RE-CYCLING

VII INTERNATIONAL CONFERENCE

Luis Palmero
Graziella Bernardo
Stefania De Gregorio
EDITORS



PROCEEDINGS

ECOLOGICAL INTELLIGENCE FOR A CIRCULAR AND TRANSFORMATIVE ARCHITECTURE

Valencia, 05 June 2026 | Universitat Politècnica de València

edUPV
Universitat Politècnica de València

Proceedings of the



RE-CYCLING

VII INTERNATIONAL CONFERENCE

ECOLOGICAL INTELLIGENCE FOR A CIRCULAR AND TRANSFORMATIVE ARCHITECTURE

Luis Palmero
Graziella Bernardo
Stefania De Gregorio

(Eds.)

edUPV
Universitat Politècnica de València

UPV Conference
RE-CYCLING. VII International Conference. Ecological Intelligence for a Circular and Transformative Architecture

© Editors
Luis Palmero
Graziella Bernardo
Stefania De Gregorio

© 2026 of the papers: the authors

© 2026 of this edition: Editorial Universitat Politècnica de València
www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6892_01_01_01

ISBN: 978-84-1396-440-9

DOI: https://doi.org/10.4995/9788413964409edUPV



RE-CYCLING. VII International Conference. Ecological Intelligence for a Circular and Transformative Architecture
This book is licensed under a Creative Commons Atribution-NonCommercial-ShareAlique-4.0 International license

Scientific committee

Rossano Albatici - *Università degli Studi di Trento*
Paola Altamura - *Sapienza Università di Roma*
Pablo Altaba - *Universitat Politècnica de València*
Jacopo Andreotti - *Politecnico di Torino*
Giuseppe Andrisani - *Università degli Studi della Basilicata*
Adolfo F. L. Baratta - *Università degli Studi Roma Tre*
Francisco Palomino Bernal - *Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán*
Edoardo Bocci - *Università Telematica eCampus*
Laura Calcagnini - *Università degli Studi Roma Tre*
Eliana Cangelli - *Sapienza Università di Roma*
Agostino Catalano - *Università degli Studi Telematica eCampus*
Fabrizio Comodini - *Università Telematica eCampus*
Fernando Cos Gayón - *Universitat Politècnica de València*
Luis Cortés - *Universitat Politècnica de València*
Giuseppe Cultrone - *Universidad de Granada*
Mariangela De Vita - *CNR Roma*
Carlos Alberto Duica Cuervo - *Universidad El Bosque*
Michela Dalprà - *Università degli Studi di Trento*
Ornella Fiandaca - *Università degli Studi di Messina*
Francesco Focacci - *Università Telematica eCampus*
Fabiola Colmenero Fonseca - *Universidad Autónoma de Coahuila*
Juan Antonio García Esparza - *Universitat Jaume I*
Ilaria Giannetti - *Università degli Studi di Roma Tor Vergata*
Francesca Giglio - *Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria*
Roberto Giordano - *Politecnico di Torino*
Antonella Guida - *Università degli Studi della Basilicata*
Martino Hutz - *Technische Universität Wien*
Jaime Llinares - *Universitat Politècnica de València*
Maria Teresa Lucarelli - *Università Mediterranea di Reggio Calabria*
Raffaella Lione - *Università degli Studi di Messina*
Antonio Magarò - *Università degli Studi Roma Tre*
Luigi Marino - *Università di Firenze*
José Miguel Molinés - *Universitat Politècnica de València*

Luigi Mollo - *Università degli Studi della Campania "L. Vanvitelli"*
Antonello Monsù Scolaro - *Università degli Studi di Sassari*
Stefania Mornati - *Università degli Studi di Roma Tor Vergata*
Andrés Salas Montoya - *Universidad Nacional de Colombia*
Matteo Ocone - *Università Telematica eCampus*
Ramiro Rodriguez Perez - *Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán*
Claudio Piferi - *Università degli Studi di Firenze*
Camilo Alberto Forero Pineda - *Universidad de Boyacá Tunja*
Vito Porcari - *Università degli Studi della Basilicata*
Annette Rudolf-*Cleff - Technische Universität Darmstadt*
Hector Saul Quintana Ramirez - *Universidad de Boyacá Sogamoso*
Andreas Schwarting - *HTWG Konstanz*
Enzo Siviero - *Università Telematica eCampus*
Donatella Radogna – *Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara*
Alessandro Rogora - *Politecnico di Milano*
Monica Rossi Schwarzenback – HTWK Leipzig
Camilla Sansone - *Università degli Studi del Molise*
Fabio Enrique Forero Suarez - *Universidad El Bosque*
Antonella Violano - *Università degli Studi della Campania "L. Vanvitelli"*

The Scientific Committee selected the contributions by a double-blind peer review procedure

Founding committee

Adolfo F. L. Baratta - *Università degli Studi Roma Tre*
Agostino Catalano - *Università degli Studi Telematica eCampus*

Scientific Direction

Luis Palmero Iglesias - *Universitat Politècnica de València*
Graziella Bernardo - *Università degli Studi della Basilicata*
Stefania De Gregorio - *Università degli "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara*

Organizing Committee

Pablo Ariel Escudero - *Universitat Politècnica de València*
Carla De Juan - *Universitat Politècnica de València*
Ester Martínez - *Universitat Politècnica de València*
Pablo Palmero - *Universitat Politècnica de València*
Pilar Rodrigo - *Universitat Politècnica de València*
Lucía Tordera - *Universitat Politècnica de València*

TABLE OF CONTENTS

Introduction

Ecological intelligence for circular and transformative architecture xv
Luis Palmero, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio

Closing the loop: circular materials, recycling and upcycling strategies

Recycling as a design and technological practice: limits, and perspective of the six “Re-Cycling” conferences 3
Adolfo F.L. Baratta, Laura Calcagnini

Circularidad material en la arquitectura popular del Cabanyal: reutilización estética y ambiental 17
Material circularity in the popular architecture of Cabanyal: aesthetic and environmental reuse
Graziella Bernardo, Luis Manuel Palmero Iglesias

From fragmentation to integration: the building as a circularity connector between tangible and intangible dimensions 33
Cinzia Maria Luisa Talamo, Noelia Huanca Coacalla, Nazly Atta, Giancarlo Paganin

Diseño Circular en Acción: a design–build lab for circular living wall systems 59
Carlotta Fasano, Pablo Luis Palmero-Sánchez

Campus mining: progettare e prototipare con gli scarti del Politecnico di Torino 71
Campus mining: designing and prototyping with waste materials from the Politecnico di Torino
Nicolò Di Prima, Angela Lacirignola, Elena Montacchini, Silvia Tedesco

End-of-Life of building materials: innovative upcycling experiment for brick recovery 83
Jacopo Andreotti

Riciclo delle macerie edilizie: dal QT8 di Milano all'Ucraina di oggi 97
Construction Debris Recycling: from QT8 Milan to Contemporary Ukraine
Matteo Ocone

Upcycling dell'architettura industrializzata del secondo novecento: dall'inventario alle strategie di riuso delle componenti in acciaio 107
Upcycling of industrialized architecture from the second half of the 20th century: from inventory to reuse strategies for steel components
Cristian Tolù, Stefania Mornati, Ilaria Giannetti

Increasing circularity of small-scale wind turbines: the PANORAMA vertical axis prototype 119
Massimiliano Condotta, Tommaso Morbiato, Chiara Scanagatta, Elisa Zatta

Nano-silica engineered cementitious matrices for sustainable construction: coupling mechanical strength with reduced thermal conductivity 133
Andres Salas-Montoya

Analisi FT-IR di materiali alcalino-attivati ottenuti da fanghi di segagione 147
FT-IR analysis of alkali-activated materials produced from sawing sludge waste
Antonio D'Angelo, Roberto Simonelli, Michelina Catauro, Sara Fasana, Marco Zerbinatti, Luigi Mollo

Digital Twin e Material Passports per la valutazione dell'effetto serra degli edifici: un focus sulla fase di fine vita 157
Digital Twins and Material Passports for assessing buildings' global warming potential: a focus on the end-of-life stage
Roberto Giordano, Federica Gallina, Benedetta Quaglio

Il passaporto digitale per la tracciabilità della circolarità dei prodotti edilizi 169
The Digital Passport for the traceability of the circularity of building products
Adriana S. Sferra, Giuseppe Piras, Francesco Muzi

Hyperlocal architecture in regeneration strategies for the Abruzzo region 179
Donatella Radogna, Luciana Mastrolonardo, Maria Chiara Capasso, Valeria Lualdi

Hyper-Local Self-Built Infrastructures for Slow Tourism 195
Matteo Clementi, Tae Han Kim, Jae Young Lee

Designing and self-constructing in mountain contexts: prototyping for the Abruzzo inner areas (Italy) 209
Antonio Vasapollo, Stefania De Gregorio, Miju Kim

Living territory: adaptive reuse and circular urban transformations

Costruire per il riuso. Pionierismi italiani per l'abitare provvisorio(1936-1945) 223
Costruire per il riuso. Pionierismi italiani per l'abitare provvisorio (1936-1945)
Laura Greco, Francesco Spada

Riuso eco-orientato del patrimonio produttivo del Mediterraneo. La Tonnara di Avola 235
Eco-friendly reuse of the Mediterranean's productive heritage. The Tonnara di Avola
Rosa Maria Giusto, Mario Buono

Riuso adattivo e riciclo: una rilettura dei processi di trasformazione urbana di Campo Santa Maria ad Amiternum 247
Adaptive reuse and recycling: re-reading urban transformation processes at Campo Santa Maria ad Amiternum
Mariangela De Vita, Alfonso Forgione

The superuse of urban warehouses to activate built environment stock 255
Jacopo Gasparotto

Urban circularity and circular development: governance, infrastructure and limits of the ecological transition 267
Pablo Altaba Tena

Monte de' Cocci in Rome. The testimonial value of historical waste, between Italy and Spain 277
Adolfo F.L. Baratta, Francesca Romana Stabile, Antonio Magarò, Massimo Mariani

Regenerative approaches to industrial heritage: circular adaptive reuse toward culture 291
Gaia Garofali, Paola Altamura, Serena Baiani

Riuso e memoria: gli elementi della Certosa nel tessuto urbano di Serra San Bruno 305
Reuse and memory: Charterhouse elements in Serra San Bruno's urban fabric
Lorenzo Russo, Giuseppe Fortunato

Facciate prefabbricate in pannelli di calcestruzzo. Strategie di riqualificazione 317
Prefabricated concrete panel façades. Renovation strategies
Francesco Spada, Laura Greco

El Análisis de Ciclo de Vida como herramienta estratégica en la rehabilitación del patrimonio edificado 331
Life Cycle Assessment as a strategic tool in the rehabilitation of built heritage
Pablo Ariel Escudero, Isabela Cristina de Assis Berg

Bio-intelligent futures: ecological design and learning environments

Inteligencia ecológica y Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la gestión de riesgos hidrometeorológicos para la regeneración del territorio en el Puerto de Veracruz 341
Ecological intelligence and Geographic Information Systems (GIS) in the management of hydrometeorological risks for the regeneration of the territory in the Port of Veracruz
María del Carmen Ixtepan Turrent, Fabiola Colmenero Fonseca, Juan Francisco Palomino Bernal, Ángela Sánchez Aldana, Ramiro Rodríguez Pérez

Decoding Venice: An Erasmus laboratory for ecological intelligence in architecture 353
Maria Antonia Barucco, Bensu Berk

Metodología e inteligencia ecológica aplicada a la vivienda de interés social en Guanajuato con GIS, BIM y ACV 365
Methodology and ecological intelligence applied to social housing in Guanajuato with GIS, BIM, and LCA
Fabiola Colmenero Fonseca, Ángela Sánchez Aldana, Juan Francisco Palomino Bernal, Ramiro Rodríguez Pérez, Javier Cárcel-Carrasco

La stampa 3D/4D per materiali bio-eco ispirati in architettura 381
3D/4D printing for bio-eco materials inspired by architecture
Alessandra Cernaro, Ornella Fiandaca

Bio-based materials for the energy-efficient retrofitting of buildings 403
Agostino Catalano

Learning from Bee's Ecological Intelligence: Biomaterials and honeycomb architecture 413
Stefania De Gregorio

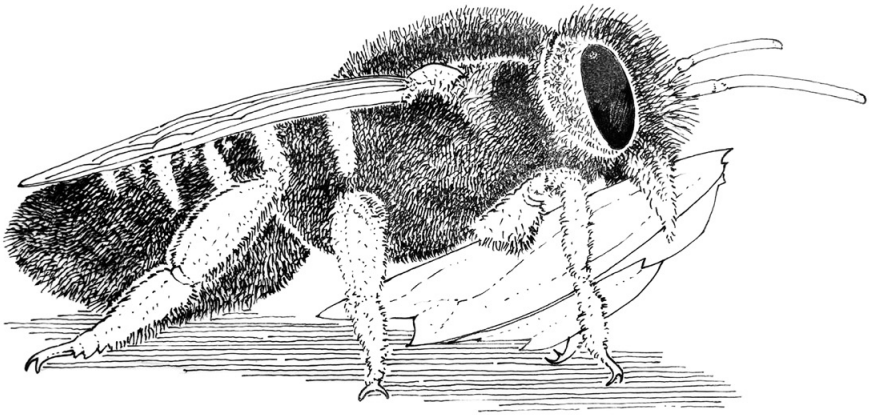
Recycling as a pedagogical strategy: the educational building as a sustainability laboratory. Architecture that teaches sustainability: the building as a learning tool 425
Pilar Rodrigo-Catalán, Carla De-Juan-Ripoll

Introduction

Ecological Intelligence for Circular and Transformative Architecture

Luis Palmero, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio

The leafcutter bee cuts small pieces of leaves and sometimes uses petals or old plant materials to build its nest. Instead of creating new materials, it reuses natural resources already available in the environment. Contemporary architecture should imitate the leafcutter bee: working with what already exists, recognizing latent value in discarded matter, transforming inherited structures, and constructing new habitats through intelligent forms of ecological interdependence.



Megachile centuncularis (Adolfo F.L. Baratta)

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

The seventh edition of the Re-cycling International Conference, held in 2026 at the Universitat Politècnica de València, marks a significant step in the evolution of a research field that, over the last decade, has progressively widened its theoretical horizons, operational tools, and disciplinary boundaries. What initially emerged as a debate focused on waste reduction, material recovery, and technological innovation in construction has evolved into a broader reflection on architecture's role within the contemporary ecological crisis. The call for papers for this edition explicitly proposed a radical shift toward forms of ecological intelligence capable of interpreting the built environment as a living reservoir of materials, memories, energies, infrastructures, and relationships. Within this perspective, reuse, recycling, adaptive transformation, and regenerative design become central cultural practices for rethinking architecture in a time defined by climate instability, resource depletion, demographic change, and territorial fragility.

The contributions received for this edition can be broadly summarised within three interrelated thematic clusters: Closing the Loop: Circular Materials, Recycling and Upcycling Strategies; Living Territory: Adaptive Reuse and Circular Urban Transformations; and BioIntelligent Futures: Ecological Design and Learning Environments.

Several contributions explore innovative strategies for extending the life cycle of building materials and components through reuse, upcycling, and technological experimentation. Research on brick waste recovery, alkaliactivated materials derived from industrial sludge, nanoengineered cementitious matrices, reversible wind infrastructure, and biobased retrofitting materials demonstrates how construction materials are increasingly conceived not as static products but as temporary configurations within longer cycles of transformation. Parallel investigations into digital twins, material passports, life cycle assessment methodologies, and traceability systems underline the growing importance of datadriven approaches in managing future reuse scenarios. In these contributions, waste ceases to represent the end of a process and instead becomes the beginning of a new material biography.

At the same time, historical investigations on vernacular architecture in El Cabanyal, Monte Testaccio in Rome, postwar debris recycling in Milan, temporary housing systems of the twentieth century, and ancient reuse practices in Amiternum show that circular logics have long been

embedded in architectural culture. Scarcity, necessity, pragmatism, and cultural adaptation have historically generated sophisticated reuse practices that contemporary design is now rediscovering under new environmental imperatives.

Adaptive reuse becomes a strategy for preserving built heritage and activating new forms of social, cultural, and environmental regeneration. Contributions focused on industrial heritage, Mediterranean productive landscapes, abandoned infrastructures, inland regions, and fragile rural environments show how existing spatial resources can be reactivated through circular strategies capable of generating new economies, collective identities, and local resilience.

The hyperlocal design approaches in fragile territories such as inland Abruzzo, where architecture become a catalyst for slow tourism, local production chains, community participation, and ecological stewardship demonstrate that circularity cannot be reduced to material efficiency alone; it must also engage with questions of geography, mobility, governance, and social inclusion. In this sense, circularity becomes a lens through which to rethink territorial justice, everyday practices, and longterm forms of care.

