

LIVING BOX - SISTEMA ABITATIVO MODULARE PREFABBRICATO IN LEGNO

Salvatore GARZANITI - Stefano BERTAGNI - Lorenzo LEONCINI

RIASSUNTO

Il tipo edilizio delle abitazioni temporanee rappresenta un campo di ricerca e di applicazione progettuale molto vitale (e non solo recentemente). Da un lato perché sempre più stringenti si fanno le richieste di soluzioni abitative temporanee a causa di fenomeni migratori, di eventi sociopolitici e di calamità naturali: una tendenza in sicura crescita dato che una parte del mondo dovrà farsi carico dell'altra che vive ancora con soluzioni abitative incongrue oltre che indegne. Dall'altro, con un'ottica di cultura del progetto, perché lo studio del modulo abitativo rappresenta la distillazione di quelle regole che si vorrebbero poi generalizzare al costruito diffuso. In questo lavoro si è inteso proporre una soluzione che partisse dalla interdisciplinarietà del progetto quale punto caratterizzante il metodo. L'approccio integrato non è di per sé bastevole, ma certo è un buon viatico, per la risoluzione di problemi giocoforza interrelati, quali gli aspetti legati all'architettura, alla struttura e all'energia. Fil rouge del progetto del Living Box è la sostenibilità, declinata nei diversi aspetti che la caratterizzano: dall'efficienza energetica, allo studio di sistemi costruttivi a secco smontabili e completamente riutilizzabili e riciclabili, all'impiego del legno nelle sue varie tecnologie, al comfort abitativo e alla salubrità dei materiali utilizzati. In assenza di target specifici verso cui indirizzare il percorso progettuale, ovvero non conoscendo i fruitori, né la collocazione spaziale e temporale del modulo abitativo, si è ritenuto opportuno mantenere un certo grado di flessibilità formale, costruttiva e funzionale. Obiettivo finale è un sistema abitativo modulare prefabbricato in legno, autonomo sotto il profilo strutturale e impiantistico, spazialmente aggregabile in più unità a formare configurazioni complesse.

ABSTRACT

The flexibility and the fast building of housing systems are becoming a necessity. The traditional living concepts are put in crisis from frequency and intensity of natural disasters, extreme weather events, migrations and urbanization. In this context, the paper's idea is to define a temporary housing system, based on the integrated design criteria. The multidisciplinary aspects related to the architecture, the structure and the energy are interconnected among them. The result is a prefabricated modular wood-house system, characterized by fast building, functional adaptability and energy efficiency. Leitmotif of the project is the sustainability, applied in the various aspects that characterize it: energy efficiency, building prefabrication (to make easy the components reusability and recyclability), wood use in its various technologies, home comfort and building materials healthiness.

Lacking specific targets towards which address the design path, or not knowing the end-users, nor the placement of the system, it was maintained a flexibility degree, both structural and functional. The ultimate goal was to develop a prefabricated modular wood-house system, structurally and functionally autonomous, and spatially aggregated into several units to form complex configurations. The paper describes the main features of Living Box and the results of its integrated analysis.

KEYWORDS

Modulo abitativo temporaneo, edilizia sostenibile, efficienza energetica, costruzione modulare, edilizia in legno

INTRODUZIONE

L'opportunità di disporre di soluzioni abitative flessibili e di rapida messa in opera viene progressivamente avvertita come necessità all'aumentare di frequenza e intensità di eventi che mettono in crisi i concetti abitativi convenzionali. Calamità naturali, eventi climatici estremi, flussi migratori e spinta verso la metropolizzazione degli spazi costruiti sono fenomeni diffusi su scala globale, cui deve essere fatto fronte in tempi brevi e con interventi reversibili. Interventi cioè in

grado di adattarsi in modo continuo alle variazioni dei fenomeni originativi.

Al tempo stesso le esigenze ambientali e più in generale di sviluppo sostenibile implicano che qualunque sia l'orizzonte temporale delle soluzioni abitative, esse vengano implementate secondo criteri di minimo impatto in termini di consumo di materiali e risorse energetiche, emissioni climalteranti dirette e indirette, e più in generale di ciclo di vita [1].

I "Sustainable Buildings" (SB) possono essere considerati come sistemi socio-tecnici comples-

si [2]. Applicando il criterio “*Triple Bottom Line*” (TBL), che identifica il concetto di “sostenibilità” nell’integrazione tra tre macroaree: ambiente, economia, società, [3] è possibile interpretare l’idea di soluzione abitativa transitoria nel seguente modo:

1. società: la soluzione abitativa viene concepita specificamente per fare fronte a necessità immediate della popolazione [4];
2. economia: la soluzione abitativa viene impostata su criteri di serializzazione e industrializzazione per limitare gli investimenti di produzione, di trasporto, di montaggio e gli imprevisti di realizzazione;
3. ambiente: la soluzione abitativa viene progettata secondo criteri di efficienza energetica e realizzata con materiali a basso impatto, quasi totalmente smontabili e riciclabili.

In questo contesto nasce l’idea sviluppata nel presente lavoro: definire una soluzione abitativa transitoria [5] inquadrandola tramite i canoni della progettazione integrata, ovvero interconnettendo gli aspetti legati all’architettura, alla struttura e all’energia. Il risultato è un sistema abitativo modulare prefabbricato in legno (Figura 1), caratterizzato da rapidità di assemblaggio, flessibilità funzionale ed efficienza energetica.

Il sistema abitativo è stato denominato “**Living Box**”, ovvero “Scatola per vivere”. Questo nome vuole richiamare da un lato la funzione principale del sistema, che è quella di luogo per abitare, e dall’altro l’assetto di riferimento, che è quello di una scatola di montaggio.

La presente pubblicazione riporta gli esiti di un approfondimento condotto dagli autori a partire da una tesi di laurea, redatta presso l’Università degli Studi di Firenze nel Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile [6].

1 – CONTESTO E INQUADRAMENTO DEL PERCORSO PROGETTUALE

L’analisi preliminare, indispensabile per conoscere il contesto in cui il Living Box si va a inserire, è stata orientata verso lo studio di soluzioni progettuali sia del passato che contemporanee. Queste, quasi sempre concepite secondo criteri di modularità compositiva e costruttiva, si basano

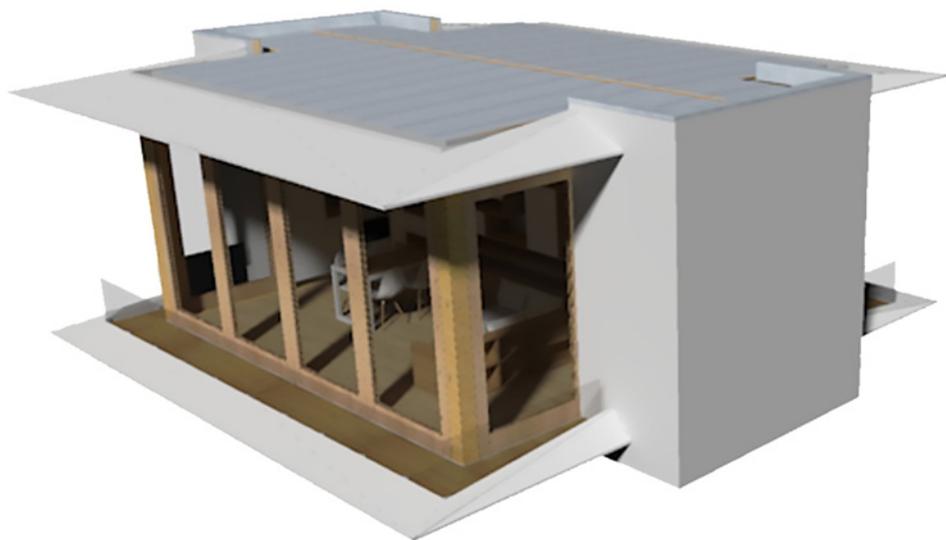


Figura 1 – Render del sistema abitativo progettato

su scale dimensionali riferite a un modulo abitativo unifamiliare autonomo e completo (l’unità abitativa elementare), per poi passare, mediante aggregazione di più moduli, alla configurazione di un organismo edilizio variamente articolato.

Da uno studio di settore della produzione industriale attuale è emerso un orientamento verso singoli moduli abitativi, aggregabili in più conformazioni e costruttivamente impostati sul criterio della prefabbricazione a volumi o a superfici. Si riscontra dunque un allineamento tra le tendenze progettuali e l’assetto produttivo dell’industria edilizia.

Lo studio delle fasi di cantierizzazione e montaggio ha evidenziato una maggiore rapidità esecutiva della prefabbricazione a volumi rispetto a quella a superfici. Rapidità esecutiva che pone tuttavia una serie di vincoli in termini di adattabilità e flessibilità dell’organismo edilizio. E’ stata posta attenzione inoltre alle modalità di trasporto degli elementi costitutivi, e in particolare ai limiti dimensionali che ne consentono la movimentabilità e/o lo stoccaggio utilizzando dispositivi standard quali i container. E’ necessario infatti che i vantaggi dati dall’elevato grado di prefabbricazione trovino riscontro non soltanto in ambito di cantiere, ma lungo l’intera filiera produttiva, dallo stabilimento alla collocazione finale.

