

“Colloqui.AT.e”

Collana editoriale di:
Ar.Tec.
Associazione Scientifica
per la Promozione
dei Rapporti tra Architettura e Tecniche dell'Edilizia

Colloqui.AT.e 2015

L'EVOLUZIONE DEL SAPERE IN
ARCHITETTURA TECNICA

a cura di:
Cecilia Mazzoli
Davide Prati

INDICE

<i>INTRODUZIONE</i> Cecilia Mazzoli, Davide Prati	1
--	---

1. PRESENTAZIONE

IDENTIFICAZIONE, INDIVIDUAZIONE, IMITAZIONE E INTERIORIZZAZIONE NEI PROCESSI DI FORMAZIONE E TRASFORMAZIONE DELL'IDENTITÀ DEL SETTORE DELL'AT Marco D'Orazio	7
---	---

LA DISCIPLINA DELL'ARCHITETTURA TECNICA. ORIZZONTI TEMATICI DI RICERCA E PROSPETTIVE DI SVILUPPO Riccardo Gulli	11
--	----

2. PROSPETTIVE DI RICERCA

Sezione I – BUILDING PERFORMANCE

CONSIDERAZIONI SULLE TEMATICHE DI RICERCA DEL SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE DI ARCHITETTURA TECNICA Placido Munafò	21
--	----

LA METODOLOGIA CRADLE TO CRADLE PER UN APPROCCIO DI UP-CYCLING AL PROGETTO DI ARCHITETTURA Rossano Albatici, Stefano Gialanella, Anna Serpelloni	25
---	----

MISURARE LA QUALITÀ COMPLESSIVA DEGLI EDIFICI. IL PROTOCOLLO BQE (BUILDING QUALITY EVALUATION) Nicola Bartolini, Francesco Della Fornace, Riccardo Gulli, Cecilia Mazzoli, Davide Prati	33
--	----

PRIMI RISULTATI SUL COMPORTAMENTO DELLE MALTE CON SCARTI DI VETRO IN AMBIENTE SALINO Rosa Agliata, Carlo Giudicianni, Giuseppe Lamanna, Luigi Mollo	43
--	----

CRITICITÀ, POTENZIALITÀ E POSSIBILI SVILUPPI DEI SISTEMI DI VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE NEGLI EDIFICI Carlo Antonio Stival	51
--	----

OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI ESISTENTI: LO SVILUPPO DI NUOVE TECNOLOGIE PER SCHERMATURE SOLARI INTELLIGENTI Maria Chiara Cimmino, Enrico Sicignano	63
--	----

LA BUILDING AUTOMATION PER IL COMFORT AMBIENTALE ED IL RISPARMIO ENERGETICO: L'ESPERIENZA DEL PROGETTO SINBAD Giuseppe Desogus	69
---	----

PARETI "TRASPIRANTI" E QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA: VALUTAZIONI SPERIMENTALI ED ANALITICHE DELLE PRESTAZIONI PER LA PROGETTAZIONE IN CLIMA MEDITERRANEO Elisa Di Giuseppe, Marco D'Orazio	79
--	----

POTENZIALI INNOVATIVI DI COMPONENTI/PRODOTTI A BASE PERLITE E STUDIO DI FATTIBILITÀ TECNICA Matteo Fiori, Andrea Giovanni Mainini, Riccardo Paolini	89
L'INTEGRAZIONE DELLA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA NELL'INVOLUCRO DEGLI UFFICI DEL CANTIERE NAVALE DI AUGUSTA Salvatore De Caro, Raffaella Lione, Fabio Minutoli, Antonio Testa	99
VETRI ELETTROCROMICI: 4 ANNI DI SPERIMENTAZIONI Gianraffaele Loddo	107
RIDUZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI IN UN CANTIERE NAVALE: TECNOLOGIE PER INTERVENTI PASSIVI Salvatore De Caro, Raffaella Lione, Fabio Minutoli, Antonio Testa	117
OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA COPERTURA-PAVIMENTAZIONE LUNGO I PERCORSI DI EXPO 2015 PER LA MITIGAZIONE DELLO STRESS TERMICO Andrea Giovanni Mainini, Ciro Mariani, Riccardo Paolini, Tiziana Poli, Andrea Vallati	129
DETERMINAZIONE DEL PROFILO CARATTERISTICO DI PRESTAZIONE OTTICA DI UN PANNELLO SEMITRASPARENTE IN PMMA E FIBROCEMENTO AL VARIARE DELLA GEOMETRIA E DEL CONTESTO Massimo Borsa, Andrea Giovanni Mainini, Riccardo Paolini, Tiziana Poli, Alberto Speroni, Andrea Zani	139
LA RICERCA NEL CAMPO DELLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI ESISTENTI Manuela Grecchi, Giuliana Iannaccone, Graziano Salvalai	149
UTILIZZO DI CONTROLLI 'SMART' NELLA VENTILAZIONE MECCANICA CONTROLLATA PER RIDURRE L'UMIDITÀ INTERNA NELLE ABITAZIONI IN CLIMI CALDO-UMIDI Sara Ticci	157
 Sezione II – BUILDING DESIGN AND TECHNIQUES	
INTRODUZIONE Raffaella Lione	169
STRUMENTI E METODI PER LA PROGETTAZIONE PARAMETRICA DI UN PROCEDIMENTO COSTRUTTIVO INNOVATIVO Nicola Bartolini, Riccardo Gulli, Cecilia Mazzoli, Davide Prati, Alice Schwigkofler	175
VALUTAZIONE DELLE IMPLICAZIONI STRUTTURALI CONNESSE ALLA REALIZZAZIONE DI COPERTURE VERDI SU EDIFICI ESISTENTI Raul Berto	185
OLTRE L'EDIFICIO: IL PROGETTO DI SOSTENIBILITÀ DELL'AMBIENTE COSTRUITO Emilia Conte	195
PROGETTAZIONE DI UN CANTIERE OSPEDALIERO SUPPORTATA DA APPROCCI SIMULATIVI Ugo Maria Coraglia, Daniela D'Alessandro, Antonio Fioravanti, Davide Simeone	203
L'ADOZIONE DEL BIM IN ITALIA: LIMITI E PROSPETTIVE Paolo Fiamma	211

