*) è possibile identificare i 10 parametri con cui viene, nella maggior parte dei casi, dimensionato un edificio.

Il parametro a , che risulta essere pari al parametro b , va a identificare la griglia di costruzione in pianta ed ha un valore pari al modulo dimensionale scelto. Per avere la massima ottimizzazione degli elementi, tale valore è stato scelto pari a 0,625 metri. Tuttavia può variare in virtù degli elementi controventati impiegati. Il parametro c identifica l'altezza delle pareti, facendolo risultare un valore dipendente dalle altezze desiderate. Nella maggior parte delle zone italiane possono essere impiegate pareti da 3 metri. Il parametro d non dipende dal modulo dimensionale, ma dalla struttura del solaio in virtù della tipologia e delle analisi strutturali. I parametri e e h dipendono direttamente dal modulo e rappresentano le larghezze dei fori strutturali. Questi, come già detto, saranno pari alla luce netta tra i montanti, anche non sequenziali (*Fig. 57-58*). Infine, i parametri f , g , i ed l non dipendono dal modulo dimensionale, ma sono dei parametri liberi poiché non influiscono all'ottimizzazione degli elementi.

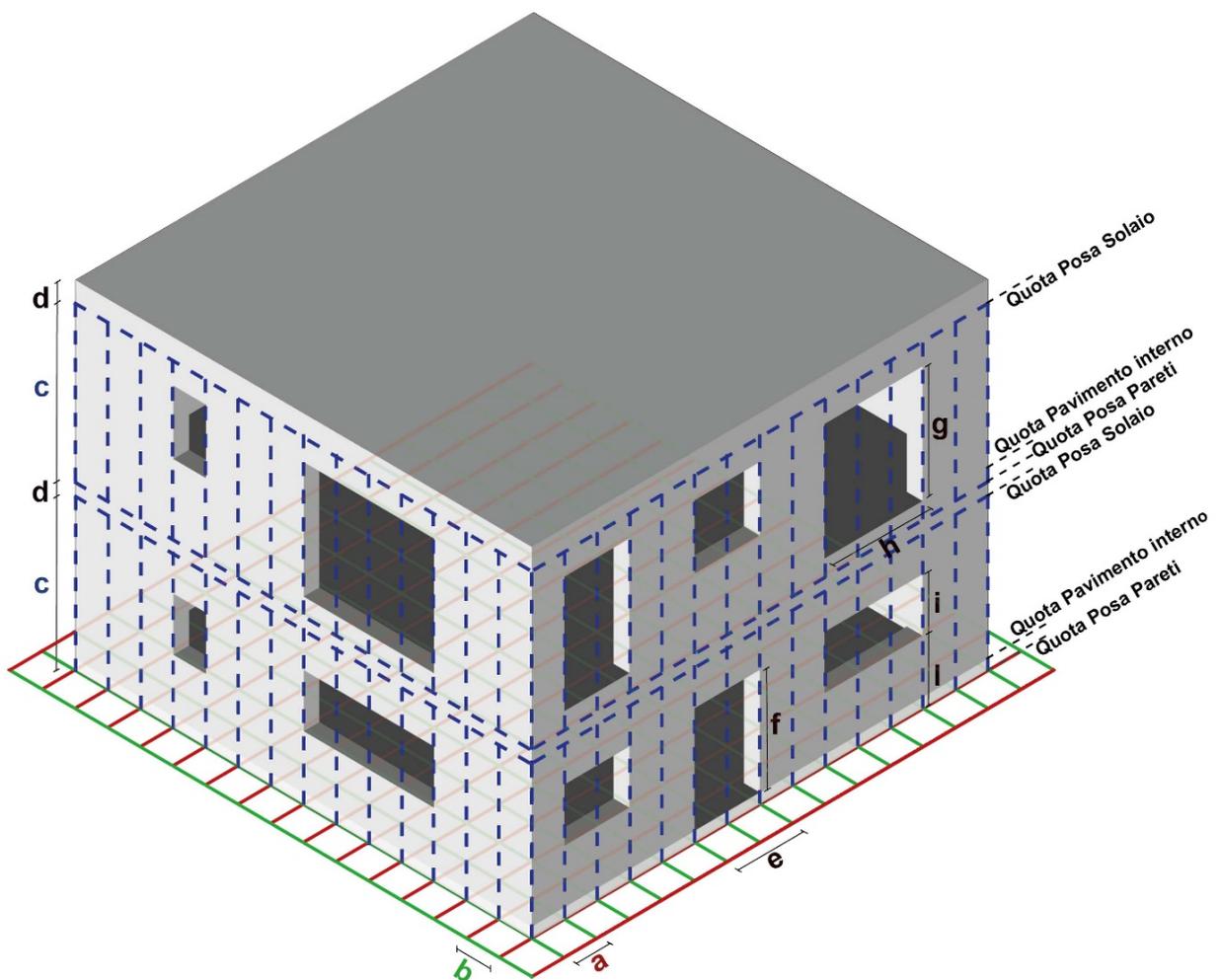


Figura 59: Parametri dimensionali per la progettazione degli edifici.

6 Applicazione del modulo dimensionale

Nel seguente capitolo verrà applicato il modulo dimensionale ai diversi casi, al fine di verificarne la corretta applicazione e le peculiarità che il suo impiego comporta. Tali casi si presentano per mezzo di piante e sezioni, definite dal progettista architettonico insieme ai clienti, che saranno ingegnerizzate per la produzione e relativa realizzazione. Così ogni caso studio verrà ingegnerizzato in due modi diversi: nella prima ipotesi sarà fatto secondo la pianta originale, mentre nelle altre ipotesi ci si avvarrà di modifiche all'edificio per adattarlo alla griglia di costruzione. La duplice ingegnerizzazione sarà accompagnata dall'analisi delle pareti da impiegare, analizzando il materiale strutturale impiegato nelle diverse ipotesi. Data la variazione della superficie utile interna, il materiale impiegato sarà normalizzato rispetto alla superficie, al fine di avere un valore normalizzato confrontabile.

6.1 Casa Giacomo (Casa G)

Il primo caso analizzato si presenta con una pianta pressoché regolare, sita nel comune di Saluzzo in zona climatica E. Si tratta di una base rettangolare di dimensioni 9x10,25 metri che si sviluppa su due piani e presenta due rientranze: nel piano terra in corrispondenza dell'ingresso e nel piano superiore nella parte opposta, per realizzare un piccolo loggiato (Fig.60-61). Sono presenti diverse aperture in corrispondenza degli infissi di diverse dimensioni, che necessitano di un architrave opportunamente dimensionata. Grazie all'impiego travi in lamellare sdraiato per la realizzazione dei solai rigidi, i carichi risultano uniformi lungo tutta la struttura. Tuttavia, saranno presenti delle travi che scaricheranno dei carichi concentrati sulle pareti, il che comporterà l'inserimento di alcuni montanti di rinforzo in corrispondenza dei suddetti.

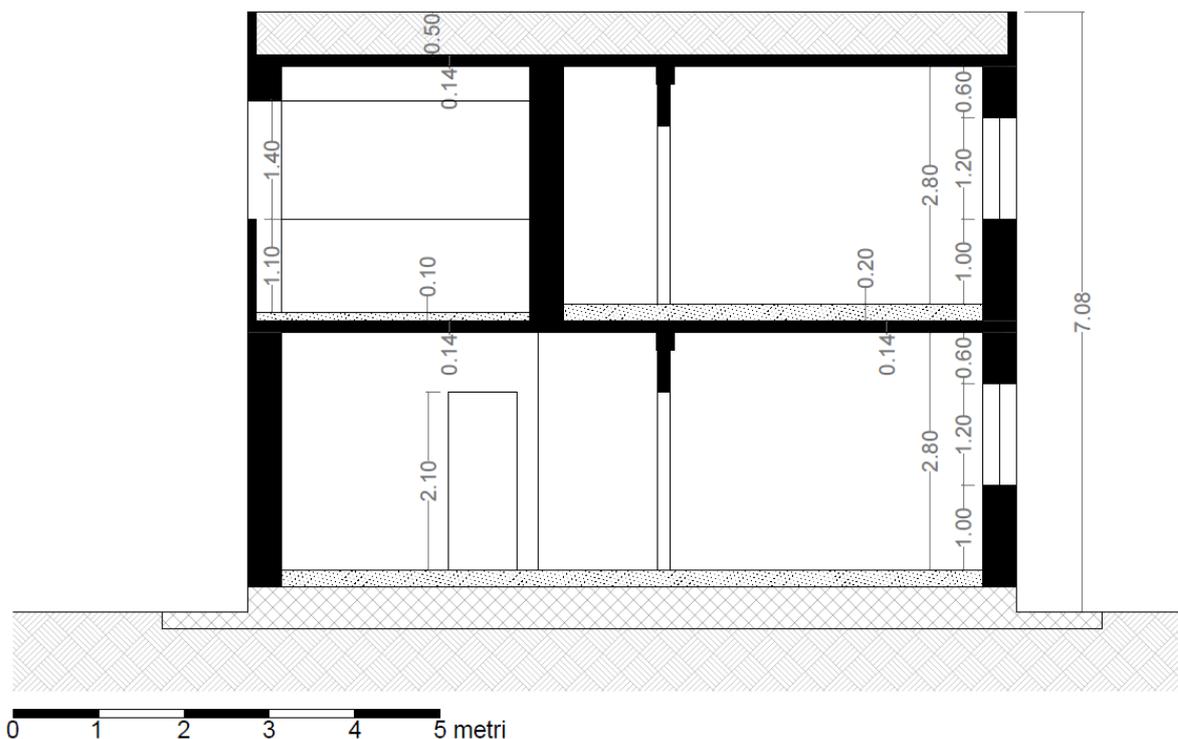


Figura 60: Sezione della Casa - G. Misure in metri.

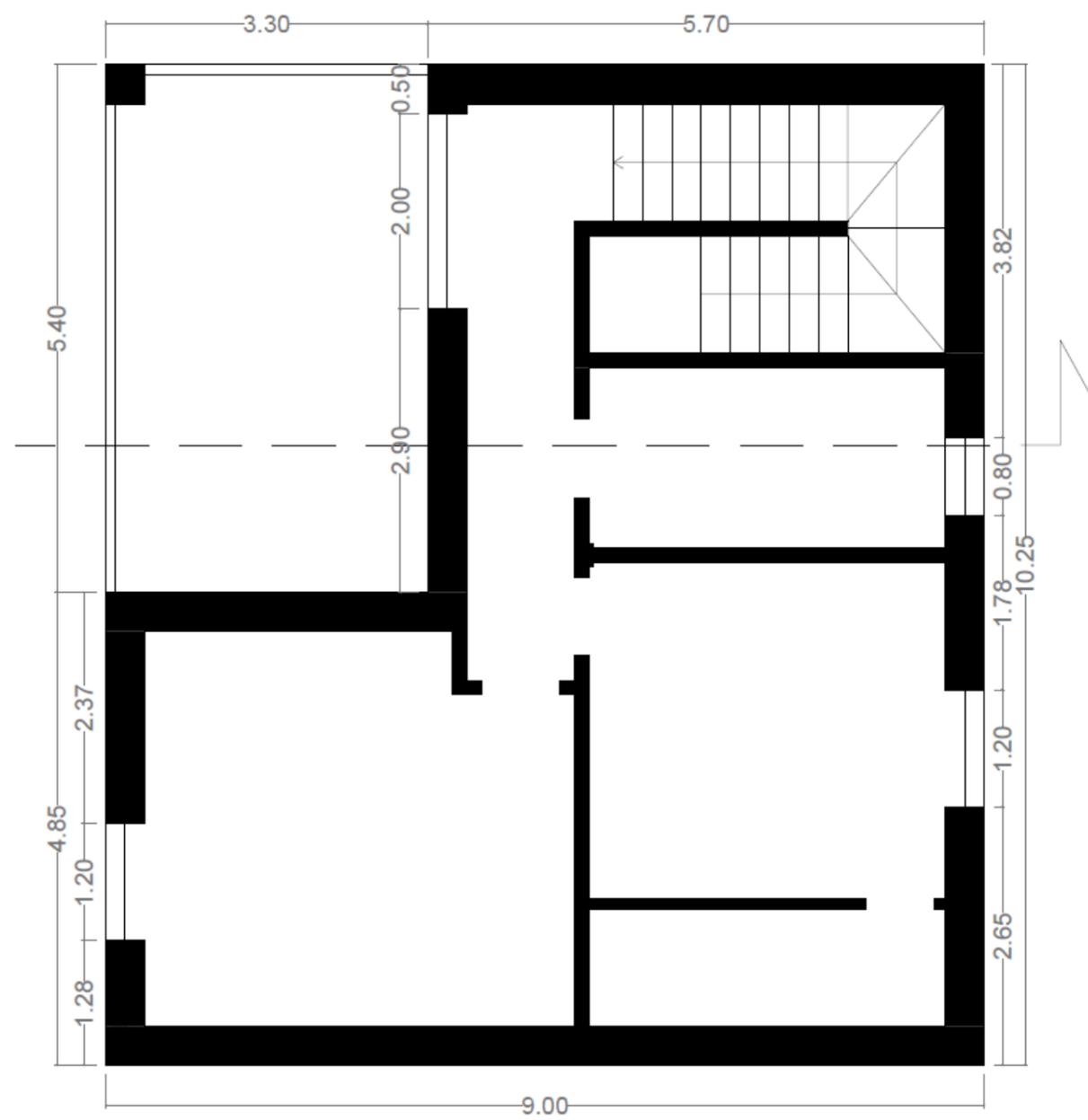
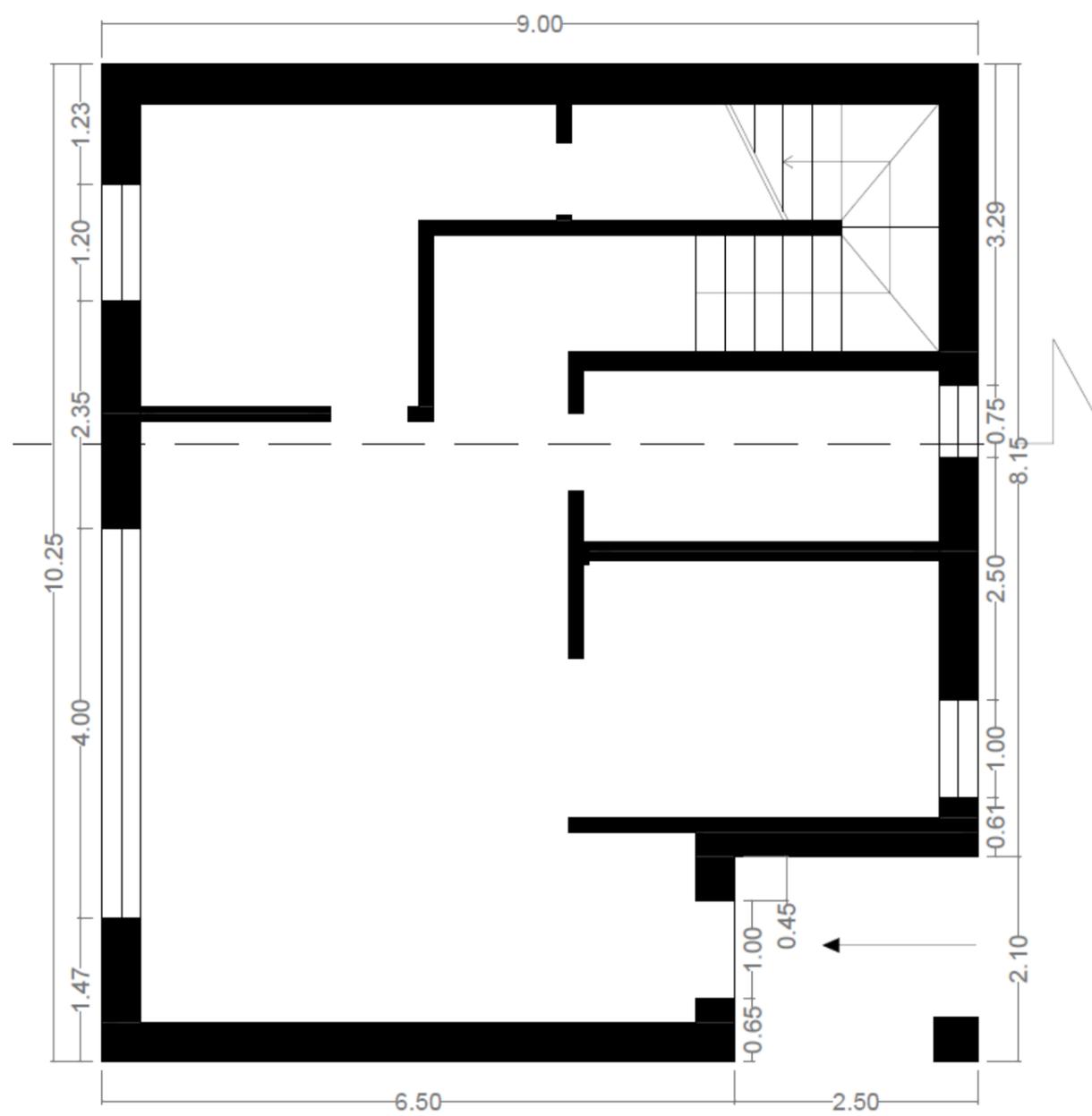
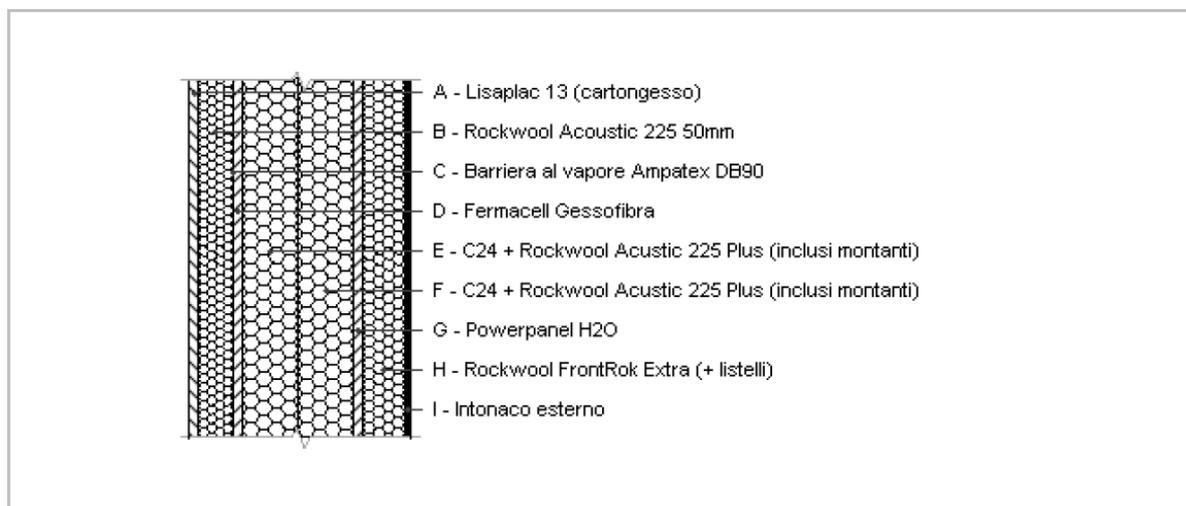


Figura 61: Pianta originali della Casa-G. A sinistra la pianta piano terra. A destra la pianta del piano primo. Misure in metri.

Prima di effettuare l'ingegnerizzazione, è necessario effettuare un'analisi termo-energetica per analizzare la parete e verificare che l'impiego di montanti in KVH da 6x16 centimetri sia sufficiente. Dall'analisi della stratigrafia (*Fig.62*) si evince che la trasmittanza termica soddisfa i limiti di legge vigente che, per questo edificio sito in zona climatica E, è pari a $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ ⁶⁹.



Spessore	317,8 mm	Trasmittanza	0,181 W/m ² K
Resistenza	5,539 m ² K/W	Massa superf.	75 kg/m ²
Tipologia	Parete esterna		
Descrizione	Parete impotizzata per l'edificio "Casa G" sito in zona climatica E		

Figura 62: Risultato prima analisi della stratigrafia e degli spessori da impiegare. L'analisi è stata fatta col software di calcolo energetico "Termolog"

Per far fronte alla pianta originale, dove erano state considerate delle contropareti con montanti in alluminio da 50 millimetri, è reso necessario allargare il profilo interno dei muri perimetrali di tale valore.

Strutturalmente, come anticipato, è stata impiegato il lamellare sdraiato per la realizzazione dei solai. Vista la luce di quasi 9 metri, è stato necessario inserire una trave al centro dell'edificio che poggia sulle pareti e su un pilastro centrale. L'analisi strutturale non è stata redatta, ma sono già stati previsti questi elementi già in fase preliminare. Inoltre, tutti gli architravi sono stati dimensionati provvisoriamente come elementi semplicemente appoggiati soggetti ai soli carichi del solaio superiore. Necessiterà quindi di una completa verifica strutturale.

Sono stati definiti così 4 diverse ipotesi d'ingegnerizzazione: l'ipotesi uno (*Fig.63*) dove l'edificio è stato ingegnerizzato tendo in considerazione le dimensioni effettive della richiesta; l'ipotesi due (*Fig.64*) dove è stato ingegnerizzato allineando il profilo interno delle pareti con la prima linea interna dello schema, riducendo così la superficie interna; l'ipotesi tre (*Fig.65*) schematizzata allineando il profilo interno delle pareti con la linea più vicina dello schema di costruzione, risultando così una superficie pressoché uguale; l'ipotesi quattro (*Figura 66*) realizzata allineando il profilo interno delle pareti con la prima linea esterna dello schema, con relativo aumento la superficie totale.

