

Colloqui.AT.e 2023

In Transizione: sfide e opportunità per l'ambiente costruito

In Transition: challenges and opportunities for the build heritage

Editors

Fabio Fatiguso, Francesco Fiorito,
Mariella De Fino, Elena Cantatore

I curatori, l'editore, gli organizzatori ed il Comitato Scientifico non possono essere ritenuti responsabili né per il contenuto, né per le opinioni espresse all'interno degli articoli.

Gli articoli pubblicati, i cui contenuti sono stati dichiarati originali dagli autori stessi, sono stati sottoposti ad un processo di *double-blind peer review*.

Negli articoli l'asterisco accanto al cognome di un autore indica il referente al quale indirizzare la corrispondenza.

È utile sottolineare che i comitati non sono responsabili dei contenuti e delle opinioni espresse nei singoli contributi pubblicati nel volume. Le opinioni sono espressamente riferibili agli Autori dei contributi pubblicati nel presente volume. La presenza di prodotti e nomi commerciali non costituiscono una raccomandazione d'uso.

The editor, the publisher, the organizers and the Scientific Committee cannot be held responsible either for the content or for the opinions expressed in the articles.

Published articles, whose contents have been declared original by the authors themselves, have been subjected to a double-blind peer review process.

In the articles, the asterisk next to the surname of an author indicates the contact person to whom correspondence should be addressed.

The conference Committees are not responsible for the statements of opinions expressed in this publication. Any Statements of view expressed in the papers contained in this Book are those of the Author(s). Mention of trade names or commercial products does not constitute endorsement or recommendation for use.

Il volume è a cura di / The volume was edited by:

Fabio Fatiguso, Francesco Fiorito, Mariella De Fino, Elena Cantatore

Il volume è pubblicato con il patrocinio di / This book has been published with the patronage of
UNIBIM | Master BIM Manager – Università di Pisa

La foto di copertina è di Francesco Carlucci

EdicomEdizioni
Monfalcone (Gorizia)
info@edicomedizioni.com
www.edicomedizioni.com
www.edicomstore.it

© Copyright EdicomEdizioni

Vietata la riproduzione anche parziale di testi, disegni e foto se non espressamente autorizzata. Tutti i diritti sono riservati a norma di legge e delle convenzioni internazionali.

The reproduction, even partial, of texts, drawings and photos is forbidden unless expressly authorized. All rights are reserved by law and international conventions.

ISBN 979-12-81229-02-0

Prima edizione ottobre 2023 / First edition October 2023

Colloqui.AT.e 2023

**In Transizione:
sfide e opportunità
per l'ambiente costruito**

**In Transition:
challenges and opportunities
for the build heritage**

A cura di / Editors

Fabio Fatiguso, Francesco Fiorito,
Mariella De Fino, Elena Cantatore

14-17 giugno 2023

*Politecnico di Bari – Dipartimento di Ingegneria Civile,
Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica*

*Polytechnic University of Bari – Department of Civil,
Environmental, Land, Building Engineering and Chemistry*

EdicomEdizioni

Indice

INTRODUCTION	18
INTRODUZIONE	20
<u>A – CONSTRUCTION HISTORY AND PRESERVATION</u>	
IL MAL SOTTILE E L'ARCHITETTURA SANATORIALE IN ABRUZZO M. Abita, D. Di Donato, A. Tosone, R. Morganti	25
UN.BUILDING. ESERCIZI PROGETTUALI DI CONTRAZIONE CONTROLLATA IN UN PAESE IN VIA DI SPOPOLAMENTO M. Achenza, P. Cherchi, A. Rivera Vidal	41
IL PADIGLIONE MANDOLESÌ: PROGETTO DI RECUPERO DI UN EDIFICIO MODERNO NEL CAMPUS DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA DELL'UNIVERSITÀ DI CAGLIARI M. Agus, C. Atzeni, S. Cadoni, G. Desogus, F. Marras, E. Quaquero, A. Sanna	57
UN INVENTARIO TIPOLOGICO ALLA RICERCA DEI CRITERI PROGETTUALI IN UN CONTESTO DI NUOVA FONDAZIONE. LO STUDIO DI UN BRANO DEL TESSUTO URBANO A MESSINA G. Angileri, G. Tomasello	73
GLI EDIFICI ANTITUBERCOLARI PER L'INFANZIA A PALERMO: TIPOLOGIA E TECNOLOGIA T. Basiricò	91
ARCHITETTURA E COSTRUZIONE PER L'INDUSTRIA AGRO-ALIMENTARE IN ITALIA. IL CASO DI UDINE (1920-26) A. Bertolazzi, G. Croatto, U. Turrini, F. Chinellato, L. Petriccione	103
WORK PACKAGING MODEL PER LE IPOTESI COSTRUTTIVE DEL MAUSOLEO DI TEODORICO C. Bezzi, M.A. Bragadin e L. Guardigli	117
LA SCUOLA ITALIANA DI INGEGNERIA E I "CAPOLAVORI POSTUMI": ARCHITETTURA, TECNOLOGIA E COSTRUZIONE DEL VIADOTTO DI MODICA IN SICILIA (1962-67) F. Cammarata	133
L'INGEGNERIA STRUTTURALE NEL PROGETTO "CARTA DELLA CULTURA INDUSTRIALE" G. Capurso, L. Grieco	147
RESTAURO ARCHITETTONICO SOSTENIBILE CON MALTE IDRAULICHE NATURALI A BASE CALCE E COCCIOPESTO. TEORIE E APPROCCI CATANESI, UNA RASSEGNA DELL'ULTIMO DECENNIO S.M. Cascone, L. Longhitano, G.A. Longhitano	165
HERITAGE IMPACT ASSESSMENT IN UNESCO WHS. AN APPROACH FOR EVALUATING HUMAN-INDUCED ALTERATIONS IN TRADITIONAL BUILDING'S FACADES P. Cucco	177
SPAZI E STRUTTURE PER L'INDUSTRIA: EVOLUZIONI DELLA VOLTA SOTTILE AUTOPORTANTE IN ITALIA E. Currà, I. Giannetti, M. Russo	193

MACCHINA, FABBRICA E PROGETTO. CONVERGENZE DISCIPLINARI PER IL RECUPERO DEL PALAZZO-FABBRICA DELLA ZECCA DI ROMA E. Currà, M. Russo, L. Severi, C. Cui	209
LA RIQUALIFICAZIONE PRESTAZIONALE DEI QUARTIERI INA CASA DI MESSINA. GLI ALLOGGI PER LAVORATORI DI FILIPPO ROVIGO IN CONTRADA GAZZI FUCILE G. Currò, G. F. Russo	227
LA COSTITUZIONE DI UN PARCO RURALE DELLE MADONIE. UN PROGETTO COMUNITARIO PER IL RECUPERO E LA VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO E PAESAGGISTICO DI UN'AREA INTERNA DELLA SICILIA OCCIDENTALE A. D'Amore, M. Saeli, T. Campisi	243
IL RIUSO DELL'EDILIZIA DISMESSA. IL CASO-STUDIO DEI CASELLI FERROVIARI: ANALISI E PROPOSTE METODOLOGICHE E. D'Andria, P. Fiore	261
CONSERVAZIONE E RESILIENZA NELL'ESPERIENZA DI PALAZZO CARLI A L'AQUILA. RIFLESSIONI SU UN APPROCCIO METODOLOGICO PER EDIFICI STORICI IN CONTESTI POST-CATASTROFE P. De Berardinis, G. Di Giovanni, A. Tosone, M. Rotilio, F. Cavalieri, L. Vespasiano	279
LE FABBRICHE A STRUTTURA D'ACCIAIO NEL MEZZOGIORNO D'ITALIA: IL CENTRO LOGISTICO SIVAM A GIOIA DEL COLLE D. Di Donato, M. Abita, A. Tosone, R. Morganti	299
L'ALBERO INQUILINO E LA CRITICA AL RAZIONALISMO G. Di Mari, E. Garda, T. Casale, A. Renzulli, E. Ricchiello	315
SOLUZIONI DI ADATTAMENTO CLIMATICO DELLO SPAZIO APERTO NEGLI EDIFICI STORICI. IL CASO DEL COMPLESSO DI SAN FRANCESCO DEL PRATO (PARMA) B. Gherri	327
MODELLI CITYGML-BASED SUPPORTATI DA SISTEMI DECISIONALI PER LA CONSERVAZIONE E LA GESTIONE DEL PATRIMONIO STORICO-CULTURALE. UNA REVISIONE SISTEMATICA M. Lasorella, E. Cantatore, F. Fatiguso	345
PROGETTO DI DOCUMENTAZIONE, MAPPATURA E FRUIZIONE DI UN OGGETTO ARCHITETTONICO IN UN SISTEMA INFORMATIVO M. Morandotti, E. Doria	365
CONSERVAZIONE E VALORIZZAZIONE DEL COSTRUITO PER UNO SVILUPPO SOSTENIBILE. IL CASO DEL COLLEGIO SPALLANZANI DI PAVIA M. Morandotti, A. Greco, D. Besana, F. Pelini	381
TRASFORMAZIONI CULTURALI E SPERIMENTAZIONI COSTRUTTIVE NELLE ARCHITETTURE DEL '900. LA "CASA DEL MUTILATO" DI BARI A. Pagliuca, P. P. Trausi, G. Grimaldi	397
RI-SCRITTURA DEL PATRIMONIO CULTURALE DEL MADE IN ITALY TRA DIGITALIZZAZIONE E DESIGN STRATEGICO V.D. Porcari, R. Lorusso, A. Guida	413
SUPPORTO ALL'ANALISI COSTRUTTIVA PER GLI EDIFICI STORICI: APPLICAZIONI DEL <i>REVERSE ENGINEERING</i> AL RILIEVO DEL PATRIMONIO COSTRUITO D. Prati, A. Massafra, L. Guardigli, R. Gulli	427