LA PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA COME SUPPORTO ALL'AZIONE ASSISTENZIALE E AI PROCESSI TERAPEUTICI NELLE MALATTIE PSICOFISICHE Paolo Liguori	221
GLI EDIFICI SCOLASTICI COME CENTRI DI CONOSCENZA PER LE CITTÀ Matteo Locatelli	229
L'APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DEL BUILDING INFORMATION MODELLING NELLE SIMULAZIONI DINAMICHE Alberto Messico	239
INDICAZIONI PER LA PROGETTAZIONE DELLA COMPONENTE VETRATA IN EDIFICI PER UFFICI AD ELEVATA PRESTAZIONE ENERGETICA IN ITALIA Frida Bazzocchi, Vincenzo Di Naso, Serena Miceli	249
APPROCCIO METODOLOGICO PER IL RECUPERO SOSTENIBILE DEL PATRIMONIO EDILIZIO ESISTENTE: APPLICAZIONE IN CASI STUDIO SIGNIFICATIVI Mauro Caini, Rossana Paparella	259
BIM E REALTÀ AUMENTATA: INNOVAZIONE DI METODI E TECNOLOGIE PER LA GESTIONE DEI PROGETTI SULL'ESISTENTE Francesco Livio Rossini	269
COSTRUIRE LA SOSTENIBILITÀ NEI CONTESTI MEDITERRANEI. UNA SPERIMENTAZIONE NELL'AMBITO DEI PROGRAMMI EUROPEI DI COOPERAZIONE. Antonello Sanna	275
IL RUOLO DELL'ARRICCHIMENTO SEMANTICO NEL BUILDING INFORMATION MODELLING Gianfranco Carrara, Stefano Cursi, Davide Simeone	285
BIM-M E STRATEGIE PER L'IMPLEMENTAZIONE DI APPROCCI INNOVATIVI NEGLI APPALTI PUBBLICI Marco Vassale	293
APPLICAZIONI DI METODI DECISIONALI PER L'OTTIMIZZAZIONE DI UN PROCESSO RIGENERATIVO DEGLI EDIFICI ESISTENTI Clara Vite	301
BIPV - OPPORTUNITÀ E LIMITI DELL'INTEGRAZIONE EDILIZIA DEL FOTOVOLTAICO Maddalena Achenza	311
LA STRATEGIA DELLE ADDIZIONI VOLUMETRICHE PER LA RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA RESIDENZIALE SOCIALE Elena Cattani, Annarita Ferrante, Anastasia Fotopoulou	319
LE TECNOLOGIE DI PRODUZIONE ADDITIVE: LA STAMPA IN 3D NEL CAMPO DELL'EDILIZIA, UNA LITERARY REVIEW Mario Cristiano	331
ACCESSIBILITÀ ED INCLUSIONE NEI PROTOCOLLI DI VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ PER L'AMBIENTE COSTRUITO Michela Dalprà	337
TECNICHE DI CORRELAZIONE DEI SERRAMENTI. PROBLEMATICHE DI CONTROLLO DELLE PRESTAZIONI TERMO-IGROMETRICHE LOCALI E DIFFUSE Ornella Fiandaca	345

CLIMATE ORIENTED URBAN DESIGN COMFORT TERMICO NEGLI SPAZI URBANI E PER IL RISPARMIO ENERGETICO DEGLI EDIFICI Elena Cattani, Annarita Ferrante, Anastasia Fotopoulou, Riccardo Gulli	357
SISTEMI ABITATIVI A CARATTERE TEMPORANEO IN LEGNO Valentina Guagliardi	367
KREO – KINETIC RESPONSIVE ENVELOP BY ORIGAMI Gianluca Rodonò, Vincenzo Sapienza	373
PANNELLI MURARI SEMI-PREFABBRICATI IN CALCESTRUZZO. TECNICHE E TECNOLOGIE COSTRUTTIVE PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE PERFORMANCE Albina Sciotti	383
EFFICIENZA PRESTAZIONALE DI EDIFICI IN CLIMA MEDITERRANEO Giuliana Carlino, Gaetano Sciuto	393
 Sezione III – BUILDING HERITAGE	
INTRODUZIONE Giovanni Fatta	407
TECNICHE NON DISTRUTTIVE PER LA MISURA DELL'UMIDITÀ NELLE MURATURE: TDR E OF. LO STATO DELL'ARTE Rosa Agliata, Roberto Greco, Luigi Mollo	411
AUMENTARE LA SICUREZZA DELLE PERSONE IN EDIFICI STORICI: VERIFICA SPERIMENTALE DI UN INNOVATIVO SISTEMA DI WAYFINDING ALL'INTERNO DI UN TEATRO Gabriele Bernardini, Marco D'Orazio, Enrico Quagliarini	419
SPESSORE E PROGETTO. LA MURARIETÀ ALLA LUCE DEI MATERIALI DELLA CONTEMPORANEITÀ Stefano Cadoni	427
METODI INNOVATIVI SULLO STUDIO DELLA VULNERABILITÀ TERRITORIALE PER LA REDAZIONE DI PIANI DI EMERGENZA Roberto Castelluccio, Marina Fumo, Federica Pascale, Francesco Polverino	437
APPROCCIO METODOLOGICO PER IL RECUPERO SOSTENIBILE DEL PATRIMONIO EDILIZIO STORICO DEL PORTO VECCHIO DI TRIESTE Raul Berto, Giovanni Cechet, Carlo Antonio Stival, Nicola Strazza, Edino Valcovich	447
VALUTAZIONE QUALITATIVA DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DEI CENTRI URBANI Chiara Cicero, Grazia Lombardo	457
PROTOCOLLI DI INDAGINE IN SITO PER LA QUALIFICAZIONE DEL PATRIMONIO STORICO-ARCHITETTONICO AD USO SCOLASTICO Mariella De Fino	465

UN MODELLO DECISIONALE PER IL RIUSO SOSTENIBILE DI EDIFICI INDUSTRIALI DISMESSI Giuseppe Donnarumma	457
TECNICHE INNOVATIVE E PROTOCOLLI OPERATIVI PER LA QUALIFICAZIONE E IL CONTROLLO DEL PATRIMONIO COSTRUITO Mariella De Fino, Giambattista De Tommasi, Fabio Fatiguso, Albina Sciotti	483
ANALISI DEI SISTEMI COSTRUTTIVI E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI NELL'EDILIZIA TRADIZIONALE. IL CASO DI STUDIO DEL CENTRO STORICO DI SCALEA (COSENZA, ITALIA) Giulia Forestieri, Alessandro Campolongo, Maurizio Ponte	493
PROPOSTA METODOLOGICA PER UN MIGLIORAMENTO ENERGETICO COMPATIBILE DELL'ARCHITETTURA STORICA PALERMITANA Enrico Genova	503
LA CONOSCENZA PER IL RECUPERO. IL CASO DELLE ARCHITETTURE ECCLESIASTICHE Antonella Guida, Antonello Pagliuca	511
STRATEGIE METAPROGETTUALI FINALIZZATE AL RIUSO COMPATIBILE: IL CASO DELLE CHIESE AD AULA UNICA DELLA CITTÀ DI CATANIA Alessandro Lo Faro, Attilio A. Mondello, Angelo Salemi	519
IL RESTAURO DEI SASSI DI MATERA ATTRAVERSO NUOVE ENERGIE Antonio Giulio Loforese	529
SOLUZIONI DI COPERTURA PREFABBRICATE IN LEGNO PER LA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DEL PATRIMONIO EDILIZIO RESIDENZIALE Laura Elisabetta Malighetti, Francesco Pittau	539
ANALISI STRUMENTALI E PROTOCOLLI OPERATIVI PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLA COSTRUZIONE Luca Guardigli, Riccardo Gulli, Giovanni Mochi	549
CERCHIATURA DI COLONNE IN MURATURA: NUOVI MATERIALI PER L'EVOLUZIONE DI UNA TECNICA TRADIZIONALE Francesco Monni, Enrico Quagliarini, Federica Greco, Stefano Lenci	559
IL DOPOLAVORO DI CARBONIA. CONSERVAZIONE, RECUPERO E RIUSO Giuseppina Monni, Antonello Sanna, Paolo Sanjust	567
CONTATTO AGRO E URBANO. CONFRONTO TRA ORGANISMI DI LUNGA DURATA E BORGHI DI FONDAZIONE Aurora Perra	577
ARCHITETTURA INDUSTRIALE PREFABBRICATA E SOSTENIBILITÀ: DALLA VALUTAZIONE ENERGETICO AMBIENTALE ALLE STRATEGIE DI RIQUALIFICAZIONE Maria Vittoria Santi	587
CUCITURE FLESSIBILI PER IL RINFORZO A SECCO DI MURATURE STORICHE: RISULTATI SPERIMENTALI PER AZIONI FUORI DAL PIANO Stefano Lenci, Francesco Monni, Enrico Quagliarini, Agnese Scalbi	597