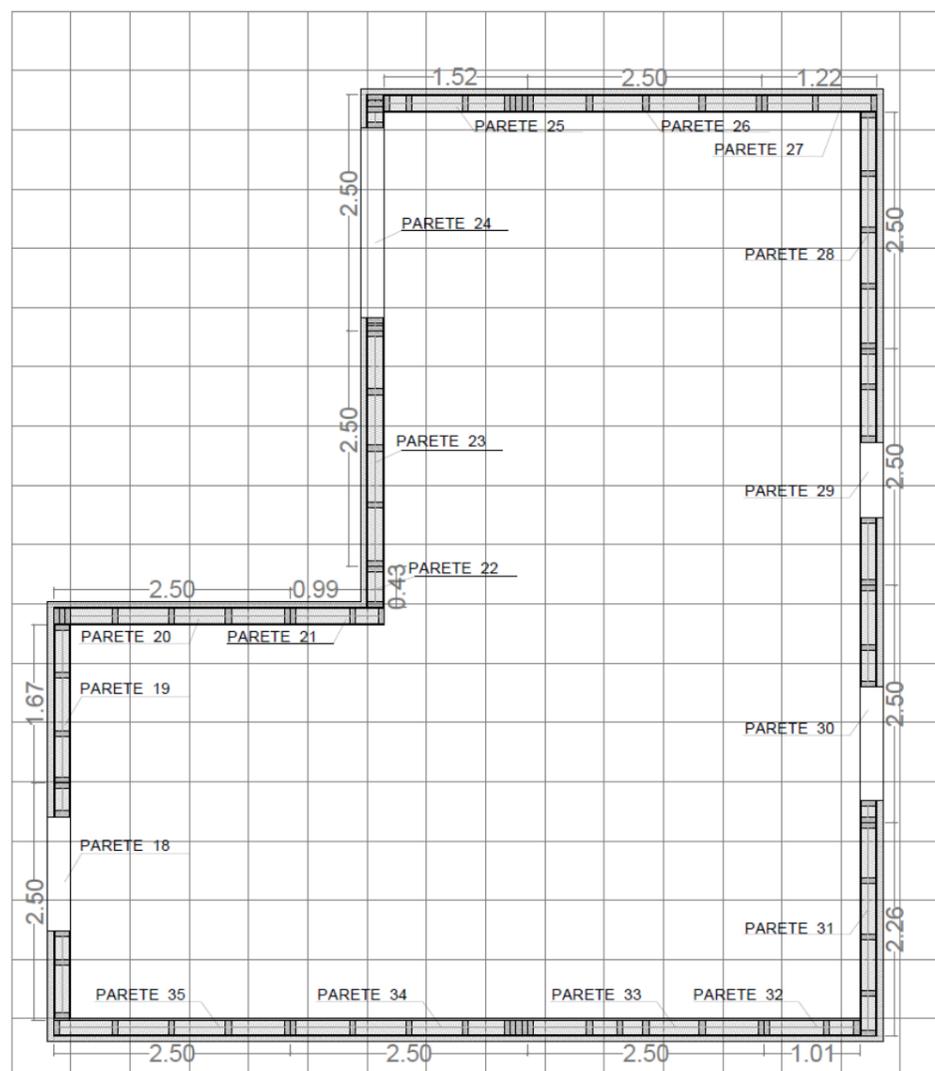
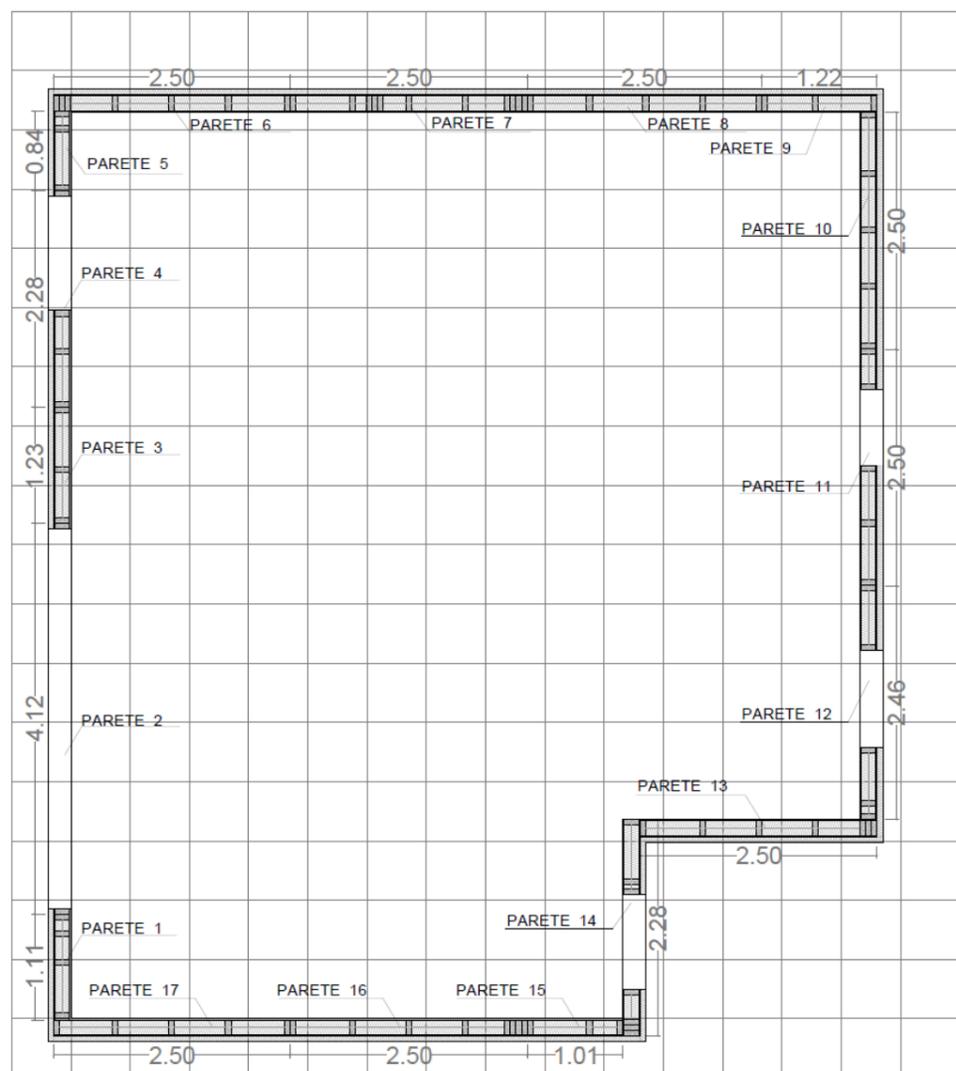


Figura 63: Ingegnerizzazione ipotesi 1, soluzione originale – Casa G. Misure in metri. A sinistra il piano terra, a destra il piano primo. Lo schema di costruzione riportato nelle piante è stato messo al solo scopo di confronto con le altre ipotesi.

Tabella 13: Quantità di materiale ligneo strutturale impiegato nelle pareti dell'ipotesi 1 – Casa G

ID Parete	Materiale (mc)	Descrizione
1	0,132	Parete 1,115 m
2	0,442	Parete per apertura con architrave 4,120 m
3	0,108	Parete 1,225 m
4	0,236	Parete per apertura con architrave 2,283 m
5	0,109	Parete 0,840 m
6	0,242	Parete 2,500 m
7	0,352	Parete con rinforzo 2,500 m
8	0,186	Parete 2,500 m
9	0,108	Parete 1,220 m
10	0,186	Parete 2,500 m
11	0,269	Parete per apertura con architrave 2,500 m
12	0,265	Parete per apertura con architrave 2,459 m
13	0,242	Parete con rinforzo 2,500 m
14	0,283	Parete per apertura con architrave e rinforzo 2,284 m
15	0,102	Parete 1,005 m
16	0,269	Parete con rinforzo 2,500 m
17	0,186	Parete 2,500 m
18	0,238	Parete per apertura con architrave 2,500 m
19	0,143	Parete 1,670 m
20	0,242	Parete con rinforzo 2,500 m
21	0,102	Parete 0,985 m
22	0,063	Parete 0,425 m
23	0,186	Parete 2,500 m
24	0,321	Parete per apertura con architrave e rinforzo 2,500 m
25	0,195	Parete con rinforzo 1,515 m
26	0,186	Parete 2,500 m
27	0,106	Parete 1,220 m
28	0,186	Parete 2,500 m
29	0,272	Parete per apertura con architrave 2,500 m
30	0,248	Parete per apertura con architrave 2,500 m
31	0,181	Parete 2,255 m
32	0,102	Parete 1,005 m
33	0,214	Parete 2,500 m
34	0,269	Parete con rinforzo 2,500 m
35	0,186	Parete 2,500 m

Totale	7,158	Totale quantità di KVH impiegati (mc)
	135,970	Totale superficie utile interna (mq)
	0,053	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna

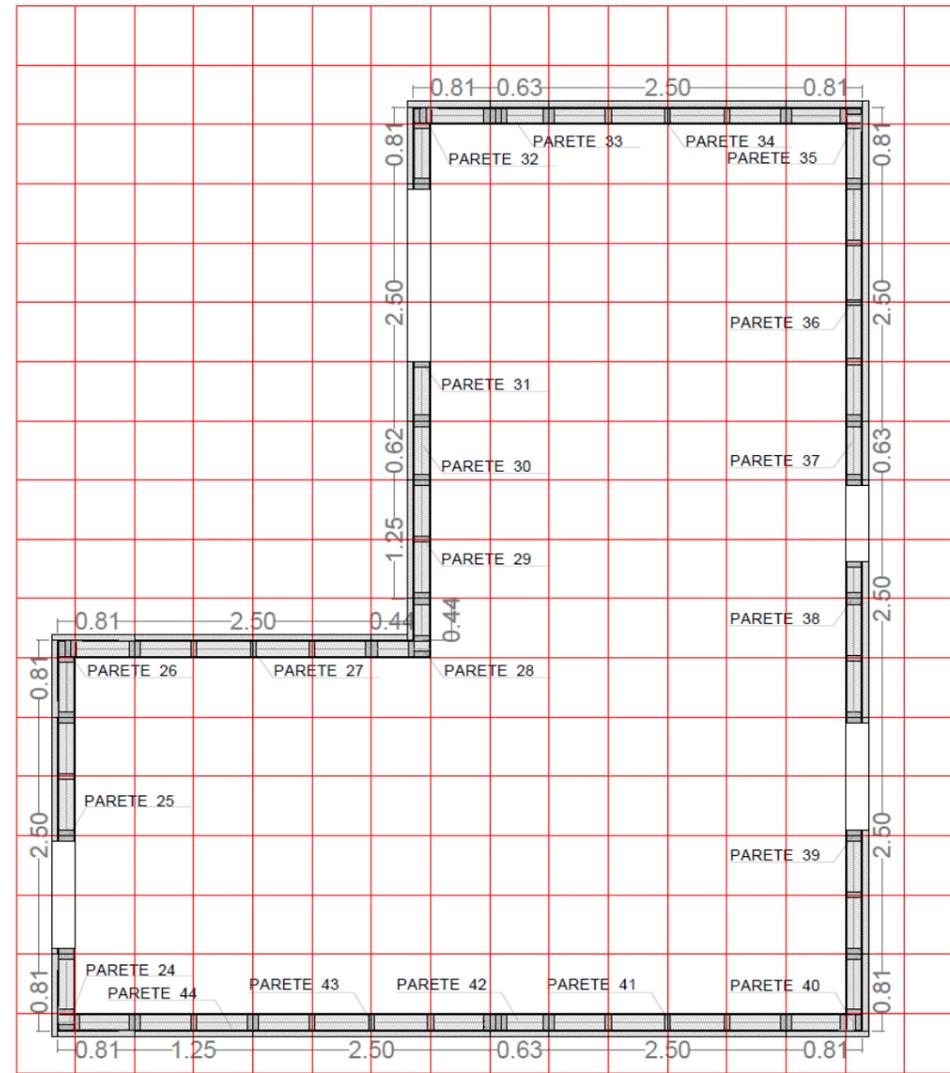
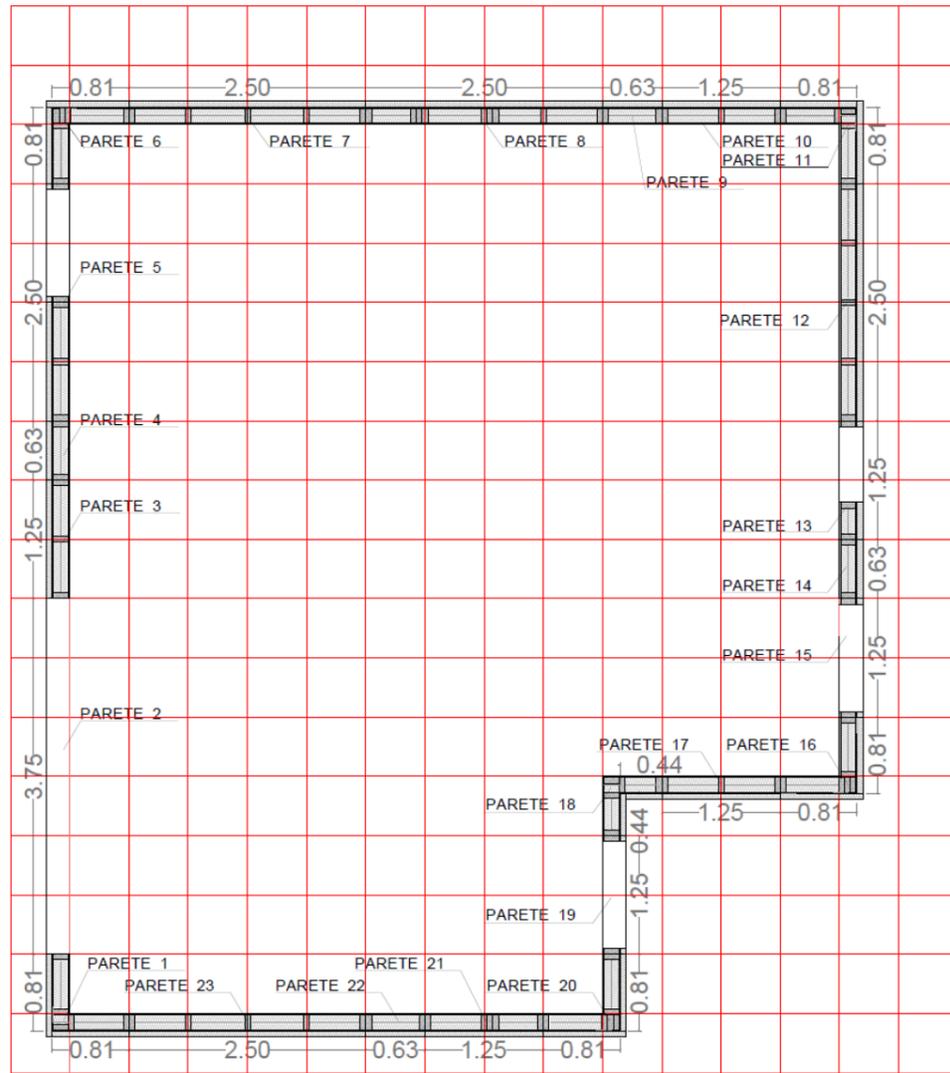


Figura 64: Ingegnerezza ipotesi 2, soluzione con superficie ridotta – Casa G. Misure in metri. A sinistra il piano terra, a destra il piano primo

Tabella 14: Quantità di materiale ligneo strutturale impiegato nelle pareti dell'ipotesi 2 – Casa G

ID Parete	Materiale (mc)	Descrizione
1	0,166	Parete angolare sporgente
2	0,376	Parete per apertura con architrave 3,750 m
3	0,107	Parete 1,250 m
4	0,067	Parete 0,625 m
5	0,259	Parete per apertura con architrave 2,500 m
6	0,166	Parete angolare sporgente
7	0,186	Parete 2,500 m
8	0,297	Parete con rinforzo 2,500 m
9	0,067	Parete 0,625 m
10	0,107	Parete 1,250 m
11	0,166	Parete angolare sporgente
12	0,186	Parete 2,500 m
13	0,152	Parete per apertura con architrave 1,250 m
14	0,067	Parete 0,625 m
15	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
16	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
17	0,107	Parete 1,250 m
18	0,159	Parete angolare rientrante
19	0,110	Parete per apertura con architrave 1,250 m
20	0,194	Parete angolare sporgente
21	0,165	Parete con rinforzo 1,250 m
22	0,067	Parete 0,625 m
23	0,186	Parete 2,500 m
24	0,166	Parete angolare sporgente
25	0,210	Parete per apertura con architrave 2,500 m
26	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
27	0,186	Parete 2,500 m
28	0,159	Parete angolare rientrante
29	0,107	Parete 1,250 m
30	0,067	Parete 0,625 m
31	0,210	Parete per apertura con
32	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
33	0,123	Parete con rinforzo 0,625 m
34	0,186	Parete 2,500 m
35	0,166	Parete angolare sporgente
36	0,186	Parete 2,500 m
37	0,067	Parete 0,625 m
38	0,259	Parete per apertura con architrave 2,500 m
39	0,217	Parete per apertura con architrave 2,500 m
40	0,166	Parete angolare sporgente
41	0,186	Parete 2,500 m
42	0,123	Parete con rinforzo 0,625 m
43	0,186	Parete 2,500 m
44	0,107	Parete 1,250 m

Totale	7,039	Totale quantità di KVH impiegati (mc)
	125,000	Totale superficie utile interna (mq)
	0,056	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna
	-6,96%	Risparmio rispetto alla soluzione originale

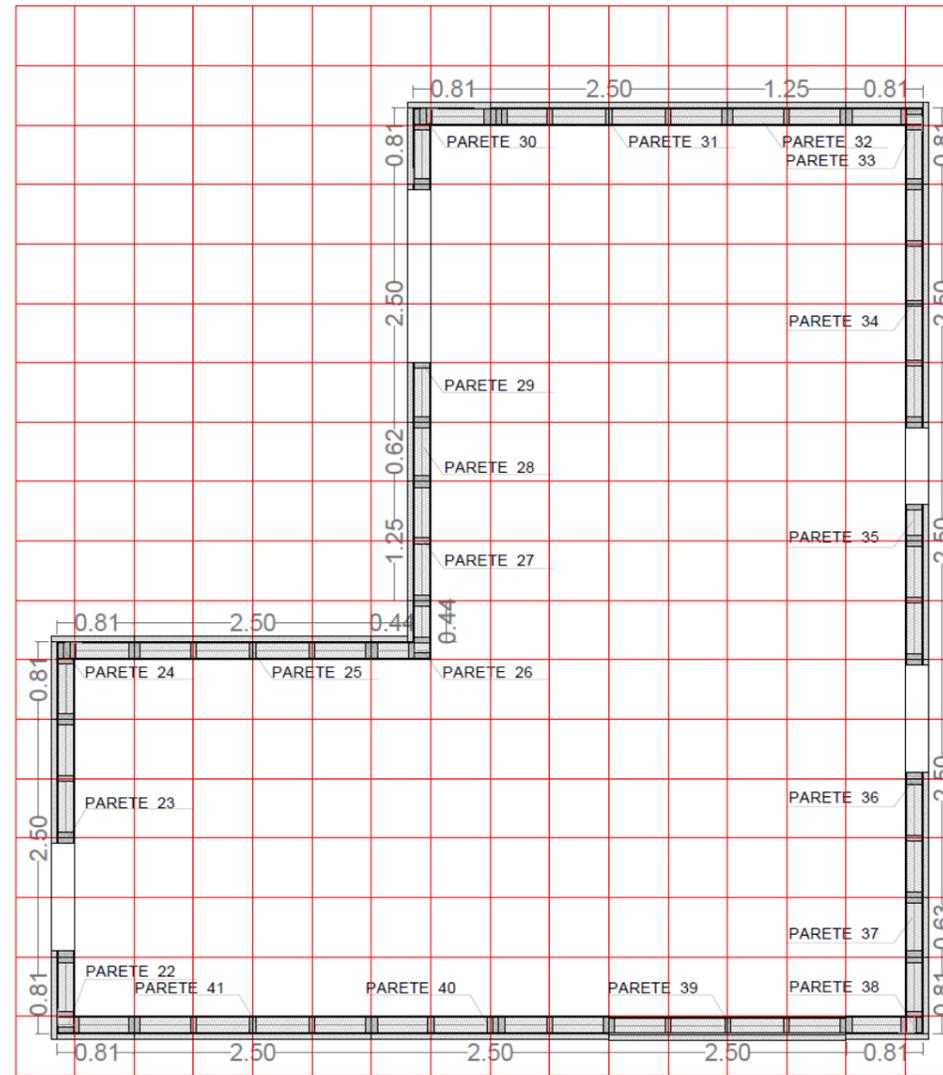
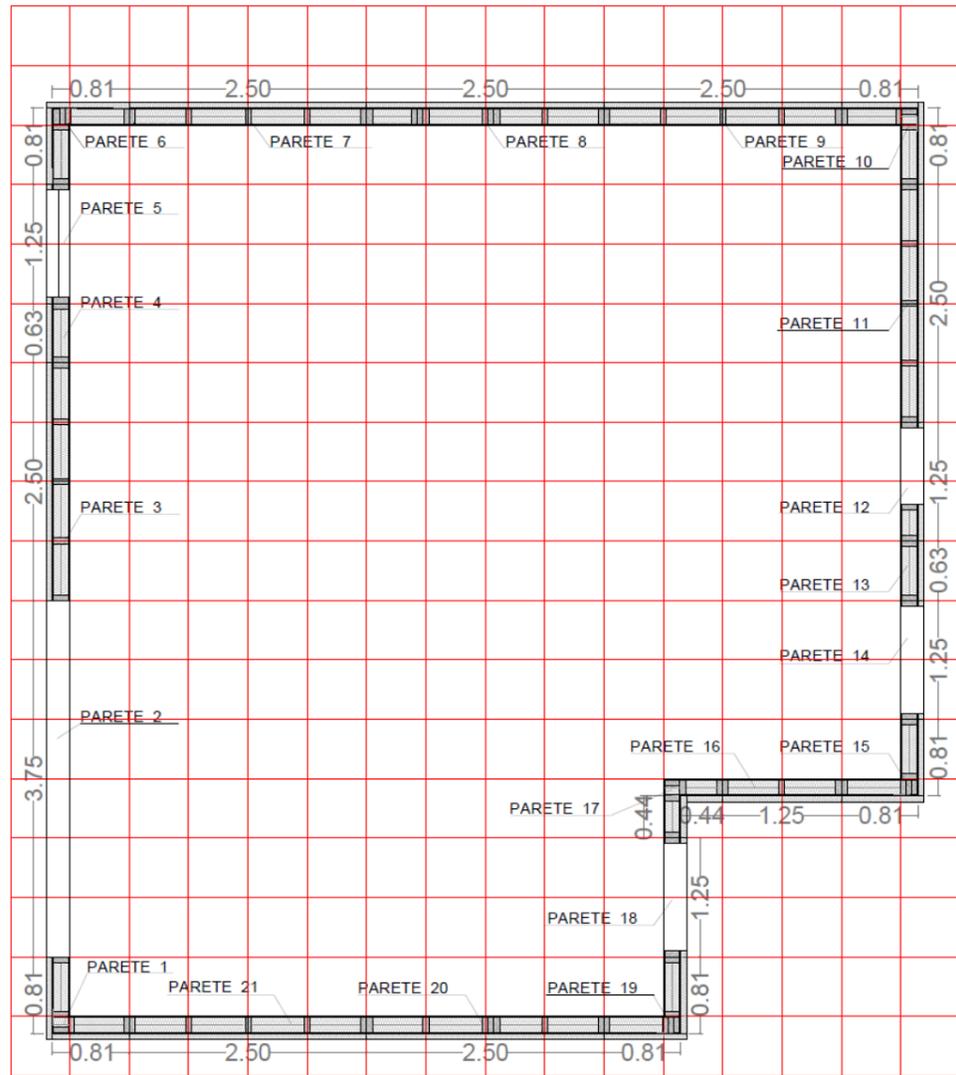


Figura 65: Ingegnierizzazione ipotesi 3, soluzione con superficie simile – Casa G. Misure in metri. A sinistra il piano terra, a destra il piano primo

Tabella 15: Quantità di materiale ligneo strutturale impiegato nelle pareti dell'ipotesi 3 – Casa G

ID Parete	Materiale (mc)	Descrizione
1	0,166	Parete angolare sporgente
2	0,376	Parete per apertura con architrave 3,750 m
3	0,186	Parete 2,500 m
4	0,067	Parete 0,625 m
5	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
6	0,166	Parete angolare sporgente
7	0,186	Parete 2,500 m
8	0,352	Parete con rinforzo 2,500 m
9	0,186	Parete 2,500 m
10	0,166	Parete angolare sporgente
11	0,186	Parete 2,500 m
12	0,152	Parete per apertura con architrave 1,250 m
13	0,067	Parete 0,625 m
14	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
15	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
16	0,107	Parete 1,250 m
17	0,159	Parete angolare rientrante
18	0,110	Parete per apertura con architrave 1,250 m
19	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
20	0,242	Parete con rinforzo 2,500 m
21	0,186	Parete 2,500 m
22	0,166	Parete angolare sporgente
23	0,217	Parete per apertura con architrave 2,500 m
24	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
25	0,186	Parete 2,500 m
26	0,159	Parete angolare rientrante
27	0,107	Parete 1,250 m
28	0,067	Parete 0,625 m
29	0,210	Parete per apertura con architrave 2,500 m
30	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
31	0,242	Parete con rinforzo 2,500 m
32	0,107	Parete 1,250 m
33	0,166	Parete angolare sporgente
34	0,186	Parete 2,500 m
35	0,259	Parete per apertura con architrave 2,500 m
36	0,217	Parete per apertura con architrave 2,500 m
37	0,067	Parete 0,625 m
38	0,166	Parete angolare sporgente
39	0,186	Parete 2,500 m
40	0,242	Parete con rinforzo 2,500 m
41	0,186	Parete 2,500 m