VILLA ARATA DI GIO PONTI A NAPOLI TRA IDENTITÀ RAZIONALISTA E TRADIZIONI MEDITERRANEE F. Ribera, P. Cucco	443
INNOVAZIONE E SPERIMENTAZIONE NEL SOLCO DELLA TRADIZIONE: IL CANTIERE STORICO DEL PALAZZO DI GIUSTIZIA DI ROMA F. Ribera, P. Cucco, G. Neri	459
LE OPERE IDRICHE E LE VIE D'ACQUA NELLA FORMAZIONE DEL TESSUTO STORICO URBANO. PARADIGMI DI GOVERNANCE TRADIZIONALE E CONSERVAZIONE DEL PATRIMONIO CULTURALE F. Ribera, A. Gallo, P. Cucco	473
RAZIONALIZZAZIONE DEI PROCESSI COSTRUTTIVI E PREFABBRICAZIONE: UN BREVETTO DI SOGENE E FABRIZIO DE MIRANDA PER PONTI A STRUTTURA MISTA ACCIAIO-CALCESTRUZZO F. Spada	491
STRATEGIE DI RIGENERAZIONE DEI CENTRI MINORI ATTRAVERSO LA VALORIZZAZIONE E L'INNOVAZIONE TECNOLOGICA DELLE RISORSE LOCALI: UN CASO LOMBARDO F. Speciale, L. E. Malighetti, M. Grecchi	505
RESISTERE "PER FORMA". LE VOLTE A GUSCIO NELLA COSTRUZIONE STORICA SICILIANA: IL CASO DI PARTINICO C. Vinci, S. Di Maggio, C. Di Maggio	521
RIGENERARE LE PERIFERIE URBANE DI BARI: PICTOR OPTIMUS, UN COWORKING HUB DELLE ARTI PITTORICHE NEL QUARTIERE POGGIOFRANCO C. Vizzarri, S. Zingaro, V. Zappimpulso, M. De Fabrizio, A. Calderazzi	535
RIGENERAZIONE URBANA E DISEGNO DELLA NATURA URBANO-INDUSTRIALE L. Zecchin	553
LE ARCHITETTURE RELIGIOSE DI GIUSEPPE NICOLOSI NEL CONTESTO CASSINATE M. Zordan, F. Fragnoli	569

B – CONSTRUCTION AND BUILDING PERFORMANCE

STRUMENTI E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA MITIGAZIONE DEI RISCHI AMBIENTALI E ANTROPICI DEL PATRIMONIO CULTURALE. IL CASO STUDIO DELLA CHIESA DI SAN FRANCESCO A SANT'AGATA DEI GOTI M. Angrisano, I. Mecca, A. Scotto di Santolo	583
TOWARD INTEGRATED REDEVELOPMENT OF INDUSTRIAL BUILDINGS: A GENERAL INTERVENTION PROTOCOL AND A CASE STUDY N. Banti, C. Ciacci, V. Di Naso, F. Bazzocchi	595
VALUTAZIONE (BEHAVIOURAL DESIGN-BASED) MULTIRISCHIO DI AMBIENTI COSTRUITI URBANI E DELLE STRATEGIE DI MITIGAZIONE: IL CASO DELLE PIAZZE STORICHE G. Bernardini, E. Quagliarini, M. D'Orazio	613
STRUMENTI E METODI INNOVATIVI PER LA MANUTENZIONE PREVENTIVA E PROGRAMMATA PER LA CONSERVAZIONE DEL PATRIMONIO CULTURALE G. Bernardo, C. Rinaldi, A. Guida	633

APPLICATION POTENTIALS OF A 3D EXOSKELETON TECHNOLOGY COMBINED WITH PREFABRICATED PANELS TO RENOVATE THE MODERN BUILDING STOCK M. Bosco, S. D'Urso, G. Margani, E. M. Marino, G. M. Nicolosi, C. Tardo	649
SOSTENIBILITÀ FORMALE VS SISTEMA A CAPPOTTO: L'IMPIEGO DI MALTE FIBRO-RINFORZATE PER IL RIPRISTINO DELLE FACCIATE L. Calabrese, F. Grungo, R. Lione, F. Minutoli	661
GLI STANDARD E LINEE GUIDA PER LA MISURAZIONE DELLE EMISSIONI DI CARBONIO IN EDILIZIA: ANALISI DELLA LETTERATURA M. Calistri, M. A. Bragadin, S. Righi	675
MOQA: A LOW-COST, PLUG-AND-PLAY, WIRELESS SMART HUB FOR BUILDING ENERGY PERFORMANCE AND INDOOR COMFORT MONITORING AND OPTIMIZATION N. Callegaro, R. Albatici	691
EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI SCOLASTICI PUGLIESI: UN'INDAGINE BASATA SULLA RILEVAZIONE DEI CONSUMI REALI L.M. Campagna, F. Fiorito	709
L'IDENTIFICAZIONE DEL RISCHIO EDILIZIO COME FASE NECESSARIA PER LA GESTIONE DEGLI SCENARI MULTI-RISCHIO R. Castelluccio, M. Fraiese, L. Diana, V. Vitiello	727
BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS (BIPV): EMERGING TECHNOLOGIES, PATENTS, AND PRODUCTS K. A. Castro M., R. Corrao	745
RELAZIONE UOMO-ARCHITETTURA NELLE VELE DI SCAMPIA. LO SPAZIO DI RISONANZA A. Catalano, C. Sansone, B. Bonetti	761
STRUMENTI GEOREFERENZIATI SPEDITIVI PER LA SIMULAZIONE ENERGETICA, ANALISI LCA E LCC ALLA SCALA DELL'ISOLATO URBANO. UNA METODOLOGIA COMPARATIVA, <i>CRADLE-TO-CRADLE</i> , PER VALUTARE SCENARI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA E DEMOLIZIONE-RICOSTRUZIONE C. Costantino, A.C. Benedetti, R. Gulli	769
STRUMENTI DIGITALI PER L'EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI: UNA REVISIONE SISTEMATICA DELLA LETTERATURA F. De Simone, M. Morganti, A. D'Amico	789
METODOLOGIA PER L'ANALISI ENERGETICA DI CONTESTI EDILIZI CONSOLIDATI: DAL RILIEVO ALLA COSTRUZIONE DEL MODELLO DIGITALE R. Chieppa, G.R. Dell'Osso, F. Iannone	805
COME È CAMBIATA LA PERCEZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ E DELL'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO SUGLI EDIFICI NELLA RICERCA DOPO IL COVID 19. UN PRIMO SONDAGGIO U.M. Coraglia, C. Morganti, M.A. Bragadin, S. Pelsmakers	823
BIM FOR HEALTHY BUILDINGS: UN APPROCCIO INTEGRATO ALLA PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA BASATO SULLA PREVISIONE DELLA IAQ A. D'Amico, E. Currà, G. Bergonzoni, A. Pini, P. Monti, G. Confessore, D. Rinaldi	839
END-USER'S PERCEPTION OF THE STATE OF THE BUILDING SYSTEMS THROUGH SENTIMENT AND EMOTION ANALYSIS METHODS M. D'Orazio, E. Di Giuseppe, G. Bernardini	859

IDENTIFYING AND PREVENTING PATHOLOGIES IN ALPINE HUTS AND BIVOUACS: A NEW METHODOLOGY BASED ON TYPE ANALYSIS AND CLUSTERING G. Dorigatti	871
PROGETTAZIONE E VERIFICA SPERIMENTALE DI UN RIVESTIMENTO DI FACCIATA, A BASE DI SCARTI LAPIDEI, PER LA RIDUZIONE DEL RUMORE NEI CANYON URBANI M. Ferrero, A. Coletta, C.V. Fiorini, A. Vallati	887
PATOLOGIA DEL “DETTAGLIO”. LE COPERTURE CONTINUE M. Fiori, E. De Angelis	905
UN PERCORSO METODOLOGICO VERSO EDIFICI ZERO-CARBON G.Iannaccone, F.Pittau, E.Kamel	917
LEG.AT.I – LEGARE I LEGANTI: CEMENTO, TERRA CRUDA E GEOPOLIMERI M. La Noce, G. Sciuto	929
MURATURE STORICHE, UN’ANALISI FEM PER VALUTARNE LE PROPRIETÀ TERMOFISICHE E. La Placa, G. E. Dino, C. Vinci	949
VERDE VERTICALE NEGLI EDIFICI. CAMPAGNA SPERIMENTALE PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DI UNA PARETE VERDE IN AREA MEDITERRANEA G. Lombardo, A. Lo Faro, A. Moschella, G. Sciuto, A. Salemi, M. Detommaso	963
RESIDENTIAL ENERGY RETROFITS: BALANCING DAYLIGHT PERFORMANCE AND OUTDOOR VIEW A.G. Mainini, M. Cavaglià, J.D. Blanco Cadena, A. Speroni, T. Poli, C. Meli	977
COMPLESSITÀ E CAMBIAMENTO CLIMATICO: IL RUOLO DELL’AMBIENTE COSTRUITO ED I METODI PER CONSIDERARE LE INCERTEZZE E MOLTEPLICI OBIETTIVI S. Mannucci, A. Ciardiello, F. Rosso, M. Morganti, M. Ferrero	993
RETROFIT AMBIENTALE DI EDIFICI ESISTENTI: VALUTAZIONE DELL’IMPATTO DI FLUOROCARBURI RESIDUI MEDIANTE ANALISI DI SENSITIVITÀ E INCERTEZZA G. Maracchini, R. Di Filippo, R. Albatì, O.S. Bursi, R. Di Maggio	1011
ARCHITETTURA OSPEDALIERA FLESSIBILE: ANALISI DEL CONTESTO ITALIANO CONTEMPORANEO R. Marmo, G. De Lucia, P. Fiore, E. Sicignano	1029
STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM) AND THE IMPLEMENTATION OF THE INTERNET OF THINGS (IOT) PARADIGM A. Martinelli	1045
A MULTI-FUNCTION AND COST-EFFECTIVE SENSOR NETWORK SYSTEM DEVELOPMENT FOR INDOOR AIR QUALITY MONITORING APPLICATIONS. VALIDATION PROCEDURE AND EXPERIMENTAL TESTS IN A SCHOOL CLASSROOM F. Nabilou, M. Maresca, A.G. Mainini	1061
KEY ENABLING TECHNOLOGIES PER LA VALUTAZIONE DELL’EFFICIENZA ENERGETICA E DELLA QUALITÀ DELL’ARIA INDOOR NEGLI EDIFICI A. Pagliuca, D. Gallo	1079
ANALISI E OTTIMIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DI UNA PARETE VENTILATA A STRUTTURA COMPOSITA IN LEGNO E CALCESTRUZZO MEDIANTE CFD S. Pastori, N. Concato, V. Rava, G. Scrinzi, E.S. Mazzucchelli	1093
ANALISI SPEDITIVE PER LA VALUTAZIONE SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN CALCESTRUZZO ARMATO E MURATURA. IL METODO ADRISEISMIC G. Predari, L. Stefanini	1111