LA PROGETTAZIONE MULTISENSORIALE NELLA RIQUALIFICAZIONE DEGLI EDIFICI ESISTENTI Manuela Marino, Gaetano Sciuto	605
LA SEDE DEL MONTE DEI PASCHI DI SIENA A COLLE VAL D'ELSA (SI) DI GIOVANNI MICHELUCCI Frida Bazzocchi, Vincenzo Di Naso, Andrea Masi	615
PORTO VECCHIO DI TRIESTE. TECNOLOGIE INNOVATIVE ORIGINARIE E METODOLOGIE DI RECUPERO COMPATIBILI Giovanni Cechet, Edino Valcovich	625
NORME E BREVETTI NELL'ITALIA DEL NOVECENTO. IL CASO DELLE COSTRUZIONI METALLICHE Stefano Cocco	635
TECNICHE E SPERIMENTAZIONE DEI MATERIALI COIBENTI NELLA COSTRUZIONE MODERNA IN ITALIA: IL CASO DELLE COLONIE Angelo Bertolazzi, Giorgio Croatto, Umberto Turrini	645
LA COSTRUZIONE METALLICA NELLA PALERMO DEL XIX SECOLO Tiziana Campisi, Giovanni Fatta, Calogero Vinci	655
POTENZIALITÀ DEI FINANZIAMENTI EUROPEI IN TEMA DI SALVAGUARDIA E VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO COSTRUITO. IL CASO MOMOWO Caterina Franchini, Emilia Garda, Marika Mangosio	663
COSTRUIRE LA SCUOLA. INDUSTRIALIZZAZIONE PER L'ISTRUZIONE DI MASSA (1960-1975) Ilaria Giannetti	673
I GRANDI INTERVENTI ALL'ESTERO DELLA SOCIETÀ GENERALE IMMOBILIARE Gianluca Lecoque	683
CARATTERISTICHE TIPOLOGICHE E VULNERABILITÀ SISMICHE DEGLI EDIFICI SCOLASTICI COSTRUITI IN ITALIA NEL SECONDO DOPOGUERRA Francesco Clementi, Stefano Lenci, Gianluca Maracchini, Francesco Monni, Enrico Quagliarini	691
TECNOLOGIE PER LA GESTIONE DELL'ACQUA Francesco Marras	701
IL PATRIMONIO ARCHITETTONICO E CULTURALE DEI PORTI STORICI: DALLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO ALLA CONSERVAZIONE E VALORIZZAZIONE Antonello Martino	709
EDILIZIA INDUSTRIALIZZATA E QUALITÀ DELL'ABITARE A TORINO NEGLI ANNI DELLA GRANDE IMMIGRAZIONE Emilia Garda, Caterina Mele	717
CONTRIBUTO ALLA CONOSCENZA DELLE COPERTURE LIGNEE AD AMPIA LUCE IN AMBITO BOLOGNESE Luca Guardigli, Giovanni Mochi, Davide Prati	727
LINEE GUIDA PER LA CONSERVAZIONE DEL MODERNO. QUATTRO ARCHITETTURE DI GIUSEPPE VACCARO N EMILIA ROMAGNA Riccardo Gulli, Giorgia Predari	737

STORIA A TECNICA NEI TABACCHIFICI DELLA PIANA DEL SELE
Pasquale Apicella, Alessandra Landi, Federica Ribera

747

ANALISI DI ALCUNE PARADIGMATICHE SPERIMENTAZIONI DEL DOPOGUERRA A CASSINO:
STORIA DELLA COSTRUZIONE E RECUPERO
Franco Fragnoli, Marcello Zordan

757

Soluzioni di copertura prefabbricate in legno per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio residenziale

Laura Elisabetta Malighetti ^{a*}, Francesco Pittau^a

^a Dipartimento ABC, Politecnico di Milano, P.zza Leonardo da Vinci 32, Milano, 20133, Milano

Abstract

In Italia la richiesta di interventi di recupero immobiliare e retrofit energetico sta registrando ogni anno un incremento costante. L'adozione di sistemi costruttivi industrializzati basati sulla prefabbricazione off-site sono capaci di rispondere alle esigenze del mercato e garantire la qualità dell'intervento edilizio su larga scala. Nel presente lavoro viene proposto un sistema costruttivo prefabbricato in legno per la riqualificazione di coperture, appositamente sviluppato affinché possa contenere al suo interno un'alta percentuale di materiale riciclato. Sulla base di elementi standardizzati sono state infine svolte analisi tecnologiche, energetiche ed economiche sfruttando come caso studio un edificio di edilizia residenziale sociale sito nel comune di Cinisello Balsamo (MI).

1. INTRODUZIONE

Il riuso e la riqualificazione rappresentano per il prossimo futuro temi centrali per il settore delle costruzioni considerando che in Europa il 50% del mondo dell'edilizia è assorbito dal recupero [1] e alla luce della consapevolezza che una significativa riduzione delle emissioni inquinanti, obiettivo irrinunciabile per ogni politica di sviluppo, si può ottenere soltanto attraverso l'adeguamento del patrimonio edilizio costruito negli ultimi cinquanta anni, che è in gran parte energeticamente obsoleto.