A valle dell’analisi di settore, il tema dell’edilizia modulare è stato inquadrato all’interno di uno

schema logico-concettuale (Figura 2) che evidenzia come, nonostante la prefabbricazione, l'organismo edilizio risulti fortemente articolato in termini di utenza, contesto e tecnologia. Ciò si è tradotto in linee guida e spunti tematici da seguire durante il percorso progettuale.



Figura 2 – Schema logico-concettuale di articolazione del progetto

In assenza di target specifici verso cui indirizzare il percorso progettuale, ovvero non conoscendo i fruitori, né la collocazione spaziale e temporale del modulo abitativo, si è ritenuto opportuno mantenere un certo grado di flessibilità formale, costruttiva e funzionale. Obiettivo finale è stato sviluppare un sistema abitativo modulare prefabbricato in legno, autonomo sotto il profilo strutturale e impiantistico, spazialmente aggregabile in più unità a formare configurazioni complesse.

2 – PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA E TECNOLOGICA DEL SISTEMA ABITATIVO

Il *concept* progettuale è impostato su un sistema di base composto da due tipologie di cellule: una cellula di tipo A, portata strutturalmente e a planimetria variabile, nella quale collocare gli ambienti giorno e notte; una cellula di tipo B, strutturalmente portante e a planimetria fissa, che ospita i servizi igienici, i dispositivi impiantistici e gli spazi accessori. Ad ogni cellula di tipo A sono affiancate due cellule di tipo B, come mostrato in Figura 3.

I criteri di dimensionamento hanno seguito i

COMPOSIZIONE

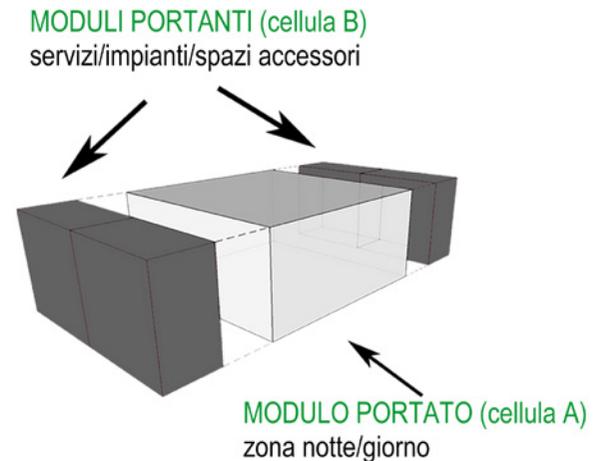


Figura 3 – Concept progettuale – composizione

modelli individuati in fase di analisi preliminare, verificando il rispetto dei correnti requisiti spaziali minimi per l'edilizia abitativa di superficie, altezza dei locali e rapporto aeroilluminante [7] (la valutazione del fattore di luce diurna, FLD, ancorché interessante, non è stata possibile in quanto incognite a priori la latitudine e la presenza di ostruzioni esterne). È stato definito come unità spaziale elementare un modulo di forma quadrata, di 1.5 m di lato. Le cellule di tipo B, di servizio, hanno altezza interna netta pari a 2.40 m e estensione planimetrica fissa di 1 x 2 moduli, ovvero 1.5 x 3.0 m. Le cellule di tipo A, servite, hanno altezza interna netta pari a 2,70 m ed estensione planimetrica variabile da 2 x 4 moduli a 4 x 4 moduli, ovvero da 3.0 x 6.0 m a 6.0 x 6.0 m. Lo schema grafico è riportato in Figura 4.

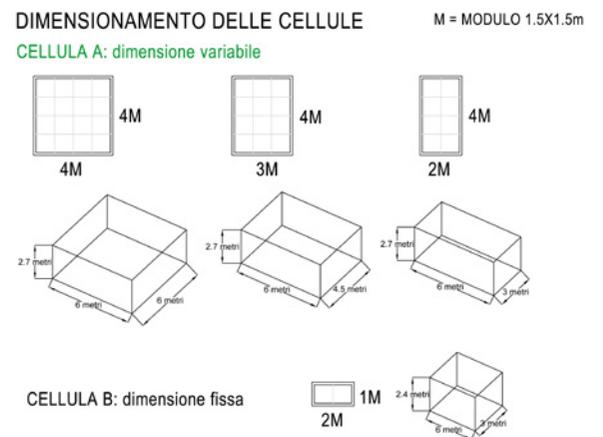


Figura 4 – Concept progettuale – dimensionamento delle cellule

La variabilità dimensionale della cellula di tipo A consente di ottenere tre differenti configurazioni costruttive, aventi rispettivamente 18 m² (abitazione a carattere temporaneo [8]), 28 e 36 m² di superficie utile netta, oltre la superficie delle due cellule di tipo B affiancate (Figura 5).

Per ciascuna configurazione costruttiva è stato studiato un assetto di utilizzo standard, come singolo nucleo, e una serie di assetti di utilizzo alternativi, come più nuclei aggregati orizzontalmente e/o verticalmente. E' così possibile ottenere singoli alloggi modulari secondo i canoni del mono-, bi-, tri- locale, ecc... L'aggregazione di più unità abitative, previo inserimento di vani scala di interconnessione, consente inoltre di realizzare edifici multialloggio, sviluppati secondo le consolidate tipologie edilizie a schiera, in linea e a ballatoio. In Figura 6 è presentato un esempio di edificio multialloggio in linea, che si eleva per quattro livelli con quattro alloggi per ciascun livello.

Riguardo la scelta dei materiali, dall'analisi di settore è emerso che la produzione industriale attuale è riconducibile a due sistemi di riferimento: sistema costruttivo a secco con struttura portante in acciaio e sistema costruttivo a secco con struttura portante in legno [9]. Entrambi i sistemi si presentano come idonei alla realizzazione di Living Box. Si è comunque preferito volgere l'attenzione verso il legno come materiale da costruzione perché meglio combina prestazioni strutturali e prestazioni energetiche.

Riguardo il criterio di prefabbricazione si è optato per una combinazione tra criterio a superfici, più flessibile, per la realizzazione delle cellule di tipo A, e criterio a volumi, più rigido, per la realizzazione delle cellule di tipo B. Questo in considerazione della compattezza dimensionale e dell'elevato grado di serializzazione funzionale delle cellule di tipo B, e viceversa in considerazione delle esigenze di customizzazione e adattabilità delle cellule di tipo A.

Il sistema abitativo così configurato è stato validato tramite la progettazione esecutiva architettonica, strutturale e energetica di un nucleo singolo, in assetto di utilizzo standard, ovvero a formare una unità indipendente, composta da