Totale	7,046	Totale quantità di KVH impiegati (mc)
	136,720	Totale superficie utile interna (mq)
	0,052	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna
	2,11%	Risparmio rispetto alla soluzione originale

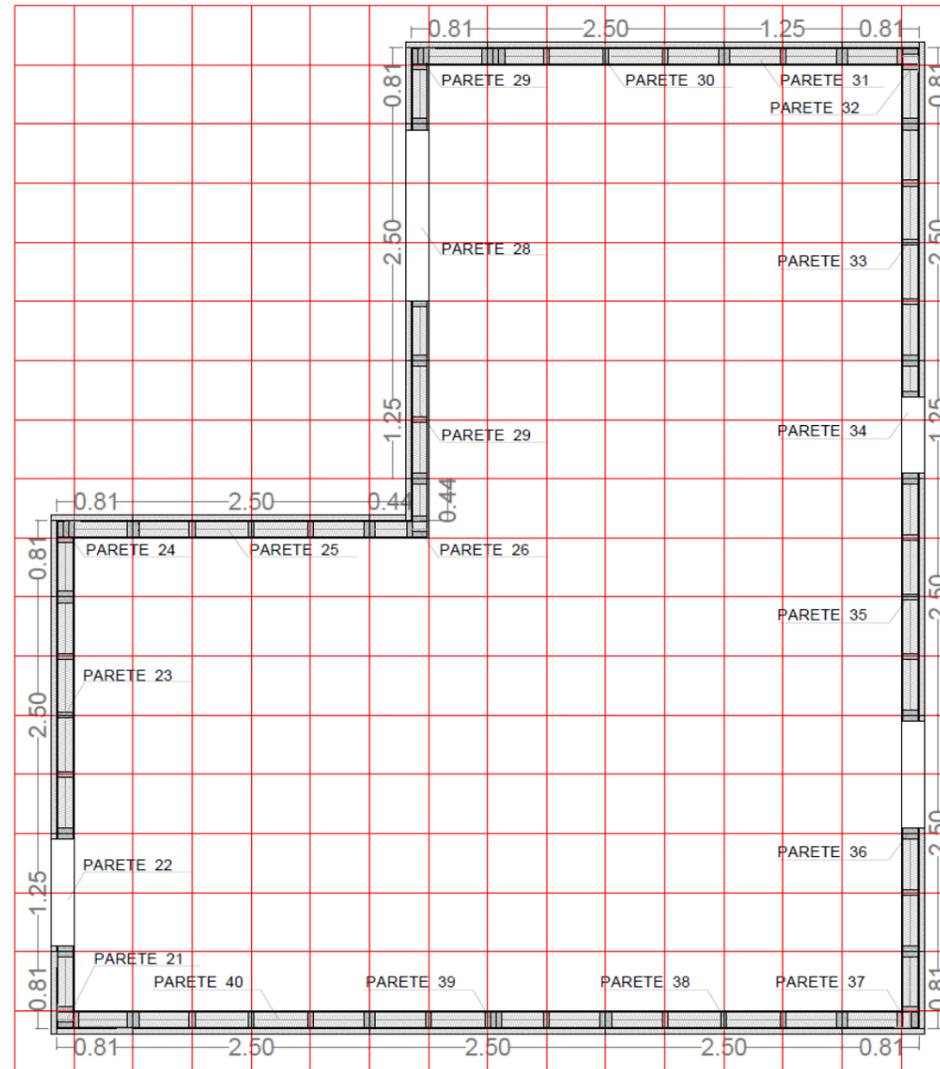
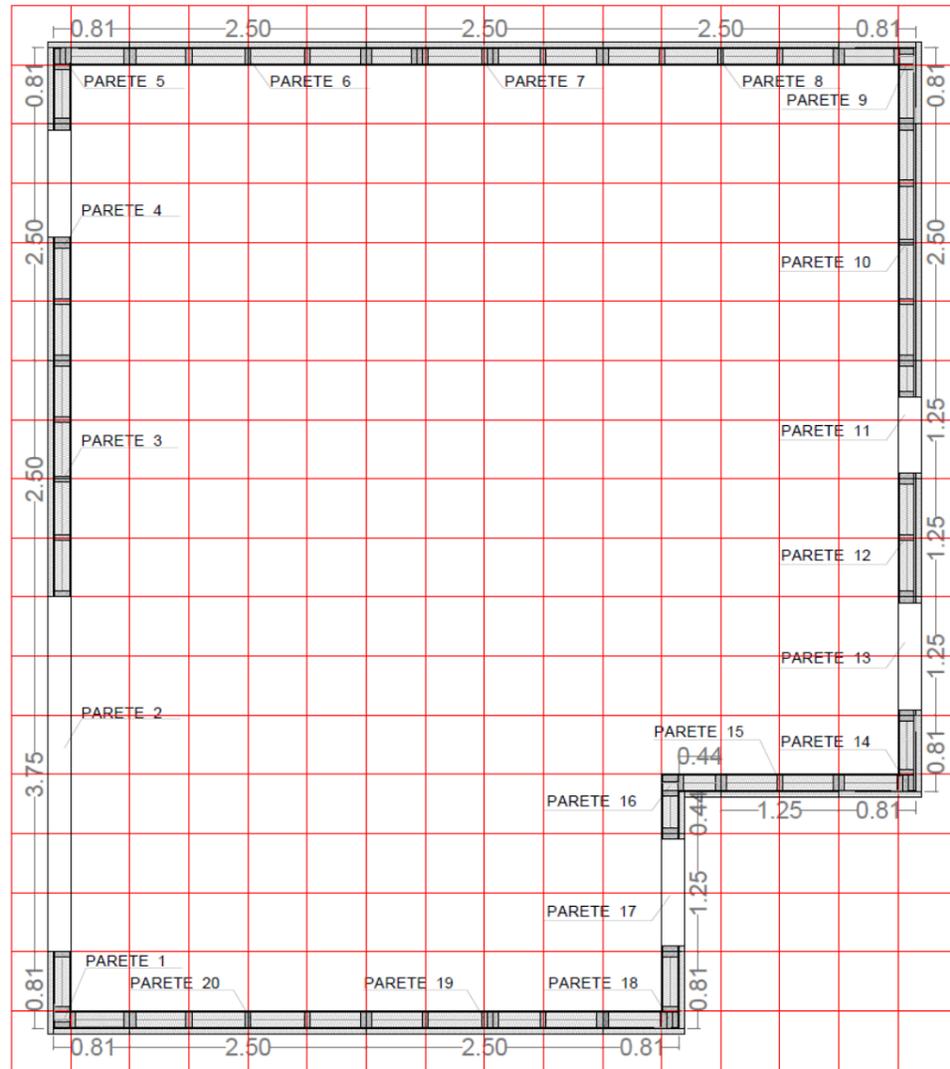


Figura 66: Ingegnierizzazione ipotesi 4, soluzione con superficie incrementata – Casa G. Misure in metri. A sinistra il piano terra, a destra il piano primo

Tabella 16: Quantità di materiale ligneo strutturale impiegato nelle pareti dell'ipotesi 4 – Casa G

ID Parete	Materiale (mc)	Descrizione
1	0,166	Parete angolare sporgente
2	0,376	Parete per apertura con architrave 3,750 m
3	0,186	Parete 2,500 m
4	0,217	Parete per apertura con architrave 2,500 m
5	0,166	Parete angolare sporgente
6	0,186	Parete 2,500 m
7	0,352	Parete con rinforzo 2,500 m
8	0,186	Parete 2,500 m
9	0,166	Parete angolare sporgente
10	0,186	Parete 2,500 m
11	0,152	Parete per apertura con architrave 1,250 m
12	0,107	Parete 1,250 m
13	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
14	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
15	0,107	Parete 1,250 m
16	0,159	Parete angolare rientrante
17	0,110	Parete per apertura con architrave 1,250 m
18	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
19	0,242	Parete con rinforzo 2,500 m
20	0,186	Parete 2,500 m
21	0,166	Parete angolare sporgente
22	0,131	Parete per apertura con
23	0,186	Parete 2,500 m
24	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
25	0,186	Parete 2,500 m
26	0,159	Parete angolare rientrante
27	0,107	Parete 1,250 m
28	0,210	Parete per apertura con architrave 2,500 m
29	0,194	Parete angolare sporgente con rinforzo
30	0,242	Parete con rinforzo 2,500 m
31	0,107	Parete 1,250 m
32	0,166	Parete angolare sporgente
33	0,186	Parete 2,500 m
34	0,152	Parete per apertura con architrave 1,250 m
35	0,186	Parete 2,500 m
36	0,217	Parete per apertura con architrave 2,500 m
37	0,166	Parete angolare sporgente
38	0,186	Parete 2,500 m
39	0,242	Parete con rinforzo 2,500 m
40	0,186	Parete 2,500 m

Totale	7,149	Totale quantità di KVH impiegati (mc)
	150,000	Totale superficie utile interna (mq)
	0,048	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna
	9,47%	Risparmio rispetto alla soluzione originale

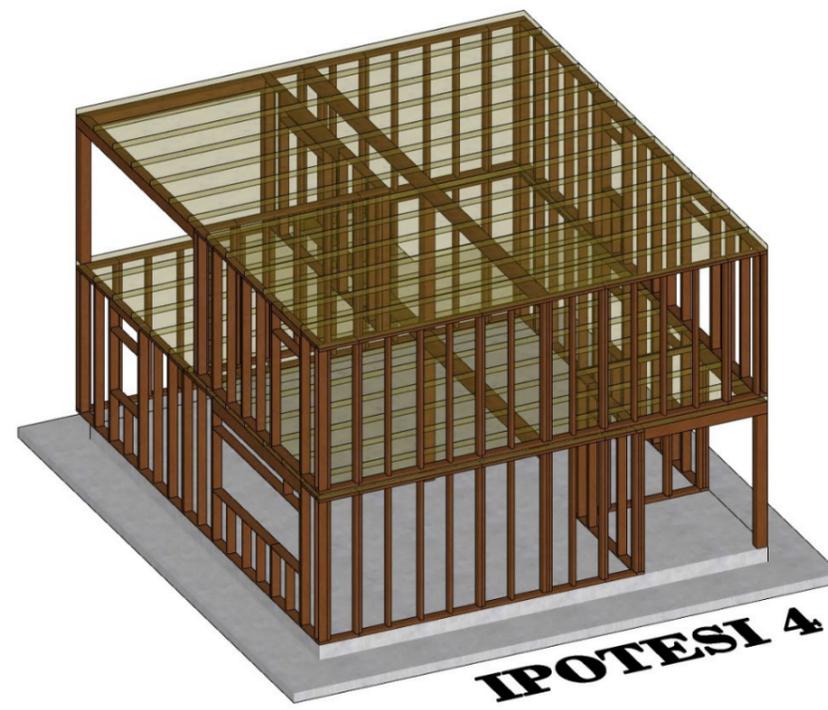
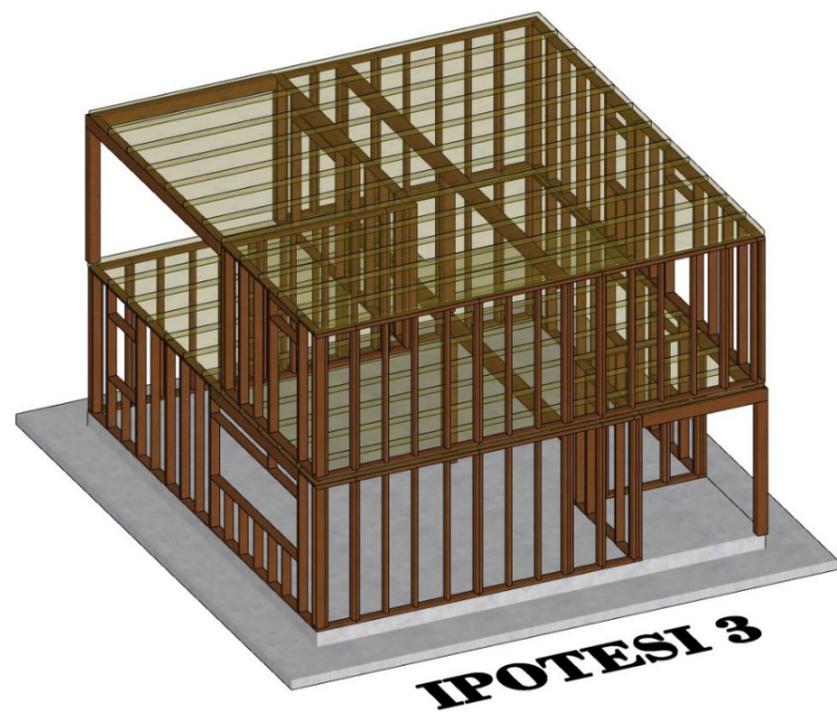


Figura 67: Modellazione Tridimensionale delle quattro ipotesi di realizzazione della casa G.

Le pareti impiegate non sono state analizzate staticamente, ma solo geometricamente attraverso il modulo dimensionale stabilito in precedenza. La computazione dei vari elementi impiegati è stata effettuata in maniera precisa grazie all'ausilio dei modelli tridimensionali (*Fig.67*). In questi ultimi, infatti, sono state inserite le pareti e computati i vari elementi strutturali che componevano il telaio quali montanti, traverse e architravi. Non sono stati computati i pilastri e le travi esterne in quanto, in questa fase preliminare, risulterebbero pressoché simili. Nell'analisi non sono stati computati i pannelli di controventatura ed eventuali isolanti, in quanto proporzionali alla superficie delle pareti. Anche se non analizzati, è possibile notare che, a causa delle dimensioni dei pannelli impiegati nella soluzione originale, lo sfrido dei pannelli risulterà superiore rispetto alle ipotesi realizzate mediante la griglia. Infatti, in queste ultime, l'unico sfrido prodotto risulta essere nelle aperture e, in piccola parte, nelle pareti angolari.

Oltre alla computazione del materiale strutturale delle pareti, è stato calcolata la superficie interna per ogni ipotesi, al fine di calcolare il loro rapporto e ottenere un valore normalizzato e confrontabile senza l'influenza della dimensione effettiva del fabbricato. Bisogna inoltre precisare che nell'ipotesi originale, la dimensione massima dei pannelli è stata fissata pari a 2,5 metri poiché, realizzando pareti con una larghezza superiore, si andrebbe in contro a un incremento dei costi causati dalla necessità di effettuare un trasporto eccezionale.

Grazie alla tabella di confronto (*Tab.17*) si possono fare alcune precisazioni sul sistema e come è stato impiegato per questo caso studio.

Tabella 17: Confronto tra le quattro ipotesi di realizzazione della casa G.

	Totale quantità di KVH impiegati (mc)	Totale superficie utile interna (mq)	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna	Risparmio rispetto all'IPOTESI 1
IPOTESI 1	7,158	135,970	0,053	0,00%
IPOTESI 2	7,039	125,000	0,056	-6,96%
IPOTESI 3	7,046	136,720	0,052	2,11%
IPOTESI 4	7,149	150,000	0,048	9,47%

Dal confronto tra l'ipotesi originale e l'ipotesi due, dove la pianta è stata schematizzata attraverso la riduzione della superficie interna, è possibile notare che quest'ultima risulta impiegare il materiale strutturale di circa il 7% in più. Da questo valore si potrebbe giungere alla conclusione che il sistema a griglia, nella pratica, non risulti così efficiente come considerato in precedenza. Tuttavia, bisogna analizzare attentamente le richieste della griglia di costruzione e il risultato dell'applicazione. Le piante dell'ipotesi due (*Fig.64*) mostrano un utilizzo errato del sistema a griglia. Infatti, seppur presentando una superficie interna notevolmente ridotta rispetto alle altre ipotesi, impiega un quantitativo superiore di pareti. Tale quantitativo è legato all'eccessivo utilizzo di pareti con dimensioni piccole. La griglia necessita del maggior numero di pareti da 2,5 m possibili per essere ottimizzata al meglio. Un ulteriore incremento di materiale lo si riscontra nelle due rientranze richieste dalla committenza dove, per poter seguire correttamente la pianta originale, hanno richiesto un numero superiore di pareti angolari. L'ipotesi due risulta rappresentare un approccio errato alla griglia di costruzione poiché, seppur risparmiando in termini di tempi di progettazione e produzione, il quantitativo di materiale strutturale impiegato, normalizzato alla superficie, risulta essere superiore all'ipotesi originale che non impiegava la griglia di costruzione.

L'ipotesi tre, diversamente all'ipotesi due, restituisce un risultato positivo nel confronto con l'ipotesi originale. In questo caso la schematizzazione della pianta è stata fatta in modo da risultare simile al progetto originale. Dalle piante (*Fig.65*) si può notare una significativa diminuzione dell'impiego dei pannelli da 0,625 metri, rispetto alla precedente ipotesi, che ha portato dei benefici al risultato finale. Infatti, dal loro confronto si nota che c'è stato un risparmio di materiale strutturale di oltre il 2% che, seppur non rappresenta un valore significativo, dev'essere considerato insieme agli altri vantaggi dovuti all'impiego della griglia di costruzione.

Infine, l'ipotesi quattro risulta essere quella più significativa poiché conferma quanto affermato sull'efficienza del sistema modulare dimensionale. Dalla tabella di confronto (*Tab.16*) è possibile notare un quantitativo di materiale inferiore rispetto all'ipotesi originale, pur risultando una superficie interna superiore. Ciò porta a definire un grande risparmio di materiale strutturale che, normalizzato alla superficie, risulta essere superiore al 9%. Tale valore è dovuto alla corretta applicazione della griglia di costruzione al fine di ottimizzare al massimo il materiale, portando a dichiarare che questa ipotesi risulta essere quella che meglio sfrutta il sistema. Analizzando le piante dell'ipotesi quattro (*Fig.66*) è possibile notare la completa assenza di pareti da 0,625 metri e il ridotto impiego delle pareti da 1,25 metri. Queste ultime, infatti, sono impiegate per lo più in corrispondenza delle aperture.

In conclusione, dall'analisi effettuata sulla casa G, è stato possibile verificare la corretta funzionalità della griglia di costruzione e delle pareti impiegate. Con l'ipotesi quattro non si è giunti a una ottimizzazione totale dell'edificio poiché, pur riscontrando un valore positivo, se il progetto avesse presentato maggiore regolarità nella pianta e un dimensionamento corretto delle aperture per le finestre più piccole, si poteva raggiungere a un risultato migliore. Tuttavia, tale dimensionamento doveva essere fatto già in fase preliminare durante la definizione degli spazi interni.

6.2 Casa Luca (Casa L)

Questo edificio (*Fig.68*), diversamente dal precedente, si presenta a un solo piano con una pianta stretta e lunga. Questa morfologia è dettata da alcuni vincoli definiti dal contesto in cui essa si ritrova nella città di Ciriè, anch'essa in zona climatica E. Infatti, il lotto dove sorgerà tale edificio si presenta lungo, stretto e circondato da altri edifici che presentano anch'essi delle unità abitative. In virtù della lunghezza, quindi, è reso necessario l'inserimento di alcune pareti strutturali all'interno dell'edificio. È presente anche un porticato che rimarrà pressoché invariato nell'operazione di adattamento della pianta originale alla griglia di costruzione, in quanto non soggetto all'impiego di pareti. Sono presenti diverse aperture aventi dimensioni diverse, per ospitare finestre, porte finestre e ingressi sia nella parte abitata che nel garage. La copertura è stata prevista piana e realizzata mediante l'impiego di travi in lamellare sdraiato, cosa che permette una distribuzione dei carichi uniforme al fine di evitare carichi concentrati.

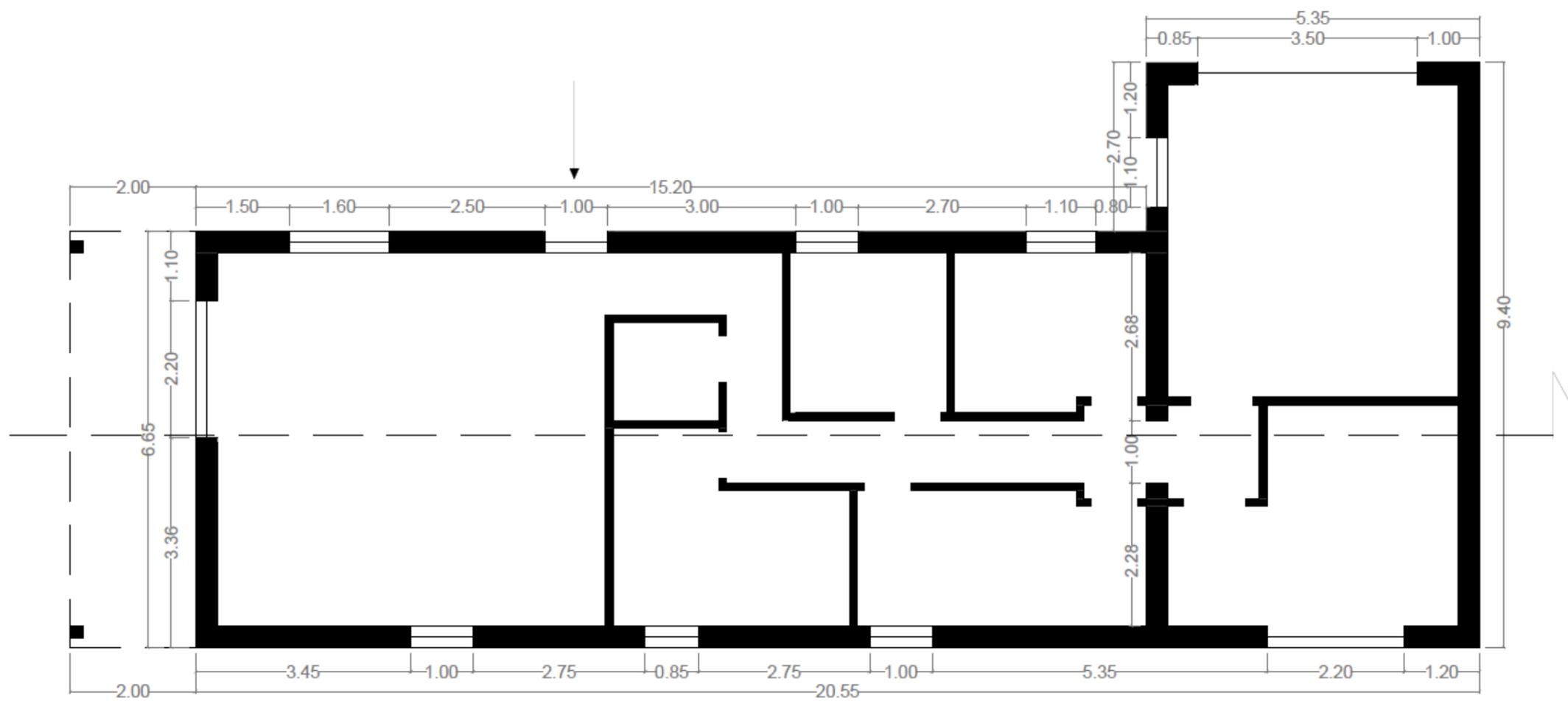
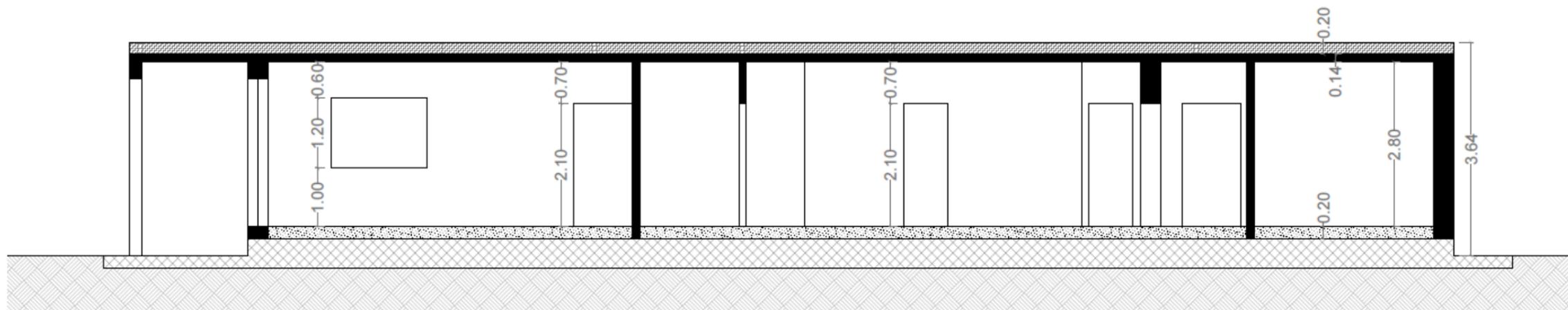
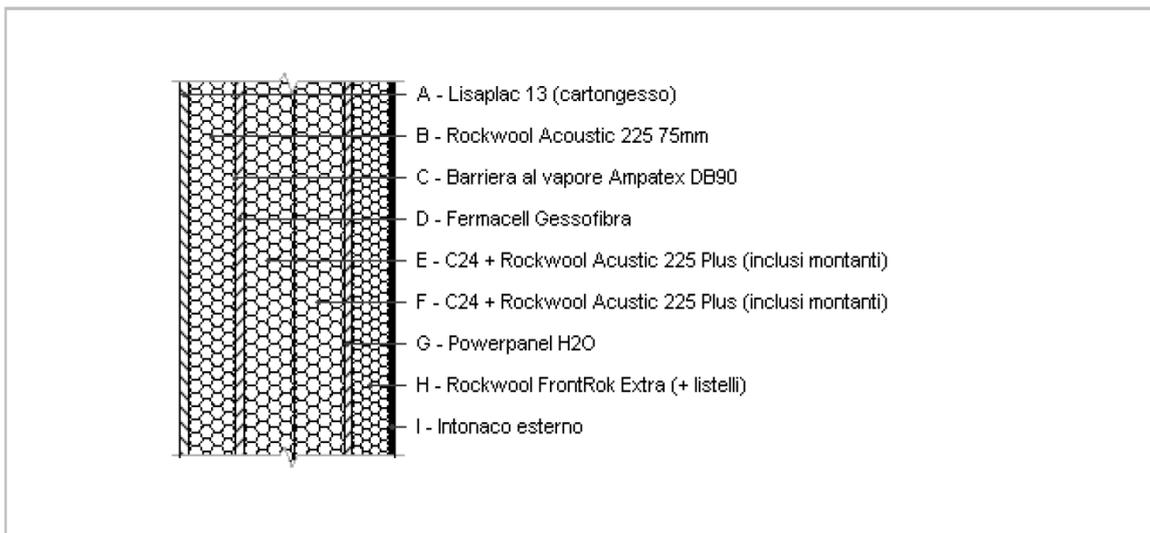


Figura 52: Pianta e sezione originale della Casa-L. In alto la sezione. In basso la pianta del piano terra.. Misure in metri.