RIVESTIMENTI ELETTRICAMENTE CONDUTTIVI “AUTORISCALDANTI” A BASE DI GRAFENE: PROGETTAZIONE E STUDIO DELLE PRESTAZIONI S. Polverino, S. Bellani, G. Bianca, L. Gabatel, F. Bonaccorso	1127
COME INCREMENTARE LA SICUREZZA MULTIRISCHIO DELL’AMBIENTE COSTRUITO TRAMITE UN APPROCCIO COMPORTAMENTALE: RISULTATI DAL PROGETTO BE S ² ECURE E. Quagliarini, E. Currà, F. Fatiguso, G. Mochi and G. Salvalai	1147
THERMOPHYSICAL CHARACTERIZATION AND LIFE CYCLE ASSESSMENT OF TWO ALTERNATIVE GREEN ROOF SYSTEMS R. Rapisarda, R. Caponetto, F. Nocera, V. Costanzo, G. Sciuto	1167
TIPOLOGIE MURARIE LOCALI NON INCLUSE NELLA CIRCOLARE N.7/2019 ALLE NTC18: COME ORIENTARSI? IL CASO DELLE MURATURE MISTE IN PIETRA E MATTONI PIENI DELLE MARCHE G. Romano, E. Quagliarini, G. Pace, M. Renzi	1183
ANALISI SPERIMENTALE DI UN NUOVO INTONACO A BASE DI AGGREGATI NATURALI G. Salvalai, A. Stefani, M. Imperadori, G. Nerobutto	1197
UNA CASSETTA DEGLI ATTREZZI PER PARAMETRIZZARE IL BENESSERE DEI FRUITORI E RENDERE SANI GLI AMBIENTI L.M.S. Savoca	1211
OPAQUE FAÇADES ENERGY REFURBISHMENT: DESIGN OPTIONS AND GOOD PRACTICE G. Scrinzi, E. S. Mazzucchelli, A. Lucchini, S. Pastori, A. Stefanazzi	1227
LA RIQUALIFICAZIONE DEL PATRIMONIO EDILIZIO ESISTENTE FINALIZZATA ALLA SICUREZZA E AL BENESSERE. L’OPPORTUNITÀ TECNICA E LE RECENTI AGEVOLAZIONI FISCALI C. Sicignano, F. Polverino	1243
VALUTAZIONE SPERIMENTALE DI UN NUOVO INVOLUCRO IN BLOCCHI TERMICI DAL CONFRONTO CON UNA PARETE LEGGERA S. Summa, G. Remia, C. Di Perna, F. Stazi	1255
IL PAESAGGIO SONORO NELLA PROGETTAZIONE SOSTENIBILE DELL’AMBIENTE COSTRUITO S. Torresin, R. Albatici, F. Aletta, J. Kang	1265

C – DESIGN AND BUILDING TECHNOLOGIES

SVILUPPO DI UN PRODOTTO BASATO SU UN MATERIALE CIRCOLARE: IL CARTONE PER UN’EDILIZIA PIÙ SOSTENIBILE C. Antonetti, M. Rotilio	1283
CONSTRUCTION 4.0: ADDITIVE MANUFACTURING E EDILIZIA MODULARE PER REALIZZARE IL CANTIERE DEL FUTURO C. Battaglia, R. Morbiducci, A. Vitale	1301
URBAN MINING E RIGENERAZIONE: UPCYCLING PER LA CASA DELLA CULTURA A RIETI A. Bellicoso, S. Manna, G. Di Giovanni, G. Angelucci	1315
USO DEI PROTOCOLLI ENERGETICI NELLA PROGETTAZIONE POST EMERGENZIALE: ESPERIENZE A CONFRONTO M. Bellomo	1333

PROCESSI PARTECIPATIVI PER FAVORIRE LA TRANSIZIONE VERSO LA NEUTRALITÀ CLIMATICA. IL CASO DI BOLOGNA A.C. Benedetti, C. Mazzoli, K. Douka, A. Ferrante, L. Cameli, C. Lantieri	1349
SVILUPPO DI UNA PIATTAFORMA COMPUTAZIONALE INTERATTIVA PER LA SIMULAZIONE DI INVOLUCRI RESPONSIVI AD ALTE PRESTAZIONI IN DIVERSI SCENARI CLIMATICI TIPICI E FUTURI F. Carlucci, G. R. Dell’Osso, F. Fiorito	1367
I NOMADI DIGITALI. UNA NUOVA FRONTIERA DELLA CULTURA DELL’ABITARE T. Casale, E. Garda, S. Bulla, G. Di Mari, A. Renzulli	1387
NUOVE PROSPETTIVE DERIVANTI DAL TRASFERIMENTO TECNOLOGICO: ANALISI DEI BREVETTI SUI MATERIALI DA COSTRUZIONE SOSTENIBILI S.M. Cascone, M. Vitale	1403
BUILDING INFORMATION MODELING AND LEED: A REVIEW ON THE POSSIBLE INTEGRATION METHODS S. Cascone, R. Caponetto	1415
ZERO WINDOWS PER PROGETTI FUTURI. UN PERCORSO IMPEGNATIVO FRA TRANSIZIONE ECOLOGICA E TRANSIZIONE DIGITALE A. Cernaro, O. Fiandaca	1429
TECNOLOGIA E CONOSCENZA DIGITALI PER IL PATRIMONIO ARCHEOLOGICO E INDUSTRIALE C.D.L. Cui, D. Simeone, S. Corsi, S. Bortoletto, A. Fioravanti, E. Currà	1447
ECONOMIA CIRCOLARE E NUOVA VITA PER I PRODOTTI DI DEMOLIZIONE EDILIZIA G. D’Angelo, G. Trinchese, A. Verniero, M. Fumo	1465
PROGETTARE LA DENSIFICAZIONE SOSTENIBILE DEL COSTRUITO. CASI STUDIO NELLA RICOSTRUZIONE POST-SISMICA DE L’AQUILA S. De Gregorio, G. Di Giovanni	1483
UN INVOLUCRO TESSILE AD ALTE PRESTAZIONI PER IL RETROFIT DEL PADIGLIONE SPORTIVO DEL COMPLESSO CENTI COLELLA, L’AQUILA G. Di Giovanni, M. De Vita, P. De Berardinis, A. Massari	1497
EFFICIENZA ENERGETICA E CIRCOLARITÀ NEL RIUSO DELLE AREE INDUSTRIALI DISMESSE. IL PARCO SOLARE NELLA CAVA DI S. GIULIANO A L’AQUILA G. Di Giovanni, M. Nardis	1513
SCHOOL BUILDINGS OF XXI CENTURY: STRATEGIC AND EMERGENCY FUNCTIONS, AND NEW DESIGN PARADIGMS C.A. Di Mare, R. Castelluccio	1529
METODO PROBABILISTICO PER LA CORRELAZIONE TRA IMPRONTA DI CARBONIO E TIPOLOGIA EDILIZIA DEL PATRIMONIO ABITATIVO DELL’AREA MEDITERRANEA G. Di Ruocco, F. La Pastina	1545
IL METODO BIM PER LA PUBBLICA AMMINISTRAZIONE ITALIANA: STRATEGIE E CASI REALI P. Fiamma, S. Biagi	1565
STATE-OF-THE-ART OF AUTOMATIC IMAGE SEGMENTATION TECHNIQUES APPLIED ON CULTURAL HERITAGE BUILDINGS V. Giannuzzi, F. Fatiguso	1579

VERSO INSEDIAMENTI URBANI SOSTENIBILI TRA PARTECIPAZIONE E INCLUSIONE A. Greco, V. Giacometti, E. Bifano	1591
VALIDAZIONE SPERIMENTALE DI AMBIENTI VIRTUALI IMMERSIVI PER LO STUDIO DI COMFORT, EFFICIENZA LAVORATIVA E COMPORTAMENTO ENERGETICO DI UTENTI IN AMBIENTI AD USO UFFICIO A. Latini, E. Di Giuseppe, M. D’Orazio	1605
AREE INTERNE INCLUSIVE, UNA POSSIBILITÀ PER LE MADONIE. CRITERI SMART PER RIPROGETTARE IL COSTRUITO STORICO, TRA INNOVAZIONE TECNOLOGICA E ACCESSIBILITÀ L. Lombardo, S. Colajanni, T. Campisi	1621
LA NUOVA FRONTIERA TECNOLOGICA DEL RIVESTIMENTO CERAMICO DI FACCIATA CONTEMPORANEO: LA TERZA DIMENSIONE M. Mangosio	1641
PARAMETRI UMANI PER IL BIM: UN WORKFLOW PROGETTUALE PER UNO SPAZIO A MISURA D’UTENTE M. Martino, M. Nugara, G. Santi, L. Verricelli	1655
IL PARADIGMA DEL GEMELLO DIGITALE PER LA GESTIONE PRESTAZIONALE DEL PATRIMONIO COSTRUITO A. Massafra, R. Gulli	1667
RIQUALIFICARE O DEMOLIRE E RICOSTRUIRE? ANALISI DEGLI SCENARI PROGETTUALI SVILUPPATI SECONDO UN APPROCCIO CIRCOLARE C. Mazzoli, L. Dragonetti, A. Ferrante	1685
TECNOLOGIE APPROPRIATE E INNOVATIVE PER LA SOSTENIBILITÀ: APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO L. Mollo, R. Agliata	1703
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEL COSTRUIRE: METODO F.A.D. COME CHIAVE DI LETTURA DI BUONE PRATICHE DI CIRCOLARITÀ G. Montalbano, G. Santi	1713
INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO ENERGETICO DI UN’AULA ATTRAVERSO LA METODOLOGIA MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION C. Mosca	1729
A PROPOSITO DI GENTRIFICAZIONE. IL PADIGLIONE FUKSAS NEL MERCATO DI PORTA PALAZZO A TORINO A. Renzulli, T. Casale, C. Chiampo, G. Di Mari, E. Garda	1747
OVERVIEW SUL CARTONE ONDULATO COME MATERIALE DA COSTRUZIONE E PROSPETTIVE FUTURE: UNA REVIEW DELLA TECNOLOGIA E LE INNOVAZIONI DEL PROGETTO ARCHICART LIFEHOUSE G. Rodonò, D.L. Distefano, A. Monteleone	1763
MANAGING UNCERTAINTIES IN CONSTRUCTION TENDERING: A DECISION THEORY FRAMEWORK FOR SUPPORTING BIDDERS F. L. Rossini, G. Novembri, E. De Santis	1773
VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA MECCANICA DEL VETRO DI POST-CONSUMO A. Rota, M. Zaccaria, F. Fiorito	1787