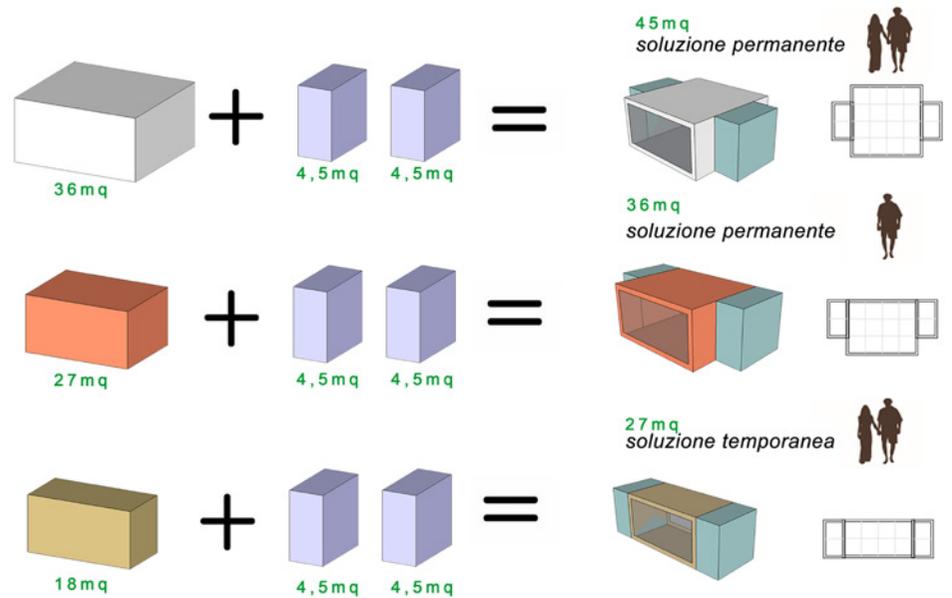


Figura 5 – Configurazioni costruttive

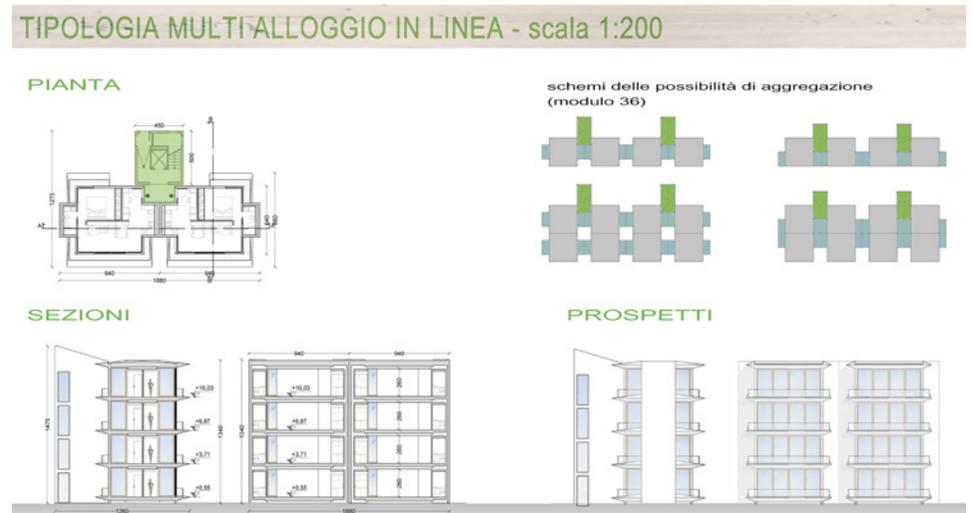


Figura 6 – Tavola di inquadramento "Tipologia multialloggio in linea"

un'area giorno/notte affiancata da un lato dal blocco dei servizi igienici, e dall'altro dal blocco della cucina accoppiato con locale tecnico. Si riporta in Figura 7 la planimetria.

La struttura portante in legno (Figura 8) si presenta a telaio, in corrispondenza della cellula di tipo A, e scatolare, in corrispondenza della cellula di tipo B. Ad essa sono sovrapposti i componenti di involucro, pannellature e finiture con tecnologia a secco, a formare l'edificio completo (Figura 9).

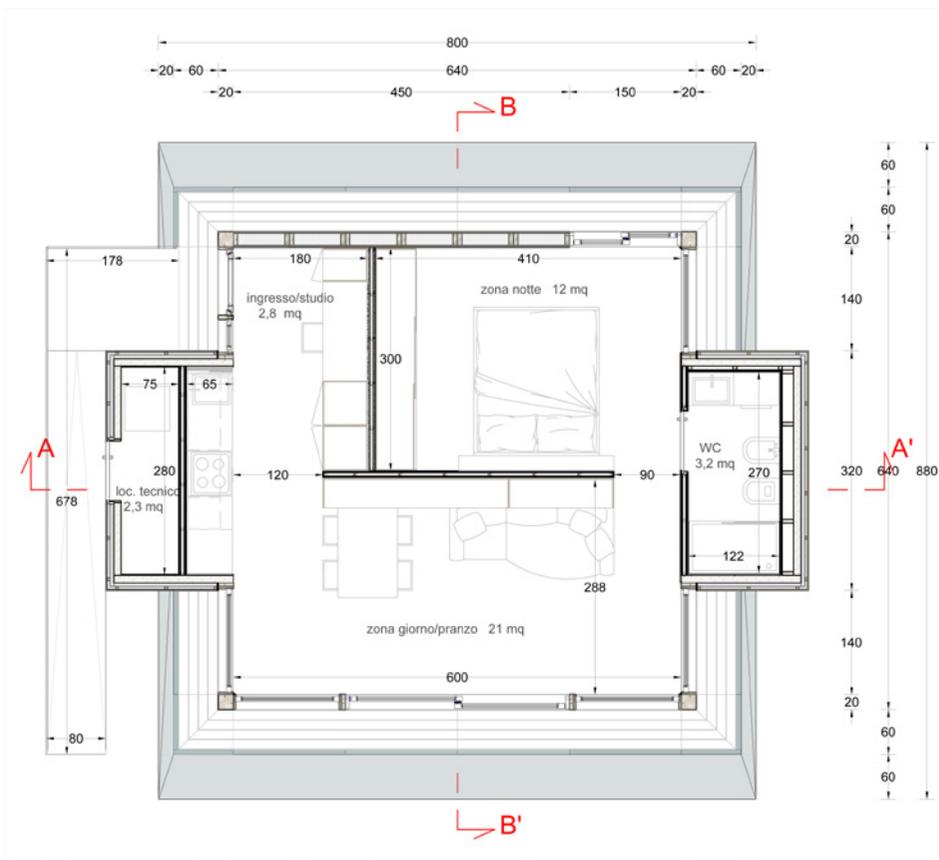


Figura 7 – Planimetria del modulo oggetto di studio



Figura 8 – Vista esplosa della struttura in legno



Figura 9 – Vista esplosa dell'edificio completo

Tutti gli elementi costruttivi sono stati dimensionati per poter essere trasportati tramite uno o più containers “High Cube 40”, lunghi 40 piedi (equivalenti a 12.20 m), consentendone la movimentazione via mare, su rotaia e su gomma. Si evidenzia così il concetto di “scatola di montaggio” come aspetto intrinseco del Living Box (Figura 10).

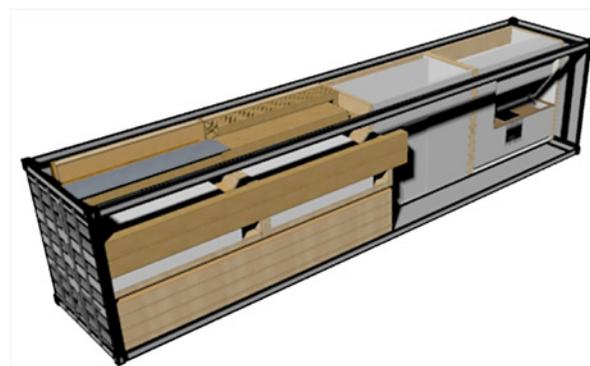
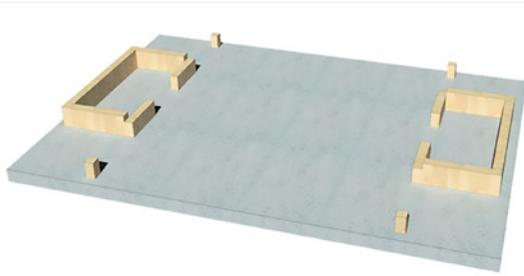


Figura 10 – Elementi costruttivi imballati in un container “High Cube 40”

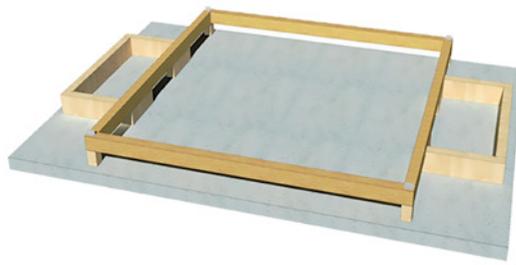
L'assemblaggio del sistema può essere sintetizzato in otto passaggi:

1. posa dei cordoli di base (in c.c.a., potenzialmente anche in blocchi smontabili a fine uso);
2. posa delle travi di base del telaio connesse ai cordoli di base;
3. posa e fissaggio dei pannelli del solaio di base;
4. posa delle cellule di tipo B e collegamento ai cordoli di base;
5. completamento della struttura delle cellule di tipo B;
6. posa del solaio di copertura;
7. posa delle chiusure verticali e della copertura; completamento con elementi accessori interni ed esterni.
8. completamento con elementi accessori interni ed esterni.

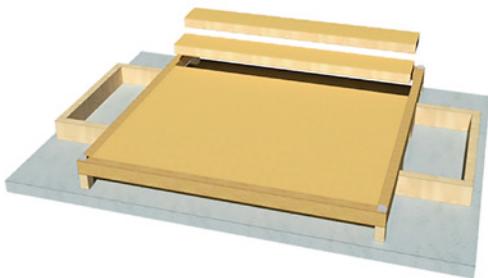
La sequenza di assemblaggio è rappresentata graficamente in Figura 11.



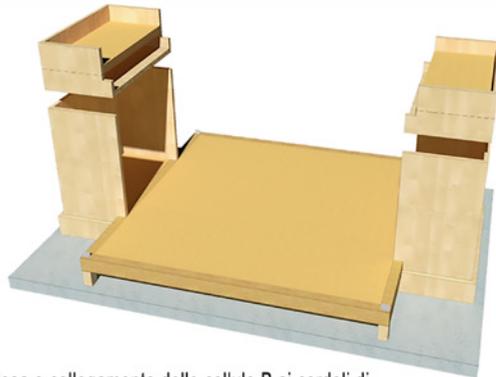
1 Posa dei cordoli di base in legno di larice sulla platea, connessi alla fondazione tramite barre filetate.