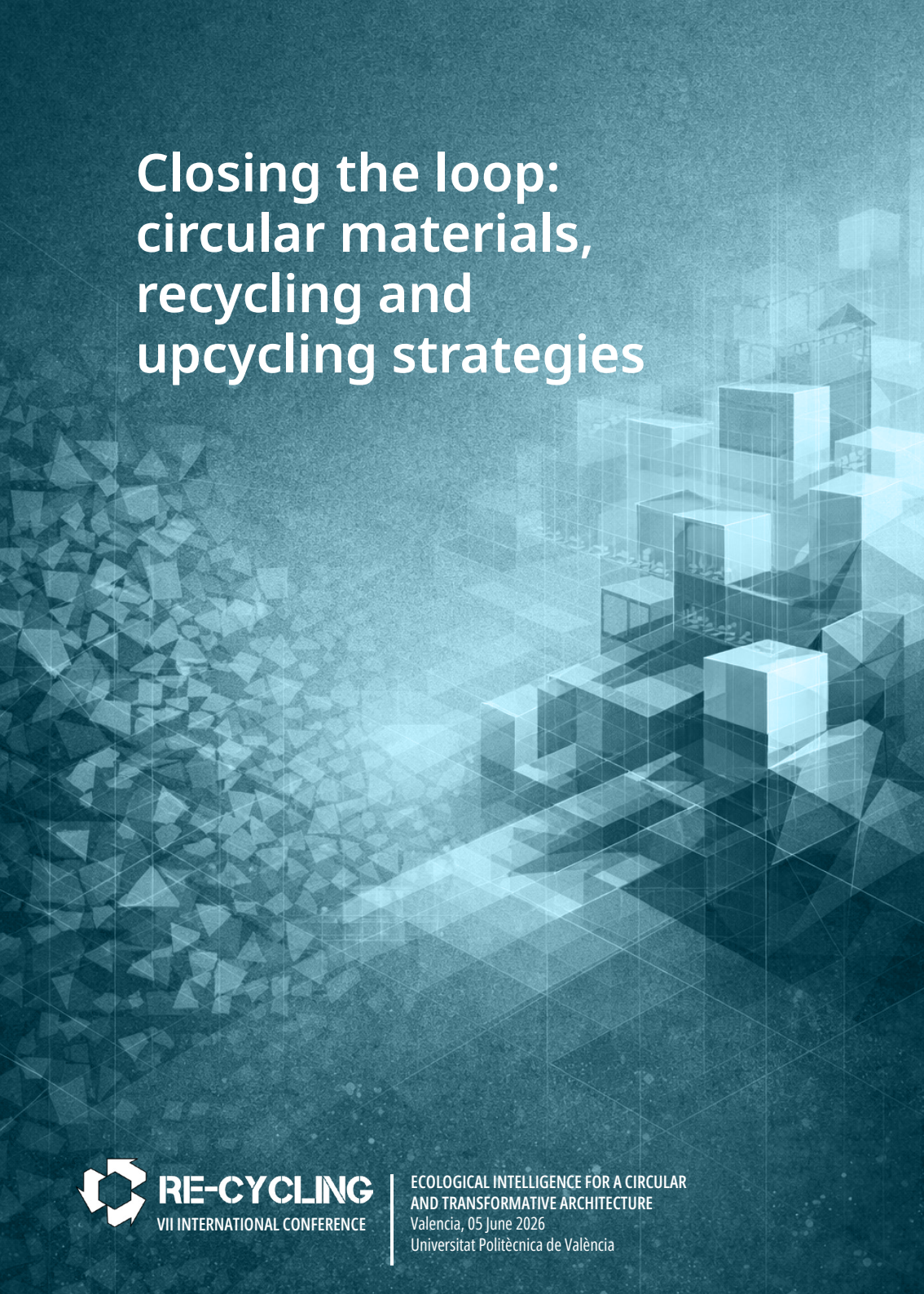
Similarly, contributions addressing urban governance, GISbased ecological mapping, and territorial risk management indicate that circularity increasingly requires systemic thinking. Urban metabolism, infrastructure networks, hydrological resilience, and spatial justice emerge as crucial dimensions of circular urban transformation. The city and the territory are thus reimagined as evolving metabolic systems, whose cycles of matter, energy, information, and meaning need to be realigned with ecological limits.

At the same time, emerging research on biomaterials, living systems, additive manufacturing, and naturebased solutions points toward increasingly hybrid relationships between architecture and biological intelligence. Studies on living walls, bioinspired materials, adaptive manufacturing processes, and biomimetic construction suggest a future in which architecture operates less as an act of domination over nature and more as a process of collaboration with ecological systems. In this view, design becomes an art of negotiating with other forms of life, embracing uncertainty, adaptation, and coevolution.

Architecture can become a pedagogical device: educational buildings become laboratories where sustainability is made visible through construction systems, water cycles, reversible assemblies, and material transparency. Design-build workshops, self-construction experiments, university laboratories, and international educational programs show that circularity must be learned through direct engagement with matter, labour, and environmental systems.

This volume underlines a profound cultural transformation in the way architecture understands growth, permanence, innovation, and responsibility in which ecological intelligence becomes a new ethical and cultural framework of built environment.

Closing the loop: circular materials, recycling and upcycling strategies



RE-CYCLING
VII INTERNATIONAL CONFERENCE

ECOLOGICAL INTELLIGENCE FOR A CIRCULAR AND TRANSFORMATIVE ARCHITECTURE
Valencia, 05 June 2026
Universitat Politècnica de València

Recycling as a design and technological practice: limits, and perspective of the six “Re-Cycling” conferences

Adolfo F.L. Baratta

Associate Professor, Roma Tre University, Department of Architecture, Italy.
adolfo.baratta@uniroma3.it

Laura Calcagnini*

Assistant Professor, Roma Tre University, Department of Architecture, Italy.
laura.calcagnini@uniroma3.it

Abstract: from 2015 to 2025, a group of Italian researchers promoted six international conferences on the topic of recycling in the construction sector. The conferences were all held in Rome, prior to the current move to Valencia. The six conferences were preceded by specific calls for papers that characterized them differently, offering, in the results of the papers, a broad and articulated overview of the theme of recycling applied to architecture and construction. The conference proceedings, all available online in open access mode, testify to a long history of research and essays on the theme of recycling.

This contribution aims to analyze the contributions presented at the six conferences. Through a thematic, critical, and statistical analysis, the essay highlights how recycling has emerged more as a cultural horizon than as a consolidated operating system, highlighting convergences, divergences, and unresolved issues between technological research and architectural design that can contribute to building new research perspectives.

The six conferences share an interdisciplinary approach, positioning recycling as a strategy for ecological transition, a tool for the regeneration of the built environment, and a field of experimentation between technology, design, and public policy. A variety of approaches emerges: some conferences were more technical and engineering-oriented, others more theoretical and critical or focused on architectural design; however, what they all had in common, without this implying anything negative, was the lack of a single definition of recycling.

BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Corresponding author

Recycling is in fact used alternately to refer to the theme of material recycling and reuse, functional recycling and reuse, and finally conceptual or symbolic recycling and reuse. The representation of the different characteristics of recycling allows us to take a snapshot of the themes that this conference attracts, highlighting its limitations and potential.

Keywords: recycling conference, conference review, recycling strategies and tools, research on recycling.

1. Introduction

Inefficient waste management, combined with the extensive exploitation of natural resources, has led national and European governments to orient waste management policies toward mitigating environmental impacts, with the aim of achieving environmental, social, and economic sustainability goals (Baratta, 2021a).

For over twenty years, the issue of recycling has therefore taken center stage in political, social, architectural, and technological debates in relation to sustainability, the circular economy, and waste reduction objectives. The six international conferences held biennially in Rome from 2015 to 2025 represent a privileged observatory for understanding how these issues have been addressed in the various disciplinary fields related to the construction sector.

The conferences followed six different calls with the ambition of defining for each conference some more specific themes within the more general theme of recycling: all the events were also characterized by the presence of a "guide animal" (Figure 1) described in the introduction to the Proceedings for its virtuous recycling and reuse capabilities.

The first conference (Baratta and Catalano, 2015), entitled "Recycling as a virtuous practice for sustainable projects", aimed to gather common reflections on the social and environmental implications of recycling to identify actions that would promote the dissemination of experiences in the field of sustainable projects. The proceedings that resulted from this conference collected 17 contributions. The guiding animal was the tilapia

(*Tilapia cabrae*), a freshwater fish that grows quickly, is inexpensive, and whose waste is fully reused in different production sectors.

The second and third conferences, entitled "Waste as a resource for sustainable design" (Baratta and Catalano, 2017) and "The recycling of waste and refuse in construction. From Downcycling to Upcycling towards Circular Economy Goals" (Baratta, 2019), identified the theme of waste and its possible use in the construction sector as the focus. There were 18 contributions in the proceedings of the second conference and 29 in the third conference, with a quantitative increase that highlighted how much the conferences had grasped the importance of researching the specific reuse of waste as a resource. Their guide animals were the hermit crab (*Pagurus bernhardus Linnaeus*), known for reusing abandoned shells - and occasionally human waste - and the bowerbird (*Ptilonorhynchus violaceus),* which constructs and decorates its nest using colorful human-made scraps.

The fourth conference, entitled "Traditional Practices and Innovative Technologies for End of Waste" (Baratta, 2021b), proposed a conscious call that waste management must begin with careful design of the building and the definition of practices and technologies to support the project. The proceedings collected 27 contributions. The guiding animal was the dung beetle (*Geotrupes stercorarius Linnaeus*), a beetle that demonstrates how it is possible to reduce the consumption of natural resources in favor of a process of recovery and valorization of waste.

The fifth conference, entitled "The value of materials in the ecological transition of the construction sector" (Baratta et al., 2023b), took a broad look at the issue of recycling through the lens of ecological transition. The topicality of the perspective attracted and published 38 contributions. The caiman (*Zophobas Morio*), a small worm capable of eating and digesting plastic-based substances thanks to a bacterial enzyme present in its digestive system, was the animal guide for the conference.

The sixth conference, entitled "Innovative Scenarios in Project and Research Culture" (Baratta et al., 2025), promoted not only tools but also innovative ideas and scenarios on the theme of recycling: the proceedings collected 37 contributions, including one from a "virtual researcher" with a contribution generated using artificial intelligence as a new tool to support research in the recycling sector.

The last animal associated with the conference was the coconut octopus (*Amphioctopus marginatus*), a small mollusk from the Indo-Pacific seabed that uses tools to hide and defend itself from predators, including human waste and debris.

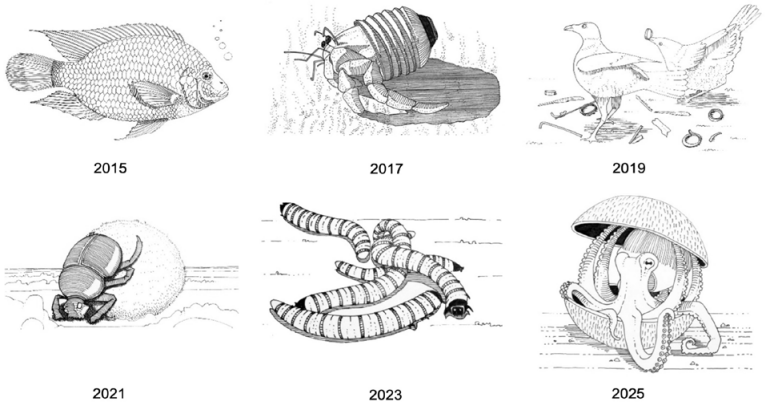


Figure 1. The six "guide" animals: tilapia (2015), hermit crab (2017), bowerbird (2019), dung beetle (2021), caiman (2023), and coconut octopus (2025).

This paper systematically and critically reviews the contributions that emerged from the six scientific conferences dedicated to recycling, with the aim of highlighting thematic convergences, methodological approaches, and main critical issues. The analysis combines a qualitative reading of the content (Figure 2) with a quantitative assessment of the disciplinary distribution of the authors and the use of keywords, in order to provide a comprehensive picture of the state of the art.

2. Methodology

This study is based on an integrated approach that combines, without claiming to be exhaustive, a quantitative (statistical) and a qualitative (thematic) analysis of the papers published in the proceedings of the six international "Re-Cycling" conferences (2015–2025).

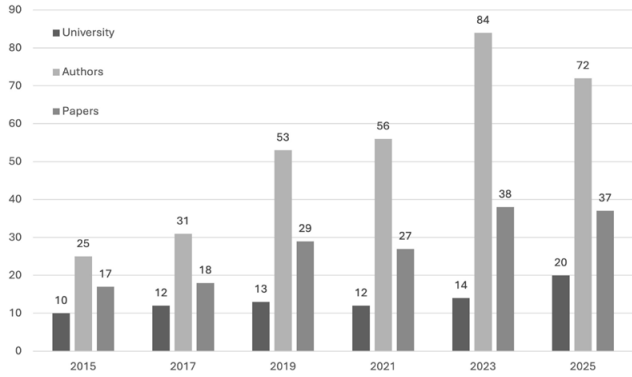


Figure 2. Number of contributions, authors, and participating universities.

The analyzed corpus comprises 128 papers, selected from the official proceedings of the six conferences, all of which are available via open access. The analysis included only contributions that underwent scientific review (through a double-blind peer review process), excluding introductory or editorial materials.

The quantitative or statistical analysis focused on the number of contributions, authors, and institutional affiliations with regard to geographical distribution (national, international), the disciplinary distribution of authors, and the frequency of keywords. In the count:

- each author was considered individually, even in the presence of co-authors.
- recurring authors were counted only once in the overall distribution.

Keywords were considered by meaning; that is, the same word in different languages was counted only once (e.g., recycling and "riciclaggio") and also in different variants with identical meanings (e.g., recycling, recycle).

The disciplines are clearly identifiable in the national paper because of the coding of scientific disciplinary sectors established by the Ministry of Universities (MUR, 2026), but in the international context it can be determined with evident difficulty from the authors' CVs. The disciplines have been grouped into three broad categories:

- architectural and urban design.
- materials technology and engineering.
- economic, social, and political sciences.

Quantitative and thematic analyses were conducted through an exploratory reading of the contributions and the identification of recurring categories; these are:

- material recycling.
- reuse and design.
- policies and regulations.
- recycling as a design strategy.

Non-prevalent themes were nevertheless briefly described; furthermore, multiple coding was adopted, allowing for overlap between themes to highlight the interdisciplinary nature of the contributions.

The analysis was limited to the above, as it was conducted with the aim of determining not only a general profile of authors' and topics' interests but also the prevailing thematic categories across different research fields. A specific objective was charting future directions and strategies in light of the interests and themes of the research presented at the six conferences.

3. Statistical Analysis

The quantitative analysis of six conferences dedicated to reuse and recycling is based on the analysis of a total of 128 papers and a total of approximately 2,200 pages of published proceedings, of which over 1,500 pages are dedicated to the papers alone.

There are 321 authors in total from 27 different universities (many of whom have contributed to more than one conference proceedings), of which approximately 30% are non-Italian, mainly from Europe and, to a lesser extent, South America (Colombia and Mexico).

This data does not merely reflect a quantitative distribution; rather, it highlights a structural imbalance among academic disciplines: the predominance of design and technology suggests that the topic of recycling is primarily addressed as a technical and design issue, while the economic and social dimensions -which are fundamental to its practical application- remain less developed.

The disciplinary distribution of authors (Figure 3) shows that researchers working in the fields of design (45% of contributions), materials technology, and engineering (30%) are predominant, with the remaining contributions showing a more limited participation of scholars in economics,

public policy, and social sciences. The distribution reflects a disciplinary fragmentation that often translates into parallel approaches and weak integration between fields of knowledge.

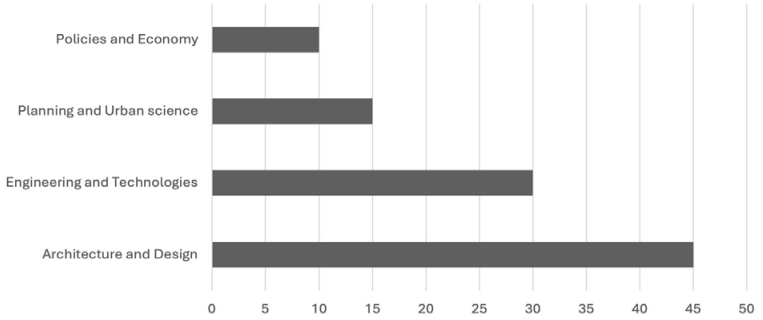


Figure 3. Disciplinary distribution of proceedings.

Recycling is thus interpreted in a pluralistic but not always convergent way: interdisciplinarity does not characterize the contributions, and the theme and structure of the conference attract vertical expertise.