Prima di effettuare l'ingegnerizzazione, come nel caso precedente, è necessario effettuare un'analisi termo-energetica per analizzare la parete. Dall'analisi della stratigrafia (Fig.69) si evince che la trasmittanza termica soddisfa i limiti di legge vigente che, per questo edificio sito in zona climatica E, è pari a $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$. La riduzione della trasmittanza della stratigrafia della casa L rispetto alla casa G è dovuta a uno spessore della camera impianti superiore. Oltre a far passare cavi e tubi, tale spazio è destinato all'inserimento di un ulteriore strato isolante al fine di aumentare le prestazioni dell'involucro senza aumentare lo spessore della parete. Infatti, anche in questo caso non è stata tenuta in considerazione la controparete interna durante la definizione dei locali interni ma, in accordo con il progettista architettonico, si prevede la sua realizzazione mediante un telaio in alluminio da 75 millimetri.



Spessore	342,8 mm	Trasmittanza	$0,160 \text{ W/m}^2\text{K}$
Resistenza	$6,254 \text{ m}^2\text{K/W}$	Massa superf.	77 kg/m^2
Tipologia	Parete esterna		
Descrizione	Parete impotizzata per l'edificio "Casa L" sito in zona climatica E		

Figura 53: Risultato prima analisi della stratigrafia e degli spessori da impiegare. L'analisi è stata fatta col software di calcolo energetico "Termolog"

Strutturalmente, è prevista una parete strutturale interna che divide l'intera morfologia dell'edificio e permette di impiegare delle sezioni in lamellare sdraiato ridotte, per la realizzazione del solaio. Infine, gli architravi delle aperture sono state calcolate come semplice appoggio. Inoltre, tutti gli architravi sono stati dimensionati provvisoriamente come elementi semplicemente appoggiati, soggetti ai soli carichi del solaio superiore che, in questo caso, corrisponde alla copertura. Solo in corrispondenza dell'apertura del garage, l'architrave sarà staccato dalle pareti, poiché risulta troppo lunga e senza la necessità di creare parte dell'involucro opaco. L'intera struttura necessiterà quindi di una completa verifica strutturale.

Diversamente dal caso precedente, per la casa L è stata analizzata una sola variazione della pianta al fine di ottimizzare il più possibile il materiale. Sono stati definiti così due diverse ipotesi d'ingegnerizzazione: la prima (Fig.70) dove l'edificio è stato ingegnerizzato tenendo in considerazione la pianta originale; la seconda (Fig.71) dove è stata prevista un'ingegnerizzazione allineando l'interno delle pareti con la linea più vicina dello schema di costruzione, facendo risultare così una superficie e una forma pressoché uguale.

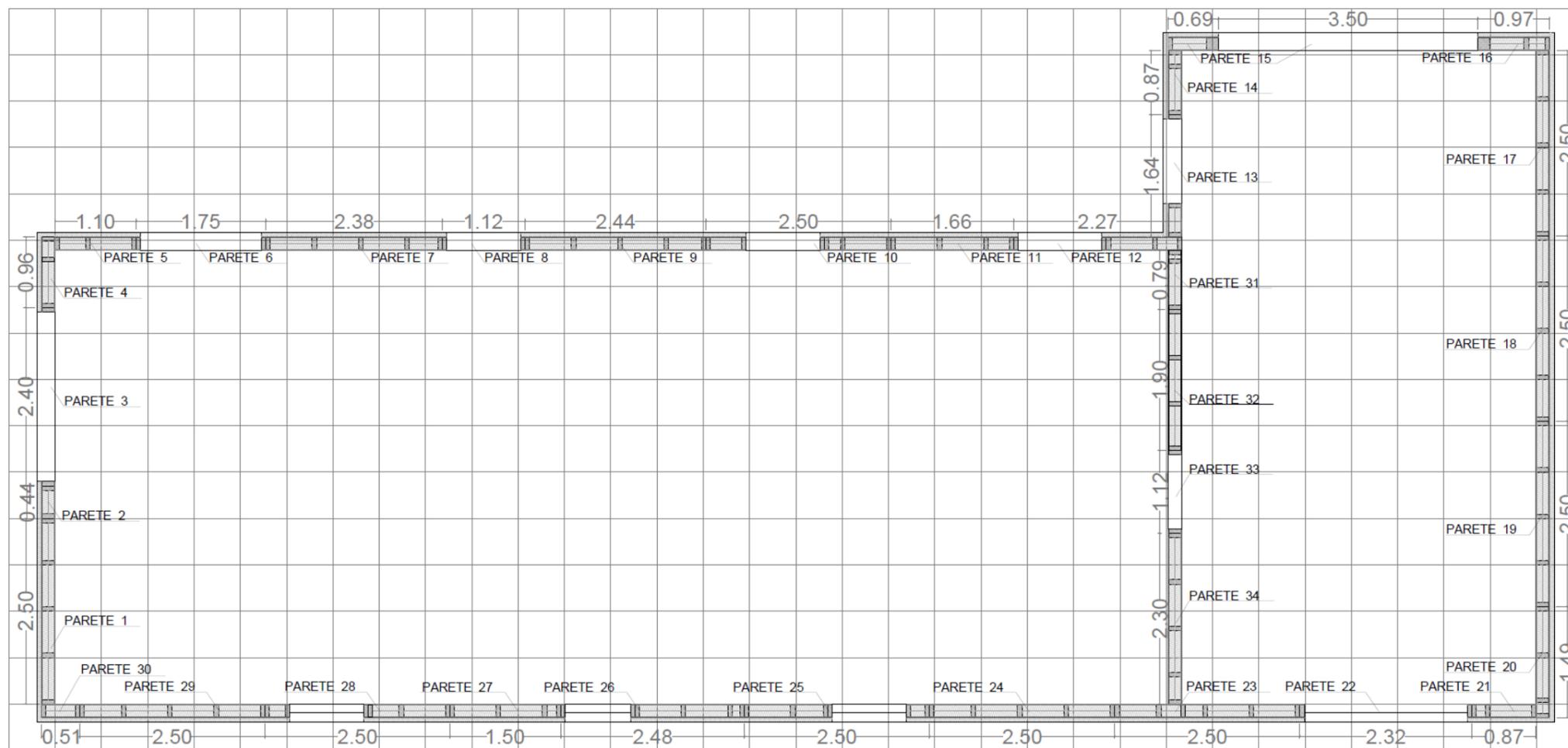


Figura 54: Ingegnerrizzazione ipotesi 1, soluzione originale – Casa L. Misure in metri. Lo schema di costruzione riportato nelle piante è stato messo al solo scopo di confronto con le altre ipotesi.

Tabella 18: Quantità di materiale ligneo strutturale impiegato nelle pareti dell'ipotesi 1 – Casa L

ID Parete	Materiale (mc)	Descrizione
1	0,186	Parete 2,500 m
2	0,064	Parete 0,440 m
3	0,170	Parete per apertura con architrave 2,400 m
4	0,101	Parete 0,957 m
5	0,104	Parete 1,095 m
6	0,145	Parete per apertura con architrave 1,750 m
7	0,184	Parete 2,38m
8	0,107	Parete per apertura con architrave 1,120 m
9	0,185	Parete 2,44m
10	0,268	Parete per apertura con architrave 2,500 m
11	0,142	Parete 1,655 m
12	0,258	Parete per apertura con architrave 2,267 m
13	0,152	Parete per apertura con architrave 1,643 m
14	0,100	Parete 0,869 m
15	0,275	Parete 0,689 m con pilastro e architrave
16	0,148	Parete 0,972 m con pilastro
17	0,186	Parete 2,500 m
18	0,186	Parete 2,500 m
19	0,186	Parete 2,500 m
20	0,139	Parete 1,494 m
21	0,096	Parete 0,869 m
22	0,167	Parete per apertura con architrave 2,320 m
23	0,214	Parete 2,500 m
24	0,186	Parete 2,500 m
25	0,274	Parete per apertura con architrave 2,500 m
26	0,258	Parete per apertura con architrave 2,475 m
27	0,139	Parete 1,500 m
28	0,265	Parete per apertura con architrave 2,500 m
29	0,186	Parete 2,500 m
30	0,065	Parete 0,792 m
31	0,083	Parete 0,513 m
22	0,147	Parete 1,900 m
33	0,126	Parete per apertura con architrave 1,120 m
34	0,182	Parete 2,300 m

Totale	5,676	Totale quantità di KVH impiegati (mc)
	135,100	Totale superficie utile interna (mq)
	0,042	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna

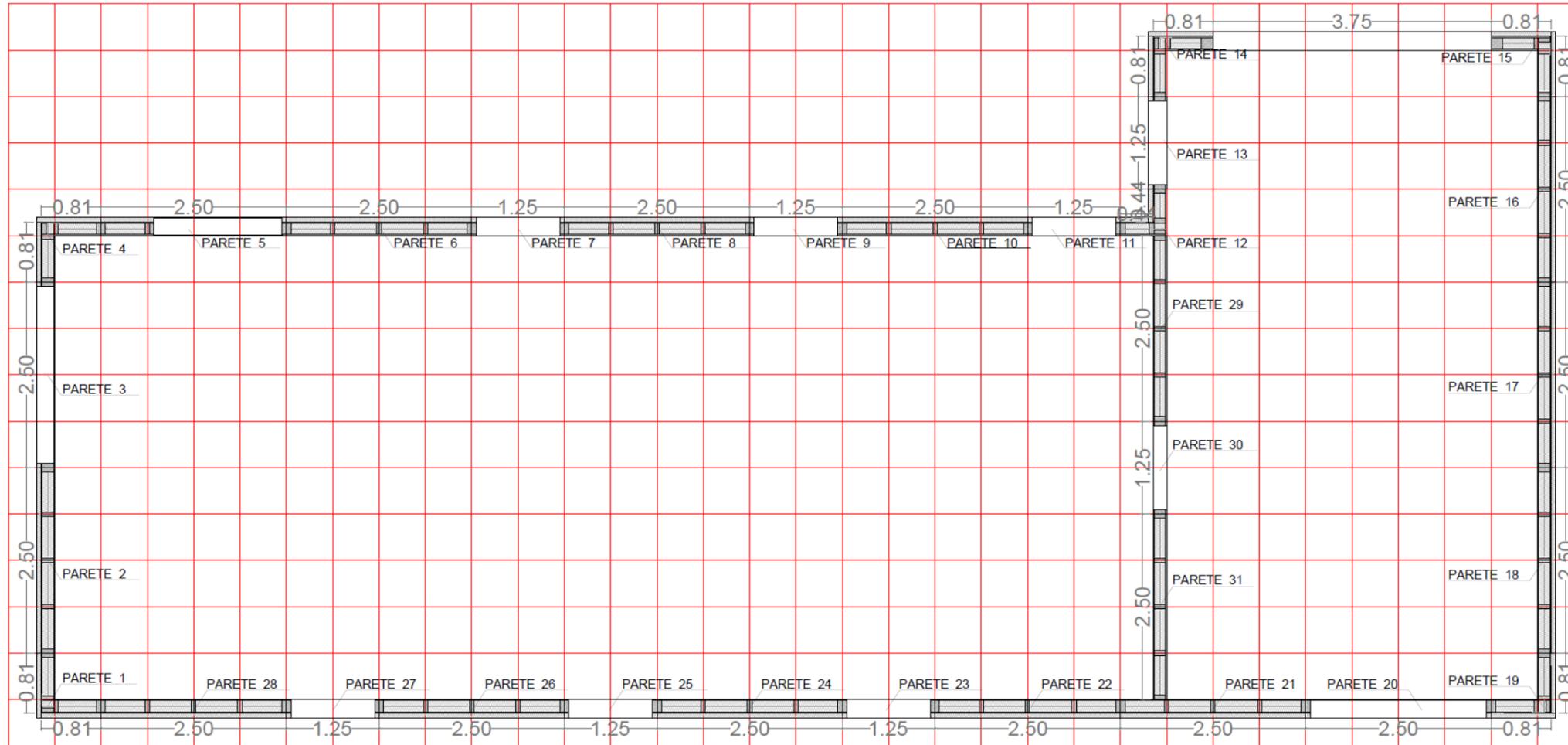


Figura 55: Ingegnerezza ipotesi 2, soluzione con superficie simile – Casa L. Misure in metri.

Tabella 19: Quantità di materiale ligneo strutturale impiegato nelle pareti dell'ipotesi 2 – Casa L.

ID Parete	Materiale (mc)	Descrizione
1	0,166	Parete angolare sporgente
2	0,186	Parete 2,500 m
3	0,175	Parete per apertura con architrave 2,500 m
4	0,166	Parete angolare sporgente
5	0,214	Parete per apertura con architrave 2,500 m
6	0,186	Parete 2,500 m
7	0,111	Parete per apertura con architrave 1,250 m
8	0,186	Parete 2,500 m
9	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
10	0,186	Parete 2,500 m
11	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
12	0,159	Parete angolare rientrante
13	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
14	0,341	Parete angolare sporgente con pilastro e architrave
15	0,193	Parete angolare sporgente con pilastro
16	0,186	Parete 2,500 m
17	0,186	Parete 2,500 m
18	0,186	Parete 2,500 m
19	0,166	Parete angolare sporgente
20	0,175	Parete per apertura con architrave 2,500 m
21	0,186	Parete 2,500 m
22	0,186	Parete 2,500 m
23	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
24	0,186	Parete 2,500 m
25	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
26	0,186	Parete 2,500 m
27	0,131	Parete per apertura con architrave 1,250 m
28	0,186	Parete 2,500 m
29	0,186	Parete 2,500 m
30	0,111	Parete per apertura con architrave 1,250 m
31	0,186	Parete 2,500 m
Totale	5,070	Totale quantità di KVH impiegati (mc)
	137,500	Totale superficie utile interna (mq)
	0,037	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna
	12,24%	Risparmio rispetto alla soluzione originale

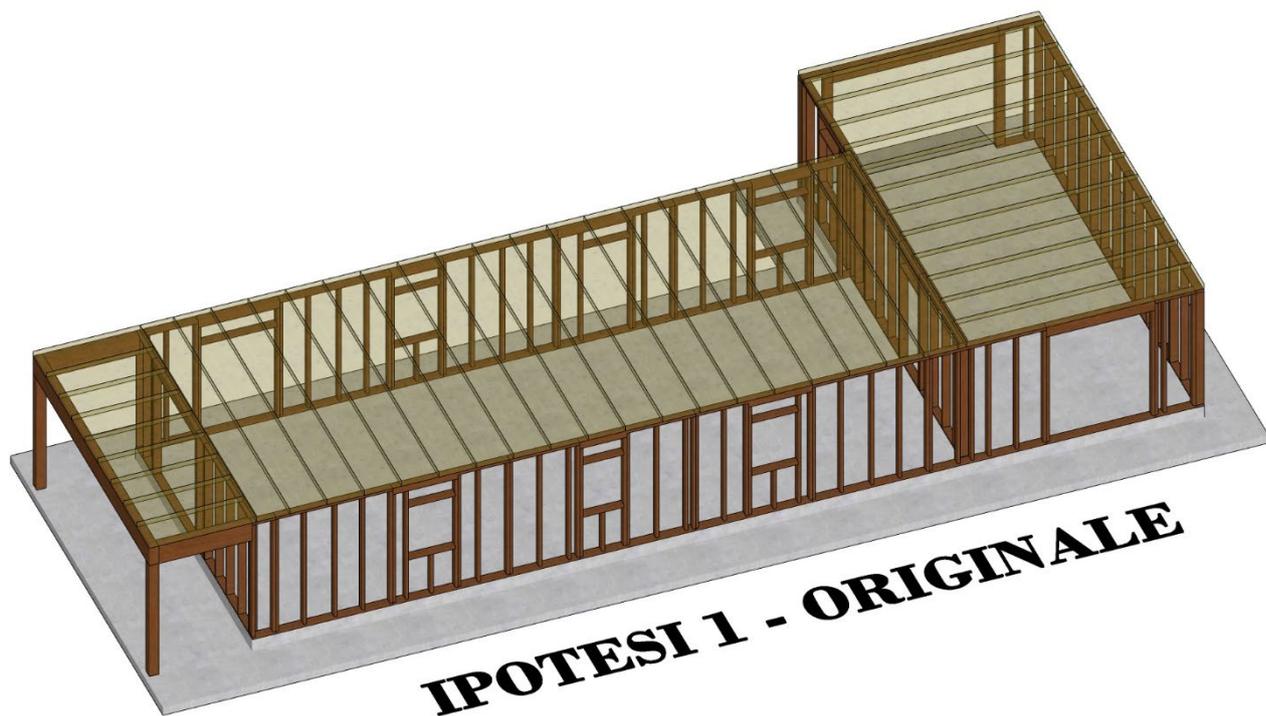


Figura 562: Modellazione delle due ipotesi di realizzazione della casa L

Le pareti impiegate non sono state analizzate staticamente, ma solo geometricamente attraverso il modulo dimensionale stabilito in precedenza. La computazione dei vari elementi impiegati è stata effettuata in maniera precisa grazie all’ausilio dei modelli tridimensionali (Fig.72). In questi ultimi, infatti, sono state inserite le pareti e computati i vari elementi strutturali che componevano il telaio, quali montanti, traverse e architravi. Non sono stati computati i pilastri e le travi esterne in quanto, in questa fase preliminare, risulterebbero pressoché simili. Nell’analisi, come nel precedente caso, non sono stati computati i pannelli di controventatura ed eventuali isolanti, in quanto proporzionali alla superficie delle pareti.

Oltre alla computazione del materiale strutturale delle pareti, è stato calcolata la superficie interna per ogni ipotesi, al fine di calcolare il loro rapporto e ottenere un valore normalizzato e confrontabile senza l’influenza della dimensione effettiva del fabbricato. Bisogna inoltre precisare che nell’ipotesi originale la dimensione massima dei pannelli è stata fissata pari a 2,5 metri, poiché realizzando pareti con una larghezza superiore, si andrebbe in contro a un incremento dei costi causati dalla necessità di effettuare un trasporto eccezionale.

Dalla tabella di confronto (Tab.20) è possibile notare che l’ottimizzazione del materiale nell’ipotesi due risulta superiore al 12% rispetto all’ipotesi originale. Inoltre, grazie all’impiego di un modulo dimensionale e di pareti strutturali standardizzate, viene garantita una produzione molto più veloce.

Tabella 20: Confronto tra le due ipotesi di realizzazione della casa L.

	Totale quantità di KVH impiegati (mc)	Totale superficie utile interna (mq)	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna	Risparmio rispetto all'IPOTESI 1
IPOTESI 1	5,676	135,100	0,042	0,00%
IPOTESI 2	5,070	137,500	0,037	12,24%

Bisogna capire, dal confronto delle due schematizzazioni, dove avviene questo risparmio di materiale e in che modo. Per prima cosa bisogna sottolineare che l’edificio rispecchia una delle richieste principali per l’impiego della griglia, la geometria regolare. In secondo luogo, la pianta originale risulta avere dimensioni che non corrispondono a un multiplo del modulo dimensionale dei pannelli in commercio, cosa che comporta un aumento di materiali impiegati a parità di superficie. Infine, anche le aperture non rispecchiavano i passi dei montanti, portando a impiegare almeno un montante in più per ogni apertura. Per ottenere questo risparmio è bastato alterare leggermente la pianta, sia in termini di superficie che posizione e dimensioni delle aperture. Osservando i due schemi ingegnerizzati, infatti, è possibile notare una concentrazione di montanti in alcune zone, al fine di ottenere dei supporti per i pannelli impiegati o per delimitare i fori strutturali. Bisogna altresì ricordare che tali computi non tengono in considerazione problematiche strutturali che sarebbero emerse in seguito a un’approfondita analisi strutturale.

In conclusione, dall’analisi effettuata sulla casa L è stato possibile verificare la corretta funzionalità della griglia di costruzione e delle pareti impiegate.

6.3 Casa Miriana (Casa M)

Avendo già applicato il sistema a due edifici prettamente regolari, facendone emergere i vantaggi del suo impiego, si cercherà ora di applicare il modulo dimensionale a un edificio più complesso dal punto di vista geometrico. In questo modo sarà possibile verificarne l'effettivo impiego anche in casi eccezionali dove, a causa del contesto, la geometria risulta essere vincolata. Tale edificio (*Fig.73-74-75-76*) è situato presso un comune montano, in zona climatica F, e presenta una pianta non regolare, dove solo uno dei quattro angoli risulta essere retto. Inoltre, si tratta di una struttura avente una pianta di modeste dimensioni, che si sviluppa su tre piani, e si conclude con un tetto a più falde. Si tratta quindi di un'ottimizzazione complessa. Data la presenza di un tetto a più falde, dove puntoni e cantonali poggiano direttamente sulle pareti, bisognerà tenere in considerazione i carichi concentrati che essi comportano. Tali sforzi non saranno analizzati mediante un'analisi strutturale, ma solo ipotizzati. Lungo la struttura sono presenti diversi fori strutturali dove sono state calcolate, attraverso un'analisi preliminare di una trave in semplice appoggio con i soli carichi del solaio superiore, i corrispondenti architravi. Questi saranno presenti solamente al piano terra e al piano primo, dove il solaio sarà realizzato per mezzo di elementi in lamellare sdraiato. Nel terzo piano, le pareti avranno il compito di sostenere la copertura puntualmente mediante l'inserimento di più montanti affiancati, evitando di inserire degli architravi visto la loro inutilità. In aggiunta, al piano terra, verranno raddoppiati i montanti per contrastare i carichi concentrati del balcone del piano superiore. A maggior ragione, in questo caso, la struttura necessiterà in seguito di una completa verifica strutturale.