2 Posa delle travi di base del telaio, connesse ai cordoli tramite barre filetate.



3 Posa e fissaggio tramite viti dei pannelli solaio alle travi in legno lamellare T1



4 Posa e collegamento delle cellule B ai cordoli di base, con angolari metallici e holddown.



5 Completamento della struttura a telaio della Cellula B tramite la posa e il fissaggio dei montanti e le travi superiori.



6 Posa e fissaggio dei pannelli solaio di copertura



7 Posa delle chiusure verticali opache e trasparenti.
Posa della copertura



8 Completamento della struttura con gli elementi complementari e gli strati di finitura esterni ed interni.

Figura 11 – Fasi di assemblaggio

3 – PRESTAZIONI DI SOSTENIBILITA' AMBIENTALE DEL "LIVING BOX"

Il caso del Living Box risulta paradigmatico nel quadro dei requisiti dei progetti che vogliono definirsi sostenibili: il suo progetto è fortemente indirizzato al soddisfacimento di molti dei requisiti che un edificio sostenibile deve possedere (efficienza energetica e nello sfruttamento delle risorse, basso impatto ambientale *Life-Cycle* dei materiali costitutivi, salubrità indoor, sicurezza nell'uso e manutenzione). Unica eccezione, in questo caso inevitabile, risiede nell'impossibilità di uno studio e ottimizzazione del rapporto fra edificio e contesto, in quanto il contesto non può essere univocamente definito.

Per molti degli aspetti summenzionati il soddisfacimento dei requisiti di sostenibilità è verificabile a prescindere dal criterio, protocollo o metodologia di verifica della sostenibilità che si intenda utilizzare: come noto, infatti, al di là di linee generali di principio, tanti e vari sono i metodi ed i parametri per valutare, o misurare, la sostenibilità di un edificio (ancorché in fase di progetto come il Living Box) [10].

In sintesi possiamo riassumere l'aderenza del Living Box ai requisiti di sostenibilità di seguito descritti.

3.1 – Riduzione del consumo energetico in fase di uso

È questo l'aspetto prioritario, o meglio un pre-requisito imprescindibile cui ogni edificio sostenibile debba conformarsi. L'impatto ambientale più importante di un prodotto edilizio, in tutto il suo ciclo di vita, lo si deve soprattutto all'energia e alle risorse che questo consuma per il suo uso (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione, ecc ...) [11]. L'adozione di un obiettivo nZEB dimostra un elevato livello prestazionale, specie se calato nel contesto dei sistemi abitativi modulari.

A questo proposito è opportuno rimarcare che l'adozione di un sistema costruttivo basato sul materiale legno, pure con isolamenti prevalentemente derivanti dal legno, comporta un netto miglioramento prestazionale energetico anche nel regime estivo, rispetto a sistemi più "tradizionali" impiegati per i sistemi abitativi modulari e tem-

poranei, caratterizzati, questi ultimi, da un'inerzia termica (o massività) dell'involucro piuttosto scadente. Il requisito dell'inerzia termica dell'involucro, infatti, non è secondario negli scenari di impiego dei moduli abitativi temporanei: climi con estati calde, un'intensa radiazione solare ed una forte oscillazione di temperatura giornaliera sono tipici di contesti dove si verificano con una certa frequenza non solo eventi calamitosi, ma anche criticità sociali e geopolitiche.

La leggerezza ponderale dei componenti opachi, utile per agevolare il trasporto ed il montaggio, in genere comporta un deficit prestazionale in termini di inerzia termica da parte dei "tradizionali" moduli abitativi, concepiti con sistemi costruttivi in acciaio e pacchetti di tamponamento leggeri a secco. In quei casi, infatti, lo sfasamento dell'onda termica è valutabile nell'ordine delle 4 ore. Nel caso del Living Box, invece, le ottime caratteristiche di massività ed inerzia termica delle componenti opache di involucro stratificato a base legno (il legno ha un elevato calore specifico) garantiscono uno sfasamento dell'onda termica che si attesta intorno alle 12 ore (calcolato secondo la UNI EN ISO 13786:2008 [12]).

Le prestazioni di massività sono inoltre corroborate, nel Living Box, da uno specifico studio e controllo della radiazione solare, specie sui componenti vetrati, che nel caso in esame si concretizza mediante aggetti di gronda e di solaio. Ovvio che l'orientamento dei moduli dovrà essere opportunamente scelto nel contesto in modo, ad esempio, da disporre lungo il fronte Sud le protezioni in aggetto.

3.2 – Sistema costruttivo a secco

L'adozione di un sistema costruttivo massimamente assemblato in opera a secco possiede numerosi risvolti positivi nella riduzione dell'impatto *Life-Cycle* dell'opera. Va in deroga solo la fondazione che, specie nei casi di forte sismicità o scarsa portanza del terreno di imposta, non può prescindere da getti continui di cemento armato. Una ricca e consolidata letteratura comprova la riduzione degli impatti ambientali e, più in generale, la sostenibilità dovuta all'impiego di tecniche di prefabbricazione (specialmente di tipo "leggero"). Per un approfondimento in merito alla declinazione della prefabbricazione in ot-

tica della sostenibilità si vedano i testi di Quale et al [13], Jallion et al [14], Landolfo e Russo Ermolli [15], Dattilo et al [16] e le pubblicazioni dell'associazione britannica *Buildoffsite* [17], nei quali sono stati quantificati i vantaggi della prefabbricazione in termini di: risparmio energetico, riduzione delle emissioni (CO2) dovute ai trasporti, riduzione degli infortuni sul lavoro, riduzione dei difetti costruttivi.

Da un lato (inizio vita) la prefabbricazione riduce gli sprechi di materiali e economizza i costi dei componenti (aderendo efficacemente ai dettami *Triple-Bottom-Line*: ambiente ed economia, principalmente). Dall'altro lato (fine vita) l'assemblaggio a secco consente e favorisce lo smontaggio, il riuso o il riciclaggio dei manufatti. In particolare modo questo secondo aspetto è particolarmente rilevante nel caso di sistemi abitativi modulari, che sono appunto caratterizzati da una temporaneità nell'uso.

Ultimo vantaggio, infine, dei sistemi costruttivi a secco è quello della agevole cantierizzazione: nel cantiere di montaggio aumenta il livello della sicurezza dei lavoratori (squadre specializzate di montatori), riducendo di pari passo i tempi realizzativi e lo sporcamento del cantiere e del contesto. In questo, evidentemente, il Living-Box non si discosta dai vantaggi offerti dai sistemi costruttivi come X-lam o platform frame, come pure da quelli della prefabbricazione leggera più in generale.

3.3 – Materiali sostenibili

Sebbene in fase di progettazione non sia stata condotta una valutazione analitica del livello di sostenibilità materiale (es. LCA), è intuitivo che il legno sia un materiale costruttivo sostenibile a basso impatto, anche in termini di efficienza energetica che questo materiale conferisce all'involucro (come già descritto al precedente punto 3.1). Si sono inoltre scelti materiali compatibili con il legno, nelle finiture interne ed esterne, e si sono scelti isolanti termici a base legno. La scelta di questi componenti di isolamento e finitura è stata condotta cercando per le varie unità di riferimento (il metro quadrato di parete o il metro quadrato di solaio o copertura) la stratigrafia che, a parità di prestazione energetica, minimizzasse l'impatto ambientale dei materiali.

Come già favorevolmente sperimentato in altri contesti ed in altre ricerche simili, si sono selezionate stratigrafie che minimizzassero gli indici GWP (*Global Warming Potential*), PEI (*Primary Energy Intake*), AP (*Acidification Potential*), senza tuttavia pesare o ricondurre gli esiti dei tre computi ad un unico indicatore mediante un procedimento di normalizzazione.

Tale approccio ha potuto mediare, fra rigore e semplicità, la ricerca di una soluzione "sostenibile", specie dei pacchetti tecnologici, garantendo comunque una valutazione di sostenibilità di tipo quantitativo e non solo qualitativo.

In merito alle prestazioni in materia di salubrità dei materiali, specie per i materiali impiegati per le finiture interne, sono stati seguiti i più rigorosi protocolli inerenti la certificazione dei materiali in termini di qualità dell'ambiente interno (GEV-EMICODE 1 plus, NaturePlus, Ecolabel, ANAB-ICEA); protocolli premianti anche per le certificazioni LEED, BREEM, ITACA.

3.4 – Smontabilità quasi-totale come obiettivo di sostenibilità

La quasi completa smontabilità dei moduli abitativi permette, terminata l'esigenza che ne ha resa necessaria la costruzione, di restituire il suolo al suo precedente uso o vocazione. Il processo è quindi quasi reversibile (sebbene solo nell'ottica del sedime e non nel senso termodinamico generale, ovviamente). Tale caratteristica facilita la scelta dei suoli in cui allocare i moduli, riduce l'eventuale impatto paesistico, favorisce la costruzione anche in contesti da tutelare.