Furthermore, regarding the participating authors, there is a strong academic presence and limited participation by professionals, businesses, and other stakeholders in general.

The analysis of keywords (Figure 4) highlights the recurrent use of generic terms such as recycling and reuse, waste, and circular economy, with less attention paid to the definition of shared and operational taxonomies.

4. Thematic Analysis

The distribution of topics is not neutral but reflects the research priorities in the field: in fact, a technological approach appears to prevail over design- and systems-based approaches, indicating that the field is still in an exploratory phase. The topics most frequently covered during the decade of publications and conferences can be summarized as follows:

- raw materials, understood as the result of the process of recovering and reusing production waste and construction and demolition waste.

- the reuse of existing buildings.
- national and European policies and regulatory developments on the circular economy.
- recycling as a design practice and tool for urban regeneration.

In general, most of the contributions address recycling as an eminently technological problem, focusing on construction materials, the recovery and valorization of construction and demolition (C&D) waste, and the use of secondary raw materials in the construction sector.

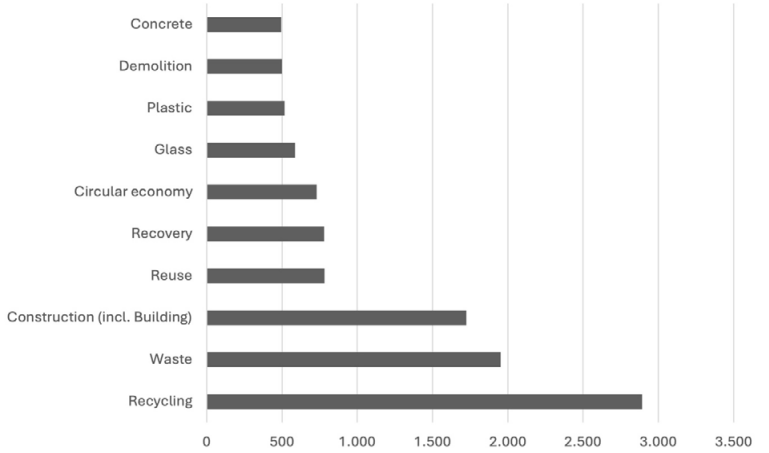


Figure 4. Keyword distribution.

Recurring topics refer to the recycling of concrete, bricks, steel, and glass: numerous experimental contributions investigate the mechanical, physical, and environmental performance of concrete with recycled aggregates, post-consumer plastics, recycled glass, and industrial by-products. Several contributions address the use of secondary materials and industrial by-products and LCA and performance assessments. This research highlights how material recycling can contribute significantly to reducing the consumption of natural resources and the environmental impact of the construction sector. However, the results are rarely associated with widespread or standardized design solutions: the issue of material recycling

often remains confined to the material level, without having a structural impact on the overall design process.

This approach demonstrates experimental maturity, but also limited scalability, as innovations often remain confined to the material level without affecting the overall design process.

A second area of research considers recycling as a design practice, especially in the reuse of existing buildings. In these contributions, the project becomes a tool for interpreting the existing situation, but is often confined to the case study, without evolving into a reproducible model and far from the project itself. This thematic strand includes topics such as the repurposing of disused industrial buildings, interventions on obsolete residential buildings, and the dialogue between conservation and innovation. The topics are addressed through case studies, often specific to individual buildings or experiences, from which it is generally not possible to define a systemic model of intervention.

The centrality of the case study highlights its rich empirical content but also its methodological fragility, due to the difficulty of generalizing the results.

A third area is that of European strategies, policies, and regulations and the circular economy, although these are not always accompanied by concrete impact assessments, but are nevertheless addressed in connection with future scenarios. References to the circular economy and European policies form a constant backdrop to the conferences analyzed. The targets set by the European Union for recycling and waste reduction are frequently cited as a reference framework for research and design. However, a critical reading highlights the risk of sustainability rhetoric, in which the concepts of recycling and the circular economy are taken as axioms, without in-depth verification of the economic, cultural, and production conditions necessary for their effective application in the construction sector.

Frequent references to European policies are often more rhetorical than substantive, highlighting a gap between strategic guidelines and actual practice.

A fourth area concerns recycling as a design strategy, presenting content on the technical and participatory roles involved in applying the strategy, projects as acts of reinterpretation and creative and adaptive reuse, often with approaches that are more narrative than operational. The

scenarios reflect the need for a completely different approach to design, one that allows holistic sustainability concepts to enhance environmental issues, improve people's living conditions, and reduce their impact on ecosystems, restoring the designer's leading role in promoting values of equity. From this perspective, the project becomes a tool for interpreting the building, capable of integrating memory, innovation, and new functional requirements. This also includes the theme of urban regeneration: these contributions offer relevant theoretical insights, questioning the demolition/reconstruction paradigm and proposing a vision of recycling as a process of continuous transformation. However, these experiences often remain linked to specific case studies, with limited capacity for generalization and transferability.

In this context, recycling tends to function as a cultural and narrative device rather than as a codified technical tool, confirming that it has not yet fully come into its own.

Other prevalent topics developed during the six conferences relate to selective demolition practices, material traceability, and flow management, as well as regulatory requirements for achieving end-of-waste status, with approaches that are sometimes not very practical, the circular economy, and the upcycling and downcycling of products, which are mainly theoretical and strategic in nature, and the aesthetics of recycling, a topic that has emerged more recently but is still marginal.

If we were to observe the relationship between technology and design, the general objective of all the conferences, it is clear that technology is considered to be a major driver of design, but there are not many articles that deal with this, while technology is very often treated as a separate topic or, in some cases, as a support to design.

4. Conclusions

Resource and waste management is a key issue for all countries, particularly those that have undergone rapid industrial development, such as China and India. While there is a direct correlation between increased resource consumption and waste production, the long-term environmental and human health consequences are certainly more dangerous (Crawford et al., 2017).

All the research published in the Proceedings and presented at conferences pursued the goal of "transforming waste into a quality resource" (Baratta et al., 2023a, p. 66).

The analysis highlights the need to move beyond a sectoral view of recycling, promoting a truly integrated approach between technology, design, and policy. Only in this direction can recycling evolve from a cultural issue to a structuring practice of contemporary design.

Among the critical issues are the lack of integration with architectural design and an approach that is often "additive" rather than transformative.

Although the level of experimental research is high, a recurring critical issue emerges: the difficulty of transferring the results of academic and industrial research into architectural design and professional practice.

The six conferences can also be summarized by representing their convergences and divergences. The former clearly refer to the centrality of the theme of sustainability, the overcoming of the "demolition/new construction" paradigm, and the growing attention to the urban scale. The divergences, on the other hand, are represented by disciplinary languages that are not always compatible; a different weight given to technology compared to design and, consequently, the lack of real integration between technological research and design practice. In short, the lack of a shared lexicon.

Recycling, therefore, emerges more as a cultural horizon than as a mature operating system.

In summary, without presuming to be exhaustive or to provide an overall picture that is obviously more complex and articulated, the analysis of the six conferences reveals a rich and articulated picture, a lively and evolving field of research but also one characterized by a certain fragmentation.

The results of the analysis suggest that the main limitation does not lie in the quantity or quality of the research, but in the lack of integration across different levels of knowledge: materials, design, policies, and operational practices often remain misaligned and fail to communicate with one another.

This highlights the need to develop not only technological innovations, but also shared methodological frameworks capable of translating the concept of recycling into applicable and verifiable protocols. Furthermore, recycling appears more as a cultural and programmatic horizon than as a

fully consolidated design practice. To overcome this limitation, it is necessary to promote deeper integration between technological research, architectural design, and public policy, so that recycling can become a structuring principle of contemporary design. But it is extremely necessary to start speaking the same language through the construction of a taxonomy of recycling.

Bibliographic references

Baratta, A.F.L. (edited by) (2019). Il riciclaggio di scarti e rifiuti in edilizia. Dal Downcycling all'upcycling verso gli obiettivi di economia circolare, *Proceedings of the 3rd International Conference Recycling*. Roma: Timia Editore.

Baratta, A.F.L. (2021a). Dalle politiche per la circolarità delle risorse alla strategia zero rifiuti. *Agathon. International Journal of Architecture, Art and Design*, *9*, 59-72.

Baratta, A.F.L. (edited by) (2021b). PRE|FREE - UP|DOWN - RE|CYCLE. Pratiche tradizionali e tecnologie innovative per l'End of Waste, *Proceedings of the 4th International Conference Recycling.* Conegliano (Treviso): Anteferma Edizioni S.r.l.

Baratta, A.F.L., Andreotti, J., Trulli, L., Calcagnini, L. (2023a). L'innovazione di prodotto per la transizione ecologica. *Agathon. International Journal of Architecture, Art and Design*, *13*, 58-67.

Baratta, A.F.L., Calcagnini, L., Magarò, A. (edited by) (2023b). Il valore della materia nella transizione ecologica del settore delle costruzioni, *Proceedings of the 5th International Conference Recycling*. Conegliano (Treviso): Anteferma Edizioni S.r.l.

Baratta, A.F.L., Calcagnini, L., Magarò, A. (edited by) (2025). Scenari innovativi nella cultura del progetto e della ricerca. *Proceedings of the 6th International Conference Recycling.* Firenze: Forma Edizioni.

Baratta, A.F.L., Catalano, A. (edited by) (2015). Il Riciclaggio come pratica virtuosa per il progetto sostenibile. *Proceedings of the 1st International Conference Recycling*, Pisa: Edizioni ETS

Baratta, A.F.L., Catalano, A. (edited by) (2017). Il Rifiuti come risorsa per il progetto sostenibile, *Proceedings of the 2nd International Conference Recycling*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.

Crawford, R.H., Mathur, D., Gerritsen, R. (2017). Barriers to improving the environmental performance of construction waste management in remote communities. *Procedia Engineering*, *196*, 830-837. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.014

MUR (2026) Settori Concorsuali e Settori Scientifico-Disciplinari. Available at: https://www.mur.gov.it/it/aree-tematiche/universita/docenti-universitari-e-carriera-accademica/settori-concorsuali-e-settori (last consulted 15 of March 2026).

Circularidad material en la arquitectura popular del Cabanyal: reutilización estética y ambiental

Material circularity in the popular architecture of Cabanyal: aesthetic and environmental reuse

Graziella Bernardo

Profesora asociada, Departamento de Innovación Humanística, Científica y Social DiUSS, Università degli Studi della Basilicata, Italia. *graziella.bernardo@unibas.it*

Luis Manuel Palmero Iglesias*

Profesor titular, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universitat Politècnica de València, España. *lpalmero@csa.upv.es*

Abstract: contemporary debates on circular economy in architecture invite a reconsideration of historical practices of material reuse developed in vernacular building traditions. The Cabanyal neighborhood (Valencia), a traditional fishing enclave, is a particularly significant case due to the extensive use of ceramic cladding on its façades. This paper proposes a reinterpretation of the architectural heritage of Cabanyal from the perspective of material circularity, analysing how certain socio-economic conditions favored reuse strategies, including the use of tiles derived from production waste, defective pieces or materials recovered from demolition processes. Beyond responding solely to domestic economic constraints, these practices contributed to shaping a distinctive urban identity characterised by the chromatic richness and compositional variety of its façades. Based on typological and material analysis, the study connects these popular construction solutions with contemporary principles of circular economy and low-tech sustainability. The results allow the architecture of Cabanyal to be interpreted as a proto-circular precedent, capable of offering relevant insights for current strategies of rehabilitation and material reuse in consolidated urban fabrics.

Keywords: circular economy, vernacular architecture, material reuse, architectural ceramics, Cabanyal (Valencia), low-tech sustainability.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Autor/a de correspondencia

1. Introducción

En el actual contexto de transición hacia modelos de economía circular aplicados al entorno construido (Ellen MacArthur Foundation, 2013), la arquitectura se enfrenta al reto de reducir el consumo de recursos y prolongar la vida útil de los materiales. Frente a aproximaciones predominantemente tecnológicas e industrializadas, en los últimos años ha emergido un creciente interés por las estrategias vernáculas y low-tech, capaces de ofrecer soluciones eficientes basadas en la disponibilidad local de recursos y en lógicas de aprovechamiento material. En este marco, la revisión de prácticas históricas de reutilización adquiere una especial relevancia, al permitir identificar precedentes culturales de la circularidad antes de su formulación teórica contemporánea. La arquitectura popular desarrollada en contextos de escasez económica constituye, en muchos casos, un laboratorio empírico de optimización de recursos, donde la reutilización, la adaptación y el aprovechamiento de excedentes formaban parte de la lógica constructiva cotidiana.

El barrio del Cabanyal, en Valencia, tradicional enclave de pescadores y trabajadores vinculados al frente marítimo, representa un caso particularmente significativo. Su reconocida imagen urbana, caracterizada por el uso extensivo de revestimientos cerámicos en fachada, ha sido ampliamente estudiada desde perspectivas patrimoniales, tipológicas y estilísticas. Sin embargo, la dimensión material vinculada al reaprovechamiento de dichos revestimientos ha recibido menor atención crítica.

El presente trabajo propone una reinterpretación de la arquitectura popular del Cabanyal desde la óptica de la circularidad material, analizando hasta qué punto el uso de cerámica vidriada en sus fachadas puede entenderse como resultado de estrategias de reutilización vinculadas a condicionantes socioeconómicos y productivos locales. A través de un análisis histórico-material y tipológico, el estudio busca poner en relación estas prácticas con los principios contemporáneos de economía circular, evaluando su potencial como referencia para actuales procesos de rehabilitación y reutilización en tejidos urbanos consolidados.

1.1. Objetivo y metodología

El objetivo principal de este trabajo es reinterpretar la arquitectura popular del barrio del Cabanyal (Valencia) desde la perspectiva de la economía circular, analizando el papel del revestimiento cerámico de fachada como posible estrategia histórica de reutilización material. De manera específica, la investigación busca identificar las condiciones sociales, económicas y productivas que favorecieron el empleo de azulejos procedentes de excedentes de fabricación, piezas con taras o materiales recuperados, así como evaluar el impacto de estas prácticas en la configuración formal e identitaria del tejido urbano.

La investigación se desarrolla mediante una metodología cualitativa de carácter histórico-material y tipológico. En primer lugar, se realiza una revisión crítica de la literatura existente sobre la arquitectura popular del Cabanyal, con especial atención a las referencias relativas al uso de revestimientos cerámicos. En segundo lugar, se lleva a cabo un análisis tipológico de fachadas representativas del barrio, atendiendo a patrones de composición, variabilidad cromática y posibles indicios de reutilización material.

Este análisis se complementa con la interpretación del contexto socioeconómico y productivo en el que se desarrolló la edificación popular del Cabanyal, considerando la proximidad a centros de producción cerámica y las dinámicas de acceso a materiales por parte de las clases populares. Finalmente, los resultados se ponen en relación con los principios contemporáneos de economía circular y sostenibilidad low-tech, con el fin de evaluar el potencial transferible de estas prácticas vernáculas al debate actual sobre rehabilitación y reutilización en arquitectura.

El estudio se basa en el análisis de una muestra representativa de fachadas situadas en el barrio histórico del Cabanyal, en Valencia. La selección se ha centrado en edificaciones construidas entre finales del siglo XIX y las primeras décadas del siglo XX, periodo en el que se generaliza el uso del revestimiento cerámico en la arquitectura residencial del barrio. La muestra se definió atendiendo a tres criterios principales: la presencia de fachadas revestidas con azulejería cerámica, la conservación de rasgos materiales originales y su localización dentro del tejido urbano histórico del Cabanyal. Este enfoque permite identificar

estrategias recurrentes de reutilización de materiales y elaborar una interpretación más amplia de las prácticas de circularidad presentes en las tradiciones constructivas locales.

2. Contexto histórico y urbano del Cabanyal

El barrio del Cabanyal constituye uno de los enclaves urbanos más singulares del litoral valenciano, tanto por su origen como por la persistencia de una identidad social y material fuertemente vinculada al mar. Nacido como asentamiento independiente de pescadores, su desarrollo histórico estuvo condicionado por una economía de base modesta y por una estrecha relación con los recursos disponibles en el entorno inmediato (Simó y Jarque, 2014). Esta condición periférica y popular resultó determinante en la configuración de sus tipologías edificatorias y en las soluciones constructivas adoptadas.