IL GEMELLO DIGITALE DELL'EDIFICIO: UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLA GESTIONE DELLE UNITÀ DI AUTOCONSUMO G. Rubiu	1801
PRODOTTI DI SCARTO COME MATERIALI DA COSTRUZIONE: STRATEGIA DI MITIGAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE E. Santoro, G. Ausiello	1813
PROGETTO, SVILUPPO E PROTOTIPAZIONE DI UNA TECNOLOGIA INNOVATIVA PER MODULI ARCHITETTONICI MULTIUSO, LEGGERI E SOSTENIBILI V. Sapienza, A. Monteleone, G. Rodonò, S. Calvagna	1827
IL MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI ENERGETICO-AMBIENTALI DI PARETI PREFABBRICATE IN CALCESTRUZZO ARMATO ATTRAVERSO L'UTILIZZO DI MATERIALI DI RICICLO A. Sciotti, M. De Fino, F. Fatiguso	1845
EFFICIENZA E CIRCOLARITÀ NELL'USO E NEL RIUSO DELLE RISORSE E DELL'ENERGIA: IL PROGETTO DELL'OSSERVATORIO ASTRONOMICICO DI PIAN DELLA FIOBA A MASSA L. Secchiari	1861
SVILUPPO DI UN METODO INTEGRATO DI VALUTAZIONE DELL'IMPATTO SU SOSTENIBILITÀ E RESILIENZA PER LE INDUSTRIE DELL'ACCIAIO DEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI M. M. Sesana	1877
A BIOMIMETIC APPROACH FOR CLIMATE REACTIVE BUILDING ENVELOPES INSPIRED BY PLANTS ADAPTIVE STRATEGIES F. Sommese, G. Ausiello	1895
INNOVAZIONE DIGITALE E PROTOCOLLO ENVISION: UN NUOVO APPROCCIO PER LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ DELLE INFRASTRUTTURE ESISTENTI C. Vite, M. Gaggero	1909
TRANSITION MANAGEMENT SPHERES: NATURE-BASED SOLUTIONS R.M.Vitrano	1923
BLOCCHI STAMPATI IN 3D CON MATERIALE RICICLATO PER EDIFICI INNOVATIVI S. Volpe, V. Sangiorgio, A. Petrella, M. Notarnicola, H. Varum, F. Fiorito	1941

COMMITTEES

Directorial Committee

FATIGUSO Fabio
FIORITO Francesco
ALBATICI Rossano
CASCONI Santi Maria

CORRAO Rossella
GUIDA Antonella Grazia Maria
POLI Tiziana
POLVERINO Francesco

Organizing Committee

CANTATORE Elena
CHIARANTONI Carla

DE FINO Mariella
IANNONE Francesco

Scientific committee

ACHENZA Maria Maddalena
ALBATICI Rossano
ARENCHI Alberto
ATZENI Carlo
AUSIELLO Gigliola
BASIRICÒ Tiziana
BAZZOCCHI Frida
BELLICOSO Alessandra
BESANA Daniela
BRADASCHIA Maurizio
CAMPISI Tiziana
CAMPOLONGO Alessandro
CAPOMOLLA Rinaldo
CASCONI Santi Maria
CASTELLUCCIO Roberto
CATALANO Agostino
CHINELLATO Francesco
COLAJANNI Simona
CORRAO Rossella
CROATTO Giorgio
CURRÀ Edoardo

D'ORAZIO Marco
DALPRA' Michela
DASSORI Enrico
DE ANGELIS Enrico
DELL'OSSO Guido Raffaele
DI DONATO Danilo
DI GIOVANNI Gianni
DI GIUSEPPE Elisa
DI NASO Vincenzo
FASCIA Flavia
FATIGUSO Fabio
FERRANTE Annarita
FERRERO Marco
FIAMMA Paolo
FIANDACA Ornella
FIORAVANTI Antonio
FIORE Pierfrancesco
FIORI Matteo Paolo Giovanni
FIORITO Francesco
FRANGIPANE Anna
FUMO Marina

GARDA Emilia Maria
GAROFOLO Ilaria
GATTI Maria Paola
GIANNETTI Ilaria
GRECCHI Manuela
GRECO Alessandro
GRECO Laura
GUARDIGLI Luca
GUIDA Antonella Grazia Maria
GULLI Riccardo
IANNACCONE Giuliana
IANNONE Francesco
IORI Tullia
LIONE Raffaella
LODDO Gianraffaele
LOMBARDO Grazia
LUCCHINI Angelo
MALIGHETTI Laura Elisabetta
MANGOSIO Marika
MARGANI Giuseppe
MAZZUCHELLI Enrico Sergio
MECCA Ippolita
MELE Caterina
MOCHI Giovanni
MOLLO Luigi
MORANDOTTI Marco
MORBIDUCCI Renata
MORGANTI Renato Teofilo Giuseppe

MORNATI Stefania
MOSCHELLA Angela
MUNAFÒ Placido
NABONI Emanuele
PAGLIUCA Antonello
PIANTANIDA Paolo
POLI Tiziana
POLVERINO Francesco
PUGNALETTO Marina
QUAGLIARINI Enrico
RIBERA Federica
RIGONE Paolo
RONCHI Alfredo
SALVALAI Graziano
SANJUST Paolo
SAPIENZA Vincenzo
SCIUTO Gaetano Antonio
SICIGNANO Enrico
STAZI Francesca
TADI Massimo
TAGLIAVENTI Gabriele
TOSONE Alessandra
TURRINI Umberto
VINCI Calogero
VITTORINI Rosalia
ZERBINATTI Marco
ZORDAN Marcello

Scientific and Organizing Segretariat

BRUNO Silvana
BULDO Michele
CAMPAGNA Ludovica Maria
CARLUCCI Francesco
CASSANO Federica
CHIEPPA Riccardo
GALANTUCCI Rosella Alessia
GIANNUZZI Valeria

LAMBERTI Vito
LASORELLA Margherita
MARTINELLI Alessandra
MUSICCO Antonella
ROTA Angelica
SCIOTI Albina
VOLPE Stelladriana



Analisi sperimentale di un nuovo intonaco a base di aggregati naturali *Experimental analysis of new bio-based plaster*

G. Salvalai^{1*}, A. Stefani², M. Imperadori³, G. Nerobutto⁴

^{1*} Politecnico di Milano, Milano, graziano.salvalai@polimi.it

² Calchera San Giorgio, Grigno, anna.stefani@calcherasangiorgio.it

³ Politecnico di Milano, Milano, marco.imperadori@polimi.it

⁴ Calchera San Giorgio, Grigno, laboratorio@calcherasangiorgio.it

Abstract

The construction industry is one of the biggest consumers of energy and raw materials, and a major contributor to greenhouse gas emissions. In this context the paper brings together the analysis of research conducted for Calchera San Giorgio, one of the Italian leading company expert in the formulation of materials based on aggregates and natural binders specifically for restoration, structural consolidation, refurbishment and sustainable construction. The present work specifically aims at analyzing the in-situ performance of a symbiotic supply chain plaster formulation from food waste, produced in prefabricated three-dimensional elements, consisting of natural materials with minimal environmental impact such as hemp fiber and ground eggshells. For the performance analysis of the material, a prototype building located at the company's headquarters in Grigno (TN) was designed and constructed, as a testbed for in-situ performances verification. A detailed monitoring campaign has been carried out by means of sensors, for collecting temperature-humidity and heat fluxes behaviour. The new prefabricated mortar panels showed good hygrometric capacities, reducing the load of relative humidity through the wall, while allowing an improvement in indoor air conditions and quality; finally, the results obtained with in-situ measurement in terms of thermal resistance and transmittance of the vertical closure under analysis are comparable with those expected from static calculation.

Keywords: bio-based plaster, monitoring, performance, sustainability, technology

1. Introduzione

Il settore edile è uno dei comparti caratterizzati dal più intenso utilizzo di risorse naturali. Si stima che in Europa il consumo di circa la metà delle materie prime estratte e dei consumi energetici e un terzo del consumo di acqua e del volume dei rifiuti prodotti siano riconducibili alle attivi-

tà edili [1]. Ancora oggi nella maggior parte delle costruzioni si utilizzano materiali e processi caratterizzata da un'elevata energia grigia che, in edifici a ridotto fabbisogno di energia, può rappresentare più del 50% dell'energia utilizzata per il funzionamento nel tempo dell'edificio. Negli ultimi anni, sono stati svolti differenti studi e analisi, tra cui, fra i più recenti, quelli riportati durante la conferenza ONU sul cambiamento climatico tenutasi alla COP25 di Madrid del 2019 [2], secondo i quali il settore edilizio è responsabile per il 31% del consumo globale di energia finale e per la produzione, dal 1990 ad oggi, del 50% in più di emissioni di CO₂ a livello globale [3]. In Europa, in particolare, il 41% dell'energia finale consumata è imputabile al settore delle costruzioni [4][5], così come il 50% delle estrazioni di materie prime e il 50% delle emissioni di anidride carbonica e gas serra (GHG), dispersi nell'ambiente [6][7] con drastici impatti sull'aumento della temperatura media globale [8]. Il settore edilizio, come confermato dalla Global Alliance for Building and Construction, è infatti uno dei settori più dannosi per l'ambiente [9], in quanto principale responsabile di un'alta percentuale degli impatti ambientali prodotti dai Paesi sviluppati [5]. È ormai noto come l'emissione continua di gas serra (GHG) nell'atmosfera sia la principale causa dell'incremento delle temperature globali, aumentate in media di 0,74°C negli ultimi 100 anni, incremento che, secondo le previsioni, entro la fine del secolo raggiungerà valori pari a 1,1°C in scenari a basse emissioni e 2,4°C in scenari ad alte emissioni [10].

La Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo, già nel 1987, dichiarava la necessità di un obiettivo comune di sviluppo sostenibile per fronteggiare i danni ambientali causati dalle azioni umane [11]. In quest'ottica, le normative europee in termini di efficienza energetica degli edifici (2018/844/EU) [12] stabiliscono per gli edifici di nuova costruzione target sempre più stringenti e che prevederanno dal 2030 che tutti i nuovi edifici dovranno essere a emissioni zero, termine anticipato al 2028 per i nuovi edifici di proprietà degli enti pubblici. L'obiettivo di emissioni prossime a zero, unito al concetto di edificio energeticamente efficiente, ha l'obiettivo di promuovere pratiche al fine di convertire l'attuale parco immobiliare in uno a bassi consumi, con una potenzialità di risparmio del solo settore residenziale stimato superiore al 27% [14]. In questo processo, le proprietà termofisiche degli elementi costruttivi sono un fattore chiave [13]. L'involucro edilizio opaco ricopre infatti un ruolo di primo piano nella definizione della richiesta energetica dell'edificio, con dispersioni attraverso coperture e chiusure verticali pari al 55-60% di quelle complessive dell'edificio. L'utilizzo di materiali e componenti isolanti è quindi fondamentale per incrementare la resistenza al passaggio di energia nei componenti tecnici di involucro e per ridurre la trasmittanza termica, parametro fisico-tecnico fondamentale per la misura della capacità isolante di un elemento [15].