Anche l'uso del suolo, ed il suo sfruttamento ed impegno permanente ed irreversibile, rappresenta un non secondario aspetto cui rivolgere le valutazioni di sostenibilità.

3.5 – Progettazione integrata ed integrale

Molti sistemi di *eco-labeling* dell'edilizia (come LEED [18] e BREEAM [19]) premiano l'approccio integrato alla progettazione. Aspetti tipologici e funzionali, aspetti costruttivi e tecnologici, aspetti strutturali ed aspetti energetici devono contemporaneamente interagire sin dalle prime fasi progettuali. Il Living Box è nato proprio con questo approccio, in ciò aiutato dal fatto che il progetto era riconducibile allo studio, circoscrit-

to ma minuzioso, del modulo base.

L'approccio integrato concorre alla sostenibilità perché ottimizza, fornisce equilibrio alle parti, evita sprechi, riduce l'alea e l'arbitrio in fase di costruzione ed offre maggiori garanzie di durabilità.

Per i suddetti aspetti e motivazioni è possibile inscrivere il Living Box nel novero dei progetti sostenibili, sebbene non siano state effettuate valutazioni (ancorché preliminari) quali LCA od *eco-labeling*. Tuttavia le valutazioni preliminari effettuate nella scelta di materiali a basso impatto, leggeri e facili da trasportare, permettono di prefigurare un livello ottimale anche in termini di impatto *Life-Cycle*.

4 - PROGETTAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA

Un edificio è un sistema il cui uso induce impatti a livello energetico, economico e ambientale sia a scala locale che a scala globale. La limitazione di questi impatti si inserisce nel più ampio quadro dello sviluppo sostenibile [20], e può essere letta in ottica di *Zero Energy Building* [21]. Il concetto di *Zero Energy Building* è stato recentemente trasposto dal piano di sperimentazione al piano di regolamentazione a seguito dell'introduzione del requisito nZEB come obiettivo vincolante su scala europea per le nuove costruzioni al 2018/2020 [22].

L'introduzione del requisito nZEB si inquadra all'interno dell'azione strategica europea, volta alla riduzione della dipendenza energetica e delle emissioni di gas a effetto serra, e deve quindi essere intesa come misura di aumento dell'efficienza energetica nel settore degli edifici.

Secondo il report "*Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy*" [23] l'efficienza energetica costituisce l'elemento centrale della strategia europea al 2020, finalizzata a disaccoppiare la domanda di energia dalla crescita economica. Il report "*Action plan for Energy efficiency: realising the potential*" [24] evidenzia il rilevante margine di efficienza energetica economicamente conveniente potenzialmente disponibile. Il raggiungimento di target di efficienza energetica sotto la condizione di parallela efficienza economica costituisce una delle tematiche di maggior rilievo, trasversale alla strategia dell'Unione Europea in ambito clima-energia.

A seguito di queste considerazioni, la progettazione Living Box è stata orientata verso il raggiungimento di un elevato livello di efficienza energetica, con l'obiettivo di rendere l'edificio compatibile con il requisito nZEB di prossima introduzione nel campo della progettazione. L'efficienza energetica del sistema è data dalla combinazione di tre ambiti, o aspetti progettuali: strategie passive di controllo della domanda di energia per climatizzazione, riferite in particolare all'involucro edilizio; strategie attive di controllo della domanda di energia per climatizzazione, riferite in particolare alle dotazioni impiantistiche; installazione di dispositivi da fonti rinnovabili on-site, al fine di limitare l'impatto complessivo dell'edificio.

In assenza di target specifici verso cui indirizzare il percorso progettuale, ovvero non conoscendo la collocazione spaziale del modulo abitativo, si è ritenuto opportuno analizzare il comportamento energetico dell'edificio per differenti località climatiche: Bolzano, rappresentativa dell'area settentrionale; Firenze, rappresentativa dell'area centrale; Reggio Calabria, rappresentativa dell'area meridionale. La variazione di latitudine, e quindi di severità climatica, implica l'adattamento dei componenti edilizi e impiantistici, mantenendo comunque l'impostazione costrut-

Tabella 1 – Principali parametri climatici di Bolzano, Firenze e Reggio Calabria

	Bolzano	Firenze	Reggio Calabria
Temperatura media annuale [°C]	13.4	16.0	18.6
Temperatura massima annuale [°C]	34.5	38.4	41.5
Temperatura minima annuale [°C]	-4.6	- 3.0	4.0
Radiazione globale media giornaliera su piano orizzontale (luglio) [MJ/m ²]	22.5	25.6	27.5
Radiazione globale media giornaliera su piano orizzontale (gennaio) [MJ/m ²]	4.5	5.3	7.5

tiva di base. In area settentrionale infatti dovrà essere posta attenzione al livello di isolamento termico di involucro e favoriti gli apporti solari attraverso gli elementi vetrati, al fine di limitare il carico per riscaldamento. In area meridionale viceversa dovrà essere posta attenzione al tasso di ventilazione e ostacolati gli apporti solari attraverso gli elementi vetrati, al fine di limitare il carico per raffrescamento.

In Tabella 1 si riportano i principali parametri climatici delle tre località considerate.

4.1 – Progettazione dell'involucro edilizio

Si descrivono di seguito le principali caratteristiche dei componenti edilizi di involucro.

1. Parete verticale di tamponamento (cellula di tipo A): i pannelli, aventi spessore totale di 22 cm, sono costituiti da un telaio in legno a montanti e traversi che sostiene un doppio tavolato in elementi di tipo *Oriented Strand Board* (OSB) dello spessore di 2 cm ciascuno, nella cui intercapedine è posto uno strato termoisolante dello spessore di 16 cm. Come materiale termoisolante è stata individuata la fibra di legno, al fine di ottenere un compromesso tra trasmittanza termica stazionaria e capacità termica della parete. La fibra di legno è, inoltre, uno degli isolanti termici a minor impatto ambientale (si riscontrino a tal riguardo gli indici di impronta ambientale PEI, GWP, AP [25]). Variando la densità del materiale, le caratteristiche termiche della parete possono essere adattate allo specifico contesto climatico in cui è posto l'edificio. La finitura interna e esterna è in lastre di cartongesso;
2. Parete verticale portante (cellula di tipo B): i pannelli, aventi spessore totale di 22 cm, sono costituiti da un setto in legno massiccio a strati incrociati dello spessore di 10 cm, accoppiato ad uno strato termoisolante in fibra di legno dello spessore di 10 cm posti sulla faccia esterna. La finitura interna ed esterna è in lastre di cartongesso;
3. Solaio di copertura: i pannelli, aventi spessore totale di 32 cm, sono costituiti da un'orditura in legno che sostiene un doppio tavolato in elementi di OSB dello spessore di 1,5 cm ciascuno, nella cui intercapedine è

posto uno strato termoisolante dello spessore di 25 cm. La finitura interna è in lastre di cartongesso, mentre quella esterna in lana di legno mineralizzata dello spessore di 4 cm;

4. Solaio di base: i pannelli sono analoghi a quelli del solaio di copertura, invertendo la posizione delle finiture interna/esterna;
5. Serramenti: gli infissi sono costituiti da telaio in legno di sezione 68 x 80 mm, e vetrocamera a vetro stratificato con trattamento basso-emissivo di spessore 6/7-15-6/7 mm. La trasmittanza termica stazionaria risulta pari a 1.5 W/m²K.

In Tabella 2 si riportano le caratteristiche termofisiche dei componenti descritti.

Tabella 2 – Caratteristiche termofisiche dei componenti di involucro

	Parete verticale di tamponam.	Parete verticale portante	Solaio di copertura
Trasmittanza termica stazionaria [W/m ² K]	0.207	0.308	0.138
Trasmittanza termica periodica [W/m ² K]	0.058	0.067	0.047
Massa superficiale [kg/m ²]	76	91	61
Attenuazione [-]	0.281	0.219	0.339
Sfasamento [h]	12.51	11.81	12.02

Per il controllo della radiazione solare sono stati previsti elementi accessori, integrabili nell'organismo edilizio di base in funzione di aspetti climatici o architettonici. Fra questi tende ad impacchettamento da interni e frangisole a lamelle orientabili. Il Living Box è caratterizzato da un oggetto perimetrale posto alla quota del solaio di copertura, la cui ampiezza variabile tra 0.8 m e 1.2 m è stata dimensionata verificando che, per le diverse latitudini considerate, la componente diretta della radiazione solare fosse totalmente intercettata al solstizio di estate, e totalmente passante al solstizio di inverno, come mostrato in Figura 15 per la città di Firenze.