Nei Paesi dell'Unione Europea il comparto delle costruzioni è responsabile di circa il 40% dei consumi finali di energia, con un'incidenza del settore delle costruzioni residenziali pari al 63%. Se si considera la quantità di edifici costruiti dalla seconda guerra mondiale agli anni Settanta in Europa, e il tasso medio di nuove costruzioni (solo l'1%) risulta evidente che il potenziale di riduzione emissioni di gas serra, per raggiungere gli obiettivi UE 2020, ottenibile con il recupero dello stock di edilizia residenziale è cruciale. In Italia questo patrimonio ammonta 29,1 milioni, di cui 16,6 milioni di abitazioni costruiti prima degli anni Settanta in assenza di regolamentazioni circa il contenimento dei consumi energetici [2].

Numerosi Paesi europei per raggiungere gli obiettivi che si sono dati al 2050 hanno programmi di retrofit che prevedono tassi superiori ad 1 abitazione ristrutturata al minuto da qui al 2050. Sono già stati sviluppati e testati approcci industriali capaci di abbattere in modo considerevole costi e tempi della riqualificazione aumentando contemporaneamente i risultati prestazionali e lanciate politiche con il duplice obiettivo di favorire l'efficientamento energetico degli edifici obsoleti e collocare la ripresa del settore edilizio [3].

In un contesto di modesta crescita economica e di produttività il settore immobiliare necessita di reinventarsi attorno al nuovo mercato della riqualificazione ambendo a risultati radicali (deep retrofit) dove l'industrializzazione della riqualificazione può giocare un

* Corresponding author. Tel.: +39-02-23996022; fax: +39-02-23996020; e-mail: laura.malighetti@polimi.it

ruolo chiave. La rapidità degli interventi di recupero oltre che l'economicità degli stessi sono un importante fattore di competitività. La prefabbricazione è generalmente considerata una valida soluzione per consentire di ridurre in modo significativo i tempi di costruzione assicurando al contempo una migliore qualità del recupero. Dai report del progetto europeo TABULA [4] risulta che il 64% delle costruzioni residenziali in Italia è costruito in muratura e che gli edifici plurifamiliari con tetti a falde sono il campione più rappresentativo, specialmente nel nord Italia (60% del patrimonio edilizio residenziale esistente). Alla luce di queste considerazioni e dei dati relativi agli interventi di riqualificazione/sostituzione edilizia, risulta evidente come gli investimenti in termini di ricerca su sistemi di riqualificazione delle coperture risultino strategici per contribuire a rilanciare la ripresa del settore edilizio. In particolare le coperture a falda, su uno stock di 841 milioni di mq (dei quali la metà senza alcun intervento di manutenzione negli ultimi 12 anni) registrano una richiesta di riqualificazione entro il 2020 di 387-412 milioni di mq [5].

Questo paper descrive il processo ingegnerizzazione di un componente di copertura prefabbricato, realizzato con un'alta percentuale di materiale riciclato, progettato per essere prodotto da cooperative sociali di tipo B (che impiegano persone svantaggiate) operanti nella provincia di Lecco; competitivo dal punto di vista economico e innovativo dal punto di vista funzionale. Lo sviluppo del componente è il risultato finale di un lavoro di consulenza per un consorzio di cooperative (Società Consorzio Consolida) e finanziato dalla Fondazione della Provincia di Lecco Onlus (Fondazione di Comunità della Fondazione Cariplo) che mira a individuare nuove forme di produzione adatte alla tipologia di persone svantaggiate presenti nelle cooperative e allo sfruttamento/riconversione dei laboratori artigianali già esistenti.

2. STATO DELL'ARTE

Negli ultimi anni, le forze imprenditoriali e progettuali di molti Paesi europei si sono focalizzate con interesse crescente intorno al tema della prefabbricazione edilizia, in quanto in grado di fornire una risposta immediata al fabbisogno di edifici per abitazione - nuovi ma soprattutto rinnovati - e servizi sociali annessi. Sul piano qualitativo si sono ottenuti risultati di elevato contenuto tecnologico che permettono oggi a molte nazioni di disporre di tecnologie in grado di fornire soluzioni estremamente valide ai molteplici problemi dell'edilizia abitativa.

La prefabbricazione edilizia ha perso quei connotati di anonimità e serialità che la caratterizzava nelle sue prime fasi. Tra i sistemi di prefabbricazione edilizia, i componenti preassemblati in legno sono quelli che stanno registrando un maggior incremento nel mercato italiano. Sebbene in altri Paesi Europei (Germania e Austria in primis, ma anche Scandinavia e Irlanda) edifici interamente prefabbricati in legno siano una realtà ormai consolidati da diversi anni, in Italia il mercato delle costruzioni prefabbricate in legno rappresenta circa il 2.8% del patrimonio immobiliare residenziale e l'8.5% dell'intero settore delle costruzioni, con una crescita negli ultimi cinque anni del 400% e un'ulteriore crescita stimata per i prossimi dieci anni fino all'800% [6]. Nonostante i numeri confortanti, in netta controtendenza rispetto all'andamento degli investimenti nel settore delle costruzioni, il mercato delle costruzioni industrializzate resta una realtà di nicchia, specie se paragonato a realtà come quella austriaca dove le abitazioni prefabbricate in legno rappresentano il 35% del mercato [7]. I vantaggi nell'uso di componenti industrializzati in legno sono molteplici: alla modularità e ripetitività dei

vari elementi, con un conseguente abbattimento dei costi di produzione, si aggiungono la rapidità di montaggio in opera, la solidità strutturale e ottime prestazioni termo-acustiche.

Lehmann [8] sottolinea come sia necessario per il settore delle costruzioni spingersi verso modelli e metodologie costruttive in grado di ottimizzare le materie prime, aumentare l'efficienza dei processi produttivi e contenere le emissioni di carbonio. Gli elementi costruttivi modulari in legno, specialmente se massivi (pannelli multistrato, CLT, etc.), grazie alle proprietà fisiche del legno sono in grado di stoccare grandi quantità di CO₂ [9] che, abbinate all'elevato livello di sicurezza sismica, rende auspicabile un'applicazione a larga scala nel prossimo futuro per la realizzazione di edifici multipiano in contesti urbanizzati.

Anche Spiels [10] definisce i sistemi costruttivi prefabbricati a secco a base legno come i più ricchi di potenzialità, a differenza di altri basati per esempio su sistemi misti calcestruzzo e acciaio, in grado di rispondere positivamente ai bisogni dell'abitare, garantendo costruzioni performanti e affidabili, con tempi e costi di messa in opera contenuti. Gli aspetti positivi di tali tecnologie costruttive sono tanto evidenti nelle nuove realizzazioni quanto negli interventi di recupero e retrofit di edifici esistenti, dove la necessità di interventi economici, con durate ridotte e un alto livello di precisione sono elementi di fondamentale rilevanza.