Nelle costruzioni esistenti la riqualificazione dell'involucro edilizio rappresenta un'azione fondamentale del processo verso la decarbonizzazione del comparto edile, a cui si aggiunge anche la scelta di materiali sostenibili. Così come per l'edificio costruito, anche per i materiali che costituiscono i vari elementi tecnologici è necessario un impatto ambientale minimo durante tutte le fasi del ciclo di vita. Questo indicatore può essere analizzato attraverso il life cycle assessment (LCA), un metodo per valutare il carico ambientale di prodotti e processi durante il loro ciclo-vita [16] [17], oggi normato tramite le norme ISO 14040-44 [18][19]. I materiali concorrono, inoltre, alla definizione della qualità dell'aria dell'ambiente interno, di fondamentale importanza considerando che si spende mediamente l'80% del proprio tempo in ambienti confinati e che, di

conseguenza, una bassa qualità dell'aria interna può causare problemi psico-fisici anche a lungo termine [20]. Oggigiorno vi è una crescente gamma di materiali, in continua evoluzione, che soddisfa sia i requisiti prestazionali che quelli di bassi carichi energetici. Tra questi, i materiali a base di calce e aggregati a base biologica [21] sono sempre più considerati nel processo costruttivo anche per gli effetti positivi sulla qualità dell'aria interna, grazie alla minore presenza di composti organici volatili (VOC) e alla capacità di regolazione dell'umidità.

L'attività di ricerca svolta dagli autori analizza le prestazioni in opera di un innovativo intonaco prefabbricato a base di calce e di aggregati derivanti da scarti della filiera agricola, caratterizzato da un ridotto impatto ambientale e con proprietà igrotermiche che favoriscono la qualità dell'aria interna. In particolare, lo studio riporta i dati preliminari derivanti da un caso sperimentale costruito per: i) verificare la modalità di posa e la durabilità nel tempo dell'innovativo intonaco, ii) verificare le prestazioni in opera di una parete multistrato posata a secco, analizzando i livelli di temperatura ed umidità e comparando i valori di trasmittanza termica calcolate secondo il metodo statico [22] rispetto a quella rilevata in situ [23] per una chiusura verticale tipo con applicazione del materiale innovativo.

2. Inquadramento e metodo di analisi

Il seguente lavoro riporta i risultati della ricerca sperimentale commissionata dall'azienda Calchèra San Giorgio, azienda specializzata nella formulazione di malte, intonaci, rasanti e finiture minerali traspiranti biocompatibili ed ecosostenibili, esenti da sostanze dannose per la salute e l'ambiente. Nello specifico il documento raccoglie i risultati delle diverse attività sperimentali svolte al fine di indagare le prestazioni in opera di una nuova miscela basata sull'utilizzo di inerti naturali provenienti dalla filiera del riso e applicabili in architettura. Il lavoro è stato strutturato in diverse fasi, dallo studio e ottimizzazione del mix design fino alla messa in opera e alla misura delle prestazioni termiche. Per il rilevamento in situ è stato progettato e costruito un edificio sperimentale, successivamente strumentato con diversi sensori per il monitoraggio di variabili ambientali, che permette di caratterizzare il comportamento del materiale in condizioni di utilizzo reali e di analizzarne le capacità termoigroscopiche in opera. L'attività sperimentale ha permesso, inoltre, di testare la posa del materiale evidenziandone gli aspetti critici sia dimensionali che di facilità di lavorazione.

2.1. Caratteristiche tecnologiche e funzionali dell'edificio prototipo

Il nuovo intonaco sperimentale a base di inerti naturali è stato applicato su un edificio prototipo costruito ad-hoc per la verifica del comportamento in opera dei materiali in fase di sviluppo da parte dell'azienda. Si tratta di una costruzione a base rettangolare costituita da un unico ambiente a temperatura controllata e caratterizzata da una superficie interna di 6,27 m² (Fig. 1), con struttura portante lignea in Cross Laminated Timber (CLT) a 5 strati chiodati tramite spine in faggio, con interposti fogli di carta traspirante. L'edificio, dotato di copertura verde piana, raggiunge un'altezza massima di 375 cm e un'altezza minima di 370 cm dovuta alla pendenza della copertura. Esso presenta una porta d'ingresso sulla facciata esposta a Nord-Est e due murature per il

test di materiali innovativi, in particolare intonaci ad elevata percentuale di aggregati naturali e caratterizzati da elevate prestazioni termiche, sul fronte principale rivolto a Sud-Ovest. La finitura interna delle pareti, ad esclusione delle murature per i test, è costituita dall'intonaco prefabbricato oggetto di analisi, denominato Calcherà San Giorgio “Calcedicampo” (Fig. 1). In particolare, il test in opera delle prestazioni dell'intonaco innovativo è eseguito su una porzione della parete rivolta a Nord-Ovest, dove è stato posato un set di sensori per la misurazione di temperature superficiali, temperatura e umidità dell'aria e flusso termico passante attraverso i diversi layer che compongono la soluzione tecnologica (Fig. 3). Le condizioni ambientali interne sono misurate attraverso un termoigrometro la cui temperatura è mantenuta costante da un riscaldatore elettrico posto all'interno dell'edificio. Sulla parete esterna rivolta a Sud-Ovest sono infine installati i sensori per il rilevamento delle condizioni ambientali esterne, quali radiazione solare globale [W/m^2], temperatura [$^{\circ}\text{C}$] e umidità relativa dell'aria [%] (Fig. 3). Tutti i sensori sono collegati via radio e via cavo a due data logger per la raccolta ed il campionamento dei dati.

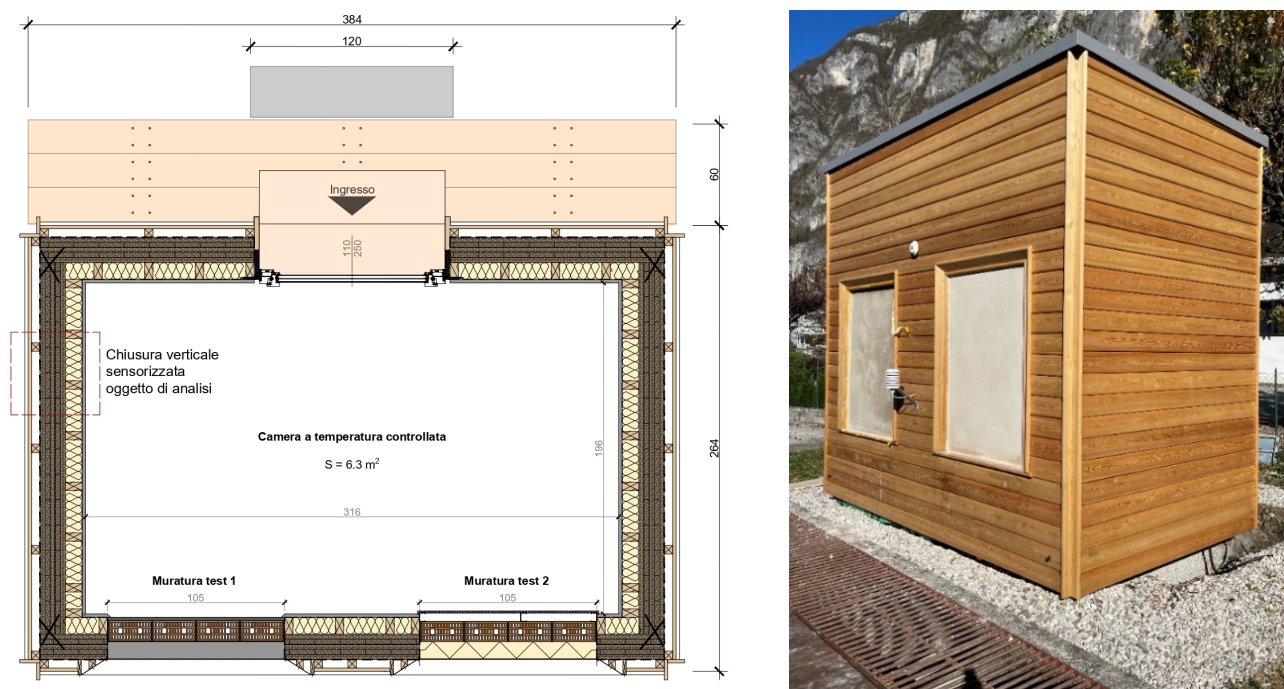


Fig. 1. Pianta 2D, l'ingresso avviene tramite il prospetto posteriore, mentre anteriormente sono applicate le due pareti in muratura per test dei materiali innovativi; la parete verticale nord ovest, evidenziata, alloggia i pannelli “Calcedicampo” (sinistra). Immagine fotografica dell'edificio prototipo completo (destra) – © 2023, Politecnico di Milano.

La copertura dell'edificio è costituita da un tetto verde, composto da strato drenante, membrana geotessile filtrante, strato colturale fertilizzante e layer vegetale in Sedum. L'isolamento della chiusura orizzontale superiore è garantito dalla posa di un pannello in fibra di legno mono-strato, omogeneo, con conducibilità termica di riferimento pari a $0,040 \text{ W}/\text{mK}$ e densità pari a $140 \text{ kg}/\text{m}^3$. Tale materiale è utilizzato anche per la stratigrafia del basamento. Il rivestimento esterno delle pareti è invece composto su tutti e quattro i lati da listelli in larice naturale con sezione trapezoidale, altezza 130 mm e spessore variabile da 20 a 40 mm.