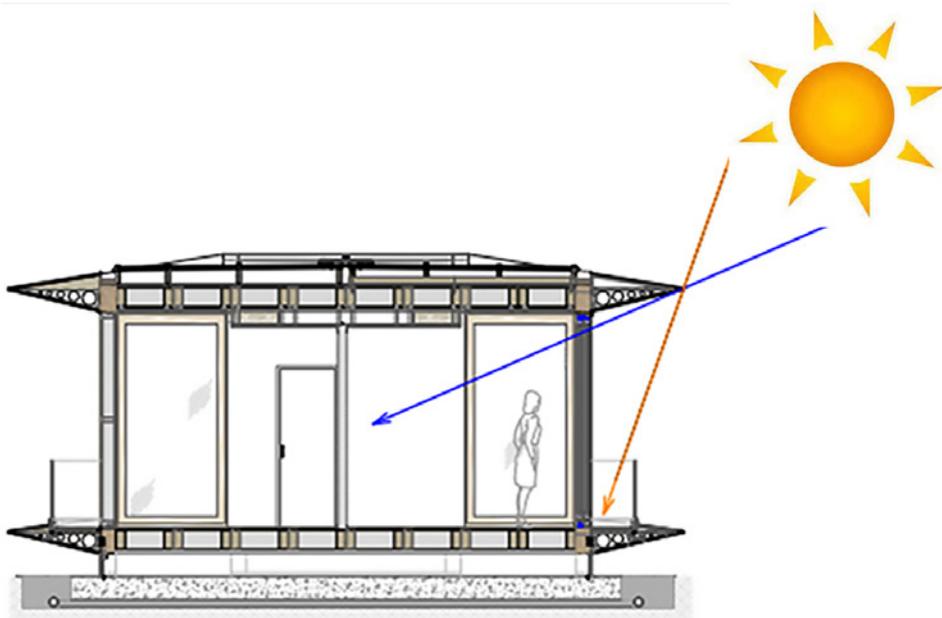


Figura 12 – Angolo di incidenza della radiazione solare (componente diretta) ai solstizi di estate e di inverno

4.2 – Progettazione delle dotazioni impiantistiche

Coerentemente con le attuali tendenze a livello europeo, volte all'elettrificazione degli usi finali dell'energia, e allo scopo di semplificare il layout impiantistico, è stato ritenuto conveniente servire i sistemi di riscaldamento, raffrescamento e produzione di Acqua Calda Sanitaria (ACS) tramite un unico vettore energetico, il vettore elettrico. L'elettrificazione delle utenze è un criterio di energy-policy di portata europea, che vede nell'energia elettrica l'unico vettore in grado di connettere le utenze contemporaneamente con generazione di potenza e generazione distribuita, eventualmente in ottica di smart-grid. La sostenibilità è stata dunque intesa come "allineamento" a questo criterio.

L'impianto di condizionamento è di tipo a tutt'aria, in grado di svolgere le funzioni di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, umidificazione e deumidificazione. In questo modo è possibile il controllo completo delle condizioni ambientali indoor, con elevato comfort per gli utenti. L'impianto è servito da una pompa di calore reversibile aria-aria, da una rete di canalizzazioni correnti nel controsoffitto all'intradosso del solaio di copertura, e da terminali a bocchetta. L'angolo cucina e il servizio sono dotati rispettivamente di cappa e di estrattore. La produzione

di ACS avviene tramite pompa di calore aria-acqua, connessa ad un accumulo della capacità di 150 l per ciascun nucleo.

Nella configurazione costruttiva a nucleo singolo, la centrale tecnica è posta in una delle due cellule di tipo B. Aumentando il numero di nuclei aggregati, e quindi le dimensioni dei dispositivi di impianto, la centrale tecnica è prevista estendersi, fino ad impegnare un nucleo dedicato, posto in prossimità del vano scale per agevolare l'interconnessione con gli alloggi.

4.3 – Progettazione dei dispositivi da fonti energetiche rinnovabili

L'obiettivo nearly Zero Energy Building implica che l'edificio sia in grado di produrre un quantitativo di energia circa equivalente a quello consumato. In un'ottica di interazione edificio-rete, ciò significa che l'edificio dovrebbe essere in grado di immettere in rete un quantitativo di energia circa equivalente a quello prelevato. È stato quindi dimensionato un campo fotovoltaico disposto sulla copertura di Living Box (cellula di tipo A). Data la giacitura orizzontale del piano di posa sono stati individuati come soluzione idonea i moduli a film sottile di tipo Cd-Te (Telloruro di Cadmio), in quanto in grado di garantire una adeguata producibilità anche per giaciture non ottimali. I moduli sono accoppiati ad elementi di alluminio a doghe, giuntabili in opera in modo da formare un unico strato continuo che integra le funzioni di copertura dell'edificio e di produzione di energia.

Il sistema fotovoltaico posizionato in copertura a Living Box è architettonicamente integrato nel pacchetto edilizio-costruttivo. Il calcolo della producibilità elettrica annua è stato svolto tramite il tool "PVGIS" sviluppato dal Joint Research Center della Commissione Europea, accessibile al seguente URL: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.

La tecnologia fotovoltaica è l'unica modalità tecnicamente semplice di produzione elettrica onsite a livello di edificio. La sostenibilità è stata qui interpretata in ottica di "valore della generazione distribuita", e non di ciclo di vita dell'impianto. La variabilità, nel tempo e per contesto nazionale, degli incentivi alle fonti energetiche rinnovabili, non consente di tenerne conto a livello di pro-

gettazione preliminare, specie nel caso “decontestualizzato” di Living Box.

Il campo fotovoltaico progettato è composto da 36 moduli, aventi ciascuno 87.5 Wp, per una potenza installata complessiva di 3150 Wp. La producibilità annua derivante da calcolo risulta pari a 3710 kWh per la località di Bolzano, a 3860 kWh per la località di Firenze e a 4610 kWh per la località di Reggio Calabria.

Sulla copertura di Living Box (cellula di tipo B) sono stati previsti inoltre dei pannelli solari termici, di ausilio al sistema di produzione di ACS, dimensionati in modo da coprire una quota media annua di fabbisogno di circa 60%.

4.4 – Analisi energetica dell’edificio

L’analisi energetica dell’edificio è stata impostata sulla norma tecnica di sistema UNI EN ISO 13790, e sulle relative norme tecniche di componente da essa richiamate. Il metodo di calcolo è semistazionario. Il passo di calcolo è mensile. Il calcolo è stato svolto combinando fogli Excel con tool disponibili in rete [28]. Assunzioni, semplificazioni e condizioni al contorno sono conformi alla norma richiamata. I dati climatici delle tre località considerate sono tratti da UNI 10349: 1994.

I risultati dell’analisi energetica del sistema descritto hanno confermato il raggiungimento di un elevato livello di efficienza energetica, posto come obiettivo al fine di rendere l’edificio compatibile con il requisito nZEB.

In Tabella 3 si riportano i risultati ottenuti per le tre località considerate.

Il bilancio energetico dell’edificio risulta essere positivo per ciascuna delle tre località considerate, ovvero il Living Box si spinge oltre il concetto nZEB, divenendo un Energy Positive Building. Occorre tuttavia considerare che il caso analizzato di nucleo singolo presenta un rapporto superficie solarizzata / superficie climatizzata di circa 1:1, particolarmente favorevole. L’aggregazione di più nuclei comporta inevitabilmente una penalizzazione sotto questo punto di vista, con conseguente riduzione della quota di fabbisogno elettrico complessivo coperta tramite fonti energetiche rinnovabili.

Tabella 3 – Risultati dell’analisi energetica per Bolzano, Firenze e Reggio Calabria

	Bolzano	Firenze	Reggio Calabria
Fabbisogno elettrico per riscaldamento [kWh]	1276	602	0
Fabbisogno elettrico per raffrescamento [kWh]	643	1139	1740
Fabbisogno elettrico per produzione di ACS [kWh]	177	150	32
Fabbisogno elettrico per illuminazione [kWh]	685	685	685
Producibilità fotovoltaica annua [kWh]	3710	3860	4610
Quota di fabbisogno elettrico complessivo coperta tramite fonti energetiche rinnovabili	133 %	149 %	187 %

5 – ASPETTI STRUTTURALI

Per la natura decontestualizzata del progetto in sé, e quindi la mancanza di specifiche indicazioni circa la località di installazione, è stato necessario verificare la possibilità di inserire l’edificio in differenti contesti e per diverse conformazioni spaziali. Questo ha portato a fissare una capacità portante strutturale limite del sistema in termini di azioni statiche. Il limite di portanza è stato determinato in riferimento ad un assetto di assemblaggio pluripiano, formato dalla sovrapposizione di quattro unità abitative (Figura 13).

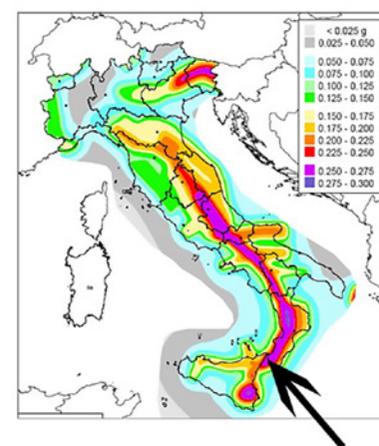


Figura 13 – Struttura oggetto di calcolo

Per tenere conto della capacità del sistema in termini di azioni dinamiche è stata studiata la risposta della struttura all'azione sismica, ipotizzando di inserire l'edificio in un contesto ad elevata pericolosità sismica, quale il territorio di Reggio Calabria. Reggio Calabria è inquadrata secondo l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia [26] in "Zona Sismica 1", avente Peak Ground Acceleration (PGA) superiore a 0.25g (con g accelerazione di gravità pari a 9.8 m/s²).