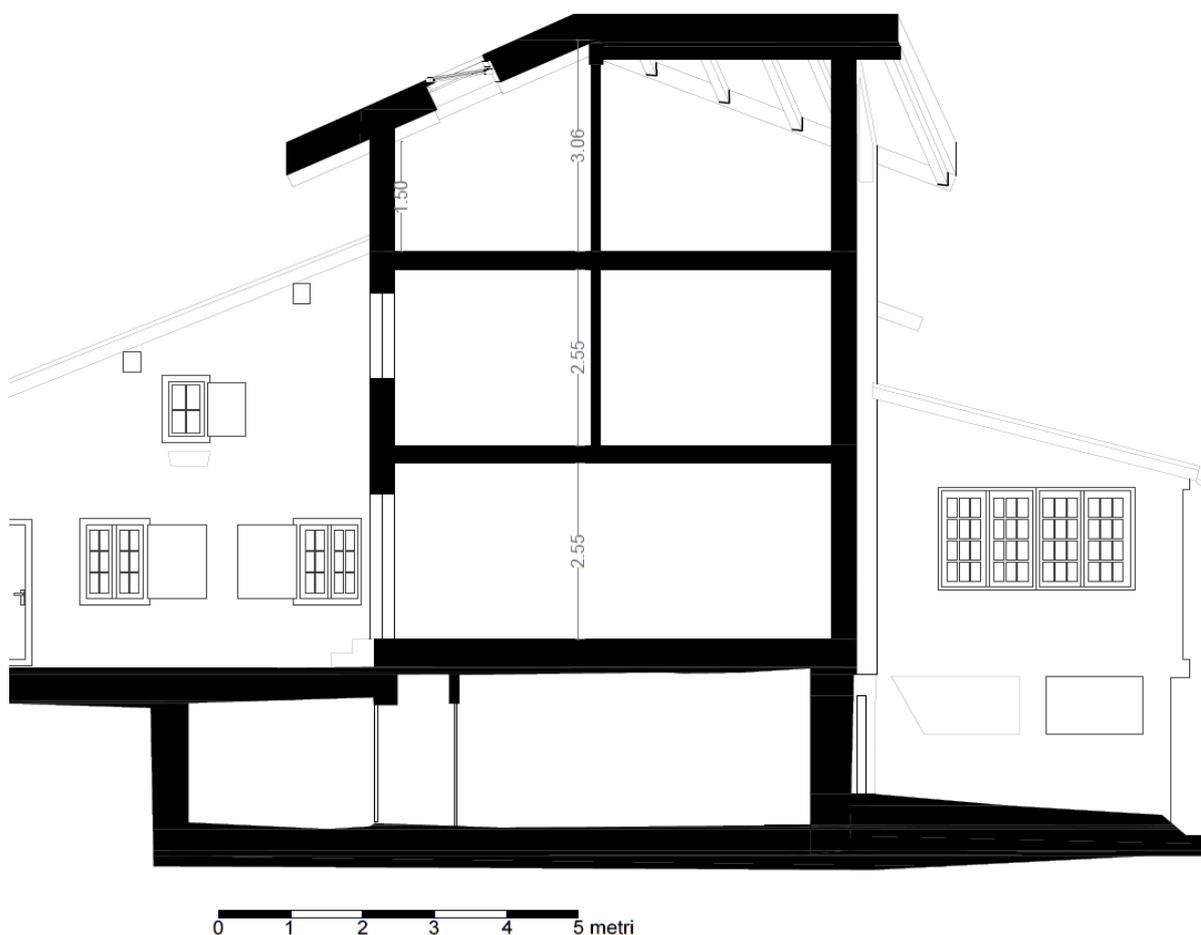


Figura 573: Sezione della Casa M. Misure in metri.

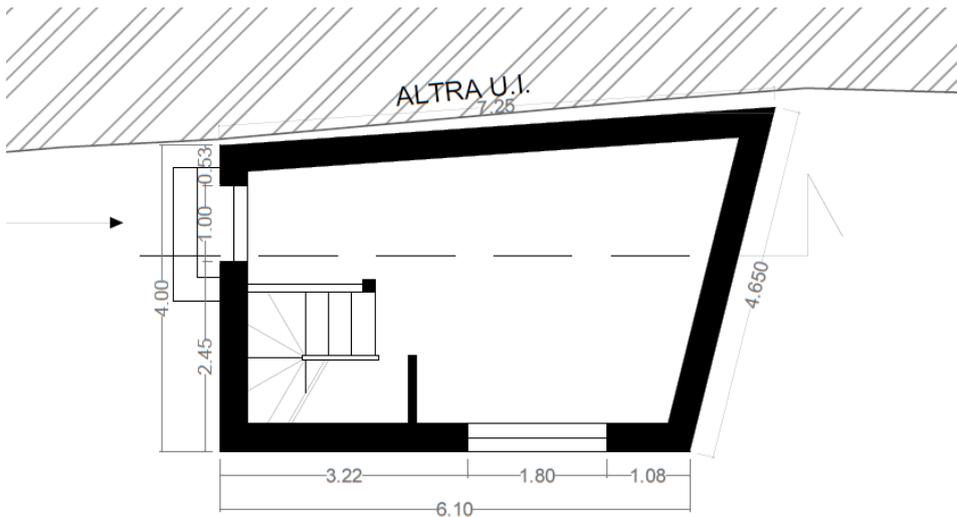


Figura 604: Pianta piano terra della Casa M. Misure in metri

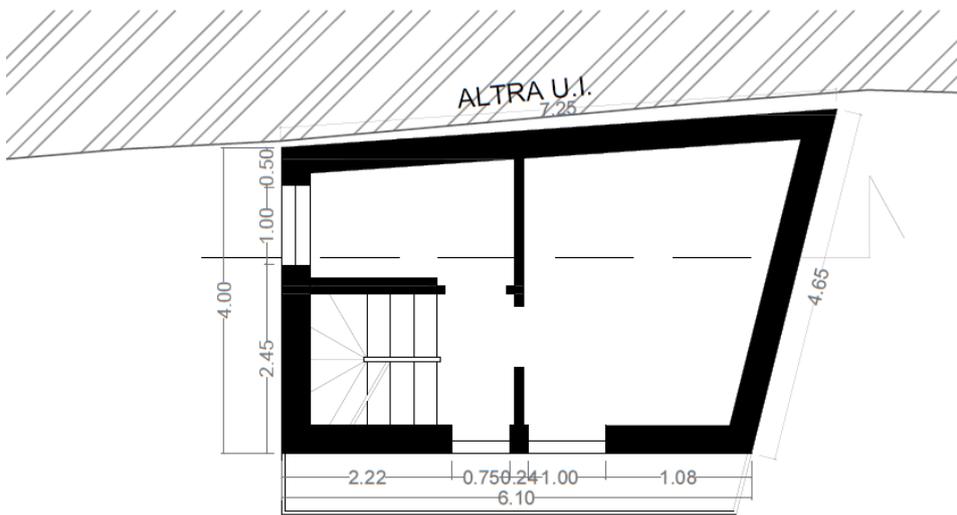


Figura 59: Pianta piano primo della Casa M. Misure in metri

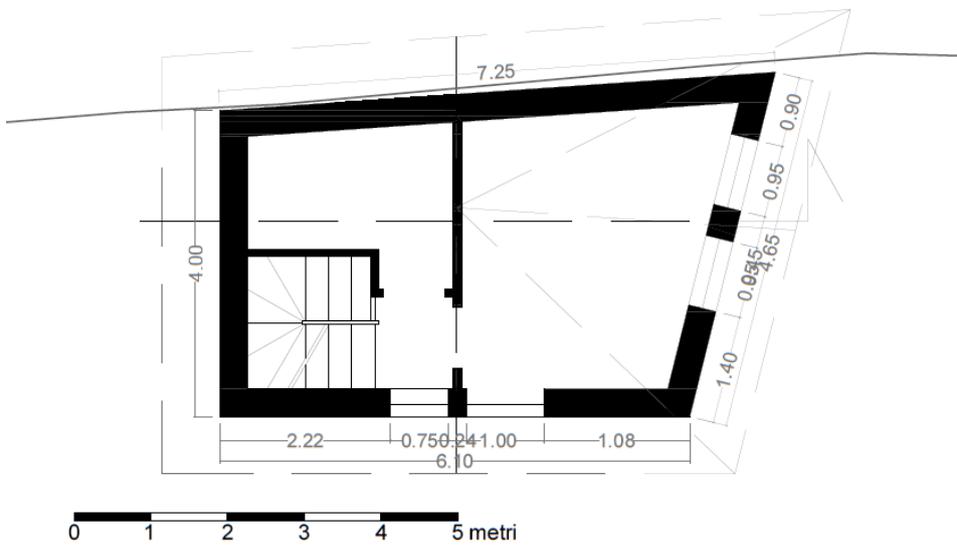
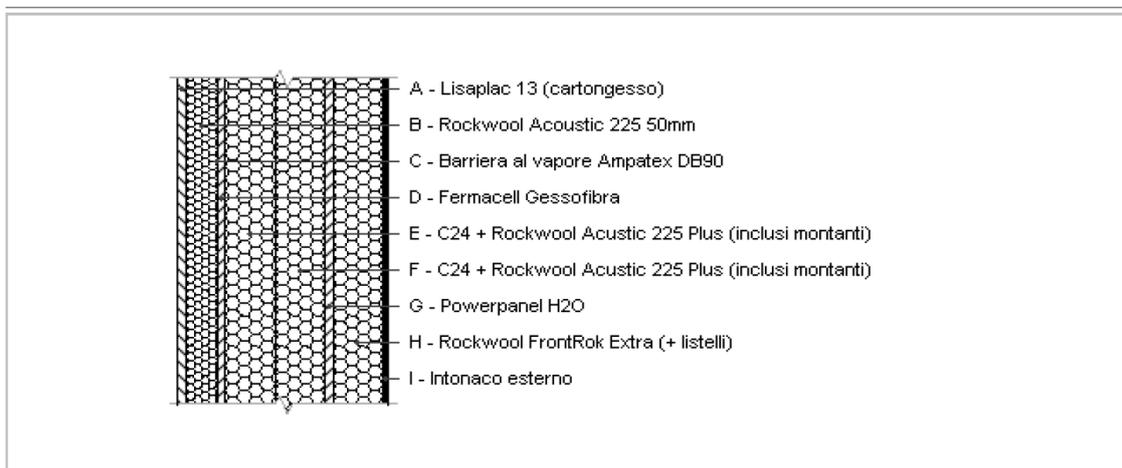


Figura 58: Pianta piano secondo della Casa M. Misure in metri

Prima di effettuare l'ingegnerizzazione, come nel caso precedente, è necessario effettuare un'analisi termo-energetica per analizzare la parete. Dall'analisi della stratigrafia (Fig.77) si evince che la trasmittanza termica soddisfa i limiti di legge vigente che, per questo edificio sito in zona climatica F, è pari a $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$. Come nei casi precedenti, anche in questo caso non è stata tenuta in considerazione la controparete interna durante la definizione dei locali interni ma, in accordo con il progettista architettonico, si prevede la sua realizzazione mediante un telaio in alluminio da 50 millimetri.



Spessore	337,8 mm	Trasmittanza	0,167 W/m ² K
Resistenza	5,984 m ² K/W	Massa superf.	78 kg/m ²
Tipologia	Parete esterna		
Descrizione	Parete impotizzata per l'edificio "Casa M" sito in zona climatica F		

Figura 77: Risultato prima analisi della stratigrafia e degli spessori da impiegare. L'analisi è stata fatta col software di calcolo energetico "Termolog".

Una differenza sostanziale rispetto alle altre due abitazioni è riscontrata nell'altezza interna. Nel progetto è stata stabilita pari a 2,55 metri per i primi due piani, dimensione minima dettata dalle normative della comunità montana, il che impedisce l'impiego delle pareti con 3 metri di altezza. Tuttavia, tale altezza non era obbligatoria ai fini del sistema, ma soddisfaceva i requisiti minimi per le altezze interne per gli edifici di civile abitazione delle città italiane. È prevista così una controventatura mediante pannelli con altezza pari a 2,75 metri dove, sottraendo lo spessore del pavimento, risulta essere uguale alla richiesta del progetto. Nell'ultimo piano, caratterizzato da altezze variabili, non si potrà mantenere una standardizzazione in altezza dei pannelli a causa della tipologia di copertura a più falde. Per questo piano, infatti, si dovranno studiare singolarmente tutti i pannelli da impiegare.

Verranno così ingegnerizzate due ipotesi: la prima (Fig.79) che rispecchia la pianta originale; la seconda (Fig.80) dove verrà applicato il solo modulo dimensionale, allineato alle varie pareti previste, senza l'impiego della griglia. Tale operazione è obbligatoria in quanto l'edificio presenta una geometria non compatibile con la griglia di costruzione, a causa della propria irregolarità (Fig.78).

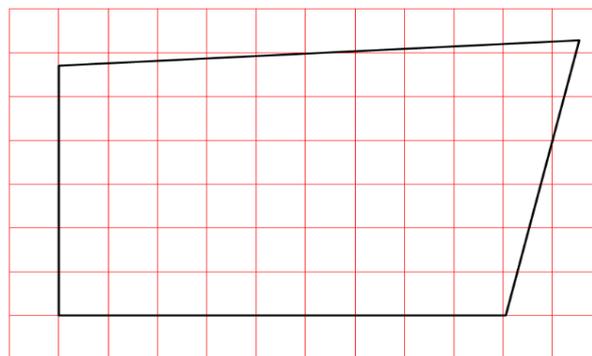


Figura 61: Applicazione non compatibile della sagoma dell'edificio alla griglia di costruzione.

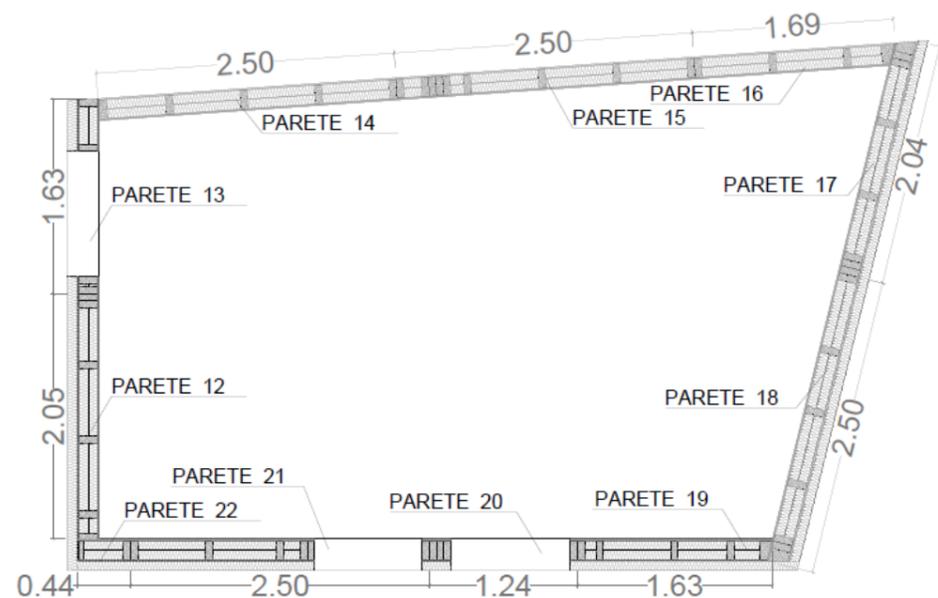
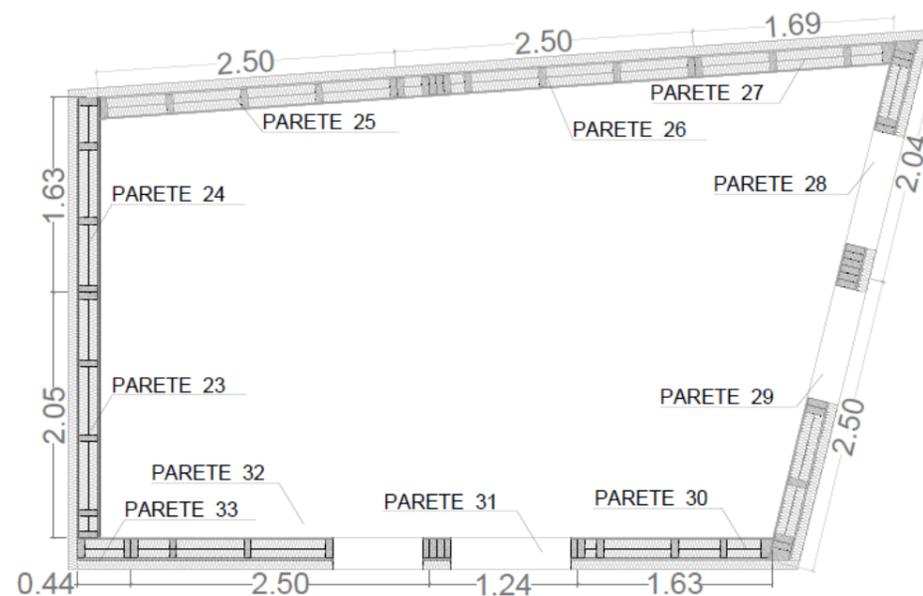
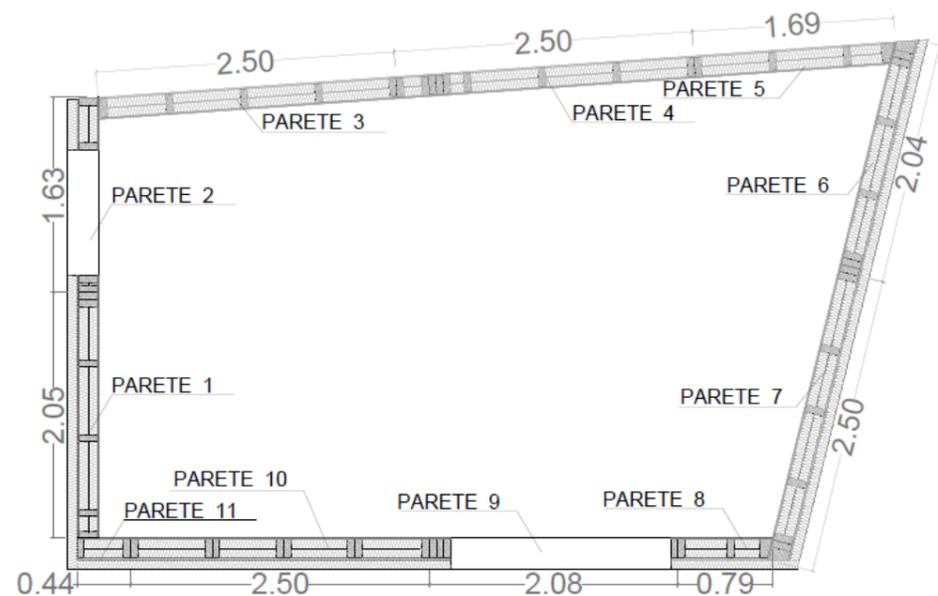


Figura 79: Ingegnerizzazione ipotesi 1, soluzione originale – Casa M. Misure in metri. In alto a sinistra il piano terra; In basso il piano secondo; In alto a destra il piano terzo

Tabella 21: Quantità di materiale ligneo strutturale impiegato nelle pareti dell'ipotesi 1 – Casa M

ID Parete	Materiale (mc)	Descrizione
1	0,191	Parete 2,053 m
2	0,170	Parete per apertura con architrave 1,632 m
3	0,177	Parete 2,500 m
4	0,275	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
5	0,146	Parete 1,687 m
6	0,256	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
7	0,235	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
8	0,101	Parete con rinforzo di montanti 0,791 m
9	0,225	Parete per apertura con architrave e rinforzo di montanti 2,080 m
10	0,250	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
11	0,059	Parete 0,448 m
12	0,191	Parete 2,053 m
13	0,190	Parete per apertura con architrave 1,632 m
14	0,177	Parete 2,500 m
15	0,275	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
16	0,146	Parete 1,687 m
17	0,256	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
18	0,235	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
19	0,170	Parete con rinforzo di montanti 1,631 m
20	0,145	Parete per apertura con architrave e rinforzo di montanti 1,240 m
21	0,216	Parete per apertura con architrave e rinforzo di montanti 2,500 m
22	0,059	Parete 0,448 m
23	0,106	Parete ribassato 2,053 m
24	0,084	Parete ribassato 1,632 m
25	0,151	Parete inclinato 2,500 m
26	0,268	Parete inclinato 2,500 m
27	0,107	Parete inclinato 1,687 m
28	0,224	Parete inclinato con apertura con rinforzo di montanti 2,035 m
29	0,186	Parete inclinato con apertura 2,500 m
30	0,129	Parete inclinato con apertura 1,631 m
31	0,106	Parete inclinato con apertura e rinforzo di montanti 1,240 m
32	0,164	Parete inclinato con apertura 2,500 m
33	0,044	Parete inclinato 0,448 m
Totale	5,714	Totale quantità di KVH impiegati (mc)
	68,190	Totale superficie utile interna (mq)
	0,084	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna

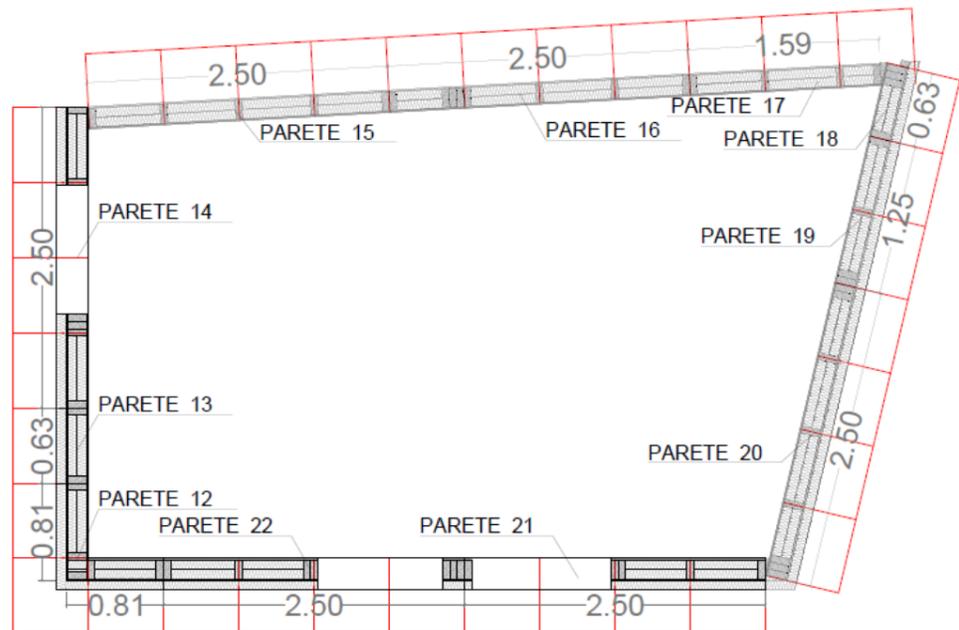
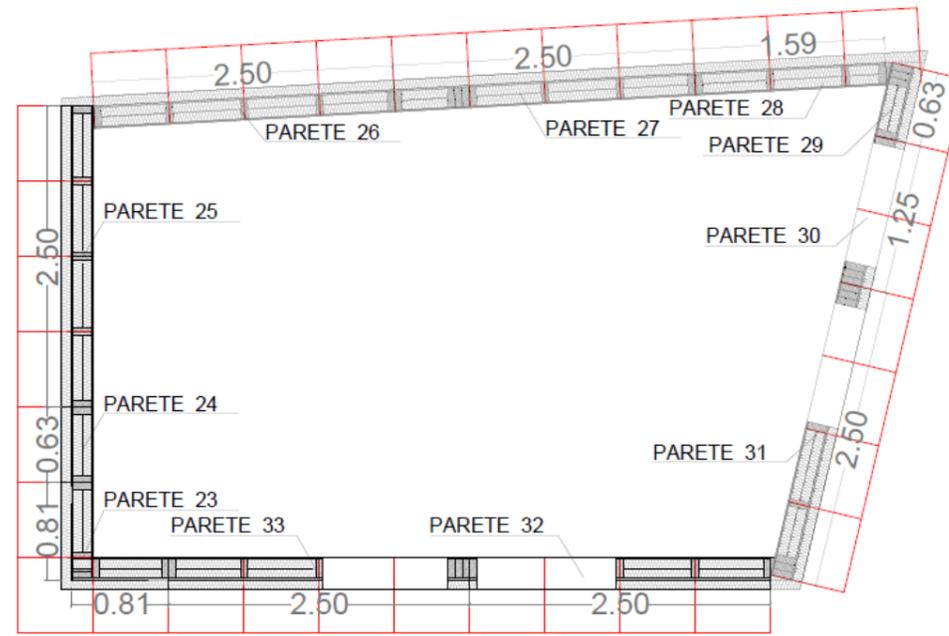
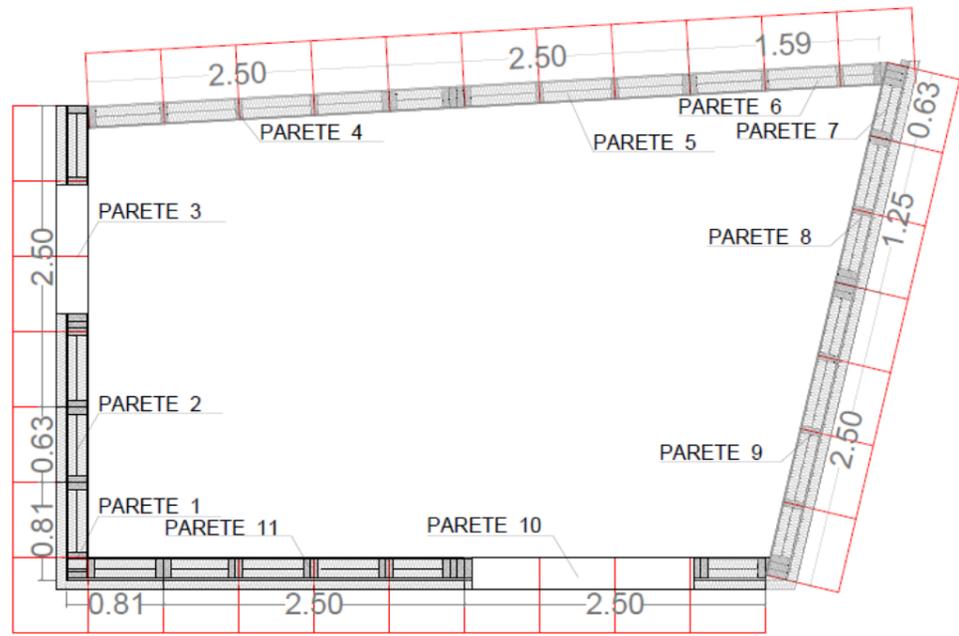


Figura 62: Ingegnerizzazione ipotesi 2, soluzione originale – Casa M. Misure in metri. In alto a sinistra il piano terra; In basso il piano secondo; In alto a destra il piano terzo

Tabella 22: Quantità di materiale ligneo strutturale impiegato nelle pareti dell'ipotesi 2 – Casa M

ID Parete	Materiale (mc)	Descrizione
1	0,153	Parete angolare sporgente
2	0,062	Parete 0,625 m
3	0,217	Parete per apertura con architrave 2,500 m
4	0,177	Parete 2,500 m
5	0,227	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
6	0,134	Parete 1,589m
7	0,113	Parete con rinforzo di montanti 0,625 m
8	0,125	Parete con rinforzo di montanti 1,250 m
9	0,250	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
10	0,242	Parete per apertura con architrave 2,500 m
11	0,300	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
12	0,153	Parete angolare sporgente
13	0,062	Parete 0,625 m
14	0,242	Parete per apertura con architrave 2,500 m
15	0,177	Parete 2,500 m
16	0,227	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
17	0,134	Parete 1,589m
18	0,113	Parete con rinforzo di montanti 0,625 m
19	0,125	Parete con rinforzo di montanti 1,250 m
20	0,250	Parete con rinforzo di montanti 2,500 m
21	0,213	Parete per apertura con architrave 2,500 m
22	0,264	Parete per apertura con architrave e rinforzo montanti 2,500 m
23	0,088	Parete angolare inclinato ribassato sporgente
24	0,040	Parete ribassato 0,625 m
25	0,117	Parete ribassato 2,500 m
26	0,148	Parete inclinato 2,500 m
27	0,255	Parete inclinato con rinforzo di montanti 2,500 m
28	0,067	Parete inclinato 1,589m
29	0,075	Parete inclinato con rinforzo di montanti 0,625 m
30	0,144	Parete inclinato con rinforzo di montanti 1,250 m
31	0,201	Parete inclinato con apertura e rinforzo montanti 2,500 m
32	0,120	Parete inclinato con apertura 2,500 m
33	0,155	Parete inclinato con apertura e rinforzo di montanti 2,500 m
Totale	5,371	Totale quantità di KVH impiegati (mc)
	68,550	Totale superficie utile interna (mq)
	0,078	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna
	6,49%	Risparmio rispetto alla soluzione originale

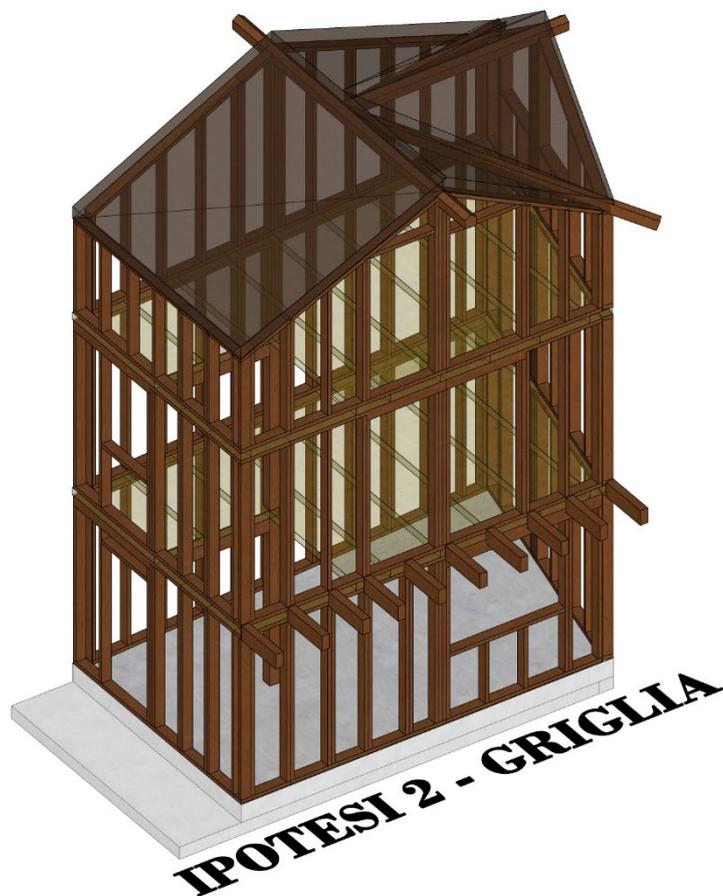


Figura 631: Modellazione delle due ipotesi di realizzazione della casa

Le pareti impiegate non sono state analizzate staticamente, ma solo geometricamente attraverso il modulo dimensionale stabilito in precedenza. La computazione dei vari elementi impiegati è stata effettuata in maniera precisa grazie all'ausilio dei modelli tridimensionali (Fig.81). In questi ultimi, infatti, sono state inserite le pareti e computati i vari elementi strutturali che componevano il telaio, quali montanti, traverse e architravi. Non sono stati computate le travi a sbalzo per la realizzazione del balcone in quanto, in questa fase preliminare, risulterebbero pressoché simili. Nell'analisi, come nel precedente caso, non sono stati computati i pannelli di controventatura ed eventuali isolanti, in quanto proporzionali alla superficie delle pareti.

Oltre alla computazione del materiale strutturale delle pareti, è stato calcolata la superficie interna per ogni ipotesi, che in questo preciso caso risulta pressoché uguale, al fine di calcolare il loro rapporto e ottenere un valore normalizzato, confrontabile senza l'influenza della dimensione effettiva del fabbricato. Sempre come nei casi precedenti, nell'ipotesi originale la dimensione massima dei pannelli è stata fissata pari a 2,5 metri, poiché realizzando pareti con una larghezza superiore, si andrebbe in contro a un incremento dei costi causati dalla necessità di effettuare un trasporto eccezionale.

Dalla tabella di confronto (Tab.23) è possibile notare che l'ottimizzazione del materiale nell'ipotesi due risulta superiore al 6% rispetto all'ipotesi originale. Inoltre, grazie all'impiego di un modulo dimensionale e di pareti strutturali standardizzate ai due piani inferiori, viene garantita una produzione molto più veloce.

Tabella 23: Confronto tra le due ipotesi di realizzazione della Casa M.

	Totale quantità di KVH impiegati (mc)	Totale superficie utile interna (mq)	Rapporto Quantità KVH/Superficie interna	Risparmio rispetto all'IPOTESI 1
IPOTESI 1	5,714	68,190	0,084	0,00%
IPOTESI 2	5,371	68,550	0,078	6,49%

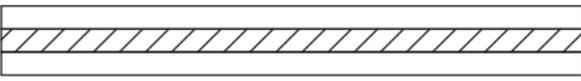
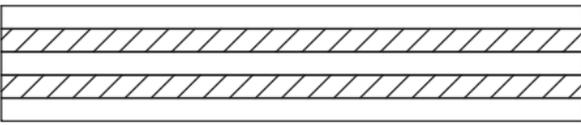
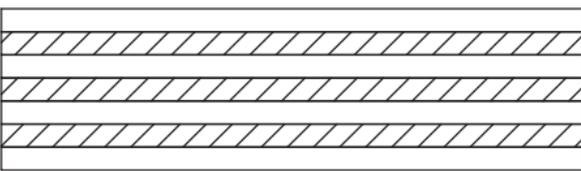
Questo edificio è stato scelto per mettere a luce alcuni aspetti dell'impiego della griglia di costruzione, grazie alle proprie irregolarità geometriche. La prima, già citata, riguardava la pianta irregolare con angoli diversi da 90° che, grazie all'impiego del modulo dimensionale, ha portato a avere una singola parete non standard a ogni piano. Nella seconda ipotesi, infatti, a esclusione delle due pareti presenti nei primi due piani e delle pareti al piano superiore, tutti gli altri setti risultano seguire perfettamente il modulo dimensionale. Volendo fare un confronto con gli altri due casi, possiamo notare che nella Casa-M il rapporto tra la quantità di elementi strutturali per le pareti e la superficie interna ottenuta, risulti maggiore a causa della dimensione ridotta dell'edificio. Attraverso questo progetto è stato dimostrato che è possibile applicare il modulo dimensionale anche a edificio che non presentano piante regolari con angoli a 90°.

6.4 Altre applicazioni

L'applicazione di un modulo dimensione negli ambienti mono e bi-familiari era attribuita alla volontà di identificare un processo di progettazione e produzione al fine di risparmiare su tempi e costi di realizzazione. Ciò ha portato alla definizione di pareti intelaiate con misure standard che eliminavano, o in alcuni casi limitavano, la produzione di sfridi. Tuttavia, le pareti ipotizzate mediante un modulo dimensionale, possono essere impiegate anche in strutture molto più grandi come condomini, hotel o edifici del terziario che si presentano con molti più piani

rispetto agli edifici mono e bi-familiari. Tuttavia, le sole pareti non riuscirebbero a sostenere l'enorme carico a cui sarebbero sottoposte. A oggi, gli edifici realizzati mediante pareti a telaio presentano principalmente uno, due e tre piani, mentre per edifici più alti, viene impiegato l'X-lam che, come già anticipato in precedenza, risulta più robusto seppur meno economico. Tuttavia, anche l'impiego dell'X-lam comporta degli svantaggi quando si trattano edifici multipiano. Lo spessore delle pareti portanti diventa importante, facendo lievitare i costi a ogni piano aggiunto. A titolo indicativo, per un edificio con cinque piani viene impiegato un pannello in X-lam con uno spessore di circa 16 centimetri, mentre per edifici fino a nove piani, tale valore può superare i 20 centimetri⁷⁰. A oggi i pannelli in X-lam possono arrivare fino a 34 centimetri di spessore (*Tab.24*). Questi valori riguardano solo i piani inferiori in quanto, salendo da piano in piano, i carichi da sopportare si riducono.

Tabella 24: Spessori pannelli X-lam commercializzati. A.Presutti, P.Evangelista. Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in X-lam (Dario Flaccovio Editore, 2014)

Numero di strati	Schema	Da (mm)	A (mm)
3		50	130
5		85	215
7		190	340

Risulta così antieconomico realizzare questo tipo di strutture attraverso una struttura a setti. Tuttavia, le pareti a telaio standardizzati secondo un modulo dimensionale possono essere impiegate come tamponamento. La loro applicazione avverrebbe al fine di evitare sfridi e ridurre il tempo di produzione. Tali pareti saranno quindi impiegate insieme a un altro materiale, che potrà essere il legno, l'acciaio o il calcestruzzo armato, che andrà a formare il telaio strutturale.

Con questo approccio (*Fig.85*), è possibile avvalersi di una produzione in massa di pareti con la possibilità di realizzare aperture secondo quanto detto in precedenza. In questo caso, le aperture non necessiteranno dell'inserimento dell'architrave ma solo di una traversa per delimitare il foro strutturale e la parete. Per ottimizzare al meglio questa modalità costruttiva, che vede l'impiego delle pareti standardizzate e un telaio spaziale, bisognerà avere delle luci nette tra pilastri che tengono conto del modulo dimensionale. In questo caso, il modulo dimensionale dovrà essere pari alla larghezza della parete più grande, quindi 2,5 metri. Questa scelta è dovuta alla volontà di massimizzare l'impiego dei materiali a parità di superficie occupata. Infatti, volendo impiegare come dimensione del modulo la dimensione delle pareti più piccole, il risultato non sarebbe ottimale dal punto di vista del materiale impiegato.

⁷⁰ A.Presutti, P.Evangelista. Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in X-lam (Dario Flaccovio Editore, 2014)

Grazie al fatto che le pareti non avranno più un compito strutturale, non sarà necessario allineare gli infissi lungo i vari piani (Fig.82). L'unico compito strutturale delle pareti che permanerà anche in questo sistema, sarà quello di contrastare le forze orizzontali agenti su di esse.

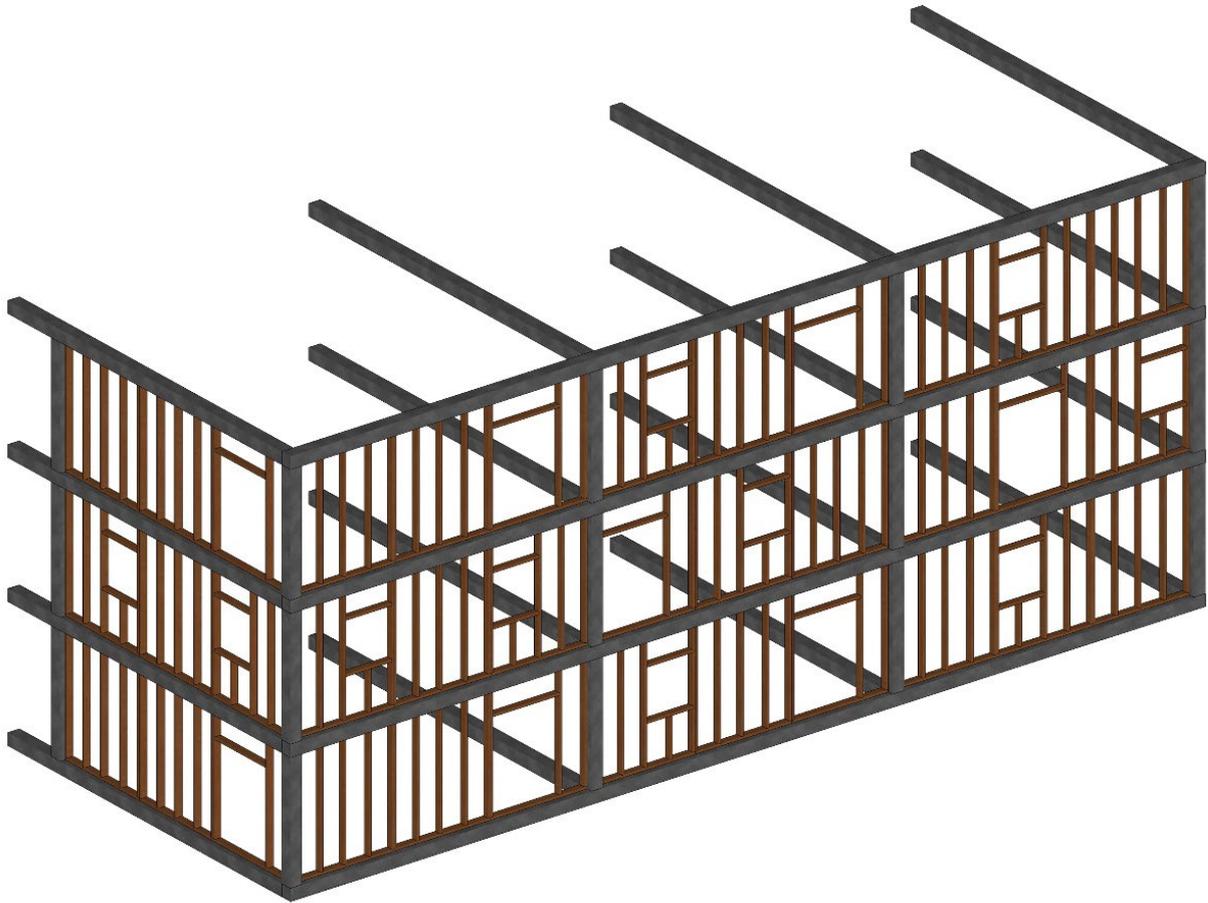


Figura 64: Parte di un modello tridimensionale composto da una struttura in C.A. e delle pareti intelaiate che fungono da tamponamento. La parete standardizzata impiegata misura 2,5 metri, impiegando sulla facciata principale 3 pareti per un totale di 7,5 metri, misura coincidente con la luce netta tra due pilastri.

7 Realizzazione delle pareti e possibili variazioni

È stato citato più volte il fatto che, applicando un modulo dimensionale per la definizione delle pareti intelaiate, queste ultime vengono progettate e prodotte più velocemente. Inoltre, la procedura con cui esse vengono realizzate, è stata solo accennata, senza mai addentrarsi nel vero processo progettuale e produttivo. La loro produzione, infatti, è frutto di un iter più complesso che parte dalla loro progettazione, passa dalla produzione e si conclude con lo stoccaggio.

Nella prima fase il progettista deve decidere i tipi di pannelli e lastre da impiegare, sia internamente che esternamente, in virtù delle caratteristiche dell'edificio, inclusa la verifica strutturale. Geometricamente si deve basare sulla larghezza delle pareti desiderate e, soprattutto, sulla loro altezza. Una scelta errata di queste dimensioni porterebbe a una produzione eccessiva di sfridi. Nella maggior parte dei casi non vengono superate mai delle larghezze che superano i 2,5 metri per evitare di andare in contro a dei costi ulteriori, dovuti a un trasporto eccezionale. Determinata la posizione e le dimensioni delle pareti, si procede alla loro composizione. Questa può avvenire impiegando un A.I. (Artificial Intelligence) tramite l'impiego di software particolari, o in autonomia, impiegando dei semplici modellatori bi/tridimensionali. La differenza ricade principalmente nel tempo impiegato che, tramite l'A.I., viene notevolmente ridotto rispetto a un approccio autonomo. Bisogna comunque ricordare che, pur impiegando l'intelligenza artificiale, sarà necessario intervenire sul risultato per risolvere alcune situazioni particolari che i software non riescono a interpretare. Uno di questi casi è il disallineamento dei montanti lungo i piani.

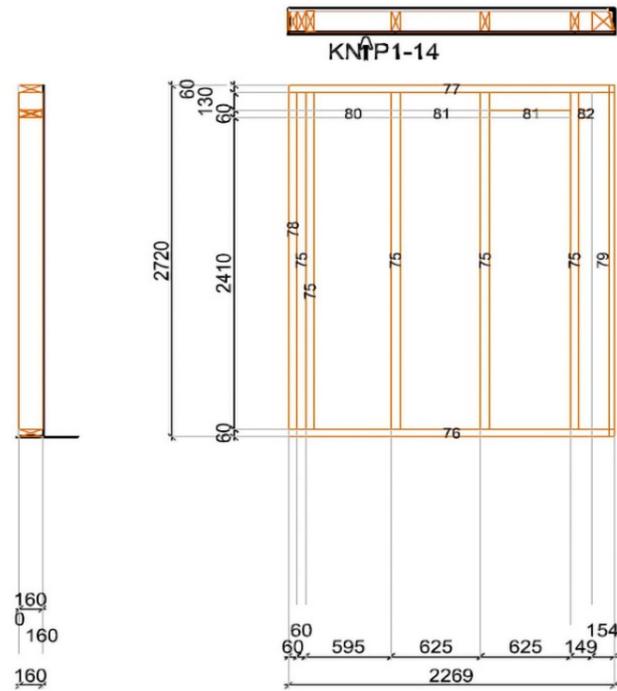
Determinata la composizione delle pareti si procede con la produzione della tavola di montaggio di ogni singolo pannello. Anch'essa può essere prodotta mediante l'impiego di un software che estrapola le informazioni in autonomia, o mediante la realizzazione autonoma dei vari elaborati. La tavola di montaggio risulta contenere i disegni tecnici necessari per produrre la parete in modo corretto. Darà le indicazioni su come posizionare i montanti e le traverse e come fissare i pannelli e le lastre controventanti al telaio, oltre ai materiali da impiegare. Il montaggio della parete può avvenire in diversi modi a seconda degli strumenti che si hanno a disposizione.

Successivamente si passa alla produzione vera e propria. I montanti possono essere prodotti sia attraverso operazioni manuali, con l'impiego di strumenti di taglio, sia attraverso operazioni automatizzate, impiegando delle macchine CNC descritte in precedenza. Il posizionamento dei montanti, invece, avviene manualmente su un piano appositamente preparato, seguendo i disegni di produzione, dopodiché si passa alla chiodatura dei montanti e delle traverse. Questa può avvenire mediante strumenti manuali, come la sparachiodi, o attraverso apposite macchine che procederanno anche al taglio e alla chiodatura dei pannelli (Fig.83).