Nel vasto panorama odierno, specialmente nell'ambito del recupero edilizio, un importante spazio lo stanno ricavando le tecnologie costruttive prefabbricate miste in legno-calcestruzzo [11]. Nati originariamente come sistemi di consolidamento per solai di legno di edifici storici, i sistemi costruttivi misti sono stati oggetto di notevoli sviluppi tecnologici negli ultimi anni, tanto da rappresentare oggi una nuova frontiera nel mercato delle costruzioni i cui vantaggi sono evidenziati da diversi ricercatori. Crocetti [12] ha studiato e sperimentato una nuova tecnologia di connessione legno-cls per la realizzazione di pannelli prefabbricati compositi di copertura. Similmente Nechanický [13] ha condotto studi per lo sviluppo e la sperimentazione di nuovi sistemi di connessione per elementi lignei in strutture di orizzontamento, introducendo l'uso di materiali riciclati.

3. METODOLOGIA

La metodologia per lo sviluppo del componente edilizio ha previsto delle fasi di lavoro, schematizzate in Figura 2, che hanno consentito di focalizzare strada facendo le sue caratteristiche in rapporto alle potenzialità del mercato e a quelle delle cooperative sociali di tipo B aderenti al progetto di ricerca.

Dal punto di vista tecnico la prima fase ha previsto un'indagine dei più diffusi prodotti edili utilizzabili nell'ambito del recupero edilizio con un alto contenuto di riciclato, costruendo una matrice di valutazione per l'assegnazione del punteggio relativo alla sostenibilità ambientale ed economica per ciascun prodotto selezionato al fine di individuare quelli potenzialmente impiegabili nel componente da sviluppare nelle fasi successive.

I prodotti analizzati sono stati schedati al fine di fornire una griglia di lettura uniforme e utile nelle fasi successive di lavoro.

Sulla base dei risultati della matrice di valutazione è stato messo a punto un concept progettuale dell'elemento tecnico: un pannello composito multifunzione prefabbricato ad alto contenuto di riciclato da installarsi su struttura discontinua.

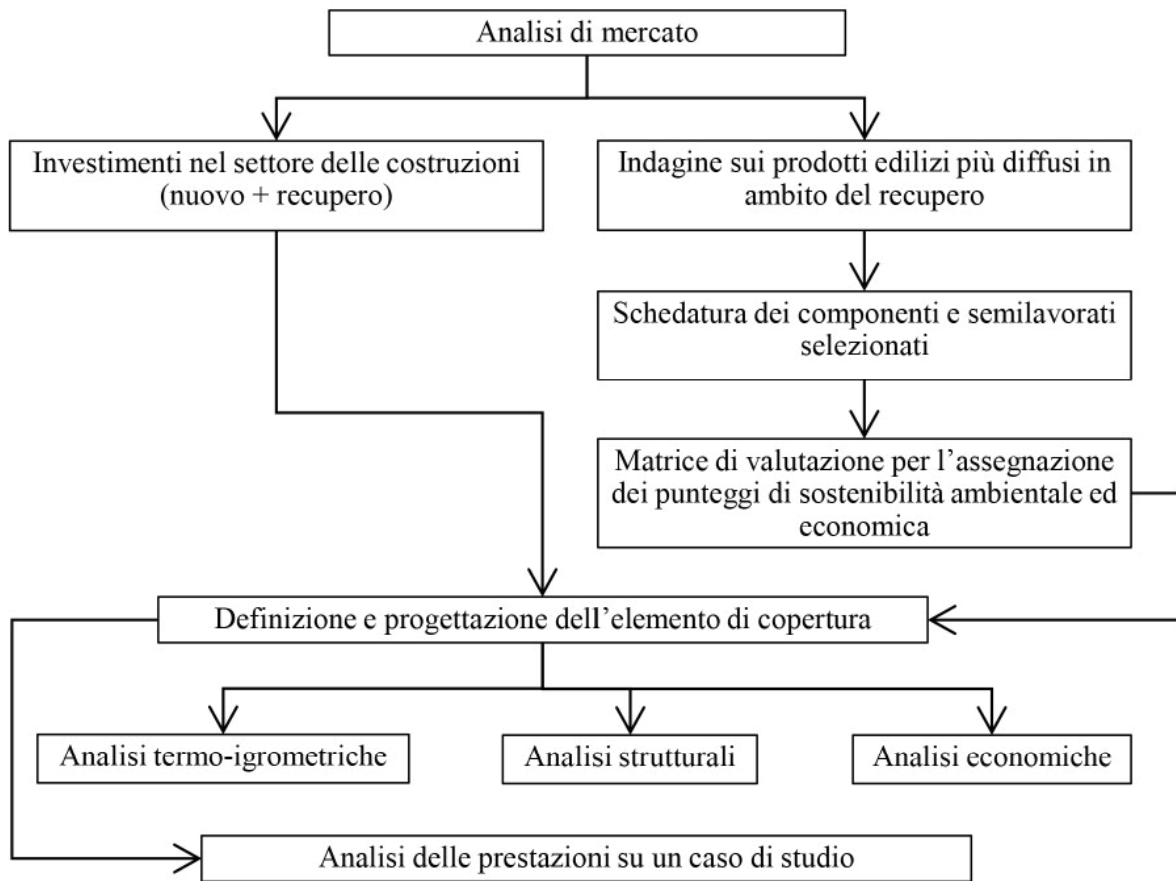


Figura 1. Struttura delle analisi per lo sviluppo del componente prefabbricato di copertura.

I materiali impiegabili sono stati valutati secondo una matrice semiquantitativa che tiene in considerazione le seguenti quattro categorie [14]:

- A. Reperibilità (disponibilità delle materie prime e relativa distanza dalle fonti di approvvigionamento);
- B. Biocompatibilità ed ecosostenibilità (provenienza delle materie prime e relative qualità ambientali);
- C. Economicità (costo di reperibilità delle materie prime, del processo produttivo e della messa in opera);
- D. Impiegabilità (rispetto dei requisiti prestazionali richiesti, quali: durabilità, traspirabilità, sicurezza, etc.).

La matrice può essere usata per confrontare singoli prodotti impiegabili nel componente (per es. materiali isolanti termici, membrane impermeabilizzanti, elementi strutturali, etc.) e al contempo valutare il singolo componente assemblato. La reperibilità e la distanza dalle fonti di approvvigionamento delle materie prime sono gli aspetti tenuti in maggiore considerazione insieme al costo di reperibilità della materia prima rispetto al valore di mercato e quello di produzione. Tra i materiali esistenti sul mercato sono state individuate le seguenti risorse presenti a livello locale impiegabili nel componente: rifiuti solidi urbani raccolti nella provincia di Lecco e destinati al riciclaggio, come la plastica; fibre tessili derivate da abiti usati; materie prime di origine naturale: fibre vegetali, legno, canna palustre. L'ingegnerizzazione della soluzione di copertura si è orientata verso un alto livello di prefabbricazione, comportando le seguenti fasi di indagine:

- studio di dettaglio delle sezioni critiche ed elaborazione dei relativi disegni esecutivi;

- sviluppo delle fasi di montaggio relative a un modulo standard;
- valutazione delle quantità dei materiali e delle lavorazioni necessarie nell'ipotesi applicativa su un edificio di studio;
- analisi energetiche e strutturali con software dedicati della soluzione di copertura;
- valutazione dei costi di fornitura commerciale e assemblaggio di un componente di copertura piccole dimensioni (lunghezza della falda di 4 m).