L'edificio è costituito da una struttura mista, data dalla composizione di due differenti concezioni strutturali:

1. cellula di tipo A: struttura a telaio formata da una maglia di pilastri e travi in legno lamellare;
2. cellula di tipo B: struttura scatolare formata da pannelli in legno massiccio disposti a strati incrociati

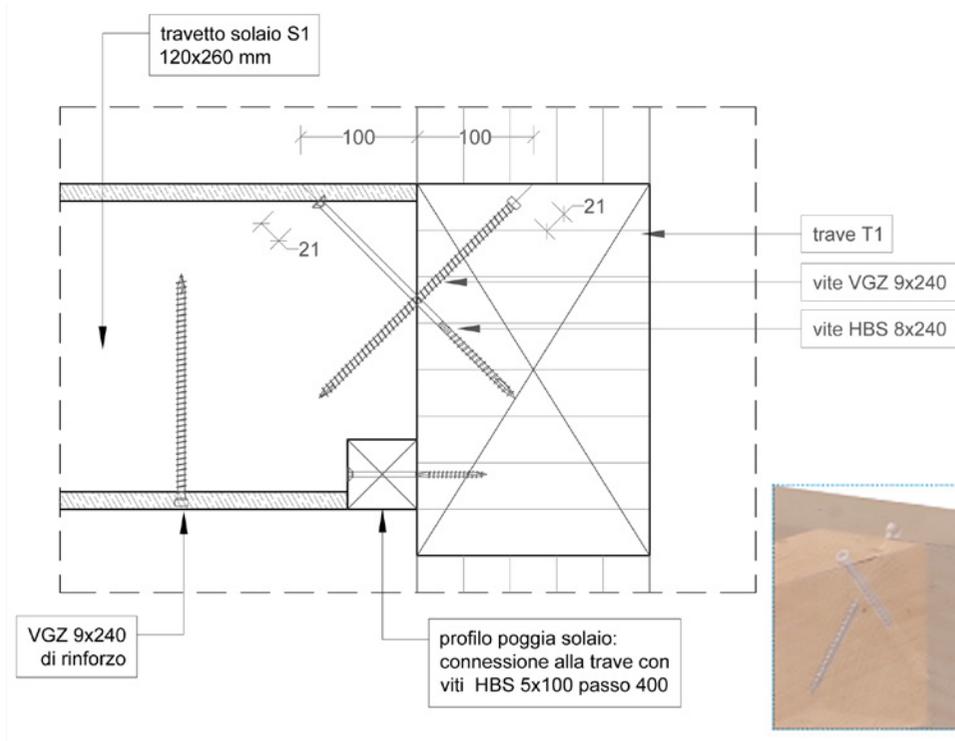


Figura 14 – Dettaglio strutturale – connessione con viti inclinate a 45°

Il telaio della cellula di tipo A è composto da profili in legno lamellare di classe GL24H, che vengono assemblati in loco, mentre la cellula di tipo B è

composta da pannelli in legno massiccio a cinque strati incrociati di classe C24, correntemente noti come "X-lam" o "Cross Laminated Timber", che vengono assemblati in stabilimento in due parti distinte, da ricongiungersi in loco, per ragioni di limiti dimensionali dovuti al trasporto in container.

La risposta della struttura all'azione sismica è stata determinata mediante un'analisi agli elementi finiti del modello rappresentato in Figura 13, inserendo tra le librerie di calcolo le caratteristiche meccaniche dei profili e pannelli in legno specificati.

Le sollecitazioni strutturali agli Stati Limite Ultimi (SLU) e agli Stati Limite di Esercizio (SLE) sono state calcolate rispettivamente in riferimento a due diverse impostazioni del modello, differenziate per le caratteristiche di rigidità della struttura. Nel primo caso (calcolo agli SLU) non viene tenuto conto dell'effettiva deformazione in esercizio delle unioni metalliche e quindi il calcolo è impostato su modello rigido. Le rigidità che concorrono alla rigidità di interpiano sono dovute ai pannelli di legno e agli elementi di connessione. Nel secondo caso, calcolo degli spostamenti allo Stato Limite di Danno (SLD), viene preventivamente determinata la rigidità K_{ser} degli elementi di connessione, e successivamente creato un materiale fittizio da attribuire ai pannelli di legno, le cui caratteristiche meccaniche siano rappresentative sia della deformabilità del legno che di quella degli elementi di connessione, definendo un modulo di taglio equivalente G_{eq} . Effettuata la verifica degli elementi strutturali in legno sono state successivamente verificate le relative giunzioni metalliche [27].

Le connessioni tra le membrature del telaio e quelle tra travi e solai sono state scelte basandosi su criteri di semplicità e rapidità di messa in opera, adottando quindi nel primo caso staffe in alluminio a scomparsa con unione spinottata e nel secondo caso viti a tutto filetto inclinate a 45° (Figura 14).

Per le connessioni tra pannelli a formare la struttura scatolare delle cellule di tipo B sono stati adottati i tradizionali sistemi di giunzione metallica, quali hold-down, angolari e viti, in modo da contrastare le azioni di scorrimento e sollevamento indotte dalle azioni orizzontali. In fase

di dimensionamento e verifica è stata rivolta particolare attenzione alle connessioni di presidio al sollevamento. Le elevate sollecitazioni ai primi tre livelli della struttura, risultanti dal calcolo agli elementi finiti, non hanno consentito l'utilizzo di sistemi standard di collegamento tra pannelli, quali bande forate o hold-down disponibili in commercio. Si è ritenuta tuttavia non conveniente la progettazione di elementi angolari ad hoc per le forze di trazione in gioco, in quanto le dimensioni delle giunzioni si sarebbero rivelate fuori proporzione rispetto alle dimensioni dei pannelli, oltre che onerose e di complessa applicazione in fase di montaggio.

Per risolvere la problematica è stato previsto quindi di realizzare un collegamento continuo dei livelli, a partire dalla fondazione, tramite barre filettate ad alta resistenza (Figura 15). Così operando i pannelli vengono connessi ad ogni livello alle barre filettate tramite hold-down disponibili in commercio, mentre la giunzione in elevazione delle barre filettate avviene tramite manicotti filettati.

In questa soluzione la forza di sollevamento gravante sugli hold-down risulta essere solamente quella del piano di competenza, mentre la somma delle forze di trazione viene demandata alle barre filettate. L'assemblaggio risulta di semplice applicazione in fase di montaggio, in quanto le cellule di tipo B potrebbero arrivare in cantiere già provviste di hold-down, limitando quindi l'assemblaggio alla sola sovrapposizione dei nuclei e successivo collegamento tra gli hold-down dei singoli livelli e le barre filettate.

A complemento è stata studiata l'interazione della struttura in elevazione con il terreno, prendendo in considerazione due opzioni alternative di strutture in fondazione: la prima costituita da una platea in calcestruzzo armato, e la seconda costituita da un graticcio di travi aventi sezione a T rovescia. La motivazione della doppia opzione è dovuta, come altri aspetti del progetto, alla sua natura decontestualizzata, ovvero alla mancanza di specifiche indicazioni circa la località di installazione.