El primitivo tejido del Cabanyal se organizó a partir de las tradicionales barracas valencianas, posteriormente sustituidas, desde finales del siglo XIX, por viviendas de fábrica que mantuvieron, no obstante, la lógica parcelaria estrecha y alargada característica del antiguo poblado. La regularidad del trazado urbano, con calles paralelas al mar y fachadas alineadas, contribuyó a generar una imagen de conjunto altamente coherente, donde la repetición tipológica convivía con una notable diversidad expresiva en los frentes edificados (Gracia, 1998). En este contexto social de pescadores y clases trabajadoras, la construcción de la vivienda respondía a criterios de economía de medios y aprovechamiento máximo de los recursos disponibles. La proximidad a los centros de producción cerámica del ámbito valenciano facilitó el acceso a azulejos vidriados que, en muchos casos, no correspondían a series comerciales de primera calidad. Diversos estudios han señalado cómo el uso de excedentes de fábrica, piezas con taras o materiales recuperados formó parte de las prácticas constructivas habituales en la arquitectura popular del barrio (Simó y Jarque, 2014).

Lejos de generar una imagen precaria, esta cultura del reaprovechamiento contribuyó a configurar una identidad urbana propia, en la que la cerámica vidriada adquirió un papel protagonista tanto desde el punto de vista funcional, aportando impermeabilidad y protección a los

muros, como desde el plano expresivo, mediante una intensa variabilidad cromática y compositiva (Gracia, 1998). De este modo, la arquitectura popular del Cabanyal puede entenderse no solo como resultado de condicionantes estilísticos vinculados al modernismo popular valenciano, sino también como expresión material de estrategias adaptativas propias de contextos de escasez. Esta doble dimensión tanto identitaria como material, convierte al Cabanyal en un caso de estudio especialmente pertinente para su reinterpretación desde los actuales marcos de la economía circular, al evidenciar cómo prácticas de reutilización y aprovechamiento precedieron, de forma empírica, a las formulaciones contemporáneas sobre sostenibilidad en el entorno construido.

3. La cerámica como estrategia de reaprovechamiento

El uso extensivo de revestimientos cerámicos en las fachadas del Cabanyal ha sido tradicionalmente interpretado desde claves estilísticas vinculadas al modernismo popular valenciano. Sin embargo, una lectura atenta de las condiciones materiales y socioeconómicas del barrio permite identificar en estas soluciones constructivas una lógica de aprovechamiento que trasciende lo meramente ornamental.

En el contexto de una comunidad formada mayoritariamente por pescadores y trabajadores portuarios, la economía doméstica condicionaba de manera directa las decisiones constructivas. La disponibilidad de recursos financieros limitados favoreció la adopción de estrategias basadas en el acceso oportunista a materiales asequibles, entre ellos azulejos procedentes de excedentes de producción, series descatalogadas o piezas con defectos de fabricación que eran comercializadas a menor coste (Simó y Jarque, 2014). A ello se sumaba la reutilización de elementos recuperados de derribos o reformas, práctica habitual en entornos populares donde el valor de uso del material primaba sobre su condición de novedad. La proximidad geográfica del Cabanyal a importantes centros de producción cerámica del ámbito valenciano facilitó estos flujos informales de material, generando un contexto particularmente propicio para el reaprovechamiento. En este sentido, el revestimiento cerámico de fachada cumplía simultáneamente una función técnica, mejorando la impermeabilidad y durabilidad de los muros

y una función económica, al permitir resolver el acabado exterior mediante materiales accesibles y de fácil colocación. Desde una perspectiva contemporánea, estas prácticas pueden interpretarse como formas proto-circulares de gestión material, en la medida en que prolongaban la vida útil de productos industriales fuera de los circuitos comerciales estándar (Addis, 2006). No obstante, a diferencia de los actuales modelos de economía circular formalizada, el caso del Cabanyal responde a una circularidad de carácter empírico y descentralizado, basada en redes locales de disponibilidad y en decisiones constructivas de escala doméstica. La notable diversidad tipológica y cromática del material cerámico empleado en el Cabanyal refleja una lógica de disponibilidad heterogénea vinculada al reaprovechamiento de excedentes productivos (Fig. 1). Esta diversidad cromática no responde únicamente a una intención decorativa, sino que está vinculada al aprovechamiento de piezas procedentes de excedentes o descartes de la producción cerámica local.

Paradójicamente, la heterogeneidad derivada de este aprovechamiento mezcla de series, variaciones cromáticas, composiciones no estandarizadas, terminó por convertirse en uno de los rasgos más distintivos de la imagen urbana del barrio. Como ya apuntó Gracia (1998), la arquitectura de los poblados marítimos valencianos desarrolló una reinterpretación libre y naíf de los lenguajes modernistas, fenómeno que en el Cabanyal se vio intensificado por la propia lógica material del reaprovechamiento. Como se observa en la Figura 2, la combinación de piezas heterogéneas refleja la incorporación de materiales procedentes de distintos lotes de producción, una práctica frecuente en el barrio que puede interpretarse hoy como una forma temprana de circularidad material.

Así, la fachada cerámica del Cabanyal puede entenderse no solo como expresión de un gusto popular por la ornamentación, sino como el resultado visible de una economía material de base circular, donde la escasez, la proximidad productiva y la cultura constructiva local convergieron en una solución arquitectónica de notable coherencia funcional y expresiva.



Figura 1. Fachada decorada con elementos recuperados [Fuente: elaboración propia].



Figura 2. Fachadas decoradas con revestimiento cerámico vidriado verde y azul en relieve [Fuente: elaboración propia].

3.1 Impacto formal: estética del reciclaje

La generalización del revestimiento cerámico en las fachadas del Cabanyal no solo respondió a condicionantes técnicos y económicos, sino que tuvo un impacto decisivo en la configuración de la imagen urbana del barrio. La lógica de reaprovechamiento material, basada en la disponibilidad irregular de piezas, generó de manera indirecta un paisaje arquitectónico caracterizado por variabilidad cromática y la singularización compositiva de cada frente edificado. A diferencia de las arquitecturas académicas, donde la homogeneidad formal suele derivarse de procesos proyectuales

centralizados, en el Cabanyal la variabilidad emerge como consecuencia de decisiones constructivas descentralizadas y de escala doméstica. La combinación de azulejos procedentes de distintas series, tonalidades y formatos produjo composiciones heterogéneas que, sin embargo, mantienen una notable coherencia urbana gracias a la repetición de las tipologías edificatorias y de la alineación parcelaria (Simó y Jarque, 2014).Este fenómeno puede interpretarse como una forma de "estética del reciclaje", en la que la reutilización material no se oculta, sino que se manifiesta explícitamente en la piel arquitectónica. Las pequeñas irregularidades, las discontinuidades cromáticas o las variaciones de motivo no constituyen anomalías, sino huellas visibles de un proceso constructivo basado en la oportunidad material. En este sentido, la fachada cerámica del Cabanyal anticipa, de manera no intencional, debates contemporáneos sobre la expresividad del material reutilizado y su potencial como generador de identidad. Como señala Gracia (1998), la arquitectura de los poblados marítimos valencianos desarrolló una reinterpretación libre de los lenguajes decorativos cultos, incorporando una dimensión lúdica y directa en el tratamiento ornamental. En el caso del Cabanyal, esta libertad compositiva se ve reforzada por la propia lógica del reaprovechamiento, que introduce un grado adicional de indeterminación formal difícilmente alcanzable mediante sistemas constructivos plenamente estandarizados.

Desde una lectura contemporánea, esta condición sugiere que la economía circular aplicada al entorno construido no debe entenderse únicamente en términos de eficiencia material, sino también como una oportunidad para generar nuevas cualidades espaciales y expresivas. El Cabanyal demuestra que la reutilización, incluso cuando surge de contextos de necesidad, puede producir paisajes urbanos de alta intensidad identitaria y notable complejidad visual. Las fachadas residenciales en el barrio del Cabanyal se caracterizan por el uso extensivo de revestimiento cerámico vidriado y composición cromática no estandarizada, representativa de la variabilidad formal asociada a prácticas de reaprovechamiento material. Esta condición se manifiesta con especial claridad en determinadas fachadas del Cabanyal, donde la repetición modular del revestimiento cerámico convive con paneles decorativos singulares incluyendo el uso de azulejos procedentes de residuos de la producción cerámica, piezas defectuosas o materiales recuperados de procesos de demolición (Figs. 3-6).



Figura 3. Fachada del Cabanyal caracterizada por la combinación de formatos y cromatismos cerámicos, representativa de la variabilidad formal asociada al reaprovechamiento material [Fuente: elaboración propia].



Figura 4. Fachada caracterizada por el uso de elementos decorativo tradicionales de cerámica y en relieve. [Fuente: elaboración propia].

4. Lectura contemporánea desde la economía circular

La reinterpretación del Cabanyal desde la perspectiva de la economía circular permite situar la arquitectura popular del barrio en un marco de debate plenamente vigente. Aunque las prácticas de reutilización detectadas no respondían a una conciencia ambiental formalizada, sí evidencian una lógica material basada en la prolongación de la vida útil de los productos cerámicos y en la optimización de recursos disponibles a escala local. En

este sentido, diversos autores han señalado el valor de las arquitecturas vernáculas como precedentes operativos de estrategias contemporáneas de sostenibilidad material. Frente a los actuales modelos de circularidad apoyados en procesos industriales complejos, el caso del Cabanyal muestra la eficacia de estrategias *low-tech* fundamentadas en la proximidad, la adaptabilidad y el aprovechamiento oportunista de excedentes (Simó y Jarque, 2014). Esta condición resulta especialmente relevante en el contexto contemporáneo de la rehabilitación urbana, donde la reducción de la huella material del edificio existente se ha convertido en un objetivo prioritario (Pomponi y Moncaster, 2017).



Figura 5. Fachada residencial y detalle del revestimiento que recuerda al uso del trencadís[1]. [Fuente: elaboración propia].

[1] ***Trencadís:*** técnica constructiva y ornamental de origen modernista basada en la composición de superficies mediante fragmentos irregulares de cerámica, vidrio u otros materiales reutilizados, dispuestos a modo de mosaico. Popularizada por Antoni Gaudí en el modernismo catalán, la técnica ha sido reinterpretada en la arquitectura contemporánea valenciana, entre otros, por Santiago Calatrava, como homenaje a la tradición cerámica mediterránea.

Asimismo, el análisis pone de manifiesto que la reutilización no solo incide en parámetros cuantitativos de sostenibilidad, sino que puede actuar como generadora de cualidades urbanas específicas. La diversidad cromática y compositiva derivada del uso no estandarizado de la cerámica contribuyó a construir una identidad colectiva reconocible, en línea con lo apuntado por Gracia (1998) sobre la capacidad expresiva de la arquitectura de los poblados marítimos valencianos. No obstante, es necesario matizar que la circularidad vernácula del Cabanyal se apoyaba en condiciones productivas y sociales muy concretas —proximidad a la industria azulejera, economías domésticas de escasez y sistemas constructivos de baja especialización— difíciles de reproducir de forma directa en el contexto actual. Por ello, más que como modelo replicable, el caso debe entenderse como un precedente conceptual capaz de informar críticamente las estrategias contemporáneas de reutilización en arquitectura.



Figura 6. Casa en planta baja con estado anterior y rehabilitada [Fuente: elaboración gráfica propia].

En este sentido, el Cabanyal ofrece una valiosa lección: la transición hacia una arquitectura circular puede encontrar en el conocimiento material acumulado por la tradición popular no solo antecedentes históricos, sino

también principios operativos transferibles a los desafíos presentes de la rehabilitación sostenible. Este tipo de soluciones pone de manifiesto cómo las lógicas de disponibilidad material y de aprovechamiento de recursos condicionaron la configuración estética de las fachadas, integrando de manera natural prácticas de reutilización dentro de la cultura constructiva local.

5. Conclusiones

El análisis desarrollado permite reinterpretar la arquitectura popular del Cabanyal desde una perspectiva material que trasciende las lecturas exclusivamente estilísticas o patrimoniales. La generalización del revestimiento cerámico en fachada puede entenderse, al menos en parte, como resultado de estrategias de aprovechamiento vinculadas a un contexto socioeconómico de recursos limitados y a la proximidad de la industria azulejera valenciana. Las prácticas detectadas, empleo de excedentes de producción, utilización de piezas con taras y reutilización de materiales disponibles, evidencian la existencia de una lógica proto-circular basada en la prolongación de la vida útil de los productos y en la optimización de recursos locales. En este sentido, la arquitectura del Cabanyal confirma el potencial de las tradiciones constructivas vernáculas como precedentes operativos de los actuales paradigmas de economía circular (Simó y Jarque, 2014).

Al mismo tiempo, el estudio pone de manifiesto que estos procesos de reaprovechamiento no solo respondieron a criterios de economía material, sino que contribuyeron decisivamente a la configuración de una identidad urbana singular, caracterizada por la diversidad cromática y compositiva de sus fachadas (Gracia, 1998). La circularidad, incluso en su forma empírica, se revela así como un agente capaz de generar valor cultural además de eficiencia material. No obstante, la transferencia directa de este modelo al contexto contemporáneo requiere una lectura crítica, dado que las condiciones productivas y sociales que lo hicieron posible difieren sustancialmente de las actuales. Por ello, el Cabanyal debe entenderse no como un modelo reproducible, sino como un caso de estudio que aporta principios interpretativos relevantes para las estrategias actuales de rehabilitación y reutilización en arquitectura.

En definitiva, la revisión del Cabanyal desde la óptica de la economía circular permite reconocer en la arquitectura popular no solo un patrimonio a conservar, sino también un repositorio de inteligencia material capaz de informar los desafíos contemporáneos de la transición hacia un entorno construido más sostenible.

Referencias bibliográficas

Addis, B. (2006). *Building with Reclaimed Components and Materials: A Design Handbook for Reuse and Recycling.* London: Earthscan.

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition.* Isle of Wight: Ellen MacArthur Foundation.

García Esparza, J. A. (2012). *Arquitectura tradicional valenciana.* Valencia: Universitat Politècnica de València.

Gracia, C. (1998). *Historia del arte valenciano.* Valencia: Cátedra.

Pérez Guillén, I. (2008). *La cerámica arquitectónica valenciana.* Valencia: Generalitat Valenciana.

Pomponi, F., Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, *143*, 710–718. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055

Simó, T., Jarque, F. (2014). *El Cabanyal: un barrio patrimonial a rehabilitar.* Valencia: Universitat Politècnica de València.

From fragmentation to integration: the building as a circularity connector between tangible and intangible dimensions

Cinzia Maria Luisa Talamo*

Full Professor, Politecnico di Milano, Department of Architecture, Built Environment, and Construction Engineering (DABC), Italy. *cinzia.talamo@polimi.it*

Noelia Huanca Coacalla

PhD candidate, Politecnico di Milano, Department of Architecture, Built Environment, and Construction Engineering (DABC), Italy. *noeliamelany.huanca@polimi.it*

Nazly Atta

PhD, Researcher, Politecnico di Milano, Department of Architecture, Built Environment, and Construction Engineering (DABC), Italy. *nazly.atta@polimi.it*

Giancarlo Paganin

Associate Professor, Politecnico di Milano, Department of Architecture and Urban Studies (DASTU), Italy. *giancarlo.paganin@polimi.it*

Abstract: The construction sector (CS) is decisive for the circular transition, though its implementation remains fragmented across technical, economic, social, and governance dimensions. Despite strong European policy support, a critical risk persists: circular strategies are often pursued through a silos approach privileging technical and environmental performance over the systemic integration of human-centred dimensions (social, economic, governance).

Thus, this paper identifies the current structural fragmentation of circularity within the CS and highlights recurrent gaps and open issues across the main identified dimensions of circularity. Then, the paper proposes to adopt a multidimensional and multiscalar perspective based on the concept of Circular Ecosystem (CEC). In this perspective, a CEC is meant as a spatial and relational system where heterogeneous stakeholders operate in an integrated way across different scales, activating various circular strategies (product reuse, material recycling, reversibility, shared use of assets, knowledge exchange) to generate economic, environmental and social values. From this ecosystem-based perspective, the building assumes a central role. Hence, this paper proposes the concept of Circular Building (CB) as a *trait d'union* between technical strategies and ecosystemic vision, based on governance arrangements, collaborative business models, shared infrastructures, and community participation.

* Corresponding author

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

Starting from these premises, the paper proposes five conditions of CB based on the analysis of literature, case studies, and European research projects. These five CB conditions are characterised as: Adaptive Reuse & Regeneration, Temporary Use, Coworking & Coliving, Participatory Retrofit, Multifunctional Civic Hubs. Each configuration is determined by a set of aspects: technical solution, relationship between stakeholders, involvement of local governance, participatory mechanisms, community-based in decision-making and business models.

Keywords: circular economy, social dimension, silos approach, circular ecosystem, circular building.