Nel dettaglio, la parete di chiusura verticale (Fig. 3) è composta da una struttura portante in X-Lam a 5 strati (4) di spessore totale pari a 150 mm. Internamente è presente una sottostruttura a listoni in legno di sezione 100 * 50 mm e passo 600 mm, con coibentazione tra gli elementi realizzata in pannelli di lana di roccia (5) di spessore 100 mm, con bassa densità nominale ($\rho = 40 \text{ kg/m}^3$) e conducibilità termica λ pari a 0,035 W/m*K. La finitura interna è composta da uno strato di intonaco del tipo Calchèra San Giorgio “Calcedicampo Termoigroscopico” (7) di spessore 20 mm. Tra lo strato isolante e la finitura è interposta una membrana freno vapore in polipropilene (6) di massa areica 100 g/m², con spessore 0,42 mm e $S_d > 2 \text{ m}$. All'esterno della struttura portante è invece posata una membrana in polipropilene ad alta traspirazione (3) di massa areica 185 g/m², con spessore 0,89 mm e $S_d = 0,07 \text{ m}$. Infine, lo strato di finitura esterna è composto da listelli in larice (1) con relativa sottostruttura a listoni in legno (2) di sezione 50 * 50 mm e passo 600 mm per consentire la ventilazione (Fig. 1). Le sezioni successive riportano le analisi in corso su una porzione di parete come sopra descritta caratterizzata con un focus sul comportamento termoigrometrico delle lastre di intonaco prefabbricato. Studi successivi riporteranno i risultati delle misurazioni in opera di due diverse stratigrafie composte da diverse miscele di intonaci sempre caratterizzati dall'utilizzo di calce quale componente legante (sezione orizzontale di Fig. 1). In corrispondenza delle due murature di test è presente una stratigrafia di parete differente, con strato portante costituito da blocchi in laterizio forato di spessore 120 mm sfalsati rispetto all'X-Lam. Le due zone di test differiscono inoltre tra loro nelle tipologie di finitura interna ed esterna e di coibentazione. La parete di test 1 presenta una finitura esterna composta da rasatura e pittura “Calchèra San Giorgio Rasante ‘900 e Silifarbe” di spessore totale pari a 5 mm, posata sopra ad uno strato di intonaco termico “Calchèra San Giorgio Scudotermico Plus” di spessore pari a 100 mm. La finitura interna è realizzata con uno strato di intonaco “Calchèra San Giorgio Calcedicampo” di spessore 20 mm. La parete di test 2 è invece caratterizzata da una finitura esterna materica “Calchèra San Giorgio Intonaco Lavato Materia” di spessore pari a 3 mm, posata sopra ad uno strato di intonaco “Calchèra San Giorgio Fortis intonaco GR30” di spessore pari a 20 mm. La finitura interna è realizzata con uno strato di rasatura armata “Calchèra San Giorgio Rasante ‘900” di spessore pari a 5 mm, posato sopra ad uno strato di intonaco termico “Calchèra San Giorgio Scudotermico” di spessore pari a 100 mm. Il serramento porta-finestra di ingresso, posizionato sulla facciata retrostante dell'edificio, ha altezza pari a 2030 mm e larghezza pari a 1080 mm ed è caratterizzato da un telaio di spessore 92 mm in abete lamellare di provenienza certificata a marchio PEFC e da un triplo vetro di spessore 52 mm con doppia camera riempita ad argon 3+3.1/18/4/18/3+3.1 e film basso emissivo sia esterno che interno. La Tab. 1 riporta in dettaglio le prestazioni generali, calcolate secondo normativa, delle tre soluzioni utilizzate per la costruzione dell'involucro opaco dell'edificio sperimentale.

2.2. Specifiche tecniche dell'intonaco innovativo

La stratigrafia della parete in analisi è finita, verso l'interno, da un materiale specificatamente studiato dall'azienda Calchèra San Giorgio, denominato Calchèra San Giorgio “Calcedicampo”. Si tratta di un intonaco innovativo prefabbricato di spessore pari a 20 millimetri, che si presenta sotto forma di mattonelle rigide di colore variabile nella scala del grigio chiaro (Fig. 2). La diversa colorazione dei pannelli di intonaco è relativa alla presenza della lolla all'interno della miscela

Chiusura	Trasmittanza termica	Attenuazione	Sfasamento	Capacità termica	Trasmittanza termica periodica	Spessore
[U.d.M.]	[W/m ² *K]	[-]	[h]	[kJ/m ₂ *K]	[W/m ² *K]	[m]
Chiusura verticale laterale	0.1984	0.195	10.57	8.18	0.039	0.271
Chiusura verticale Test1	0.3211	0.271	9.59	18.95	0.087	0.250
Chiusura verticale Test2	0.4511	0.326	8.51	21.70	0.147	0.253

Tab. 1. Riepilogo prestazioni termiche calcolate secondo normativa delle componenti dell'involucro opaco.

ed alla difficoltà di produzione che attualmente prevede il mescolamento, di inerti e leganti, manualmente. L'intonaco, innovativo per composizione e per modalità di posa, è composto da sottoprodotti dell'industria agroalimentare, utilizzabili in quanto non classificati come rifiuti e che non trovano valide fonti alternative d'uso. Il materiale sviluppato, inoltre, essendo composto da materiali naturali, è totalmente riciclabile alla fine del suo ciclo di vita. Secondo i calcoli effettuati in laboratorio, l'intonaco è caratterizzato dalle seguenti proprietà fisico-termiche: densità $\rho = 987 \text{ kg/m}^3$, conducibilità termica $\lambda = 0,09 \text{ W/m}^*\text{K}$, calore specifico volumico $c_{pv} = 0,26 \text{ MJ/m}^3*\text{K}$ e resistenza al passaggio del vapore $S_d = 0,24 \text{ m}$. A livello chimico, il materiale è composto da calce pura naturale e materie riciclate derivate della filiera agroalimentare: sabbia da gusci d'uovo, lolla di riso e ceneri amorfe di lolla di riso (prodotto agricolo derivato dalla sbramatura del riso grezzo dopo la trebbiatura). La specifica composizione chimica non è riportata per via dell'iter di brevettazione in corso. Il processo produttivo prevede la preparazione dell'impasto, la stesura e infine la pressatura in appositi casseri in acciaio. La maturazione avviene per le prime ore in

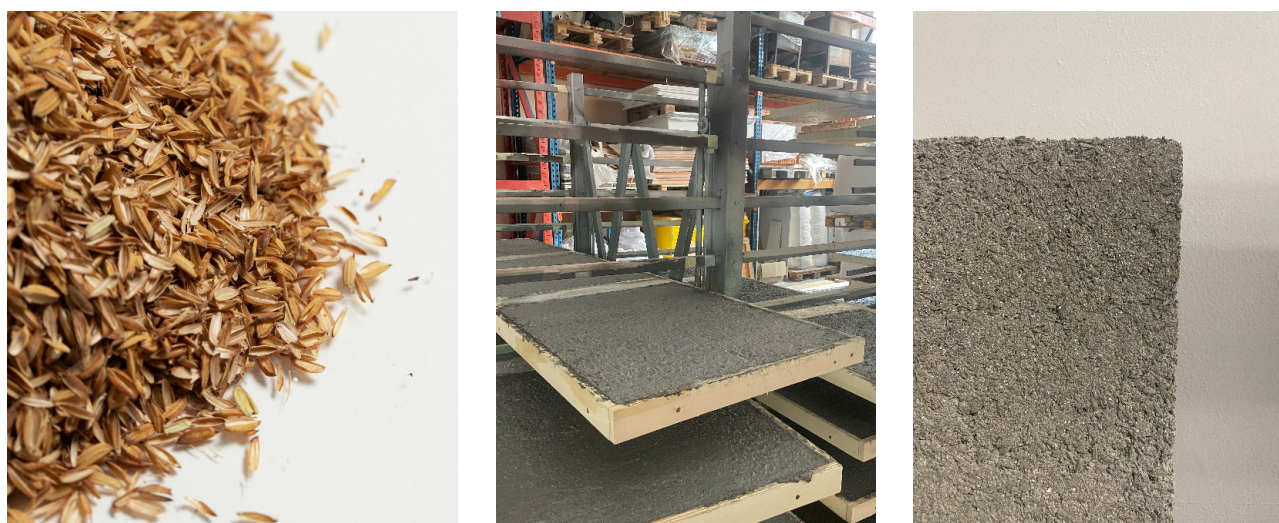


Fig. 2. Calchèra San Giorgio “Calchedicampo” pannello igroscopico; immagini relative alla lolla di riso costituente i pannelli (sinistra), al processo produttivo del pannello tramite cassetteria (centro) e pannello ultimato ed essiccato (destra) – © 2023, Politecnico di Milano.

un essiccatoio con temperatura e umidità controllate e successivamente in una struttura interna a temperatura ambiente. Una volta ultimato, l'intonaco si presenta sotto forma di pannello fibroso asciutto e può essere applicato a secco attraverso fissaggio meccanico.

2.3. Set-Up sperimentale

Per la caratterizzazione in opera delle prestazioni della finitura a pannelli prefabbricati “Calcedi-campo”, sono stati impiegati diversi sensori in grado di rilevare i livelli di temperatura e umidità relativa negli strati nonché il flusso termico (Fig. 3). In particolare, quest'ultimo è misurato con sensori posizionati sui due lati, prima e dopo lo strato di intonaco, mentre i parametri di temperatura e umidità relativa dell'elemento sono rilevati all'interfaccia di ogni strato, così da valutarne l'andamento all'interno della chiusura verticale. La disposizione dei sensori permette inoltre di valutare la trasmittanza termica della stratigrafia completa e di ricavare sperimentalmente quella del solo intonaco, in modo da permettere la comparazione tra la resistenza termica misurata in situ e quella ottenuta con calcolo statico a partire dai dati dichiarati. Il calcolo della trasmittanza in situ è effettuato in accordo con la normativa ISO 9869-1:2014 Parte 1, secondo il metodo del termoflussimetro e che prevede la misurazione del flusso termico (W/m^2) che attraversa la stratigrafia e del delta termico ($^{\circ}C$) tra le due estremità della chiusura verticale.