Sulla base delle considerazioni costruttive e di montaggio effettuate sul progetto del pannello prototipo in scala 1:1 di ridotte dimensioni, sono stati valutati diversi scenari di applicazione su un caso di studio, un edificio di residenza convenzionata di proprietà dell'ALER a Cinisello Balsamo (MI). Questo ha portato alla definizione delle dimensioni ottimali al fine di integrare al meglio i più frequenti accessori delle coperture (finestre da tetto, linee vita, comignoli, terminali impiantistici, etc.), permettendo di definire i limiti applicativi del sistema e i vantaggi economici rispetto ad una soluzione tradizionale.



Figura 2. Caso studio di Cinisello Balsamo – confronto fra lo stato di fatto (a sinistra) e il progetto (a destra).

4. RISULTATI

La configurazione finale del pannello a seguito del processo di ottimizzazione si è orientata verso lo sviluppo di un pannello semi-portante realizzato tramite un cassone multi-cella in pannelli sottili in OSB di pioppo o betulla, in grado di ospitare al suo interno diverse tipologie di isolanti con alto contenuto di materiale riciclato.

La struttura del modulo "standard" risulta composta come rappresentato in Figura 3.

La larghezza del pannello "standard" è stata studiata con un interasse tra i correnti longitudinali di 70 cm, con il possibile assemblaggio in officina di 2 o 3 moduli. L'elemento di copertura presenta uno sviluppo unico da gronda a falda, permettendo così una posa particolarmente rapida e precisa, oltre che economica. Per la realizzazione degli elementi di gronda si è optato per mantenere dei componenti separati, con travetti in legno KVH 5x8 cm a sezione variabile fissati lateralmente al cassone del pannello tramite apposite asole sul lato minore.

Tutti gli elementi di tenuta, sia la membrana interna con la funzione di freno al vapore che quella esterna di tenuta all'acqua, sono state

pensate per essere totalmente integrate già in fase di preassemblaggio. Questo comporta un attento studio delle sovrapposizioni delle varie parti, al fine di garantire la perfetta sigillatura tra i vari moduli ed evitare danni legati al degrado concentrato.

Cod.	Descrizione elemento	Spessore mm
<i>Esterno</i>		
1	Manto di copertura discontinuo	-
2	Listelli di ventilazione in abete 40x50 mm	80
3	Strato impermeabile traspirante al vapore	0.3
4	Pannelli in lana di legno mineralizzata	40
5	Pannelli OSB	25
6	Isolamento termico*	160
7	Freno vapore	0.2
8	Pannello MDF	8
9	Intercapedine d'aria non ventilata	40
10	Rivestimento interno in perline di abete	22
<i>Interno</i>		

* Previste diverse tipologie di isolante.

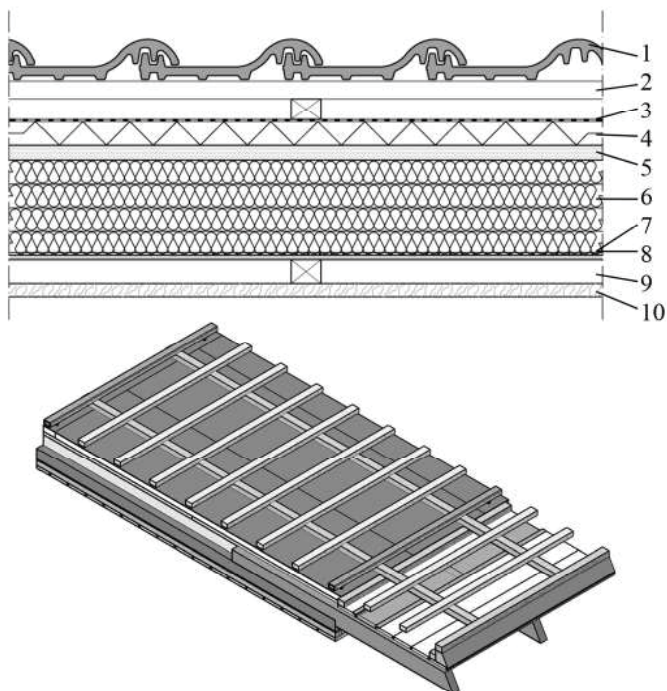


Figura 3. Composizione del pannello di copertura.

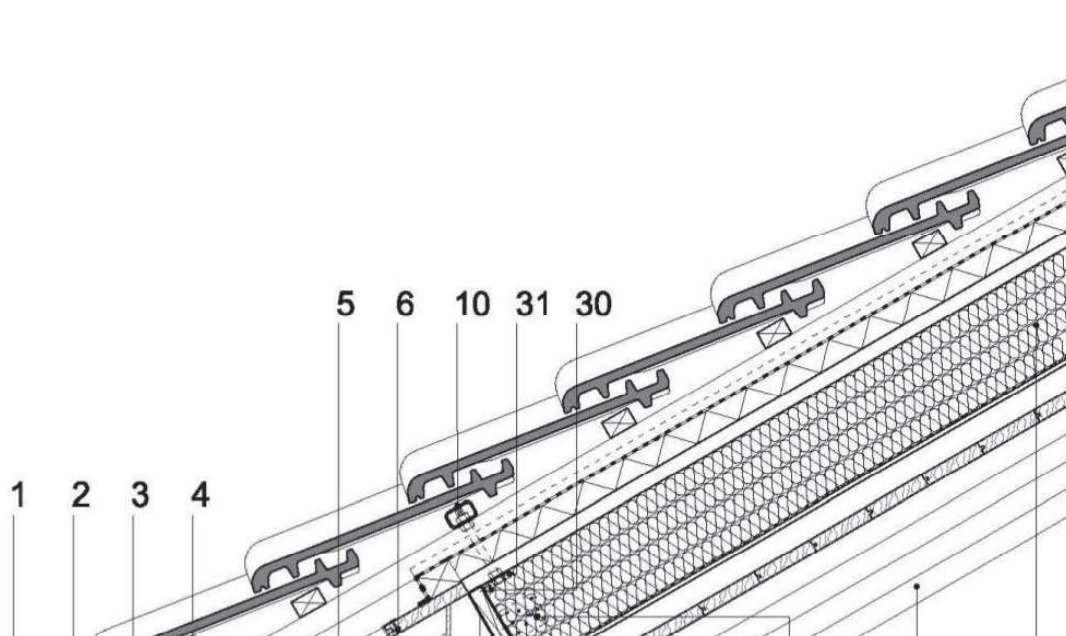


Figura 4. Connessione verticale di gronda.