1. Introduction

The construction sector (CS) represents a decisive field for transitioning to the Circular Economy. In Europe, the built environment accounts for around 33 % of energy-related greenhouse gas emissions (EEA, 2024) and 38 % of total waste generation (Eurostat, 2024). In response, the European Union has issued and implemented multiple policies promoting directly or indirectly circularity within the CS: European Green Deal, Circular Economy Action Plan, Renovation Wave, New European Bauhaus, Ecodesign for Sustainable Products Regulation, EU Taxonomy, Critical Raw Materials Act. Despite this strong policy effort, carried out by the EU in order to align circular transition with environmental goals, the implementation in the CS remains structurally complex (Gasparri et al., 2023). One of the reasons behind this complexity lies in the multi-dimensional (environmental, economic, social, governance) and multi-scalar nature of the CS, ranging from materials and components to buildings, neighbourhoods and markets (Moustafa et al., 2025). Another aspect to consider is the high fragmentation of the construction supply chain, where the difficulties in coordination among stakeholders hinder material traceability, lifecycle integration and common knowledge creation (Sun et al., 2025). Besides, Kaya (2025) highlights how, differently from other sectors (automotive, electronics), in the CS the stakeholders tend to operate within compartmentalized domains (silos), limiting the creation of shared knowledge and the development of transdisciplinary approaches useful for foreseeing the impact of circular strategies.

This structural fragmentation directly affects how circular strategies are interpreted and operationalized in the CS. Indeed, even if the notion of Triple-Bottom-Line has been widely recognized in literature (D'Amato and Korhonen, 2021), practical implementation often privileges the integration only of technical and environmental performance, together with economic optimization during decision-making, marginalizing long-term social consideration. An analysis of recent literature highlights the propensity to deal with circularity according to a silos approach, deepening specific areas of interest:

- environmental (decarbonisation, material recycling, product reuse);
- technical (design for disassembly, flexibility, reversibility, adaptability, modularity);
- economic (product-as-a-service, sharing economy, business models, cost optimization, secondary markets, local economies);
- socio-cultural (social inclusion, accessibility, affordability, job creation, skills development, social capital, community resilience, sharing and repair culture);
- governance (assessment, certification and regulatory systems).

Pomponi and Moncaster (2017) stress the scarcity of multi-scalar and multi-dimensional approaches capable of integrating all of these areas of interest. Dewagoda et al. (2024) highlight that Design for Circularity (DfC) emerges as a central strategy for embedding circular principles at the early stages of design, thereby promoting modularity, disassembly, adaptability, reversibility and flexibility. Although, as it emerges from an analysis of some widely used assessment tools and certifications (BREEAM, LEED, WELL, DGNB, Cradle-to-Cradle, EU Taxonomy, Level(s)), DfC remains confined to technical aspects, mainly addressing the micro-scale of materials and components without fully engaging with broader organizational and territorial ecosystems (Pansera et al., 2021). In general, these assessment tools have limited scopes in social sustainability as they focus on one stakeholder (the user, seen from the point of view of user-experience) and they consider mainly "hard" criteria, such as ventilation system, carbon dioxide detection and other facilities provision, rather than addressing the intangible dimension represented by the value generated

by circularity at community level (who benefits, who participates, how governance is reshaped, what capacities and community resilience are built through circular strategies) (Revellini, 2023).

Based on these premises, this paper:

- identifies the structural fragmentation that characterizes circularity in the CS (silos approach),
- highlights persistent gaps across governance, economic, technical and social dimensions.
- proposes a multi-dimensional and multi-scalar interpretative perspective of circularity,
- adopts the concept of Circular Ecosystem (CEC) as a necessary integrative perspective,
- conceptualizes the building as the main interface between the various areas of interest of circularity within the broader vision of CEC,
- translates this theoretical proposition into five configurations of CBs, demonstrating how different combinations of circular mechanisms generate distinct patterns of social value.

2. Recurrent gaps, bottlenecks and open issues related to circularity in the construction sector (CS)

Circularity in the CS still presents recurrent gaps across four dimensions: governance, economic, technical and social. Among them, governance, at the project level, is the binding dimension as it shapes how decisions, responsibilities, and coordination are organized across the other three. Construction delivery is still organized around temporary project teams and contractual fragmentation. Thus, the current system rewards short-term performance and risk transfer, not long-term management and maintenance of shared infrastructures. Other common governance gaps include: unclear ownership and responsibility for circular assets over time, weak mechanisms for collective decision-making across stakeholders, lack of procurement and regulatory pathways that legitimize reuse, and limited capacity to manage circularity at meso (neighbourhood) and macro (city/region) scales. These aspects reinforce the silos approach.

In relation to the economic dimension, high-impact circular strategies may not be financially attractive under current market conditions. Even when reuse is technically feasible, operators face price competition with virgin materials, uncertain supply and quality for reused products, liability and warranty concerns, and high costs (storage, certification, documentation, reverse logistics). This pushes decision-makers toward low-risk, product-level optimizations (narrow substitutions, small recycling improvements) for one single project rather than systemic reuse models that require collective investment. In this sense, the economic gap is not only cost-related; but also risk, reliability, and responsibility.

Concerning the technical circularity, it is mature, though its implementation often remains stuck as it is pursued only at the component level and lack coordination and continuity across time and actors. Since buildings are complex assemblies with long lifecycles and uncertain future uses, technical circularity still struggles with: (1) interconnectivity (systems are not specifically designed to be reused in the future with different configurations), (2) traceability and proof of performance for reused products, (3) logistics and timing (deconstruction rarely aligns with demand), and (4) scale mismatch (circularity innovations piloted on single sites does not take into account the whole context).

With regard to social circularity, it is often framed as a co-benefit rather than a core objective with explicit criteria. Social outcomes are usually assessed on lived experience, actual space use, diversity of publics, and community participation, elements that have not yet been integrated within circularity criteria.

The analysis of the gaps and open issues (Table 1) suggests significant conditions that are limiting a transition effectively able to integrate the many dimensions of circularity.

Table 1. Gaps and open issues for circularity in relation to specific dimensions of analysis (social, governance, technical, economic) [Source: authors].

Dimension	Topics	Open issues	Sources
Governance	**Policy and strategies**: circular roadmaps, municipal CE plans, corporate ESG governance structures. **Stakeholder formats**: partnerships, networks, PPPs, memoranda, advisory boards. **Procurement experiments**: circular procurement guidelines, pilot tenders, supplier engagement. **Regulatory discussion**: permitting, waste classification, end-of-waste, standards and compliance. **Management practices**: project governance, roles/responsibilities mapping, reporting and audits.	• What governance model fits Circular Buildings (public sector, private sector, public-private partnership, third sector)? • How to govern circularity across scales and across time? • How to align policy and procurement to make circularity the default? • How to manage data governance (passports, liability info, transparency)?	Kelly, S., Kalaitzi, D., Robertson, A., & Polychronakis, Y. (2026). "Systematic literature review of the factors of information sharing that enable circular procurement in the construction industry", *Cleaner Production Letters*, 10, 100134. Ababio, B. K., Lu, W., Agyekum, K., & Ghansah, F. A. (2025). "Enhancing circular construction through procurement: A conceptual stakeholder-centric collaborative framework for sustainable outcomes", *Environmental Impact Assessment Review*, 112, 107784. Lingegård, S., Hedborg, S. (2025). "Rethinking the project life cycle – how circularity challenges processes, roles and governance", *Project Leadership and Society*, 6, 100194, pp. 1-11. Šibenik, G., Sanchez, B., Stouffs, R., Herthogs, P. (2025). "A literature review of measurement methods for building designs that enable higher-value resource recovery: the circular economy potential framework", *International Journal of Sustainable Engineering*, 18(1), 2573270.
Technical	**Design strategies**: design for disassembly (DfD), modularity, standardization, reversible connections, adaptability/flexibility, selective dismantling, material passports	• How to guarantee the performance of reused products (standards, testing, certification)?	Pierzchlewicz, D., Woźniak, A., & Widera, B. (2025). "Recent Research on Circular Architecture: A Literature Review of 2021–2024 on Circular Strategies in the Built Environment", *Sustainability*, 17, 7580.

(Table 1 continued on next page)

(Table 1 continued from previous page)

Dimension	Topics	Open issues	Sources
Technical	**Material and product strategies**: reclaimed components, prefabrication, low-waste construction, recycled-content materials, material substitution, selective demolition/deconstruction. **Data and traceability tools**: BIM-based inventories, material passports, component tagging/QR, documentation of origin.	• How to design for unknown future uses without overdesign? • How to manage "assembly complexity" (MEP, composites, finishes) where disassembly is hardest? • How to scale reuse logistics (storage, matching, transport) without killing benefits?	Ostapska, K., Rüther, P., Loli, A., & Gradeci, K. (2024). "Design for Disassembly: A systematic scoping review and analysis of built structures designed for disassembly", *Sustainable Production and Consumption*, 48, pp. 377–395. Rakhshan, K., Morel, J.-C., Alaka, H., Charef, R. (2020). "Components reuse in the building sector – A systematic review", Waste Management & Research, 38(4), pp. 347–370.
Economic	**Business models**: product-as-a-service, leasing, buy-back schemes, take-back agreements, sharing models for space/services. **Cost frameworks**: life-cycle costing (LCC). **Market building**: secondary materials marketplaces, reverse logistics providers, circular procurement pilots, public incentives. **Financing**: green loans, impact finance narratives, circular funds, subsidies for recycling/reuse.	• Who carries risk (liability, warranty, insurance) for reused products? • How to price uncertainty (quality, supply continuity)? How to value retained value in property appraisal? • What is the right unit of value (asset, portfolio, district)?	Griffiths, P., Itanola, M., Andabaka, A., & Atstaja, D. (2025). "Hurdles to a Circular Built Environment: A Look at the Economic and Market Barriers", *Buildings*, 15(8), 1332. Vella, A. (2025). "Life cycle costing in the circular economy: a state-of-the-art review", *SN Applied Sciences*, 7, Article 819. Zeerak, A., Moustafa, S., Wuni, I.Y. (2024). "Barriers to implementing circular economy in the construction industry: A systematic review and future research directions", *Sustainable Futures*, 8, 100094.

(Table 1 continued on next page)

(Table 1 continued from previous page)

Dimension	Topics	Open issues	Sources
Social	**Co-benefits**: job creation, skills/training, community engagement, improved public realm, health/wellbeing claims. **Participation**: workshops, co-design sessions, stakeholder consultations. **Social innovation**: maker spaces, repair cafés, community hubs, cooperative models, social enterprise narratives. **Inclusion** claims: affordability, accessibility, mixed-use "activation," community-building through shared spaces.	• How to define social value in CE in a comparable way across contexts? • How to measure it (qualitative vs quantitative; before/during/after)? • How to attribute effects to circular strategies vs other factors? • How to ensure equity (not just participation, but power-sharing)? • How to prevent exclusion (circular premium, displacement, barriers to secondary markets)?	Al Haj Eid, M.; Dandis, A.O.; Cathro, V. (2025). "The Social Dimension of the Circular Economy: A Review Towards a Comprehensive Narrative", *Sustainable Development*, 33, pp. 8025–8040. Carreño-Ortiz, J., Escobar-Sierra, M., & Lopez-Perez, F. (2025). "Theoretical relationship between circular economy and social innovation from a sustainable development perspective", *Humanities and Social Sciences Communications*, 12, 1549. Cerchione, R., Morelli, M., Passaro, R., Quinto, I. (2025). "Balancing sustainability and circular justice: The challenge of the energy transition", *Journal of Cleaner Production*, 494, 144942. Corvellec, H.; Stowell, A.F.; Johansson, N. (2022). "Critiques of the circular economy", *Journal of Industrial Ecology*, 26(2), pp. 421–432.

3. Circularity in the construction sector: a multi-dimensional and multi-scalar perspective

Circularity in the CS should be faced according to a multi-dimensional and multi-scalar approach, encompassing simultaneously technical, economic, and social systems (Figure 1) (Finamore et al., 2024). These interconnected dimensions and scales (Table 2) characterize circularity in CS not merely as a technical strategy for material efficiency, but also as a systemic transformation spanning physical products, economic resources, and social relations (Bostancı, 2024). The challenge, therefore, lies not only in implementing circular measures in isolated projects, but also in coordinating interactions across scales and dimensions. Without integration, projects risk to remain confined within fragmented domains, limiting their capacity to generate systemic environmental improvements, stable economic value and impactful social outcomes.

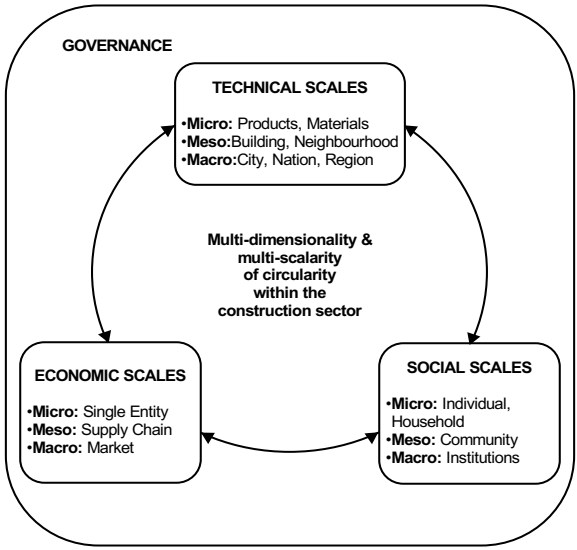


Figure 1. Multidimensional and multiscalar diagram of circularity in the construction sector. The diagram illustrates that circularity should be read across three interconnected dimensions (built environment, social, and economic), each described at three scales (micro, meso, and macro) and the binding governance dimension embedding the other three [Source: authors].

Table 2. Multidimensional and multiscalar interpretation of circularity across the technical, economic and social dimensions in the construction sector [Source: authors].

Dimension \ Scale	Micro	Meso	Macro
Technical	**Focus**: products and materials **Topics:** durability, reversibility, Design for Disassembly (DfD), modularity, standardization of components, flexibility, reversible connections, materials recycling, products reuse, material passport	**Focus:** buildings and neighbourhoods **Topics:** lifecycle integration, spatial flexibility, adaptability, coordinated resource flows between systems (shared infrastructure)	**Focus:** city, nation, region **Topics**: urban metabolism, infrastructure systems, regulatory frameworks shape territorial material circulation and resource consumption, regulatory frameworks enabling circularity
Economic	**Focus:** individual firms and related projects **Topics:** costs, risk allocation, value retention. Investment decisions, financial feasibility, secondary raw material markets	**Focus:** supply chains **Topics:** business models, contractual arrangements, reverse logistics, value chain coordination	**Focus:** Market **Topics:** policy incentives, taxation, public procurement, circular market creation
Social	**Focus:** Individuals and households **Topics:** accessibility, affordability, health, everyday use conditions	**Focus:** communities **Topics:** social innovation, shared knowledge, social capital, collective skills, community-based governance, and participation, well-being, quality of life, social relations, sense of belonging, collective benefit, through circular practices	**Focus:** Institutions **Topics:** Sustainable Development Goals (SDG), social value, job creation, just transition, inclusion, equity, power distribution, long-term social and environmental impact, territorial regeneration

4. Integrated approach toward Circular Buildings (CBs): Circular Ecosystems (CEC)

The recognition of circularity as a multi-dimensional and multi-scalar condition raises a critical conceptual question: how can these dimensions and scales be coordinated in practice? Proposing a unifying interpretative framework may represent a starting point to identify action areas where to boost coordination and integration measures. For the purpose of pursuing integration of circular measures across scales and dimensions, it is useful to assume the concept of Circular Ecosystem (CEC) as it has been defined in the literature.

Even if definitions of CEC may slightly vary across the literature (Table 3), they agree on four core themes:

(i) heterogeneity and interdependency of stakeholders,
(ii) coordination of tangible and intangible resource flows,
(iii) collective value generation beyond that one of the single firm or project,
(iv) dynamic and evolutionary nature.

Based on the above definitions, in the present paper, a CEC is meant as "a spatial and relational system, where heterogeneous and interdependent stakeholders manage the different dimensions of circularity (technical, economic, social and governance) across scales (from product to region), enabling research and implementation of technical circular strategies (product reuse, material recycling, shared use of infrastructures, knowledge exchange, ...) in order to generate outcomes across economic, environmental and social scope".

Assuming the concept of CEC also helps in overcoming the above described silos approach. According to this perspective, the building assumes a key position: it is not merely a passive asset optimized through vertical technical strategies (recycled materials, design for disassembly, modularity), but it can be considered as a node within a network, capable of synthesizing economic, technical and social values, simultaneously embedded within the ecosystem.

Table 3. Selected significant definitions of circular ecosystem within literature [Source: authors].