Esternamente, in corrispondenza del prospetto principale orientato a Sud-Ovest, sono posizionati i sensori per il rilevamento delle condizioni ambientali esterne quali temperatura, umidità relativa e radiazione solare. Tutti i sensori, sia interni che esterni, sono collegati a due datalogger per la raccolta dei dati con una granularità pari a 10 minuti. La Tab. 2 riporta i dettagli della strumentazione utilizzata con le relative proprietà di misura. In particolare, i sensori di temperatura superficiale sono costituiti da termocoppie (pt100) montate su una placca metallica e posizionate a

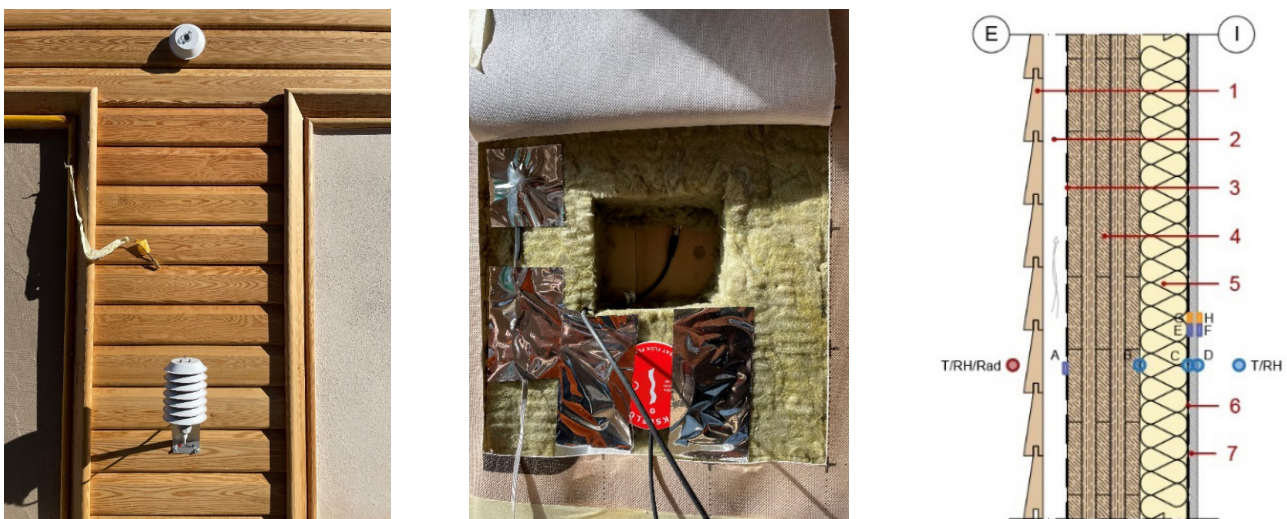


Fig. 3. Immagini della sensoristica applicata esternamente ed internamente; a sinistra i sensori per le condizioni ambientali di temperatura, umidità relativa e radiazione solare, al centro alcuni sensori applicati internamente tra isolante e membrana freno a vapore. A destra lo schema della sensoristica applicata alla chiusura verticale, con rilevazione di temperatura [$^{\circ}C$] superficiale e tra strati, umidità relativa [%] e flusso termico [W/m^2] – © 2023, Politecnico di Milano.

contatto con la superficie del provino mediante pasta adesiva conduttiva, mentre i termoflussimetri presentano un funzionamento a termopila in grado di determinare una tensione proporzionale alla differenza di temperatura tra le due facce grazie alla resistenza termica della piastra. I termogrometri sono invece costituiti da una termocoppia con sensore capacitivo in grado di misurare il livello di umidità dell'aria. Verso l'esterno, in posizione parallela alla chiusura verticale, è infine installato un radiometro in classe 2 per la caratterizzazione della radiazione solare incidente sulla facciata. L'immagine di destra e quella centrale riportate in Fig. 3 riportano rispettivamente il posizionamento dei sensori e la reale posa in opera degli stessi. La temperatura interna all'edificio prototipo è regolata da un riscaldatore elettrico dotato di un termostato per la regolazione della temperatura dell'aria nell'intervallo 19-20 °C. Dal punto di vista tecnologico costruttivo il pannello prefabbricato è stato posizionato in aderenza allo strato isolante, separato da quest'ultimo da una barriera al vapore, e fissato alla struttura sottostante attraverso viti fosfatate posizionate negli angoli. La dimensione del pannello, pari a 50x60 (l x h), ha permesso una facile posa data la maneggevolezza dell'elemento ed il peso contenuto e pari a circa 3,5 kg.

<i>SENSORE (modello)</i>	<i>Parametro rilevato</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Range misurazione</i>	<i>Sensibilità</i>	<i>Impiego</i>
EST124	Temperatura superficiale	°C	-50 ÷ +80	± 0.01	Interno
DLE124	Temperatura superficiale	°C	-50 ÷ +80	± 0.01	Interno
DMA033A	Temperatura	°C	-50 ÷ +100	± 0.01	Esterno
	Umidità relativa	%	±0 ÷ +100	± 0.1	
EXP812.1	Temperatura	°C	-20 ÷ +60	± 0.01	Interno
	Umidità relativa	%	±0 ÷ +100	± 0.1	
DPE240	Flusso termico	W/m ²	-2000 ÷ +2000	60 µV/W/m ²	Interno
DPA053A	Radiazione solare	W/m ²	±0 ÷ +4000	10÷15µV/W/m ²	Esterno

Tab. 2. Elenco sensori impiegati e relative proprietà.

3. Risultati della campagna di misurazione

La campagna sperimentale, attualmente in corso, ha lo scopo di caratterizzare nel tempo il comportamento termoigroscopico dell'intonaco innovativo costituito da elementi prefabbricati ad alto contenuto di inerti naturali. Le analisi e la valutazione delle prestazioni in opera dei pannelli Calchèra San Giorgio "Calcedicampo" sono effettuate tramite comparazione di tutti i parametri rilevati (temperatura, umidità relativa e flusso termico), da cui è possibile derivare anche il parametro di trasmittanza termica. I dati analizzati e riportati si riferiscono a un periodo di misura compreso tra le ore 10.30 del 07 Novembre 2022 e le ore 14.30 del 10 Gennaio 2023, per un totale di 1564 ore.

In Fig. 4 sono riportati i grafici relativi a temperatura [°C] e umidità relativa [%] rilevate lungo la stratigrafia di parete. In tonalità di grigio sono rappresentate, rispettivamente da scuro a chiaro, le condizioni ambientali esterne, le condizioni di interfaccia isolante/X-Lam e le condizioni am-

bientali interne, mentre in rosso e in giallo sono riportati i parametri relativi alle superfici interna ed esterna del pannello “Calcedicampo”, in modo da evidenziare cromaticamente il comportamento oggetto di analisi.

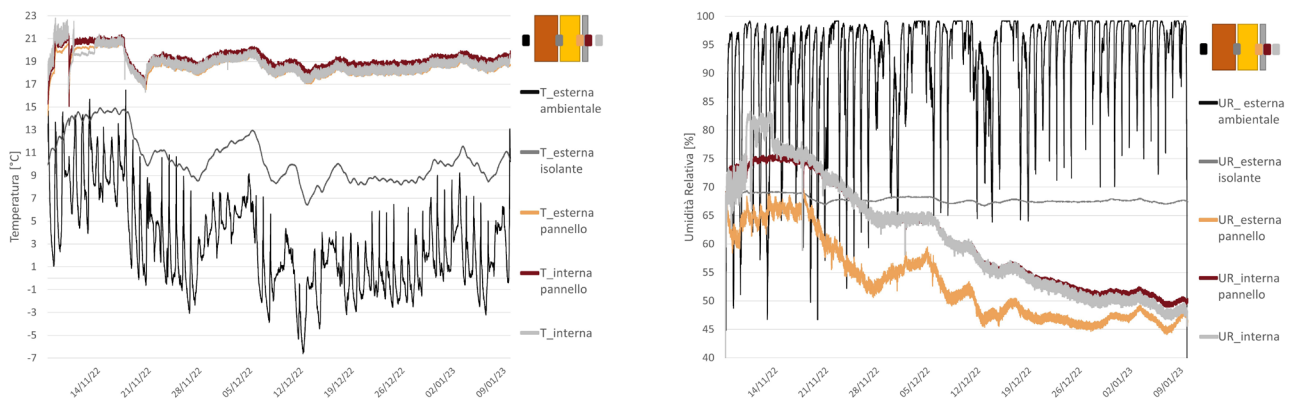


Fig. 4. A sinistra il grafico con l’andamento dei livelli di temperatura negli strati di parete, a destra l’andamento dei livelli di umidità relativa – © 2023, Politecnico di Milano.

Come evidenziato in Fig. 4 nel grafico di sinistra, durante la prima metà del periodo di analisi la temperatura esterna registra valori massimi compresi tra $12\div 16$ °C, mentre le minime rimangono al di sopra degli 0 °C. A partire dal 19 Novembre si registra una generale diminuzione della temperatura, con una conseguente diminuzione dei picchi massimi con punte prossime agli 11 °C. Mediamente durante l’intero periodo di analisi l’escursione termica giornaliera è compresa tra $8\div 12$ °C. Le temperature rilevate in corrispondenza del pannello “Calcedicampo” sono confrontabili con quelle dell’ambiente interno, con differenze minime nell’ordine di $1\div 4$ °C. Come è possibile prevedere, l’oscillazione maggiore di temperatura all’interno della stratigrafia è registrata sulla superficie esterna dell’isolamento in lana di roccia, dove si rilevano temperature mediamente inferiori di $6\div 9$ °C rispetto a quelle del pannello “Calcedicampo” e dell’ambiente interno. L’umidità relativa esterna è particolarmente elevata, con valori superiori al 95% durante le ore notturne e picchi minimi diurni compresi tra 45 e 65%. Anche nell’ambiente interno l’umidità relativa è elevata, con valori mediamente compresi tra 65 e 80% e picchi che superano l’85% in caso di presenza di persone all’interno dell’edificio. L’umidità relativa registrata tra isolante e la chiusura in X-Lam mantiene valori pressoché costanti durante l’arco della giornata, con variazioni minime inferiori all’1%. Le proprietà igrometriche del pannello “Calcedicampo” risultano invece evidenti dal confronto tra i valori di umidità relativa registrati in corrispondenza delle due superfici del materiale: internamente l’umidità è prossima a quella ambientale, mentre all’interfaccia con lo strato di isolamento i valori si riducono di circa $8\div 12$ punti percentuali, confermando le buone capacità igroscopiche dell’intonaco.