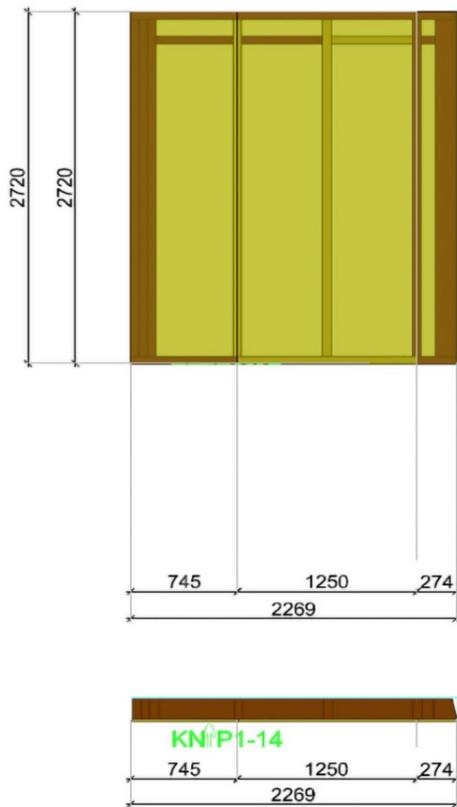
Figura 65: Montaggio pareti in fabbrica. Linea di produzione per pareti (Homag)

SISTEMA STRUTTURALE KVH



Vista frontale

PANNELLATURA FERMACELL



Vista in pianta

SCHEMA ASSEMBLAGGIO PARETE - KN -

Lato Interno

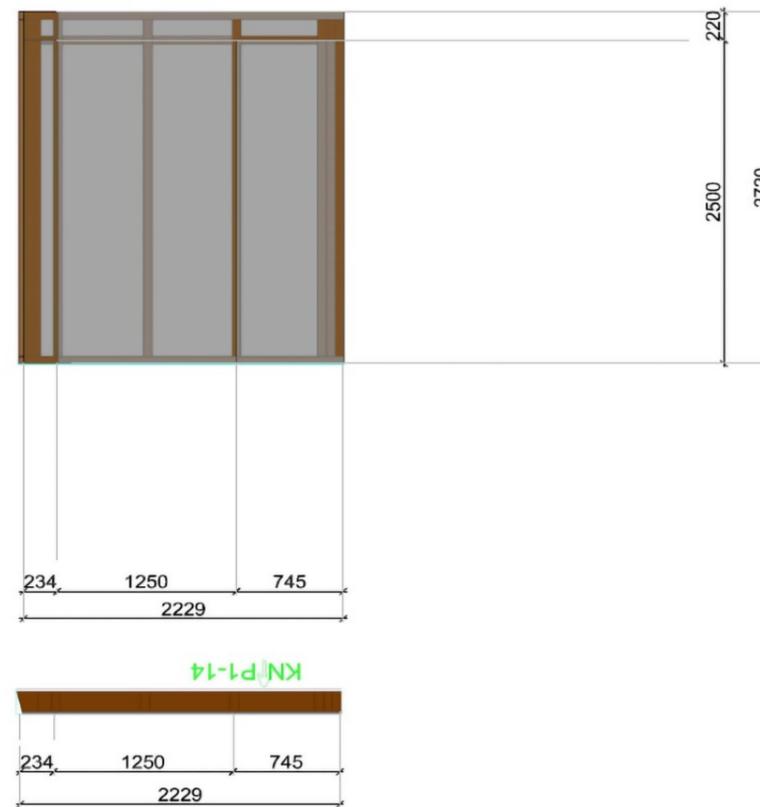
Pannello in Fermacell_sp. 1,25 cm con adesivo per giunti
 Parete KVH 6X16 cm con lana minerale sp. 6+6 cm
 Pannello in Superpan_sp. 1,3 cm

Lato Esterno

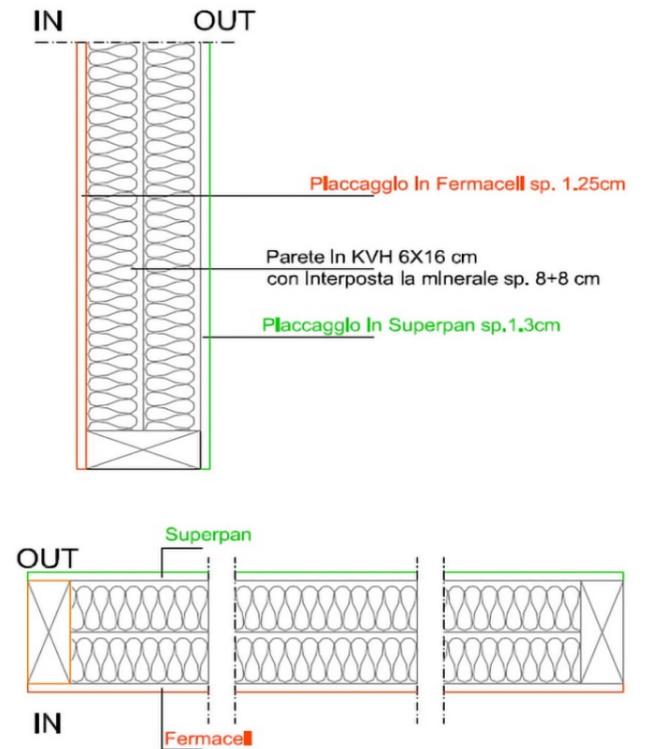
Pos	Pz	base (larghezza)	altezza	lunghezza
75	5	60	160	2600
76	1	60	160	2269
77	1	60	160	2269
78	1	60	160	2600
79	1	160	160	2600
80	1	60	160	535
81	2	60	160	565
82	1	60	160	89

Vista interna (lato Fermacell)

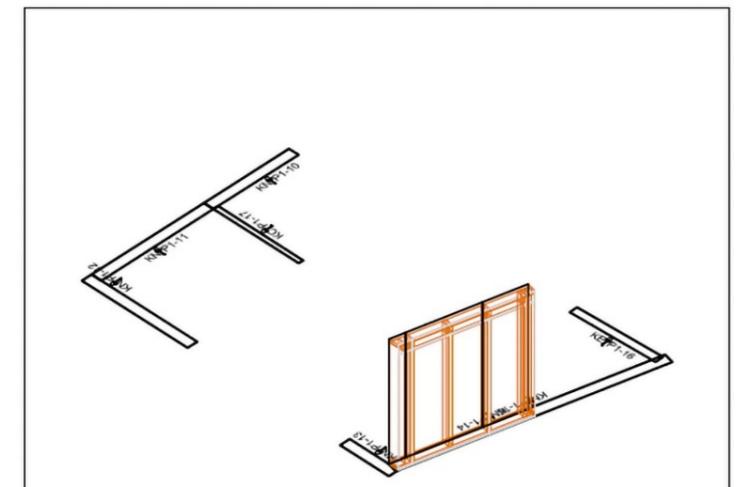
PANNELLATURA CON SUPERPAN



PARTICOLARE STRATIGRAFIA PARETE KN



ASSONOMETRIA COMPLETA



CHIODATURA

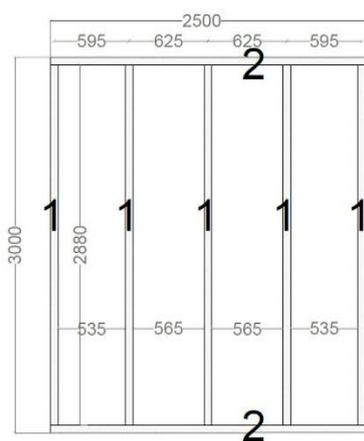


Figura 66: Tavola di montaggio di una parete. Essa contiene tutti i dati necessari per la produzione. La tavola è realizzata mediante un software che utilizza l'intelligenza artificiale. (Abitare. Case e strutture in legno)

Nella esempio di tavola di montaggio di una parete (*Fig.84*) è possibile individuare un elenco di “elementi” numerati, con relativo schema di montaggio. Quella parte è dedicata al montaggio del telaio, dove è mostrata la posizione di ogni montante e ogni traversa, al fine di eseguire correttamente l’operazione. Per agevolare la posizione, i montanti e le traverse vengono numerati, in virtù della tavola di montaggio mentre vengono prodotti. Questo rende più facile la loro individuazione e posizionamento. Tuttavia, se venisse considerata una parete regolare, tale operazione risulterebbe semplice poiché gli elementi da impiegare sono limitati. Se invece la parete inizia a essere più complessa, ci si potrebbe ritrovare davanti un quantitativo di elementi tutti diversi che porta il montatore a spendere maggior tempo sia a identificare che a posizionare i vari elementi del telaio. Inoltre, quando viene considerata un’intera abitazione, che in genere supera le venti pareti, il tempo perso per identificare i vari elementi potrebbe essere incrementato. Il processo termina con lo stoccaggio della parete in attesa del suo trasferimento in cantiere.

7.1 Montaggio delle pareti standardizzate

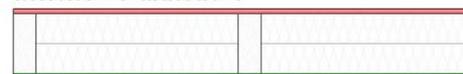
Il processo delle pareti che si avvalgono di un modulo dimensionale risulta simile a quanto già descritto, ma con alcune essenziali differenze. L’impiego di un modello standard (*Fig.85*) indica la possibilità di non impiegare alcun software aggiuntivo in quanto le pareti sono già state catalogate, a meno di modifiche particolari. Tali modifiche possono riguardare principalmente i



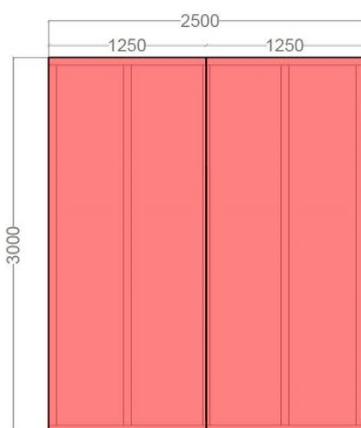
Vista interna - telaio

N.Posizione	Pezzi da produrre	base (millimetri)	altezza (millimetri)	lunghezza (millimetri)
1	5	60	160	2880
2	2	60	160	2500

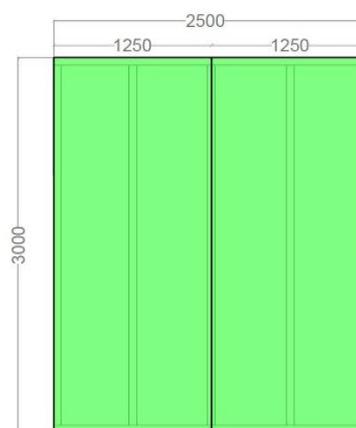
Interno - Pannello 1



Esterno - Pannello 2



Vista interna - pannello 1



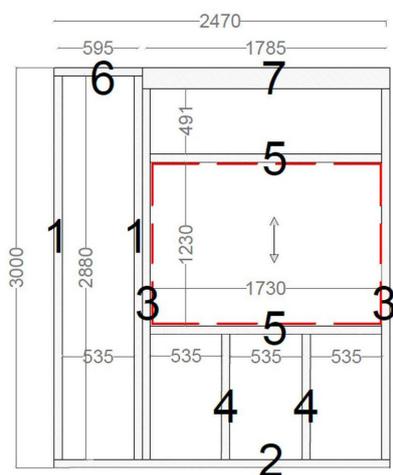
Vista esterna - pannello 2

Figura 67: Esempio di tavola di montaggio di una parete standard da 2,5 metri senza fori strutturali

fori e/o l'aggiunta di montanti che, a livello di modellazione sia tridimensionale che bidimensionale, risulta essere piuttosto semplice, riuscendo anche a produrre delle tavole di montaggio in breve periodo. Inoltre, seguendo un modulo dimensionale, molti elementi risulteranno simili, dando la possibilità di poter essere raggruppati in poche sezioni da produrre in massa. Quanto detto comporta alcuni vantaggi sia nella progettazione che nella produzione. Nella prima sarà possibile ridurre il tempo sia nel posizionamento e definizione delle pareti, sia nello sviluppo delle tavole di montaggio, in quanto molte pareti avranno le medesime caratteristiche.

Nella produzione, come nella progettazione, il risultato della standardizzazione porterà ad avere degli elementi uguali che andranno a comporre il telaio, con conseguente facilità d'individuazione durante il processo di montaggio. Inoltre, grazie al modulo dimensionale associato alle pareti, non solo verrà evitato lo sfrido dei pannelli o delle lastre, ma verrà risparmiato anche il tempo che tale operazione avrebbe richiesto.

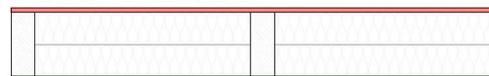
Da un'analisi effettuata sulle variazioni possibili dei pannelli standard, si è stimato che il numero di elementi standard per ogni edificio oscilla tra i 10 e i 15, escludendo eventuali architravi. Si nota infatti che, nel caso di una parete complessa come quella da 2,5 metri con un foro strutturale e un'architrave (Fig.86), il numero di elementi standard da produrre risulta essere pari a 7.



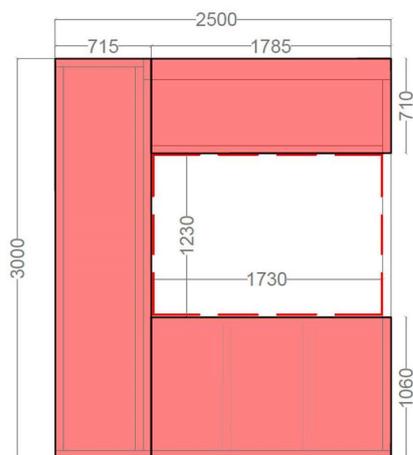
Vista interna - telaio

Pos	Pz	base (millimetri)	altezza (millimetri)	lunghezza (millimetri)
1	2	60	160	2880
2	1	60	160	2500
3	2	60	160	2780
4	4	60	160	940
5	2	60	160	1445
6	1	60	160	655
7	1	160	160	1845

Interno - Pannello 1



Esterno - Pannello 2



Vista interna - pannello 1



Vista esterna - pannello 2

Figura 68: Esempio di tavola di montaggio di una parete standard da 2,5 metri con foro strutturale per finestra

Da quanto detto è possibile individuare un quantitativo di tempo risparmiato, sia di progettazione che di produzione, che andrà a diminuire il costo della manodopera e della progettazione.

7.2 Variazione delle pareti in virtù del contesto

Come è stato evidenziato dall'applicazione del modulo dimensionale alla casa M, il contesto può comportare una variazione delle pareti da impiegare al fine di ottimizzare il materiale. Nella realtà, la parete deve inserirsi in un contesto con dei vincoli sia interni, come la statica dell'edificio e le prestazioni energetiche o più semplicemente la disposizione interna, sia esterni, come altezze massime e minime da rispettare, i confini e la morfologia del luogo. Le pareti citate in precedenza, frutto di un adattamento al modulo dimensionale, erano state standardizzate al fine di essere impiegate nella maggior parte dei casi che richiedevano altezze interne nette di circa 2,75 metri e montanti alti 16 centimetri. Tuttavia, è possibile effettuare delle variazioni a tali parametri.

La variazione in altezza può dipendere da diversi fattori sia esterni che interni. Un esempio potrebbe essere quello di avere dei soffitti alti per distribuire meglio la luce nell'ambiente, o quello di volere dei soffitti bassi al limite della normativa. Quest'ultimo caso è stato affrontato nella Casa-M. I pannelli e le lastre impiegate per definire le pareti standard erano alte 2,75 metri, al fine di ottenere un'altezza conforme con il progetto. È stato così dimostrato che è possibile diminuire l'altezza delle pareti, ma bisogna sempre confrontarsi con il mercato e considerare cosa offre nel momento in cui si progetta l'edificio. L'obiettivo è quello di ridurre al minimo i costi e gli sfridi. Bisognerebbe evitare di richiedere delle misure fuori produzione, poiché inciderebbero negativamente sul costo della parete finita. Aumentare l'altezza, invece, potrebbe a una serie di conseguenze non da sottovalutare. Dalla ricerca fatta in precedenza, è stato riscontrato che il valore di 3 metri d'altezza era quello più alto e allo stesso tempo più comune a tutti i pannelli e lastre. Incrementare l'altezza netta interna porterebbe a dover scegliere di impiegare pannelli o lastre superiori a 3 metri, che a oggi non sono prodotti mediante produzione di massa. Se tale richiesta risulta vincolante, sarà possibile seguire solamente due strade: la prima consiste nell'inserire più pannelli o lastre (Fig.87) o utilizzare le tavole a 45° per la controventatura esterna; la seconda consiste nel richiedere dei pannelli su misura. In entrambi i casi l'immediata conseguenza si riscontrerebbe nell'aumento del prezzo. Nel primo caso ci sarà dello sfrido in altezza in aggiunta alla necessità di inserire una traversa di supporto orizzontale, oltre all'incremento del tempo di produzione. Nel secondo caso si avrà un aumento del costo rappresentato dall'acquisto dei pannelli fuori misura standard. In questi casi si effettua un'analisi economica al fine di rendere meno impattante le loro conseguenze.

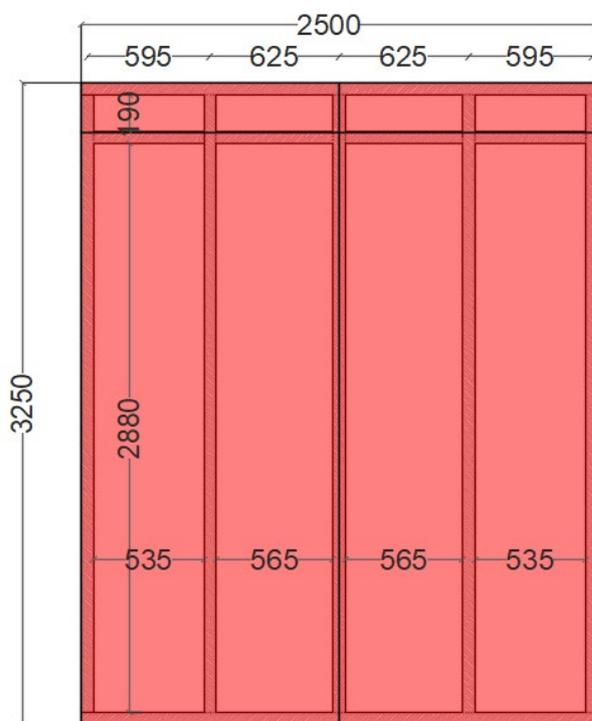


Figura 69: Ipotesi variazione in altezza (325cm). Ciò comporta l'impiego di maggior materiale per la produzione.

Oltre all'altezza, è possibile variare ulteriormente anche la larghezza. Questa possibilità, tuttavia, implica una variazione del modulo dimensionale. In precedenza, quest'ultimo era stato scelto pari a 0,625 metri, scelta che derivava dall'analisi dei pannelli e delle lastre in commercio e dalla volontà di massimizzare il risparmio. Volendo impiegare pannelli con larghezza inferiore, come 1,2 metri o anche 1 metro, ne consegue una variazione del modulo dimensionale. Ai fini progettuali tale operazione non incide ma, allo stesso tempo, comporta un leggero aumento di materiale impiegato se rapportato, normalizzandolo alla superficie coperta, al modulo dimensionale intrapreso in precedenza.

L'ultima variazione dimensionale riguarda lo spessore. In questo caso, tale variazione può essere dovuta a due fattori: a causa della statica della struttura o delle prestazioni energetiche dell'involucro. Nel primo caso, in seguito alle analisi strutturali, può risultare necessario sovradimensionare i montanti, o anche ridurli se è consentito dall'analisi, a causa della presenza di carichi diversi da quelli previsti. Nel secondo caso, invece, la volontà di aumentare o diminuire lo spessore della parete portante ricade nelle prestazioni energetiche che possono risultare troppo basse o eccessivamente alte. In questo caso, incide soprattutto la prestazione termo-energetica dell'involucro desiderata dal cliente e limitante dalla normativa vigente. In questa variazione, tuttavia, i pannelli e le lastre impiegate non variano e, di conseguenza, nemmeno il modulo dimensionale. La variazione sarà riscontrata solamente nello spessore della parete finale e dal quantitativo di materiale strutturale impiegato per il telaio. Inoltre, avendo già intrapreso la strada di impiegare la griglia di costruzione mediante il filo interno della parete, la progettazione attraverso la griglia di costruzione non varia. Bisogna ricordare che anche lo spessore dei pannelli potrebbe cambiare; tuttavia, tale variazione riguarda pochi millimetri, o anche decimi di millimetro, il che rende tale variazione ininfluenza ai fini dell'approccio al modulo dimensionale.

In conclusione, è possibile apporre delle modifiche sia al modulo dimensionale che alla dimensione delle pareti. Tuttavia, ciò consegue quasi sempre un aumento di materiale a parità di superficie coperta, causando un incremento del costo finale dell'edificio. La scelta migliore sarebbe quella di seguire il modulo dimensionale come già stabilito in precedenza, ma la realtà può portare il progettista a rispettare dei vincoli e procedere con eventuali modifiche.

8 Conclusioni

Seppur l'approccio industriale nel campo edile non risulti essere un tema recente, ancora oggi non è possibile parlare di un processo di prefabbricazione paragonabile a quello del settore meccanico. Dalle analisi è emerso che, anche impiegando elementi prefabbricati per la realizzazione di edifici, i componenti prodotti non risultano quasi mai ottimizzati. Tuttavia esistono alcuni esempi dove il processo di prefabbricazione, applicato agli edifici, ha raggiunto elevati livelli di ottimizzazione. Tali casi sono riscontrati principalmente nell'ambito nelle strutture ricettive, dove viene studiato un modulo tridimensionale composto da elementi prodotti in serie. In questo modo, gli elementi impiegati sono ottimizzati al massimo, al fine di ridurre al minimo gli sfridi. Inoltre, grazie a tale ottimizzazione, il quantitativo di elementi impiegati si riduce all'indispensabile, influenzando positivamente su tempi di realizzazione e costi. D'altronde però, questo metodo non viene quasi mai impiegato per la realizzazione di edifici mono e bi-familiari. Ciò è dovuto alla rigidità architettonica che tale metodologia comporta e che, soprattutto negli edifici privati, si scontra sempre con la volontà del cliente, che pretende un'architettura unica e personalizzata.

Per ovviare a quanto detto, nella realizzazione di edifici mono e bi-familiari è possibile ricorrere a un modulo dimensionale, al fine di ottimizzare quanto più possibile gli elementi da impiegare e ridurre sia i costi che i tempi di produzione. L'utilizzo di un modulo dimensionale non rappresenta una metodologia innovativa: in passato veniva impiegata la coordinazione modulare, dove vari produttori di arredi, sia a livello nazionale che internazionale, impiegavano dimensioni standard con cui progettare e realizzare i loro prodotti. Grazie alla coordinazione modulare il cliente poteva comporre il proprio arredo impiegando diversi prodotti, a seconda delle proprie esigenze, pur realizzati da aziende diverse. A quel tempo, si cercava di applicare la coordinazione modulare anche alla struttura di un edificio, principalmente per velocizzare il processo di produzione grazie alla standardizzazione degli elementi da impiegare.

Questo tipo di approccio è stato abbandonato a causa dell'utilizzo di macchine sempre più performanti in termini di velocità e precisione, adoperate per la produzione degli elementi prefabbricati. Seppur creati per velocizzare la produzione degli edifici, il loro impiego ha portato la maggior parte dei progettisti ad abbandonare nel tempo ogni modulo dimensionale. Infatti, grazie alle nuove tecnologie, qualsiasi elemento con forma o dimensione variabile risultava facilmente realizzabile. Questo nuovo approccio ha portato alla produzione di molti scarti e a un relativo incremento dei costi e dei tempi di produzione. Infatti, nonostante l'uso di macchine performanti per la realizzazione dei prefabbricati, bisogna considerare anche la loro progettazione e il loro assemblaggio, che avvengono quasi sempre grazie all'intervento dell'uomo. La moltitudine di variazioni che gli elementi prefabbricati presentano al momento della produzione, comporta altresì l'aumento dei tempi di realizzazione.