Definition of Circular Ecosystem	Core themes	Source
"Circular economy ecosystems describe systems of stakeholders (producers, suppliers, etc.), their different roles (orchestrators, brokers, etc.), and the interactions and interrelations (knowledge and information, material and energy, and economic flows) between them, focused at extending, cycling, intensifying, and dematerialising resource loops".	(i); (ii); (iii)	Geissdoerfer, M.; Kanda, W.; Kirchherr, J. (2025). "Conceptualizing Circular Ecosystems: An Analysis of 45 Definitions", *Business Strategy and the Environment*, 0, pp. 1–27
"Circular ecosystem (CE) is a symbiotic economic model that advocates for a paradigm shift from circular individualism to circular holism achieved through collaboration/platformization, networking and configuration among a community of non-hierarchical heterogeneous actors who are independent yet interdependent and co-create value beyond what a single actor can generate, to achieve sustainable environmental quality, economic prosperity and social equity for customers and ecosystem actors".	(i); (iii)	Aryee, R. (2024). "Conceptualising the Circular Ecosystem: An Analysis of Multiple Definitions", *Business Strategy & Development*, 7, e70050, pp. 1–17.
"A circular ecosystem consists of a group of interdependent, autonomous actors that collectively generate a circular value proposition".	(i); (iii)	Gomes, L. A. V., de Faria, A. M., Braz, A. C., de Mello, A. M., Borini, F. M., & Ometto, A. R. (2023). "Circular ecosystem management: Orchestrating ecosystem value proposition and configuration", *International Journal of Production Economics*, 256, pp. 1–16.
"By circular ecosystem innovation, we refer to innovating in the ecosystem structure and its components (value proposition, roles, activities, and links) with the aim of materializing a circular value proposition. Indeed, only recently have scholars begun to document and understand this new dimension of innovation related to an ecosystem".	(iii); (iv)	Gomes, L. A. V., Castillo-Ospina, D. A., Facin, A. L. F., Ferreira, C. S., & Ometto, A. R. (2023). "Circular ecosystem innovation portfolio management", *Technovation*, 124, pp. 1–12.
"Circular ecosystem is a fast-growing phenomenon in which a set of autonomous but interdependent actors jointly create and deliver a coherent circular value proposition". "We define a circular ecosystem as: a system of interdependent and heterogeneous actors that go beyond industrial boundaries and direct the collective efforts towards a circular value proposition, providing opportunities for economic and environmental sustainability".	(i); (iii)	Trevisan, A. H., Castro, C. G., Gomes, L. A. V., & Mascarenhas, J. (2022). "Unlocking the circular ecosystem concept: Evolution, current research, and future directions", *Sustainable Production and Consumption*, 29, pp. 286–298.

(Table 3 continued on next page)

(Table 3 continued from previous page)

Definition of Circular Ecosystem	Core themes	Source
"Ecosystem as affiliation in the CE context means that all relevant stakeholders along the material flow chain (or loop) must be considered to make circularity a reality. Ecosystem as structure focuses on the activities needed per stakeholder and, hence, the interdependent coordination of activities like the collection of materials at the end of a product's lifecycle and their reintroduction into the circular flow".	(i); (ii)	Pietrulla, F. (2022). "Circular ecosystems: A review", *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 3, 100031.
"We define CE ecosystems as communities of hierarchically independent, yet interdependent heterogeneous set of actors who collectively generate a sustainable ecosystem outcome [...] defined as a system-level outcome typified by circular processes of recycling, reuse, and reduction". "A circular economy (CE) ecosystem is a multi-actor entity in which interdependent actors play complementary roles. Actors include for-profit companies, public services, governmental bodies such as ministries, municipalities and cities, universities, non-profit organizations, and citizen–consumers. A CE ecosystem emerges or is created around a common, system-level goal related to resource circularity, and may involve the creation of CE knowledge, CE businesses, and economic value. Agency varies from focal actor-driven ecosystems to being widely distributed, and the ecosystem structure varies from tightly coordinated CE business models to loosely coupled affiliation structures oriented around CE goals".	(i); (iii); (iv)	Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., & Thomas, L. D. W. (2021). "Circular economy ecosystems: A typology, definitions, and implications" in *Research Handbook of Sustainability Agency*. Edward Elgar Publishing, pp. 260–276.
"We define a circular economy (CE) innovation ecosystem as the evolving set(s) of actors, activities, and artefacts, and the institutions and relations that are important for the innovative performance within a circular economy".	(i); (iv)	Wurster, S., & Hiete, M. (2020). "Circular economy in construction – Current awareness, challenges and enablers", *Sustainability*, 12(19), 7900.
"Co-evolving, dynamic and potentially self-organizing configurations, in which actors integrate resources and co-create circular value flows in interaction with each other".	(i); (ii); (iii); (iv)	Aminoff, A., Valkokari, K., Antikainen, M., & Kettunen, O. (2017). "Exploring Disruptive Business Model Innovation for the Circular Economy" in *Sustainable Design and Manufacturing 2017: Selected Papers on Sustainable Design and Manufacturing*, vol. 4. Springer International Publishing, pp. 525–536.

(Table 3 continued on next page)

Thus, the interpretative hypothesis advanced in this paper is that a building can be defined as Circular Building (CB), only when the following two conditions coexist (Figure 2):

1. characterized by the technical aspects of circularity,
2. able to be an active node of a wider CEC (territorially concentrated or network-based).

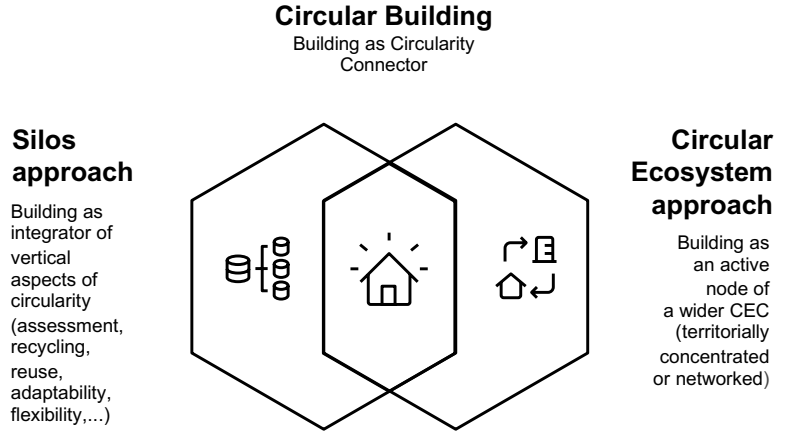


Figure 2. The Building as Circularity Connector. This diagram frames the building as a key integrator between two macro-approaches to Circularity: the circular ecosystems and the silos approach [Source: authors].

5. Five conditions for Circular Buildings (CBs)

The Circular Building, interpreted as a connector between the different compartments of circularity (silos approach) and Circular Ecosystem (CEC) vision, can play its role according to different configurations. Through the analysis of case studies, research projects and literature, the paper proposes five possible conditions for CBs (Table 4): Adaptive Reuse & Regeneration, Temporary Use & Transitional Occupancy, Coworking and Coliving, Participatory Retrofit, and Multifunctional Civic Hubs. Each condition embeds different combinations of circular mechanisms (technical solutions, governance arrangements, business model and social value generation).

Table 4. The five conditions for Circular Building as resume from case studies, European research projects and literature [Source: authors].

Condition	Circular Mechanisms	Case Studies	Research Projects	Literature
Adaptive Reuse & Regeneration	**Technical**: adaptive reuse, design for reversibility, selective deconstruction, product reuse, material recycling. **Governance**: multi-actor regeneration coalitions, long-term stewardship, public–private coordination. **Economic**: value retention, mixed-use revenue, circular procurement. **Social**: local jobs, heritage continuity, access to services, neighbourhood regeneration.	BlueCity (Rotterdam, NL) De Ceuvel (Amsterdam, NL) Kaapelitehdas (Helsinki, FI) Westergasfabriek (Amsterdam, NL) Friche la Belle de Mai (Marseille, FR) NDSM Wharf (Amsterdam, NL) Werkspoorkwartier (Utrecht, NL)	H2020 CLIC H2020 CIRCuIT H2020 BAMB H2020 RE4 H2020 Drive0	Angrisano, M., Bottero, M., Cavana, G., Fabbrocino, F., Gravagnuolo, A., Fusco Girard, L. (2025). "Adaptive reuse of cultural built heritage: towards the implementation of the circular city model", *Frontiers in Built Environment*, 11, pp. 1-20. Hamida, M. B., Greco, A., Remøy, H., Gruis, V., & van Laar, B. (2025). "Making Circular Strategies Work: Advancing an Adaptable Building Framework through Action Design Research", *Systemic Practice and Action Research*, 38, pp. 1–31. Moustafa, Z., Asif, M., & Wuni, I. Y. (2025). "Circular economy in the building sector: a systematic review of environmental, economic, and social dimensions", *Sustainable Futures*, Vol. 9, Article 100690, pp. 1-30. Zhang, Q., Md Ali, Z., Zainal Abidin, N. (2025). "Sustainable adaptive reuse of historic buildings: development of a framework from systematic review", *npj Heritage Science*, 13, pp. 1-14. Ranasinghe, U., Illankoon, C. (2024). "The adaptive reuse of buildings as a circular economy accelerator: A systematic review", in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Sydney, Australia, September 24-26, 2024. IEOM Society International, pp. 393-402. Lundgren, R. (2023). "Social life cycle assessment of adaptive reuse", *Buildings and Cities*, 4(1), pp. 334-351.

(Table 4 continued on next page)

(Table 4 continued from previous page)

Condition	Circular Mechanisms	Case Studies	Research Projects	Literature
Temporary Use & Transitional Occupancy	**Technical**: reversible fit-outs, modularity, reuse of components, design for disassembly. **Governance**: temporary leases, flexible agreements, shared risk management. **Economic**: phased investment, short-term activation, incubator logic. **Social**: access to space, experimentation, cultural production, community engagement.	T-Factor pilot sites (EU) MIND (Milan, IT) Zorrotzaurre (Bilbao, ES) Euston (London, UK) Innovation Industrial Park (Aleksotas, LT) Circular Pavilion (Paris, FR) The Green House (Utrecht, NL)	H2020 T-Factor Interreg ProCirc Circular Hub H2020 Pop-Machina H2020 HUB-IN H2020 CENTRINNO	Mazzarella, C., Greco, A., Remøy, H. T. (2025). "Beyond Experimentation: Temporary Use as a Social Circular Strategy", in Kyrö, R., Serrano, E. (eds.), *Proceedings of the Circular Building Sector Conference 2025 (CBSC2025)*, Curran Associates, pp. 134-145. Sdino, L., Torrieri, F., Dell'Ovo, M., Rossitti, M. (2025). "The economic impacts of con(temporary) urban regeneration processes: the case of Milan", *TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*, Special Series 3, pp. 88-97. Uršič, M., Cotič, T. (2025). "The Limited Role of Socio-Ecological Indicators in Temporary Use of Space—Deficits in Revitalization of Degraded Urban Areas", *Sustainability*, 17, pp. 1-24.
Coworking & Coliving	**Technical**: adaptable layouts, shared infrastructures, modular interiors, space-as-a-service. **Governance**: membership/community governance, cooperative models. **Economic**: subscription-based, mixed service revenue. **Social value**: social capital, affordability via sharing, skills exchange, wellbeing.	De Ceuvel (NL) BlueCity (NL) Hof van Cartesius (Utrecht, NL) E-Co-Housing (Budapest, HU) Schoonschip (Amsterdam, NL)	H2020 Pop-Machina H2020 CIRCuIT Interreg ProCirc H2020 T-Factor H2020 iBRoad2EPC	Amani Janati, S., Hosseini, S. Z., Ariafard, P., Zarabadipour, Z., & Zarabadi, Z. S. S. (2026). "Co-Working Spaces as Third Place: Initiatives for Sharing Economy Development", *SAGE Open*, January–March 2026, pp. 1–17. Kamenova, I. G. (2026). "Coworking and Flexible Workspaces as Drivers for Sustainable Spatial Development in Non-Metropolitan Bulgaria", *Buildings*, 16, 381, pp. 1–48. Mariotti, I., & Micek, G. (2024). "Theoretical Framework of the Location of Coworking Spaces", in Mariotti, I., Tomaz, E., Micek, G., & Méndez-Ortega, C. (eds), *Evolution of New Working Spaces: Changing Nature and Geographies*, PoliMI SpringerBriefs, Springer, pp. 73–82. Fiorentino, S. (2024). "Are shared workspaces a new form of social infrastructure?", *Planning Practice & Research*, 39(5), pp. 892–905.

(Table 4 continued on next page)

(Table 4 continued from previous page)

Condition	Circular Mechanisms	Case Studies	Research Projects	Literature
Participatory Retrofit	**Technical**: staged renovation, circular refurbishment, reuse of products/components. **Governance**: co-design, resident participation, shared decision-making. **Economic**: cooperative finance, shared savings, public subsidies. **Social**: energy poverty reduction, health, empowerment, equitable benefit distribution.	Sutton Estate (London, UK) Reigersbos (Amsterdam, NL) Sharing Cities retrofitting programme (Milan, IT) Energiesprong UK Comfort Plan™ (UK) Carbon Co-op People Powered Retrofit (Manchester, UK)	H2020 Drive0 H2020 RE4 H2020 CIRCuIT H2020 iBRoad2EPC H2020 BAMB	Ahmed, K. G., Hamza, N., Kordi, A. O., & Shareef, O. S. M. (2025). "Retrofit with residents: Proposed locally responsive participatory method for technical thermal retrofitting of public housing in the United Arab Emirates", *Smart and Sustainable Built Environment*, 14(4), pp. 1038–1072. Furman, S., Hadjri, K., Martínez Duran, A., & Martín Tost, X. (2025). "Residents' Values: Co-Designing Social Housing Retrofit", *Architecture*, 5, 58, pp. 1–22. Touchie, M. F. (2025). "Resident-centric retrofits for social housing: A multi-solving approach", *Indoor Environments*, 2, 100131, pp. 1–9.
Multi-functional Civic Hubs	**Technical**: adaptable multi-use spaces, demountable systems, shared infrastructures, reuse of products. **Governance**: multi-stakeholder co-management, civic partnerships. **Economic**: blended finance, anchor tenant + public use. **Social**: inclusion, participation, education, community resilience, shared services, shared knowledge.	People's Pavilion (Eindhoven, NL) BlueCity (NL) De Ceuvel (NL) ProCirc Circular Hub (BE) RotorDC (Brussels, BE) Buurman (Utrecht / Amsterdam / Rotterdam, NL) ReTuna Återbruksgalleria (Eskilstuna, SE) The Remakery (London, UK) Fixoteket / Alelyckan Reuse & Repair initiatives (Gothenburg, SE)	H2020 Pop-Machina Interreg ProCirc H2020 CIRCuIT H2020 T-Factor H2020 CLIC	Mussinelli, E., Tartaglia, A., Castaldo, G. (2023). "Environmental Design for a Sustainable District and Civic Hub" in Arbizzani, E., Cangelli, E., Clemente, C., Cumo, F., Giofrè, F., Giovenale, A. M., Palme, M., Paris, S. (eds.), *Technological Imagination in the Green and Digital Transition*, The Urban Book Series, Springer Nature Switzerland AG, Cham, pp. 577–588. Sforzi, J., De Benedictis, C., Scarafoni, S. (2024). *I Community Hub: Spazi multifunzionali tra rigenerazione urbana e rigenerazione sociale*. Euricse Research Report n. 37|24, Euricse, Trento, pp. 1–53. Fusco Girard, L. (2021). "The evolutionary circular and human centered city: Towards an ecological and humanistic 're-generation' of the current city governance", *Human Systems Management*, 40, pp. 753–775.

The selected case studies in Table 4 deal with buildings (or groups of them) that can be considered circular, not only for the implementation of technical strategies (adaptive reuse, design for reversibility, selective deconstruction, product reuse, material recycling), but also because they are involved in wider ecosystem dynamics, connecting people in different aspects (community-based partnerships, shared services, cooperative governance, community resilience, crowd-funding, inclusion, jobs generation). Some samples can highlight the different kinds of connections.

For instance, within Adaptive Reuse & Regeneration initiatives, preservation of the existing asset is just the enabler to circularity, but the CEC is represented by the way the reused building is operated and managed by the community:

- BlueCity (BlueCity, 2024) (former swimming pool) and Werkspoorkwartier (EC, 2024) (former industrial district) share the same approach. These two projects, at different scales, represent a bottom-up approach, where a multi-tenant organization manages an ecosystem with shared facilities and mission-oriented coordination of circular entrepreneurship and knowledge exchange.
- NDSM Wharf (HUB-IN Atlas, 2024a) represents a top-down approach led by public governance over time: adaptive reuse becomes more structurally circular when temporary occupation evolves into institutional governance that keeps spaces accessible and productive.
- In larger district regeneration cases like Westergasfabriek (EHA, 2024) and Friche la Belle de Mai (HUB-IN Atlas, 2024b), circularity is represented by the reuse of industrial assets that are operated through hybrid governance (public/private) that finances long-term maintenance, and public programming, and boosts initiative of urban improvement.
- The circular effect in Kaapelitehdas (Kaapelitehdas, 2024) is generated by a continuous collective reuse of the assets through a long-term management model (public real estate company), which operates the site under a cultural mission rather than speculative real-estate logic.