Per valutare la capacità di attenuazione termica del pannello prefabbricato “Calcedicampo” è stata effettuata un’analisi del flusso termico e della variazione di temperatura in corrispondenza delle due superfici dell’intonaco (Fig. 5). La superficie a contatto con l’ambiente interno presenta

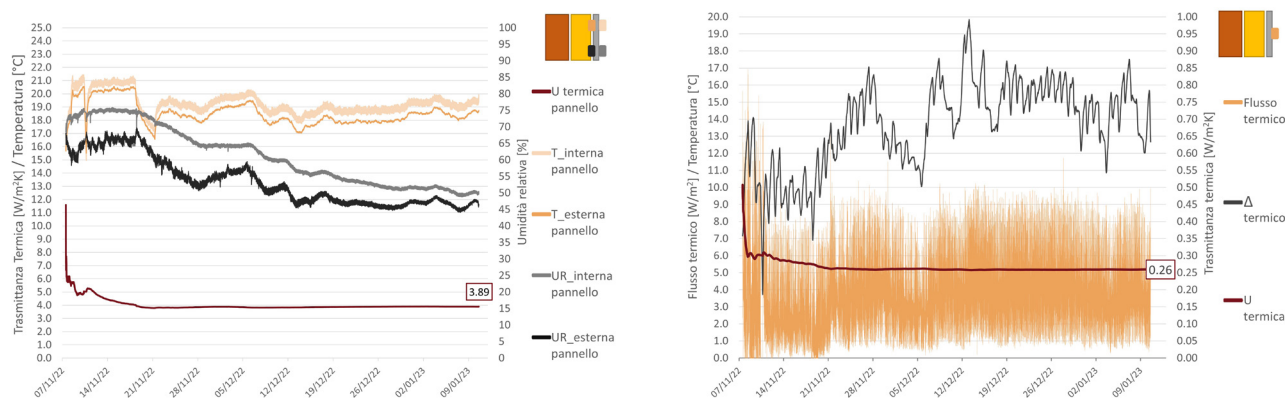


Fig. 5. Grafico del flusso termico del pannello “Calcedicampo”. A sinistra la trasmittanza termica del solo strato di intonaco a composizione della chiusura verticale, a destra il grafico della trasmittanza termica dell’intera chiusura verticale – © 2023, Politecnico di Milano.

flussi prevalentemente diretti verso l’ambiente, con valori massimi compresi tra 8-10 W/m², ad eccezione dei primi giorni di rilevamento dove si raggiungono valori massimi superiori a 15 W/m². In corrispondenza della superficie esterna del pannello, all’interfaccia con lo strato isolante, si registrano invece valori di flusso termico inferiori, generalmente compresi tra 2÷5 W/m². Durante il periodo di analisi, pari a 65 giorni, il flusso termico medio registrato in ingresso al pannello è di 3.886 W/m², mentre quello in uscita è pari a 3.571 W/m². Le temperature medie superficiali esterna ed interna della chiusura verticale sono invece pari rispettivamente a 4.14 °C e 19.26 °C, con un delta medio di temperatura tra le due estremità geometriche dell’involucro pari a 15.12 °C. Infine, è stata valutata la trasmittanza termica dell’intera chiusura verticale e del solo strato in intonaco innovativo “Calcedicampo”. Come riportato in Fig. 5, le trasmittanze termiche ricavate tramite misurazioni in situ per l’intera chiusura verticale e per il solo pannello di intonaco sono rispettivamente pari $U = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $U = 3,89 \text{ W/m}^2\text{K}$. In particolare, secondo le proprietà dichiarate dai produttori, il pannello “Calcedicampo”, di spessore $s = 0,02 \text{ m}$ e conducibilità termica $\lambda = 0,09 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, è in grado di incrementare la resistenza termica alla stratigrafia di un valore pari a $R = s/\lambda = 0,222 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$.

Per valutare le prestazioni in opera della chiusura verticale e dei pannelli di intonaco Calchèra San Giorgio “Calcedicampo” è infine stato effettuato un confronto tra i valori di trasmittanza termica calcolati in regime statico in accordo con quanto indicato dalla normativa EN ISO 13786 e quelli misurati in-situ nell’edificio prototipo in accordo alla normativa ISO 9869-1:2014 Parte 1. I risultati ottenuti dall’attività sperimentale sono in accordo con quanto riportato in letteratura, ovvero che i valori ricavati da calcolo statico sovrastimano le reali proprietà termoigrometriche degli elementi costruttivi [24]. L’elenco dei valori calcolati e ricavati sperimentalmente per la stratigrafia completa e per il pannello in intonaco innovativo è riportato in Tab. 3.

Il valore di trasmittanza termica dell’intera chiusura verticale ottenuto tramite calcolo statico risulta mediamente sovrastimato di circa il 25% ($0,06 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) rispetto alla misurazione in-situ. I pannelli prefabbricati in intonaco “Calcedicampo” presentano al contrario una rilevazione in-situ migliorativa di circa il 13% rispetto al calcolo statico effettuato utilizzando le proprietà di conducibilità termica mi-

<i>Tipologia di calcolo/misurazione e norma di riferimento</i>	Trasmittanza termica U [W/m²*K]
Calcolo statico EN ISO 13786: stratigrafia completa	0.20
Calcolo statico EN ISO 13786: pannello intonaco “Calcedicampo”	4.50
Valore misurato in-situ ISO 9869-1:2014 Parte 1: stratigrafia completa	0.26
Valore misurato in-situ ISO 9869-1:2014 Parte 1: pannello intonaco “Calcedicampo”	3.89

Tab. 3. Raffronto valori di trasmittanza termica tra calcolati da normativa EN ISO 13786 in regime statico e ricavati in-situ secondo ISO 9869-1:2014 parte 1.

surate su campioni in laboratorio. In generale l’applicazione dell’intonaco permette di migliorare del 4÷6 % le prestazioni della parete in termini di trasmittanza termica. La capacità della lastra di assorbire e modulare l’umidità sarà testata in una campagna di monitoraggio.

4. Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro raccoglie i dati e le analisi relativi alla sperimentazione in situ effettuata sui pannelli prefabbricati di intonaco innovativo prodotti dell’azienda Calchèra San Giorgio. Per il test in opera del materiale è stato progettato e realizzato un edificio prototipo con struttura lignea in X-Lam costituito da un unico ambiente interno termoregolato con superficie calpestabile pari a 6.27 m². La costruzione, ubicata presso la sede aziendale, è dotata di sensori per il rilevamento dei parametri ambientali e di temperatura, umidità relativa e flusso termico presenti all’interno della stratigrafia. I dati raccolti per le analisi sono relativi ad un periodo di misurazione pari a 65 giorni compreso tra Novembre 2022 e Gennaio 2023 e consistono in: temperatura e umidità relativa della stratigrafia e degli ambienti interno ed esterno, flusso termico dei pannelli e trasmittanza termica dell’elemento di chiusura verticale. In particolare, l’obiettivo dell’analisi è lo studio delle prestazioni in opera di un intonaco prefabbricato innovativo, “Calcedicampo”, a base di calce pura e sottoprodotti dell’industria alimentare, quali sabbia da gusci d’uovo, lolla di riso e ceneri amorfe di lolla di riso, sottoprodotti di scarto non classificabili come rifiuti che rendono il materiale completamente riciclabile al termine del proprio ciclo vita e ad impatto zero sull’ambiente. I risultati emersi durante il periodo di osservazione evidenziano buone proprietà termoigrometriche degli elementi prefabbricati in intonaco “Calcedicampo”, caratterizzati da una notevole capacità di riduzione dell’umidità relativa (8-12%). Sono altresì emersi apprezzabili risultati in termini di mitigazione del flusso termico in uscita, mentre non si denotano particolari effetti in relazione alla variazione di temperatura degli strati interni della soluzione di parete proposta, se non per effetto dello strato isolante. La chiusura verticale oggetto di analisi è caratterizzata da una trasmittanza termica rilevata con strumentazione in-situ pari a 0.26 W/m²*K, da un flusso medio in ingresso al pannello in intonaco di 3.886 W/m², e da un flusso termico in uscita dal pannello pari a 3.571 W/m², con un delta istantaneo tra le due superfici dell’intonaco pari a 0.315 W/m². Il valore della trasmittanza termica U della chiusura verticale ottenuto tramite calcolo statico è invece pari a 0.20 W/m²*K, con una sovrastima fino al 25% delle proprietà reali della stratigrafia.

Le proprietà del solo pannello “Calcedicampo” ottenute tramite calcolo statico in termini di resistenza termica ($R = 0,222 \text{ m}^2\text{K/W}$) sono risultate al contrario sottostimate del 10÷15% rispetto a quanto rilevato in-situ ($R = 0,257 \text{ m}^2\text{K/W}$). Le attività sperimentali in corso, non riportate nel seguente documento, permetteranno di caratterizzare ulteriormente il materiale soprattutto in presenza di elevate umidità interne.

Riferimenti bibliografici

- [1] IEA, 2019 Global Status Report for Buildings and Construction, 2019, <https://doi.org/10.1038/s41370-017-0014-9>.
- [2] Report of the Conference of the Parties on its twenty-fifth session, held in Madrid from 2 to 15 December 2019, 2020.
- [3] IPCC, 2023: AR6 Climate Change 2022: Mitigation of climate change, chapter 9, Report, 2023.
- [4] European Union, Energy in Figures – Pocketbook 2013, 2013, <http://dx.doi.org/10.2832/19314>.
- [5] United Nations Environment Programme UNEP. Sustainable Building and Construction; Division of Technology, Industry and Economics. Paris, France, 2003.
- [6] Raynsford N. The UK’s approach to sustainable development in construction. *Build Res. Inf.* 1999, 27, 419-423.
- [7] California Integrated Waste Management Board. Designing With Vision: A Technical Manual for Material Choices in Sustainable Construction. California Environmental Protection Agency, California, USA, 2000.
- [8] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021
- [9] IEA, 2021 Global Status Report for Buildings and Construction, 2021, <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>.
- [10] Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, Van Der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA. Climate Change 2001 Third Assessment Report (TAR) The Scientific Basis, The Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
- [11] World Commission on Economic Development. Sustainable Development; United Nations: New York, 1987, 363.
- [12] 2010/31/EU, European Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, 2010.
- [13] Directive (EU), 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, *Off. J. Eur. Union*, 2018.
- [14] European Commission, Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential. COM, 2006.
- [15] Giama E, Kyriaki E, Papadopoulos A. U-Value: a key role parameter for sustainable buildings. 2020, <https://doi.org/10.5755/j01.sace.16.3.15442>.
- [16] Sonnemann G, Castells F, Schuhmacher M. Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes. Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 2003.
- [17] Khasreen M, Banfil PPG, Menzies GF. Life-Cycle Assessment and the environmental Impact of Buildings: A Review. 2009. 10.3390/su1030674

- [18] ISO 14040:2006, Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
- [19] UNI EN ISO 14044:2021, Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida.
- [20] Fang L, Clausen G, Fanger PO. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. 1998. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x>
- [21] Maskell D, Thomson A, Lawrence R, Shea A, Walker P. The impact of bio-aggregate addition on the hygrothermal properties of lime plasters. University of Manitoba, 2015.
- [22] UNI EN ISO 13786:2018, Prestazione termica dei componenti per edilizia – Caratteristiche termiche dinamiche – Metodi di calcolo.
- [23] ISO 9869-1:2014, Thermal insulation – Building elements – In-situ measurements of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1: Heat flow meter method.
- [24] Zecevic N, Dzaferovic E, Husika A. Comparison of Measured and Calculated Heat Transfer Coefficient of External Wall at the Mechanical Engineering Faculty University in Sarajevo. TEM Journal 8(2): 417-423, doi: 10.18421/TEM82-14, 2019.