Viste le caratteristiche del modulo dimensionale e la volontà di ottimizzare un sistema costruttivo per ambienti di modeste dimensioni, la tecnologia costruttiva che meglio si presta a questo fine è quella che fa uso di pareti intelaiate. Questo sistema costruttivo, infatti, risulta essere quello che meglio sfrutta i materiali quando l'edificio non supera i tre piani. Inoltre, per realizzare le pareti intelaiate, vengono impiegati diversi elementi quali sezioni in legno, pannelli e lastre, commercializzati con misure più o meno standard. Per ottimizzare ulteriormente il processo di produzione delle pareti, è bastato dimensionare il modulo mediante un sottomultiplo dei pannelli controventanti impiegati. In questo modo si riducono gli sfridi e si ottengono scarti che possono essere reimpiegati a condizione che non vengano considerati fori strutturali per eventuali finestre,

porte o porte finestre. Inoltre, grazie al modulo dimensionale definito, è possibile realizzare una griglia di costruzione mediante la quale si può già progettare, in fase preliminare, schematizzando e ingegnerizzando l'edificio.

L'impiego di questo sistema comporta alcune regole per un corretto utilizzo, al fine di ottenere una vera e propria ottimizzazione degli elementi impiegati. Il modulo dimensionale può essere applicato a qualsiasi forma geometrica dell'edificio, mentre la griglia di costruzione può essere utilizzata solo quando la pianta risulta regolare e presenta angoli a 90°. Seppur potendo stabilire diverse pareti standard, bisogna impiegare quanto più possibile quelle che ottimizzano maggiormente il quantitativo materiale, che in genere corrispondono a quelle più grandi. Le dimensioni dei fori strutturali per porte, porte finestre e finestre, devono essere tali da consentire il loro inserimento senza l'aggiunta di montanti per la sola delimitazione del foro strutturale. Ciò si traduce nell'adoperare infissi con una larghezza paragonabile alla luce netta dei montanti già posizionati, anche non sequenziali. Con queste poche e semplici regole è possibile ottenere un risparmio in termini di quantitativo di materiale, grazie alla limitata produzione di sfridi.

Mediante l'analisi dei tre edifici studiati e ingegnerizzati, è stato riscontrato un risparmio variabile da caso a caso. Il caso dove è stato riscontrato il più alto risparmio di elementi riguarda la casa L, dove c'è stata un'ottimizzazione superiore al 12% rispetto all'ingegnerizzazione originale. Soltanto in una sola ipotesi, dal confronto con la soluzione originale, è stato riscontrato un impiego superiore di materiale, dovuto al non corretto utilizzo della griglia di costruzione. Ciò porta a comprendere che l'impiego di un modulo dimensionale, non sempre determina un effettivo risparmio di materiale. Tali strumenti devono essere impiegati con consapevolezza, al fine di ottenere il miglior risultato possibile. Per tale motivo il loro utilizzo deve essere presente già in fase preliminare, onde evitare di andare incontro a modifiche consistenti nelle successive fasi, con relativo aumento dei tempi.

Oltre ai vantaggi che riguardano principalmente la riduzione dei componenti da adoperare, tale approccio genera anche una riduzione dei tempi e dei costi per la progettazione e la produzione. Questa riduzione è dovuta alla standardizzazione delle pareti che comporta l'impiego di un modulo dimensionale. Infatti, l'utilizzo di diverse pareti standard con uguale dimensione e composizione, porta a una rapida progettazione e realizzazione, garantita da una produzione di massa.

Il modulo e le pareti standard sono stati dimensionate al fine di ottimizzare l'impiego di componenti, quali ad esempio lastre in cartongesso e pannelli di legno, reperibili in commercio. Inoltre, è stata dimostrata la possibilità di apportare delle variazioni agli elementi standard, sia in termini dimensionali che nell'utilizzo dei materiali, al fine di adattare il sistema a qualsiasi contesto.

Tuttavia, è necessario considerare anche un altro limite del modulo dimensionale. Il suo impiego porta a dover studiare in modo approfondito l'ambiente interno dell'abitazione. Ripartizioni e arredi devono potersi inserire correttamente in un ambiente dettato da dimensioni standard. Ciò non si traduce in un obbligo, bensì in una regola per il corretto impiego della griglia e del sistema di prefabbricazione. Infatti, se ad esempio una finestra dovesse essere spostata o ridotta a causa di ripartizioni interne o presenza di arredi, senza tener in considerazione le linee guida del modulo dimensionale, si andrebbe in contro a un incremento di elementi da impiegare.

Tutte le regole elencate per il corretto impiego del modulo dimensionale non comportano un obbligo, ma la loro applicazione garantisce l'ottimizzazione degli elementi impiegati.

8.1 Sviluppi futuri

L'applicazione del modulo dimensionale, oltre all'ottimizzazione dei componenti e la conseguente riduzione di tempi e costi di progettazione e produzione, può presentare ulteriori sviluppi futuri. Infatti, le potenzialità di un sistema che impiega elementi standardizzati possono essere accoppiate a quelle che un flusso di lavoro/progettazione, come il BIM, presenta. A oggi vengono adoperati diversi software per modellare e analizzare sotto vari aspetti una struttura. È stato riscontrato che, mediante un software di modellazione come Revit, tutto il processo di progettazione può avvenire in modo rapido e già definito in tutti gli aspetti, da quello energetico a quello strutturale. Ciò porta a comprendere la grande potenzialità dell'applicazione della standardizzazione degli elementi destinati all'edilizia. In questo modo è possibile ottenere il massimo profitto nel minor tempo, con conseguente risparmio delle energie che vengono messe in gioco durante tutto il processo di progettazione.

Questo metodo potrebbe dar vita alla progettazione di elementi standardizzati catalogati, potendola associare a una produzione di massa, con cui poter comporre gran parte delle abitazioni che oggi vengono realizzate.

Questo permette di modificare nel tempo le dimensioni dell'edificio in virtù delle esigenze dei fruitori, potendosi basare su un sistema a griglia, favorendo la sostituzione, l'aggiunta o l'eliminazione di nuovi setti.

9 Bibliografia

9.1 Articoli

Alessio L. (2019) “*Progetto AccuPoli*”, *Atti e Rassegna Tecnica della società degli ingegneri e degli architetti in Torino*, Vol. 152, pp.170-178.

Bernasconi A., Schickhofer G. e Traetta G. (2005) “*I prodotti di legno per la costruzione*”, Promolegno.

BMW Group (2009), “*Alpenhotel Ammerwald. Inhaltsverzeichnis*”, *BMW Medien-information*, pp.1-14.

Ranghino F. e Fucci G. (2020) “*Sustainable construction:the prefabrication opportunity*”, *Ambienta*, pp.1-6.

Steiner M. P. (2012), “*Consegna FRANCO domicilio*” *Promolegno*, Vol. 4, pp.16-19.

Toniolo G. (2007), “*Cent’anni di prefabbricazione in calcestruzzo*”, *Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia*, p.1-3.

9.2 Normative

NTC 2018 – Norme tecniche per le costruzioni.

UNI EN 1995-1-1 – Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture in legno.

UNI EN 13501-1 – Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione.

UNI TS 11300 – Normativa tecnica di riferimento per la stima delle prestazioni energetiche degli edifici.

9.3 Sitografia

Aekitecture on web (2020), “*Moduli abitativi prefabbricati in legno. Architettura omaggio al paesaggio cileno*”, disponibile in: <https://www.arkitectureonweb.com/it/web/timberonweb/-/moduli-abitativi-prefabbricati-in-legno-architettura-omaggio-al-paesaggio-cileno> (consultato il 19/05/2022).

Antincendio Italia (2019), “*Gli effetti del fuoco sugli elementi costruttivi*”, disponibile in: <https://antincendio-italia.it/gli-effetti-del-fuoco-sugli-elementi-costruttivi> (consultato il 20/02/2022).

ArchDaily, “*My Micro NY: The lastest architecture and news*”, disponibile in: [https://www.world- https://www.archdaily.com/tag/my-micro-ny](https://www.world-https://www.archdaily.com/tag/my-micro-ny) (consultato il 07/01/2022).

Assolegno (2021), Marchetti A. L., “*6° Rapporto Edilizia in Legno*” disponibile in: <https://www.federlegnoarredo.it/it/associazioni/assolegno/attivita-e-servizi-per-i-soci/analisi-di-mercato/6-rapporto-edilizia-in-legno> (consultato 22/01/2022).

BAUM Studio (2016), “Prefabbricazione: tra storia e nuovi bisogni”, disponibile in: <https://www.baumstudio.ch/download> (consultato il 30/12/2021).

BioIsoTherm (2018), “Materiali per un’edilizia sostenibile”, disponibile in: <https://www.bioisotherm.it/materiali-ecosostenibili-per-unedilizia-bio> (consultato il 06/01/2022).

Calcolo strutturale.com (2018), “L’acciaio”, disponibile in: <https://www.calcolostrutturale.com/acciaio-ntc-2018> (consultato il 19/05/2022).

Case prefabbricate in legno.it (2017), “Coibentare una casa in legno blockhaus”, disponibile in: <https://caseprefabbricateinlegno.it/2017/03/coibentare-una-casa-in-legno-blockhaus> (consultato il 15/05/2022).

CNC Training Lab, “Introduzione al linguaggio di programmazione iso standard”, disponibile in: <https://www.copraitraining.it/cnctraininglab-blog/introduzione-al-linguaggio-di-programmazione-iso-standard> (consultato il 31/01/2022).

Consorzio Poroton (2016), “Ponti termici, pareti con pilastro”, disponibile in: <http://www.poroton.it/news/ponti-termici-parete-pilastro.aspx> (consultato il 08/02/2022).

Costantini Legno, “Pacchetti linea clima”, disponibile in: <https://www.costantinilegno.it/case-in-legno/pacchetti-case-prefabbricate> (consultato il 08/01/2022).

Costantini Legno, “Tecnologia Balloon Frame - Platform Frame”, disponibile in: <https://www.costantinilegno.it/chi-siamo/tecnologia-balloon-frame-platform-frame> (consultato il 08/01/2022).

DAIKU, “Casa in Blockbau a Campobasso”, disponibile in: <https://www.daiku.it/it/impressioni.html?id=16> (consultato il 08/01/2022).

Danny Forster & Architecture, “Modular AC Hotel NoMad”, disponibile in: <https://www.dannyforster.com/project/modular-hotel-ac-nomad-marriott-architecture-project-nomad-north-madison-square-park-new-york-city> (consultato il 07/01/2022).

Dezeen (2016), A.G.Brake, “Caramel Palace”, disponibile in: [_](#)(consultato il 06/01/2022).

EcoSmartBuilding, “Case in legno a catalogo”, disponibile in: <https://ecosmartbuilding.it/case-legno-catalogo> (consultato il 08/01/2022).

EcoSmartBuilding, “Trendy Classic”, disponibile in: <https://ecosmartbuilding.it/case-legno-catalogo/trendy-classic> (consultato il 08/01/2022).

Egger, “OSB bordo dritto”, disponibile in: https://www.egger.com/shop/it_SM/building/product-detail/OSB3 (consultato il 05/02/2022).

Encyclopedia Britannica (2022), “Crystal Palace”, disponibile in: <https://www.britannica.com/topic/Crystal-Palace-building-London> (consultato il 02/01/2022).

Fermacell, “Lastre in gessofibra”, disponibile in: <https://www.fermacell.it/it/prodotti/lastre-in-gessofibra-fermacell/lastra-gessofibra> (consultato il 05/02/2022).

Fermacell, “Powerpanel H2O”, disponibile in: <https://www.fermacell.it/it/prodotti/lastre-cementizie/pannelli-in-cemento-alleggerito-fermacell-powerpanel/powerpanel-h2o> (consultato il 05/02/2022).

FINSA, “Superpan”, disponibile in: <https://www.finsa.com/en/fp/superpan-superpan/superpan/superpan -e-z-4> (consultato il 05/02/2022).

FLWright.us, “Lewis E. Burleigh Residence, 330 Gregory Street, Wilmette, Illinois”, disponibile in: <http://www.flwright.us/FLW203.2> (consultato il 04/01/2022).

Fondation Le Corbusier “Casa Dom-ino”, disponibile in: <http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb> (consultato il 02/01/2022).

Frank Lloyd Wright, “American System built homes”, disponibile in: <https://franklloydwright.org/site/american-system-built-homes> (consultato il 04/01/2022).

Gandelli Group, “Scuola in Xlam, La Materna di Carignano”, disponibile in: <https://www.gandelligroup.com/scuola-xlam-la-materna-carignano> (consultato il 07/01/2022).

Hasslacher, “Elementi per solaio in lamellare”, disponibile in: <https://www.hasslacher.com/sistemi-di-copertura-hnt> (consultato il 15/02/2022).

Homag, “Linea di produzione per pareti”, disponibile in: <https://www.homag.com/it/product-detail/linea-di-produzione-per-pareti> (consultato il 25/05/2022).

Homify, “Nuova scuola materna di Carignano”, disponibile in: <https://www.homify.it/progetti/108338/nuova-scuola-materna-di-carignano> (consultato il 08/01/2022).

Il Dolimiti (2020), “Il processo di produzione del legname:dall’albero al prodotto finito”, disponibile in : <https://www.ildolimiti.it/societa/2020/il-processo-di-produzione-del-legname-dallalbero-al-prodotto-finito> (consultato il 10/02/2022).

Ille Haus (2010), “Ricostruzione in Abruzzo”, disponibile in: <https://www.ille.haus/eventi/dettaglio/11> (consultato il 16/01/2022).

Immobilgreen.it, “Costruire”, disponibile in: <https://www.immobilgreen.it/legno> (consultato il 08/01/2022).

Imprese Edili (2016), “Scuola in legno ad energia quasi zero”, disponibile in: <https://www.impresediliness.it/scuola-in-legno-ad-energia-quasi-zero> (consultato il 08/01/2022).

Info Acciaio, “Acciaio”, disponibile in: <http://www.infoacciaio.com/glossario/acciaio> (consultato il 08/02/2022).

Info Build (2012), “LCA: valutazione del ciclo di vita al centro del design sostenibile”, disponibile in: <https://www.infobuild.it/approfondimenti/la-valutazione-del-ciclo-di-vita-lca-al-centro-del-design-sostenibile> (consultato il 06/01/2022).

Info Build, Giacometti S., “Un progetto di origine giapponese fa rinascere la città di Accumoli”, disponibile in: <https://www.infobuild.it/progetti/progetto-origine-giapponese-accupoli-legno-compensato/#:~:text=Un%20progetto%20di%20origine%20giapponese%20fa%20rinascere%20la%20citt%C3%A0%20di%20Accumoli,-Progettista%3A%20Arch.&text=Dopo%20il%20sisma%20che%20ha,donato%20al%20comune%20di%20Accumoli> (consultato il 08/01/2022).

InfoBuild (2020), “Tecniche costruttive in legno: le più diffuse, dal Blockbau all’X-lam”, disponibile in: <https://www.infobuild.it/approfondimenti/sistemi-e-tecniche-costruttive-in-legno-le-piu-diffuse> (consultato il: 04/03/2022).

Info Build Energia (2021), “Case in legno: Italia realtà europea dell’edilizia sostenibile”, disponibile in: <https://www.infobuildenergia.it/case-in-legno-italia-realta-europea-delledilizia-sostenibile/#:~:text=Le%20case%20in%20legno%20piacciono,nuove%20costruzioni%20tocca%20il%207%25> (consultato il 26/01/2022).

Internet Archive, “Aladdin Read-Cut Homes”, disponibile in: <https://archive.org/details/AladdinRead-cutHomes1949-1950> (consultato il 08/01/2022.)

Iron Bridge-George Museum “The Iron Bridge”, disponibile in: <https://www.ironbridge.org.uk/our-story/the-iron-bridge> (consultato il 02/01/2022).

Kawindhanakoses (2014), “Jean Prouvé”, disponibile in: <https://kawindhanakoses.wordpress.com/research/the-work-of-jean-prouve-and-its-influence-on-contemporary-architecture-of-the-late-20th-century> (consultato il 13/02/2022).

La Repubblica@scuola (2016), “Il legno”, disponibile al: https://scuola.repubblica.it/puglia-bari-smismichelangelo/il_mio_disegno/il-legno (consultato il 20/01/2022).

Le Valli (2021), “Club Med presenta l’ampliamento del Resort di Pragelato”, disponibile in: <https://www.levalli.info/2021/12/17/club-med-presenta-lampliamento-del-resort-di-pragelato-una-giornata-storica/> (consultato il 16/01/2022).

Lignius (2019), “Case prefabbricate in muratura: prezzi e vantaggi”, disponibile in: <https://www.lignius.it/blog/articolo/case-prefabbricate-in-muratura-prezzi-e-vantaggi/> (consultato il 19/05/2022).

ModulArt (2018), “Analogie avec la construction automobile”, disponibile in: <https://www.modulart.ch/fr/analogie-avec-la-construction-automobile> (consultato il 15/01/2022).

Nord Tex, “Legno Microlamellare”, disponibile in: <https://www.nordtex.it/legno-microlamellare/#:~:text=Il%20microlamellare%20o%20LVL%20%C3%A8,varia%20dal%201%20al%2067%20%25> (consultato il 17/01/2022).

Pianeta Design, Piegari M., “Case prefabbricate in cemento: modelli, vantaggi e costi”, disponibile in: <https://www.pianetadesign.it/curiosita/case-prefabbricate-in-cemento-modelli-vantaggi-e-costi> (consultato il 06/01/2022).

Pinerolo News (2021), “Club Med Pragelato, 14 milioni per l’ampliamento”, disponibile in: <https://www.pinerolo.news/2021/12/17/club-med-pragelato-14-milioni-per-lampliamento-900-posti-letto-da-dicembre-2022/> (consultato il 16/01/2022).

Politecnico di Torino (2017) “Ad Accumoli nasce AccuPoli, primo edificio italiano in legno compensato autoportante”, disponibile in: https://www.politocomunica.polito.it/press_room/comunicati/2017/ad_accumoli_nasce_accupoli_il_primo_edificio_italiano_in_legno_compensato_autoportante (consultato il 08/01/2022).

PrefArch (2016), “Jean Prouvé e la prefabbricazione”, disponibile in: <https://www.prefarch.it/jean-prouve-la-prefabbricazione> (consultato il 04/01/2022).

Sears Archive (2012), “What is a Sears Modern Home?”, disponibile in: <http://www.searsarchives.com/homes> (consultato il 08/01/2022).

Settesere (2021), “Massa Lombarda, la Wasp completa il primo eco-habitat stampato in 3D”, disponibile in: <https://www.settesere.it/it/notizie-romagna-massa-lombarda-la-wasp-completa-il-primo-eco-habitat-stampato-in-3d-n27396> (consultato il 08/01/2022).

SoftLab (2019), “Il fattore di comportamento: un parametro fondamentale per l’analisi sismica delle strutture”, disponibile in: [https://www.soft.lab.it/fattore-di-comportamento-sismica-strutture/#:~:text=Il%20fattore%20di%20comportamento%20\(ex,viene%20utilizzato%20ogni%20qualvolta%2](https://www.soft.lab.it/fattore-di-comportamento-sismica-strutture/#:~:text=Il%20fattore%20di%20comportamento%20(ex,viene%20utilizzato%20ogni%20qualvolta%2) (consultato il 23/01/2022).

Skyscrapercenter, “AC Hotel NoMad”, disponibile in: <https://www.skyscrapercenter.com/building/ac-hotel-nomad/35367> (consultato 07/01/2022).

Teknoring (2012), “Laterizio-tecnologia”, disponibile in: <https://www.teknoring.com/wikitecnica/tecnologia/laterizio-tecnologia> (consultato il 19/05/2022).

Teknoring (2014), “Il taglio del legno: tipologie e sezioni”, disponibile in: <https://www.teknoring.com/guide/guide-architettura/il-taglio-del-legno-tipologie-e-sezioni> (consultato il 10/02/2022).

Teknoring (2019), “AC Hotel New York NoMad: la prefabbricazione cresce in altezza”, disponibile in: <https://www.teknoring.com/news/progettazione/newyork-prefabbricazione-hotel-marriott/> (consultato il 10/02/2022).

Teknoring (2019), “Prefabbricazione e modularità, è il futuro dell’edilizia?”, disponibile in: <https://www.teknoring.com/news/materiali-e-soluzioni/prefabbricazione-modularita-futuro-edilizia> (consultato il 05/06/2022).

TraviUF, “Travi in legno massiccio: uso fiume e uso trieste”, disponibile in: <http://www.traviuf.it/it/travi-uso-fiume/-uso-trieste/37-0> (consultato il 20/02/2022).

Treccani, “Enciclopedia online: Prefabbricazione”, disponibile in: <http://www.treccani.it/enciclopedia/prefabbricazione> (consultato il 31/12/2021).

U.S. Navy Quonset Hut (2012), “Manning Cottage coloniale portatile per emigranti”, disponibile in: <http://quonset-hut.blogspot.com/2012/12/the-manning-portable-colonial-cottage> (consultato il 01/01/2022).

Weber (2020), “Calcestruzzo: un materiale da costruzione poliedrico da manutenzionare”, disponibile in: <https://www.it.weber/calcestruzzo-un-materiale-da-costruzione-poliedrico-da-manutenzionare> (consultato il 06/02/2022).

Wikiwand, “Ernest May”, disponibile in: https://www.wikiwand.com/de/Ernst_May (consultato il 04/01/2022).

World-architects.com, “Caramel Palace”, disponibile in: <https://www.world-architects.com/en/projects/view/carmel-place> (consultato il 07/01/2022).

YouTube (2018), “DMDmodular. The World's Tallest Modular Hotel”, disponibile in: <https://youtu.be/yfTEv4XcdZk> (consultato il 07/01/2022).

9.4 Testi

- Bowles J. E. (1991), *Fondazioni: Progetto e analisi*. McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano, Italia.
- Braghieri N. (2004), *Case in legno*, Federico Motta Editore S.p.A., Milano, Italia.
- Cirillo A. (2009), *Legno. Calcoli strutturali*, Esselibri, Napoli, Italia.
- Crivellaro P. (2012), *Guida alle case di legno*, Aam Terra Nuova Sr, Firenze, Italia.
- Frattari A. (2015), *Rockwool: Soluzioni costruttive per edifici in legno*, Eurgraf s.a.s., Cesano Boscone (MI), Italia.
- Giordano G. (1999), *Tecnica delle costruzioni in legno*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, Italia.
- Kolb J. (2008), *Systems in Timber Engineering*, Lignum - Holzwirtschaft, Zurigo, Svizzera.
- Natterer J., Herzog T. e Volz M. (1998), *Atlante del legno*, UTET, Torino, Italia.
- Piazza M., Tomasi R. e Modena R. (2005), *Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, Italia.
- Piva F. (2013), *Legno...Costruire...Abitare...La casa di legno fatta a regola d'arte, Realizzato privatamente in collaborazione con RoofRox, Riwega e3 Therm*, Ergodomus (stampa privata), Pergine Valsugana (TN), Italia.
- Piva F. (2019), *Manuale delle costruzioni di legno*, Legislazione Tecnica S.r.L, Roma, Italia.
- Porteous J. e Ross P., (trad. Nieri G.) (2010), *Guida all'Eurocodice 5 Progettazione di edifici in legno: EN 1995-1-1*, EPC Editore, Roma, Italia.
- Presutti A. e Evangelista P. (2014), *Edifici multipiano in legno a pannelli portanti in X-lam*, Dario Flaccovio Editore s.r.l., Napoli, Italia.
- Reiff D. D. (2001), *Houses from Books: Treatises, Pattern Books, and Catalogs in American*, The Pennsylvania State University Press, State College (Pennsylvania), Stati Uniti.
- Ruffinatto F., Cremonini C. e Zanuttini R. (2017), *Atlante dei principali legni presenti in Italia*, Regione Piemonte-Settore Forense, Torino, Italia.
- SMITH R. E. (2010), *Prefab Architecture: A guide to modular design and construction*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (New Jersey), Stati Uniti.
- Varvelli R. (2014), *Che cos'è il legno*, Mind Edizioni, Milano, Italia.