In Temporary Use & Transitional Occupancy initiatives, circularity strategies rely on technical reversibility of buildings (reversible fit-outs, modularity,

design-for-disassembly), but to be actually effective they also need robust governance mechanisms (contracts, management, coordination, shared rules) and economic models (phased investment, service-based revenues, take-back/logistics). This allows to embed temporary spaces within a wider ecosystem capable of circulating materials, knowledge, and value across phases:

- T-Factor pilot sites (T-Factor, 2024) *(EU regeneration areas),* including MIND Milano *(post-Expo innovation district)*, Zorrotzaurre *(industrial peninsula)*, Euston *(railway-area redevelopment)*, and Aleksotas Innovation Industry Park *(Kaunas industrial site activated through interim innovation uses)* demonstrate that temporary occupation becomes productive only when supported by negotiated permits, coordination platforms, and multi-actor governance capable of aligning short-term uses with long-term planning.
- The Circular Pavilion (ArchDaily, 2024a) *(demountable public structure built from reusable elements)* and the Green House (ArchDaily, 2024b) *(temporary circular pavilion designed for relocation)* demonstrate that design-for-disassembly produces circular value only when coupled with contractual take-back schemes, service-based revenue models, and logistics arrangements that determine where components go next.

The selected cases for Coworking & Coliving demonstrate that, even if the starting point is not the reuse of existing assets, both coworking and coliving new buildings generate a CEC when not only the spatial infrastructures are shared, but also the governance is shared among a defined community, thus promoting knowledge and value creation within it:

- In De Ceuvel (Urban Matters, 2024) (Figure 3), and Hof van Cartesius (Hof van Cartesius, 2024) (Figure 4), circularity is embedded in shared work environments that align space-as-a-service with circular entrepreneurship ecosystems.
- In E-Co-Housing (UIA, 2024) and Schoonschip (Schoonschip, 2024), (Figure 5) collective housing models integrate shared energy systems, participatory and long-term governance, demonstrating that circularity in living environments depends not only on technical efficiency, but also on resource sharing and social coordination.



Figure 3. Houseboat reused as workspace in De Ceuvel (Amsterdam), a circular regeneration project on a former polluted shipyard, combining resource reuse, shared infrastructure and community- based governance [Source: authors].



Figure 4. Corner view of the gateway building of Hof van Cartesius (Utrecht), circular hub developed through cooperative governance, where modular buildings built with reclaimed materials host circular entrepreneurs and shared workspaces [Source: authors].



Figure 5. Floating house in Schoonschip (Amsterdam) organised as a community-led circular ecosystem, integrating shared infrastructure for energy and water management together with participatory governance. [Source: authors].

6. Discussion and findings: the building as *trait d'union*

The structured categorization of Circular Buildings (CBs) conditions stress the theoretical and practical complexity of the circular transition in the CS. The five conditions show that CBs can act as nodes within dynamic networks for circular integration by concentrating multiple circular mechanisms (social, technical, economic, governance) within a delimited space. In this sense, CBs become testing grounds for developing Circular Ecosystems (CECs), combining new governance arrangements, hybrid business models, and collaborative resource loops. Within the CBs categorization, the building scale is strategic for aligning micro-level technical innovation with macro-level transformation, merging:

- material and technical dimensions of circularity (material recycling, product reuse, flexible layouts, modularity, reversible connections, use of local material) with
- intangible and relational dimensions (shared use of infrastructure, community participation, local repair networks, shared knowledge, collective funding, identity formation, inclusivity, social capital generation).

In particular, the proposed categorization - based on the analysis of scholarly literature, on-going European research projects and case studies - stresses a plurality of social pathways: Adaptive Reuse & Regeneration tends to emphasize heritage continuity and neighbourhood regeneration; Participatory Retrofit foregrounds empowerment of local communities and social equity; Coworking & Coliving enhances social capital and sharing assets; Multifunctional Civic Hubs consolidate inclusion and shared knowledge; Temporary Use activates experimentation and cultural production.

The analysis of the conditions also points out a critical risk: the normalization of circularity as a programmatic label rather than a systemic transformation. What differentiates a CB from a technically optimized one is its capacity to reconfigure relationships not only between actors, but more generally between resources and decision-making processes over time. These relationships are embedded in local governance, participatory mechanisms in decision-making, and community-based business models, creating a CEC.

Lastly, the awareness about the tangible and technical dimensions of circularity is quite consolidated thanks to the support of standards and criteria. By contrast, social and governance aspects are highly context-dependent (who participates, how decisions are made, and how responsibilities are allocated over time) and more difficult to be standardized in the same way; therefore they still need deeper forms of investigations and analysis. Observing the case studies, the paper has identified promising approaches to address the context-dependent social and governance dimensions of circularity:

- active public sector engagement through public co-investment, community crowd-funding, long-term leases, subsidised access, and procurement clauses that legitimise reuse;
- shared governance structure within the community, that allocates decision-making across multiple stakeholders across time, through clear mandates and roles mapping at the institutional level (who owns, maintains, insures, decides, funds, bears risk, solves conflicts) and at the operational one (space management, maintenance, repair activities, workshops);

- participation quality assessment that goes beyond attendance to better determine whether and how responsibilities and risks may be shared;
- sustainable business models (hybrid revenue streams combining memberships/fees, service-based income with public funds) and shared-value mindset (generate and redistribute benefits across stakeholders);
- periodical evaluation (from conception to post occupancy) of governance arrangements, business models, and infrastructure management to compare intended social outcomes of the project with actual results (diversity of users, accessibility and sharing of assets, conflict management, knowledge sharing, cost management, degree of interface with external users).

Bibliographic references

ArchDaily (2024a). The Circular Pavilion / Encore Heureux Architects. Available at: https://www.archdaily.com/778972/the-circular-pavilion-encore-heureux-architects (accessed on: 22.11.2025).

ArchDaily (2024b). The Green House / cepezed. Available at: https://www.archdaily.com/915728/the-green-house-architectenbureau-cepezed (accessed on: 21.11.2025).

BlueCity (2024). BlueCity Rotterdam. Available at: www.bluecity.nl (accessed on: 26.02.2026).

Bostancı, H. B., Tanyer, A. M., & Habert, G. (2024). A multi-stakeholder engagement framework for material-building-city synergy through circular transformation. *Sustainable Cities and Society, 116*, 105892. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105892

D'Amato, D., Korhonen, J. (2021). Integrating the green economy, circular economy and bioeconomy in a strategic sustainability framework. Ecological Economics, 188, 107143. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107143

Dewagoda, K.G.; Ng, S.T.; Kumaraswamy, M.M.; Chen, J. (2024). Design for Circular Manufacturing and Assembly (DfCMA): Synergising Circularity and Modularity in the Building Construction Industry. *Sustainability*, 16, 9192. https://doi.org/10.3390/su16219192

EC - European Commission (2018). Circular economy in the furniture industry. Available at: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/circular-economy-in-the-furniture-industry.pdf (accessed on: 26.02.2026).

EC - European Commission (2024). From industrial past to circular future: the Werkspoorkwartier in Utrecht. Available at: https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/Netherlands/from-industrial-past-to-circular-future-the-werkspoorkwartier-in-utrecht-netherlands (accessed on: 02.10.2025).

EEA - European Environment Agency (2024). Greenhouse gas emissions from energy use in buildings. Available at: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy (accessed on: 15.02.2026).

Eurostat (2024). Waste statistics: total waste generated and contribution by economic activity (2022). Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics (accessed on: 25.02.2026).

EHA - European Heritage Awards (2024). The Gas Works Westergasfabriek Amsterdam. Available at: https://europeanheritageawards-archive.eu/laureates-1978-2022/detail/the-gas-works-westergasfabriek-amsterdam (accessed on: 16.11.2025).

Finamore, M., & Oltean-Dumbrava, C. (2025). Emerging trends in the circular economy: Multidimensional perspective in the building sector. *Circular Economy and Sustainability,* 5, pp. 3017–3052. https://doi.org/10.1007/s43615-024-00485-0

Gasparri, E., Arasteh, S., Kuru, A., Stracchi, P., Brambilla, A. (2023). Circular economy in construction: A systematic review of knowledge gaps towards a novel research framework. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1239757. https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1239757

Hof van Cartesius (2024). Hof van Cartesius. Available at: https://www.hofvancartesius.nl (accessed on: 10.09.2025).

HUB-IN Atlas (2024a). NDSM Werf. Available at: https://atlas.hubin-project.eu/case/ndsm-werf (accessed on: 26.11.2025).

HUB-IN Atlas (2024b). Friche la Belle de Mai. Available at: https://atlas.hubin-project.eu/case/friche-la-belle-de-mai (accessed on: 26.11.2025).

Kaapelitehdas (2024). About Kaapeli. Available at: https://www.kaapelitehdas.fi/en/about-kaapeli (accessed on: 02.10.2025).

Kaya, F.E. (2025). A Stakeholder-Centric Approach to Advancing the Circular Economy in the Building Sector. *Architecture*, 5, 6, pp. 1-29. https://doi.org/10.3390/architecture5010006

Pansera, M., Genovese, A., Ripa, M. (2021). Politicising Circular Economy: what can we learn from Responsible Innovation? *Journal of Responsible Innovation*, 8(3), pp. 471–477. https://doi.org/10.1080/23299460.2021.1923315

Pomponi, F., Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 710-718. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055

Revellini, R. (2023). Social Sustainability and Inclusive Environments in Neighbourhood Sustainability Assessment Tools in Arbizzani, E., Cangelli, E., Clemente, C., Cumo, F., Giofrè, F., Giovenale, A.M., Palme, M., Paris, S. (eds), *Technological Imagination in the Green and Digital Transition*, The Urban Book Series. Cham: Springer. pp. 947–958.

Schoonschip (2024). Schoonschip Amsterdam. Available at: https://schoonschipamsterdam.org/en (accessed on: 26.02.2026).

Sun, Y., Rameezdeen, R., Chow, C.W.K., Gao, J. (2025). Information Sharing Barriers of Construction Projects Toward Circular Economy: Review and Framework Development. *Buildings*, 15, 2744. https://doi.org/10.3390/buildings15152744

T-Factor (2024). Pilot sites. Available at: https://www.t-factor.eu/pilots (accessed on: 26.01.2026).

UIA - Urban Innovative Actions (2024). E-Co-Housing: Co-creating a regenerative housing project together with the community. Available at: https://portico.urban-initiative.eu/uia/e-co-housing-co-creating-regenerative-housing-project-together-community (accessed on: 02.09.2026).

Urban Matters (2024). De Ceuvel. Available at: https://urban-matters.org/projects/de-ceuvel (accessed on: 26.02.2026).

Diseño Circular en Acción: a design–build lab for circular living wall systems

Carlotta Fasano*

Dottoranda, Politecnico di Torino Dipartimento di Architettura e Design, Italy. *carlotta.fasano@polito.it*

Pablo Luis Palmero-Sánchez

Lecturer, Universitat Politècnica de València, Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Spain. *pabpalsn@upv.edu.es*

Abstract: the paper presents *Diseño Circular en Acción*, a design–build workshop developed at the Universitat Politècnica de València (UPV) to test circular approaches in living wall systems development. Moving from previous theoretical research on the bioclimatic renovation of Building 1C at UPV, the project aims to translate a green façade design hypothesis into a prototype built with local recycled materials. The workshop is conceived as a methodological device that integrates circular design, nature-based solutions and experiential learning, engaging students in the co-design and self-construction of a disassemblable and adaptable full-scale module. A local material bank, built up from selective demolition processes and recent flood-related recovery, provided the basis for rethinking the design process by allowing materials to define the prototype configuration rather than the other way around. The resulting module operates simultaneously as a technical and pedagogical device functioning as a research-in-action model for replicable circular strategies in climate-vulnerable contexts and highlighting the role of universities in advancing local ecological transition through research-informed teaching practices.

Keywords: nature-based solutions (NBS), living wall systems (LWS), circular economy, co-design, self-construction.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Corresponding author

1. Ecological intelligence and green facades: from strategy to experimentation

We are currently facing an ecological crisis affecting climate, resources and production models. In this scenario, the construction sector, which accounts for around 40% of European energy consumption (European Commission, 2020a), can no longer limit its efforts to improving building performance, it must reconsider its approach to the built environment, interpreting the existing building stock as a reserve of resources and material capital to be transformed. This transition requires a redefinition of design processes oriented toward life extension, disassembly and upgrading of existing buildings (Leising et al., 2018), in line with circular approaches promoting adaptation, reuse and resource regeneration (Kirchherr et al., 2017).

At the European level, these principles are reflected in climate neutrality policies and renovation strategies (European Commission, 2019; European Parliament & Council of the European Union, 2024), as well as life-cycle approaches and secondary raw materials valorization (European Commission, 2020b).

Within this framework, the integration of nature into architecture plays a strategic role. Nature-based solutions (NBS) and, particularly, living wall systems (LWS), act as climate adaptation measures by reducing solar radiation and mitigating surface temperatures (Vox et al., 2018), while also contributing to urban regeneration (European Commission, 2015). The envelope thus evolves from a purely technical barrier into a dynamic device supporting urban biodiversity and enhancing spatial quality.

However, such systems remain constrained by cost, technical complexity and reliance on industrial components. If ecological intelligence implies transforming existing conditions into resources, accessible and reversible strategies based on local recycled materials must be explored.

In this perspective, the present contribution builds upon the renovation pathway initiated for Building 1C at the Universitat Politècnica de València (UPV) (Bernardo et al., 2025), translating a LWS design hypothesis into a full-scale experimental module constructed from locally sourced recycled materials to test circular, adaptive and regenerative practices in the built environment transformation.

2. The workshop as a methodological device

The workshop *Diseño Circular en Acción* emerged from research and teaching activities developed at the Escola Tècnica Superior d'Enginyeria d'Edificació (ETSIE) of the UPV. Previous student research supervised by Prof. L. Palmero and Prof. G. Bernardo, assessed the environmental performance of Building 1C and the potential of LWS as a bioclimatic renovation strategy (Capucci et al., 2013; López Vallés, 2018).

The transition from the design proposal to construction reflects a deliberate methodological choice. Literature shows that hands-on activities enhance technical skills, critical thinking and material awareness (Mackintosh, 2014), while full-scale design–build educational experiences enable direct engagement with material constraints, structural limits of recovered components and the need to adapt design decisions to real construction conditions (Montacchini et al., 2024).

In this case, the workshop goes beyond constructing a 1:1 module of a predefined LWS. It reassesses the system according to the availability of locally recovered materials. The design process is therefore reversed: instead of adapting materials to a technological system, it is the material properties, such as dimensions, form and embedded history, that shape the final configuration.

2.1. Local recycled materials valorization

The module design begins with defining a local material bank, understood as a curated inventory of resources available within the area. The concept, explored in the literature as a strategy to facilitate reuse and the reintroduction of building components into production cycles (Cai & Waldmann, 2019), is here applied as a physical storage of materials derived from selective demolition processes.

The materials intended for the workshop come from Derribos Andrés, a Valencian demolition company that recovers and stores architectural components and reusable objects prior to final demolition. The main categories identified in the warehouse include wooden elements (shelves, doors, boxes), metal components (nets, gates, frames), lightweight containers, ceramic and other heterogeneous waste objects (Figures 1a & 1b).



Figure 1a. Doors and wooden components [Source: authors].



Figure 1b. Gates and metal items [Source: authors].

While some of these materials are restored and resold as antiques, the workshop focuses on marginal and commercially unattractive items, such as disused bedsprings (Figure 2), old gates and damaged boxes, that nonetheless retain structural potential and can be reinterpreted as supporting frames or planting containers for a vegetated wall system.

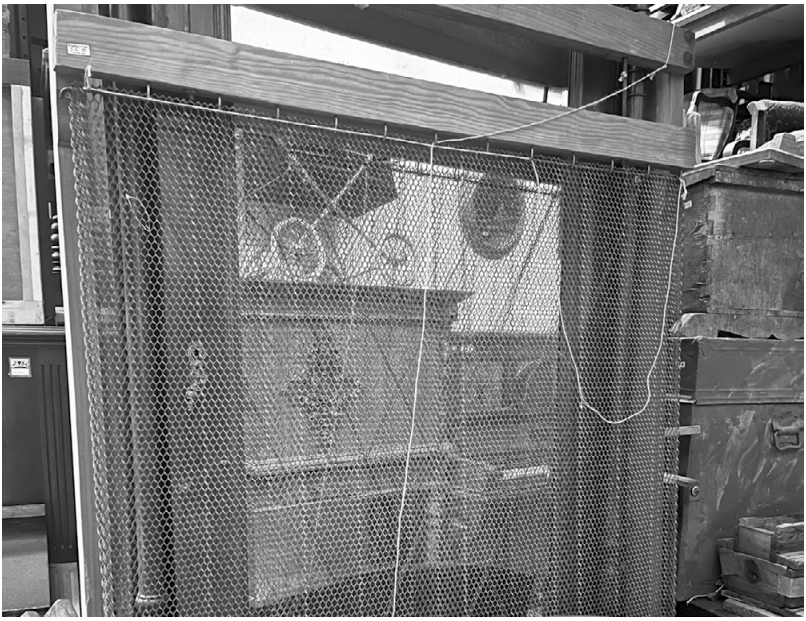


Figure 2. Old bedspring [Source: authors].