Allo stesso modo sia i travetti di ventilazione e pendenza sia quelli porta tegola sono stati studiati al fine di poter essere disposti già in officina. Sfruttando tale opzione è apparso evidente il vantaggio di utilizzare l'elemento trasversale in gronda e al colmo per l'ancoraggio e la movimentazione del pannello in fase di trasporto e di messa in opera. A tal fine è stato inserito un elemento tubolare

di supporto in acciaio zincato, saldamente vincolato alla struttura in OSB del pannello, capace di supportare il carico generato dal sollevamento e posizionamento del pannello.

Un'apposita intercapedine non ventilata è stata posta come strato di separazione tra la parte portante del pannello e il rivestimento interno. Questa svolge un duplice ruolo: da una parte permette il passaggio di corrugati elettrici, eventuali corpi illuminanti incassati e passaggi di canalizzazioni d'aria o d'acqua in assoluta libertà senza intaccare la parte portante del pannello, dall'altra garantisce la continuità della tenuta al vapore dello strato superiore. Per tale motivo risulta fondamentale l'inserimento di uno strato piano di contenimento dell'isolante in intercapedine e per la posa del freno a vapore.

In riferimento alla UNI EN ISO 6946 [15] sono state effettuate delle verifiche della termotrasmissione della sezione corrente di copertura, al fine di verificare il rispetto dei limiti definiti all'interno dal D.Lgs 311/2006 e s.m.i [16]. Successivamente sono state effettuate le verifiche igrometriche sulla base delle condizioni climatiche riscontrabili nel mese peggiore al fine di scongiurare il rischio condensa e la formazione di muffe nelle interfacce più critiche all'interno della struttura.

Da ultimo, al fine di definire l'influenza delle discontinuità presenti all'interno del pannello (giunti di estremità, diaframmi in OSB, appoggio sui travetti, etc.) è stata calcolata, tramite appositi modelli di calcolo numerico, la trasmittanza termica reale influenzata dai ponti termici strutturali e il coefficiente di trasmittanza termica lineica (Ψ).

Per il calcolo è stato utilizzato il tool "Mold simulation - dynamic version" presente all'interno del software agli elementi finiti DarTWin. Tramite il software è possibile effettuare analisi termiche in regime dinamico con modelli agli elementi finiti secondo la EN ISO 13786 [17].

Per i calcoli igrotermici è stato considerato un regime stazionario con le seguenti condizioni al contorno (cc):

- Temperatura aria interna (T_i) = 20 °C;
- Temperatura aria esterna (T_e) = -5 °C;
- Umidità relativa interna (UR) = 65%;
- Umidità relativa esterna (UR) = 80%.

Sono stata analizzate 3 diverse alternative di isolamento nell'intercapedine del pannello:

- pannelli in tessuti riciclati;
- pannelli in lana di canapa;
- pannelli in fibre di poliestere riciclate.

L'opzione 1 è stata valutata essere la più economica, con un valore di mercato intorno a 6.60 €/m² per pannelli di densità 50 kg/m³, in grado di garantire ottimi livelli di isolamento termico e capacità termica all'elemento di copertura con un valore U di progetto di 0.179 W/m²K e uno sfasamento di 11 h e 48 min.

In riferimento alla UNI EN ISO 10211 [18] la struttura è stata analizzata per evidenziare eventuali fenomeni di trasferimento di calore localizzato (ponti termici) e valutarne l'intensità e l'incidenza sulla trasmittanza termica globale della struttura ideale a cui si riferisce. Tramite l'analisi agli elementi finiti è stato possibile evidenziare gli andamenti dei flussi e delle temperature all'interno della sezione

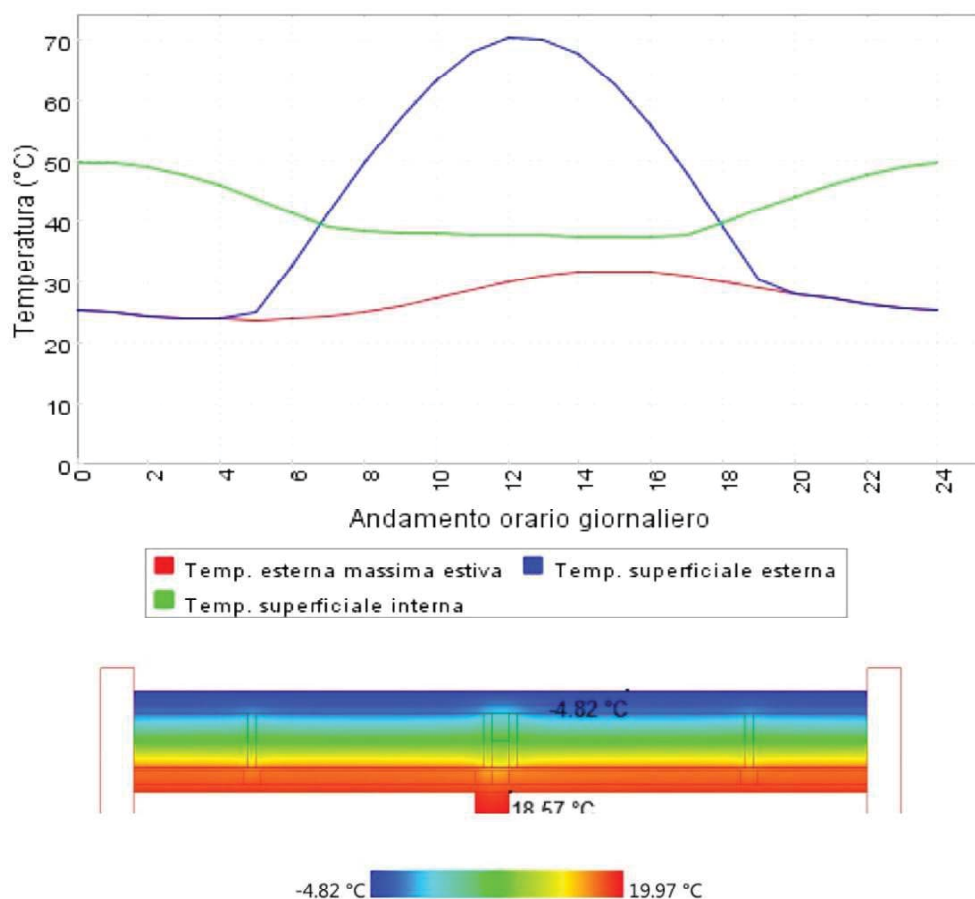


Figura 5. Andamento orario giornaliero delle temperature in periodo estivo e valutazione dei ponti termici strutturali.

indagata in funzione delle condizioni al contorno considerate. Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

- $U_{ideale} = 0.179 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- $U_{media} = 0.1978 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- $L2D = 0.4301 \text{ W/mK}$;
- $\Psi = 0.23 \text{ W/mK}$.