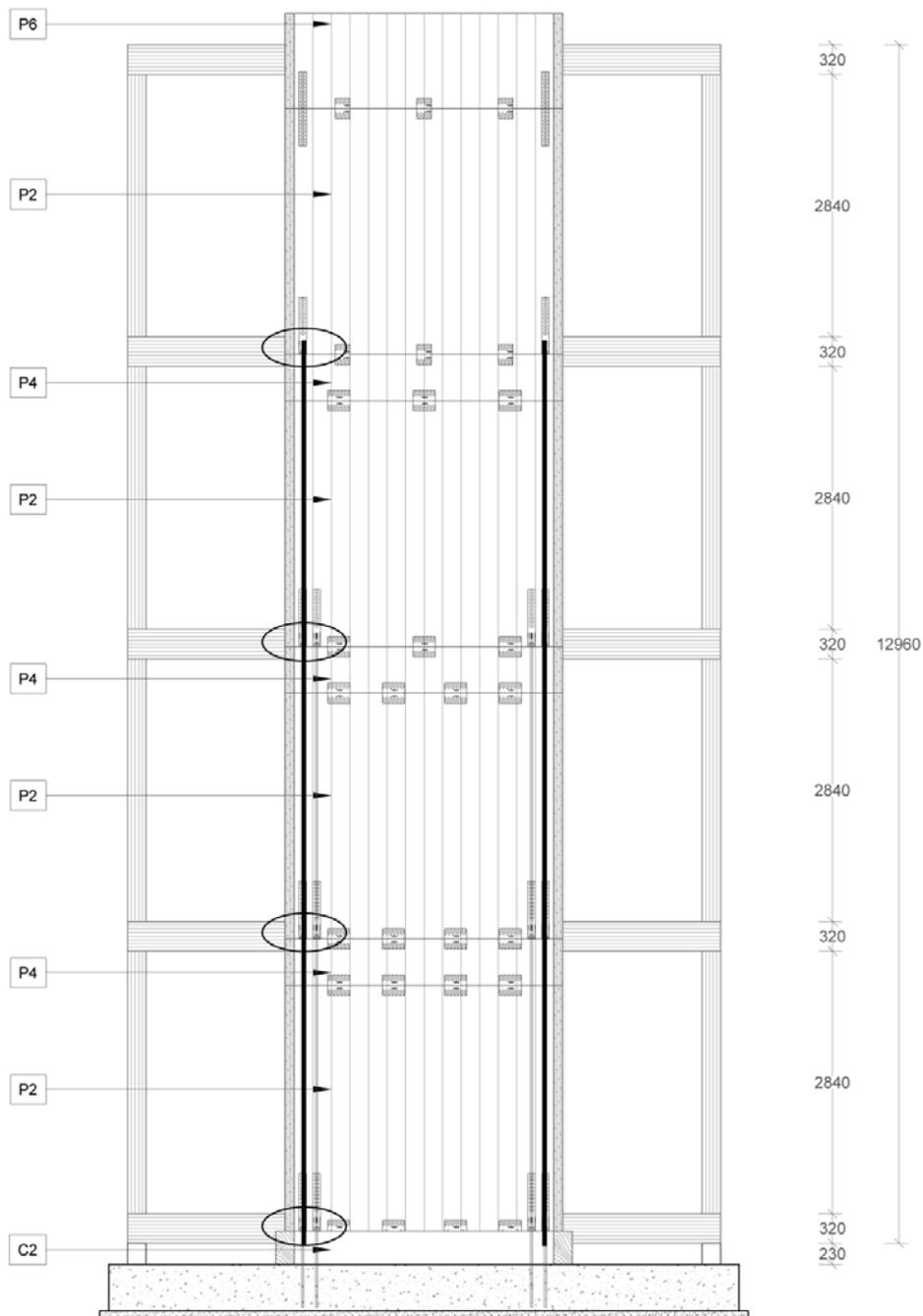


Figura 15 – Soluzione di presidio al sollevamento

CONCLUSIONI

Il Living Box, nella sua originalità, si offre come soluzione efficace, economica e sostenibile alle esigenze abitative temporanee, anche di medio-lungo periodo. La sua qualità (ricercata anche sotto il profilo estetico) ed il comfort indoor, infatti, non sono seconde a soluzioni abitative "tradizionali". Nonostante la temporaneità dell'uso è particolarmente elevato lo standard energetico (e, nota bene, ciò vale a prescindere dal conte-

sto in cui si collochi il modulo) come sono elevate le prestazioni di sostenibilità edilizia.

Il Living Box, pertanto, è la concretizzazione di una ricerca di sintesi fra gli studi modulari abitativi e le attuali tecnologie costruttive residenziali in legno.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano la prof. Arch. Frida Bazzocchi, il prof. Ing. Maurizio Orlando e l'ing. Marco Pio Lauriola per il significativo contributo apportato al progetto "Living Box".

BIBLIOGRAFIA

[1] S. V. Russell-Smith, M. D. Lepech, R. Fruchter, Y. B. Meyer, *Sustainable target value design: integrating life cycle assessment and target value design to improve building energy and environmental performance*, Journal of Cleaner Production 88, 2015, pp. 43-51.

[2] W. Pan, Y. Ning, *The dialectics of sustainable building*, Habitat International 48, 2015, pp. 55-64.

[3] W.C.N. Cam, *From global climate change to Low Carbon Cities – The Triple Bottom Line revisited*, First International Conference on Sustainable Urbanization, Hong Kong(China), 2010.

[4] C. Johnson, G.Lizarralde, *Post-disaster housing and reconstruction*, International Encyclopedia of Housing and Home, 2012, pp. 340-346.

[5] C. Lévy-Vroelant, *Temporary Housing*, International Encyclopedia of Housing and Home, 2012, pp. 172-179.

[6] S. Garzaniti, *LIVING BOX – Progettazione di un sistema abitativo modulare in legno*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, 2014.

[7] DM 5 luglio 1975: requisiti igienico sanitari abitazioni – modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico sanitari principali dei locali d'abitazione

[8] MANUALE TECNICO PER L'ALLESTIMENTO DELLE AREE DI RICOVERO PER LE STRUTTURE PREFABBRICATE DI PROTEZIONE CIVILE, approvato con decreto del capo del dipartimento di protezione civile (N° 1243 del 24 marzo 2005), www.protezionecivile.gov.it, 2005

[9] Alejandro Bahamón, *Case prefabbricate: architetture adattabili, modulari, smontabili, leggere e mobili*, Logos, Modena, 2004

[10] S. Bertagni, *Bioedilizia e sostenibilità: criteri razionali per una migliore valutazione ed applicazione*, Bollettino Ingegneri della Toscana 5 (2011) 3-9.

[11] F.M. Butera, *Dalla caverna alla casa ecologica - Storia del comfort e dell'energia*, Edizioni Ambiente, Milano, 2007, pp. 140-144.

[12] UNI EN ISO 13786:2008. Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo.

[13] Quale J., Eckelman M., Williams K., Sloditskie G., Zimmerman J., *Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States*. University of Virginia, Yale University, Stanford University. Journal of Industrial Ecology (2011).

[14] Jaillon, L., Poon, C.S., Chiang, Y.H., *Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong*. Elsevier (2008).

[15] Landolfo R., Russo Ermolli S., *Acciaio e sostenibilità. Progetto, ricerca e sperimentazione per l'housing in Cold-Formed Steel*, Alinea (2012).

[16] Dattilo C., Negro P., Colombo A., *Applicazione del LCA ad un edificio prefabbricato monopiano. Analisi comparata dell'impatto ambientale di strutture in calcestruzzo armato prefabbricato e gettato in opera*. Industrie Manufatti Cementizi, Assobeton (2012).

[17] www.buildoffsite.com/content/uploads/2015/03/BoS_offsiteconstruction_1307091.pdf

[18] <http://www.usgbc.org/leed>

[19] <http://www.breeam.com>

[20] A. Hoseini, N. Dahlan, U. Berardi, A. Hoseini, N. Makaremi, M. Hoseini, *Sustainable Energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 25 (2013) 1-17.

[21] D. H. W. Li, L. Yang, J. C. Lam, *Zero energy buildings and sustainable development implications – A review*, Energy 54 (2013) 1-10.

[22] Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast).

[23] Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy, COM(2010) 639 final, European Commission, 2010.

[24] Communication from the Commission – Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential, COM(2006) 545 final, European Commission, 2006.

[25] <http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm>

[26] <http://zonesismiche.mi.ingv.it>

[27] Norme Tecniche per le Costruzioni: Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008–Eurocodice 5: UNI EN 1995-1-1 e UNI EN 1995-2

[28] G. De Simone, Certificare 1.0 , www.ingegneri.cc

Salvatore GARZANITI, (Catanzaro, 1984). Ingegnere edile, si è laureato presso l'Università degli Studi di Firenze. Attualmente svolge attività di libero professionista occupandosi, fra l'altro, di ricerca e sviluppo di moduli abitativi in legno. E' collaboratore in una impresa di costruzioni.

Stefano BERTAGNI, ingegnere civile-edile, PhD, è Professore a Contratto presso la Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze. Da anni è titolare del corso di Architettura Tecnica e Bioedilizia. Le sue attività di ricerca sono concentrate prevalentemente sull'analisi dei caratteri distributivi e costruttivi di edifici a destinazione specialistica (in prevalenza per i trasporti), sulle tecniche costruttive innovative per l'involucro edilizio, sui temi del recupero edilizio, sulle metodologie di valutazione e certificazione della sostenibilità in edilizia e sulle tecniche costruttive della bioedilizia. Svolge attività professionale in qualità di consulente e progettista di opere edili.

Lorenzo LEONCINI (Firenze, 1982) è un ingegnere, ricercatore e progettista nel campo dell'efficienza energetica degli edifici. Si è laureato nel 2009 in Ingegneria Edile, presso l'Università degli Studi di Firenze. Nel 2014 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca (PhD) in energetica e tecnologie industriali innovative, presso la stessa Università. E' stato titolare di Assegno di Ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze, avente come tematica "Net Zero Energy Building e analisi exergetica del sistema edificio". Attualmente svolge attività di libero consulente per Studi di progettazione e Società di servizi energetici, seguendo un metodo di sintesi tra aspetti di ricerca e aspetti di progettazione.