Il ponte termico comporta quindi un peggioramento del valore di U di circa il 9.5% e presenta un coefficiente termico lineico di appena 0.23 W/mK , ben al di sotto dei valori stimati dei principali ponti termici corretti presenti in edilizia in casi simili contenuti nella UNI EN ISO 14683 [19].

Dai calcoli effettuati risulta dunque evidente come la soluzione di progetto studiata presenti delle caratteristiche termo-igrometriche che, oltre a rispettare abbondantemente i limiti imposti dalla normativa nazionale vigente in materia di risparmio energetico, garantiscono delle condizioni interne di comfort con valori di temperatura superficiale minima nel mese più sfavorevole (Gennaio) di ben 18.6 °C . Questo, oltre ad evitare fenomeni di condensa superficiale e la formazione di muffe, favorisce il benessere ambientale evitando il fenomeno dello discomfort asimmetrico radiativo.

5. CONCLUSIONI

Il sistema costruttivo industrializzato descritto nel presente paper è risultato essere originale, in rapporto a quanto già esiste sul mercato, e con un buon livello di prefabbricazione, sebbene alcune scelte strategiche, legate alle necessità produttive delle Cooperative coinvolte, abbiano portato a non avere un'integrazione del sistema strutturale all'interno del modulo. Il prodotto risulta conforme ai requisiti richiesti, così come dimostrato dalle verifiche effettuate, e facilmente adattabile a diversi contesti, nonostante permangano alcuni limiti nell'applicazioni su casi con geometrie particolarmente complesse.

I punti di forza della soluzione progettata sono molteplici. L'utilizzo di materiali eco-compatibili, con alto contenuto di materiale riciclato e di prodotti a base legno (OSB, MDF, lana di legno mineralizzata, etc.), rende il pannello adatto anche a interventi su edifici per i quali è richiesta una certificazione di elevati valori di qualità ambientale. I valori di trasmittanza termica, inoltre, risultano inferiori di quasi il 40% rispetto ai limiti di legge, garantendo elevati livelli di comfort ambientale e contenendo le dispersioni termiche per trasmissione. La facilità di gestione delle varie fasi di assemblaggio in officina è garantita dalla leggerezza dell'assemblato per il quale, in rapporto a elementi prefabbricati di pari dimensioni, non sono richiesti macchinari per la movimentazione e il trasporto particolarmente onerosi. In cantiere la facilità di movimentazione è assicurata tramite un apposito sistema di fissaggio a barre tubolari posizionate in prossimità delle estremità dei pannelli, che permette di posizionare velocemente i vari elementi prima di realizzare le sigillature dei giunti dei teli di tenuta all'acqua e al vapore, già integrati in officina assieme alla listellatura per la ventilazione.

Dai risultati ottenuti alcuni aspetti necessitano di ulteriori approfondimenti, che saranno oggetto di futuri sviluppi di ricerca prima della commercializzazione del prodotto, tra i quali: la verifica, tramite un apposito mock-up in scala reale, dell'efficacia delle connessioni tra le varie parti del cassone in OSB e delle piastre di collegamento per il fissaggio e la movimentazione, la tenuta all'acqua e all'aria dei giunti e la giustapposizione dei vari elementi costruttivi; validazione su un progetto pilota, per confrontare con una geometria specifica problemi ergonomici del cantiere, verifica dei ponti termici specifici e problemi di coordinamento e gestione degli approvvigionamenti tramite i diversi fornitori.

6. RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare la Fondazione Cariplo e la Fondazione della Provincia di Lecco Onlus per avere finanziato il progetto Habitat. Un ringraziamento speciale al Consorzio Cooperative Consolida, partner e co-finanziatore, INBAR e Italcert per la cooperazione durante tutte le fasi del progetto.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Juan Y.K., Perng Y.H., Castro-Lacouture D., S.Lu K., Housing refurbishment contractors selection based on a hybrid fuzzy-QFD approach, *Automat Control*, vol. 18, pp. 139–144, 2009.
- [2] ISTAT - 15° Censimento Generale della Popolazione e delle Abitazioni 2011, 2011. <<http://censimentopopolazione.istat.it>>
- [3] Convegno ReBuild 2015, Innovare la riqualificazione e la gestione immobiliare, Palazzo Congressi, Riva del Garda, 25-26 giugno 2015, <<http://www.rebuilditalia.it>>.
- [4] Corrado V., Ballarini I., Corgnati S.P., Typology Approach for Building Stock Energy Assessment (TABULA), National scientific report on the TABULA activities in Italy, Politecnico di Torino - Dipartimento di Energia, Torino, Italy, 2012.
- [5] CRESME RICERCHE SPA, L'efficienza energetica in edilizia fra benessere, risparmio e ambiente: gli scenari del mercato, Rapporto SAIENERGIA 2010.
- [6] Gardino P., Il mercato italiano delle case in legno nel 2010. Analisi del mercato Previsioni fino al 2015, Promo_Legno, 2011.
- [7] OECD, «Organization for Economic Co-operation and Development», 2010, <<http://stats.oecd.org/Index.aspx#>>.

- [8] Lehmann S., Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions, *Sustainable Cities and Society*, vol. 6, pp. 57–67, 2013.
- [9] Villa N., Pittau F., De Angelis E., Iannaccone G., Dotelli G., Zampori L., Wood products for the Italian construction industry – an LCA-based sustainability evaluation, in *WCTE 2012 – World Conference on Timber Engineering*, Auckland, New Zealand, pp. 609-613, 2012.
- [10] Spiehs H., Richter C., Barbu M.C., An environmental friendly-engineered wood product for buildings: cross laminated timber, in *First Serbian Forestry Congress*, Belgrade, Serbia, 2010.
- [11] Pittau F., *Sistemi costruttivi misti*, Arketipo, vol. 88, pp. 107-110, 2015.
- [12] Crocetti R., Sartori T., Tomasi R., Innovative Timber-Concrete Composite Structures with Prefabricated FRC Slabs, *Journal of Structural Engineering*, vol. 141(9), 2015.
- [13] Nechanický P., Kuklik P., Prefabricated timber-concrete composite floor, in *CESB13 – Central Europe towards Sustainable Building*, Prague, Czech Republic, 2013.
- [14] Pittau F., Malighetti L. E., Masera G., Iannaccone G., Preassembled timber panels for roof retrofit: a method for the selection of sustainable and recycled materials, in *40th IAHS World Congress on Housing – Sustainable Housing Construction*, Funchal, Portugal, 2014.
- [15] European Committee for Standardization (CEN), UNI EN ISO 6946.
- [16] D. Lgs 29 Dicembre 2006, n.311, “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell’edilizia”, GU n. 26 del 1-2-2007- Suppl. Ordinario n.26.
- [17] European Committee for Standardization (CEN), EN ISO 13786.
- [18] European Committee for Standardization (CEN), UNI EN ISO 10211.
- [19] European Committee for Standardization (CEN), UNI EN ISO 14683.