Following the October 2024 DANA flooding,[1] the warehouse accumulated additional materials from damaged buildings. The material bank thus becomes not only a stock of secondary resources but also a material archive of extreme climatic events, linking design experimentation to territorial adaptation.

[1] A DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) is an upper-level cut-off low that remains semi-stationary and convey moist, unstable air masses toward the Iberian Peninsula, generating extreme rainfall events. Similar events are currently up to 15% more intense and associated with temperatures up to +3 °C higher than in the past, with the intensification primarily attributed to anthropogenic climate change (Faranda et al., 2024).

From an organizational perspective, the scale of the warehouse makes spontaneous materials selection by students impractical. Therefore, a preliminary technical survey led to the development of an operational catalogue including typologically coherent components for the workshop. This ensures safety, dimensional compatibility and structural suitability while preserving experimental freedom.

2.2. Experiential design-build implementation

Active student involvement represents a central component of the workshop. For this reason, the course was structured as a voluntary activity limited to twelve participants, ensuring manageable coordination and safe on-site operations (Figure 3).



Figure 3. Workshop flyer [Source: authors].

The workshop was promoted through the UPV Centro de Formación Permanente (CFP).[2] Structuring the activity as a non-curricular course allows the involvement of truly motivated students, promoting a learning environment based on active participation and empowerment.

Organized in collaboration with ETSIE and the ETSA (Escola Tècnica Superior d'Arquitectura) model lab, the workshop takes place over two consecutive days following an experiential learning methodology. A theoretical session introduces LWS and circular economy principles and presents the

[2] The CFP is the unit responsible for managing the UPV's non-regulated training offer open to the public (Universitat Politècnica de València, n.d.).

case study of Building 1C and the selected materials, while a second practical phase involves students in the co-design and guided self-construction of a disassemblable, adaptable and reusable prototype. The operational dimension enables participants developing technical skills and critical awareness in transforming waste into resource, within a process where error, on-site verification and design adjustment become part of the learning experience.

3. An ecological and social micro-infrastructure

The experimental module acts as a demonstrative micro-infrastructure allowing the building envelope to be interpreted as a multi-layered ecological system. Its innovative value lies not only in environmental performance, but in the way the system is conceived and implemented. The prototype operates as a form of research-in-action, testing in real conditions the integration of LWS with circular design principles through recycled materials and reversible construction solutions.

At the same time, the workshop activates a social dimension that extends beyond the constructed object. Collective construction, understood as a process of knowledge co-production, transforms the campus into a space of experimentation and strengthens the educational role of the project. Design–build literature recognizes such practices as pedagogical tools capable of raising critical awareness and civic responsibility about environmental (Salama & Patil, 2025) and social impacts.

Integrating environmental performance of LWS, circular design and full-scale educational experimentation the prototype becomes a replicable model, suggesting a transformative architectural practice in which the envelope operates as ecological infrastructure and the construction process itself becomes a research tool.

4. Towards replicable circular LWS models

The experience shows that integrating circular design, self-construction and NBS can generate alternative approaches to existing buildings based on material reuse, construction reversibility and design adaptability. Moving from design to full-scale construction allows testing potentials and

constraints under real conditions, turning the prototype into a technical, economic and environmental assessment tool.

In a climate-vulnerable context, ecological intelligence emerges as the ability to reinterpret available resources and integrate nature and structural reuse within a unified design process.

The module becomes a demonstrator of a different operational logic, in which material constraints become generative opportunities. From this perspective, the prototype represents a starting point for replicable experimentation, suggesting a more active role for architecture, and universities, in supporting local ecological transition.

Bibliographic references

Bernardo, G., De Gregorio, S., & Palmero, L. (2025). Estrategias ambientales en fachadas. Propuesta de intervención en edificio 1C de la Universitat Politècnica de València Environmental strategies on façades. Intervention proposal in building 1C of Universitat Politècnica de València. In *Atti del VI Convegno Internazionale RE-CYCLING* (pp. 408-417). (a cura di) Adolfo FL Baratta, Laura Calcagnini, Antonio Magarò. https://hdl.handle.net/11563/200737.

Cai, G., & Waldmann, D. (2019). A material and component bank to facilitate material recycling and component reuse for a sustainable construction: concept and preliminary study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *21*(10), 2015-2032. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01758-1.

Capucci, A., Morante Ruiz, S., Mandrilli, MU. (2013). *Estudio y análisis con criterios bioclimáticos y sostenibles sobre el edificio nuevo (1C) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, ETSIE (UPV)*, ETSIE, Valencia.

European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on ‹Nature-based solutions and re-naturing cities›: (full version).* Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2777/765301.

European Commission. (2019). *The European Green Deal*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN.

European Commission. (2020a). *A renovation wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0662.

European Commission: Directorate-General for Environment. (2020b). *2020 Circular Economy Action Plan: international aspects*. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2779/085517.

European Parliament & Council of the European Union. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (recast)*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng.

Faranda, D., Alvarez-Castro, M. C., Ginesta, M., Coppola, E., & Pons, F. M. E. (2024). Heavy precipitations in October 2024 South-Eastern Spain DANA mostly strengthened by human-driven climate change. *ClimaMeter, Institut Pierre Simon Laplace, CNRS*, *10*. https://doi.org/10.5281/zenodo.14052041.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, *127*, pp. 221-232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Leising, E., Quist, J., & Bocken, N. (2018). Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool. *Journal of Cleaner production*, *176*, pp. 976-989. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.010.

López Vallés, Á. (2018). *Estudio y análisis de parámetros bioclimáticos: caso práctico: las fachadas del edificio C1 de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la UPV*. ETSIE, Valencia.

Mackintosh, L. (2014). Just doing it: The role of experiential learning and integrated curricula in architectural education. *The International Journal of Pedagogy and Curriculum*, *20*(3), 67. https://doi.org/10.18848/2327-7963/CGP/v20i03/48969

Montacchini, E., Tedesco, S., Di Prima, N. (2024). CiaBOT: the circular design of an experimental microarchitecture between material and immaterial values. *VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability. 9*(1):44-55. https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2024.21492.

Salama, A. M., & Patil, M. P. (2025). The socius in architectural pedagogy: Transformative design studio teaching models. *Architecture*, *5*(3), 61. https://doi.org/10.3390/architecture5030061.

Universitat Politècnica de València. [n.d.]. *Centro de Formación Permanente*. Available from: https://www.upv.es/entidades/CFP/info/488292normalc.html (accessed on 25.02.2026).

Vox, G., Blanco, I., & Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, *129*, 154-166. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002.

Campus mining: progettare e prototipare con gli scarti del Politecnico di Torino

Campus mining: designing and prototyping with waste materials from the Politecnico di Torino

Nicolò Di Prima

Assegnista di ricerca e docente a contratto, Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Italy. *nicolo.diprima@polito.it*

Angela Lacirignola

Funzionaria tecnica e docente a contratto, Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Italy. *angela.lacirignola@polito.it*

Elena Montacchini*

Professoressa associata, Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Italy. *elena.montacchini@polito.it*

Silvia Tedesco

Professoressa associata, Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Italy. *silvia.tedesco@polito.it*

Abstract: the construction sector is among the primary contributors to resource consumption and waste generation. Within this context, the built environment can be reinterpreted as a reservoir of reusable materials. This paper investigates the potential of urban mining at the local scale through an experimental and prototyping initiative conducted at the Politecnico di Torino. By conceptualising the campus as a "material mine", a series of educational design activities were developed based on reuse, repurposing, upcycling, and self-construction, employing waste materials sourced from construction sites and university storage facilities.

The contribution specifically presents the case study "Pimp Up Your PoliTO Bike Racks", an eight-hour *design sprint* in which Architecture and Design students redesigned decommissioned bicycle racks by integrating discarded materials such as PVC banners, pallets, obsolete blackboards, and waste bins. The process, guided by direct observation and hands-on material manipulation, fostered a material-driven design approach in which dimensional constraints, physical properties, and resource availability informed formal and functional solutions. The resulting

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Autore corrispondente

prototypes expanded the original functions of the bicycle racks by incorporating seating elements, planters, notice boards, and support surfaces.

The findings highlight how situated reuse practices can reduce waste generation and the consumption of virgin resources, generate economic benefits through the use of locally available materials, and produce social and cultural impacts by strengthening environmental awareness and fostering a sense of community. The experience further demonstrates the educational value of self-construction and adaptive design within a pedagogical framework in which the university becomes a laboratory for circular innovation applied to the built environment.

Keywords: circular design, reuse, repurpose, urban mining, self-construction.

1. Introduzione: l'ambiente costruito come miniera di materiali da reinterpretare

Il settore delle costruzioni è uno dei principali responsabili del consumo di risorse naturali e della produzione di rifiuti a livello globale. In questo contesto, l'ambiente costruito può essere considerato come una risorsa strategica di materiali, potenzialmente riutilizzabili o riciclabili lungo cicli estesi di vita. A livello europeo, questa visione è sostenuta da un insieme articolato di strategie e indirizzi politici, tra cui il Green Deal europeo (COM 640, 2019) e il New Circular Economy Action Plan (COM 98, 2020), che promuovono pratiche quali la progettazione per la disassemblabilità, la gestione sostenibile dei rifiuti da costruzione e demolizione, la tracciabilità dei materiali, attraverso strumenti quali i Digital Product Passports (Da Cruz & Cruz, 2025) e l'adozione di modelli circolari lungo l'intero ciclo di vita degli edifici. In questo quadro si afferma il concetto di *urban mining*, che descrive la città come una "miniera urbana" di materiali incorporati nel costruito, dalla quale recuperare materiali tecnicamente ed economicamente riutilizzabili per ridurre l'impatto ambientale associato ai cicli produttivi (Ghisellini et al., 2022; Hasibuan et al., 2025).

Tuttavia, studi recenti evidenziano come il potenziale effettivo dell'*urban mining* dipenda in larga misura da pratiche operative radicate nel contesto locale. In questa prospettiva, l'*urban mining* viene declinato su scala micro, configurandosi come un processo di estrazione situato, orientato

principalmente al reimpiego locale e alla conservazione della qualità dei materiali, e capace di abilitare pratiche circolari a livello territoriale (Arora et al., 2021). La declinazione alla scala locale amplia il campo delle risorse potenzialmente valorizzabili: non solo i materiali incorporati negli edifici, ma anche quelli stoccati in spazi ausiliari quali magazzini, depositi e cantine.

Con riferimento a tale scala, l'articolo presenta i risultati di attività di sperimentazione e prototipazione condotte in un contesto reale presso il Politecnico di Torino. Attraverso l'applicazione sul campo di pratiche di riuso, *repurpose*, *upcycling* e disassemblaggio di materiali e prodotti a fine vita, reperiti nei magazzini e nei cantieri del campus universitario, si intende proporre un approccio progettuale non convenzionale, in cui sono gli scarti stessi a orientare il progetto, ispirandone forme e funzioni.

2. *Campus mining* al Politecnico di Torino: contesto di ricerca e impostazione metodologica

Il Politecnico di Torino ha avviato ormai da anni un percorso di integrazione dei principi di sostenibilità nelle sue attività: didattica, ricerca, terza missione e gestione dei campus. Tali principi, presenti nel Piano Strategico di Ateneo, sono approfonditi dal Green Team di Ateneo, un hub di competenze e sensibilità sui temi dello sviluppo sostenibile, impegnato a favorirne l'integrazione nelle azioni di Ateneo, con particolare attenzione allo sviluppo di un campus sostenibile. In particolare, il Servizio Sostenibilità di Ateneo coordina le diverse azioni per la progettualità e la loro operatività, anche nella direzione di promuovere un approccio circolare all'uso delle risorse (Lombardi et al., 2023).

In collaborazione con il Servizio Sostenibilità, in questi anni abbiamo sviluppato una serie di attività progettuali nell'ambito dell'insegnamento Progettare e Sviluppare l'Economia Circolare, un percorso interdisciplinare che coinvolge studenti dei corsi di laurea magistrale in Architettura e in Design, con l'obiettivo di formare nuove figure professionali con competenze trasversali in grado di prefigurare soluzioni circolari per diversi settori dell'edilizia e del design (Montacchini et al., 2024). Le attività che svolgiamo all'interno dell'insegnamento sono finalizzate a integrare la teoria con la pratica, esplorando limiti e potenzialità dell'economia circolare,

tema dibattuto a livello internazionale, con l'obiettivo di definire soluzioni progettuali in contesti reali, assumendo i materiali di scarto come punto di partenza e fonte di ispirazione per lo sviluppo dei progetti. Oltre al valore propriamente ambientale legato al risparmio delle risorse, il tema del riuso consente a noi e a studenti e studentesse di sperimentare che cosa significa progettare con materiali di scarto, imparando a preservarne il valore, rivalorizzandoli in termini funzionali e simbolici e mantenendo la memoria della loro provenienza (Condotta e Zatta, 2020; Baratta, 2021).

Nell'ambito dell'attività presentata in questo articolo, abbiamo lavorato immaginando il campus come miniera di materiali e abbiamo applicato un approccio al riuso che, da una parte, consenta la valorizzazione di materie prime seconde e, dall'altra, lo svolgimento di attività di sensibilizzazione della comunità studentesca. L'attività è stata sviluppata adottando un approccio metodologico integrato che combina una progettazione *material-driven* con una metodologia di *design sprint*.

L'approccio *material-driven* ribalta le logiche tradizionali del progetto: non è più il progettista a selezionare materiali funzionali a un'idea predefinita, ma sono i materiali stessi, con le loro caratteristiche fisiche, dimensionali e simboliche, a orientare lo sviluppo del concept. Il progetto prende forma attraverso un dialogo continuo tra intenzione progettuale e vincoli materiali, in cui la materia non è un semplice supporto ma un agente attivo del processo.

Il *design sprint*, adattato in forma 'circolare', consente di strutturare questo processo in tempi compressi, integrando fasi di esplorazione, definizione del concept e prototipazione. Tale approccio permette di rendere esplicite le dinamiche iterative del progetto, favorendo un apprendimento basato sull'azione e sulla verifica immediata delle ipotesi.

3. *Pimp up your PoliTO bike racks*: un caso studio

Pimp up your PoliTO bike racks è il titolo di un'esperienza di riprogettazione e prototipazione con materiali di scarto appartenenti direttamente al nostro campus.

Quaranta studenti delle lauree magistrali in Architettura e in Design del Politecnico di Torino, in solo otto ore di tempo, sono stati chiamati a progettare e costruire nuovi prototipi di arredi urbani valorizzando

materiali provenienti da cantieri interni all'ateneo o utilizzando prodotti obsoleti come portabici, banner pubblicitari e cestini dei rifiuti destinati alla dismissione.

In particolare, il brief di progetto richiedeva di riprogettare alcuni portabici in acciaio al fine di migliorarne la fruizione e di renderli elementi d'arredo multifunzionali da posizionare nei cortili dell'Ateneo (Fig.1).



Figura 1. I portabici da riprogettare per migliorarne la fruizione [Fonte: elaborazione degli autori].

3.1. Materiali di scarto e criteri di esplorazione

La "miniera" di materiali, messa a disposizione dal Servizio Sostenibilità di Ateneo, è rappresentata dai portabici stessi e da altri materiali destinati alla discarica quali: cestini portarifiuti con grafiche obsolete, vecchie lavagne in disuso, banner di eventi promozionali conclusi e scarti provenienti da recenti cantieri di ristrutturazione delle sedi dell'ateneo (Fig. 2).

Tali materiali sono diventati le nuove risorse per la riprogettazione dei portabici, secondo l'approccio *material-driven*. Una prima analisi formale e materica ha permesso di capire le potenzialità dei materiali: in termini di scomponibilità degli oggetti e lavorabilità dei materiali e componenti con le tecnologie appropriate al contesto - ovvero la dotazione di utensili per l'autocostruzione presso il laboratorio LaSTIn (Laboratorio Sistemi

Tecnologici Innovativi) del dipartimento di Architettura e Design; in termini di disponibilità, ovvero quantità di materiale della stessa tipologia; in termini di tempistiche di lavorazione, valutata in base alle competenze del gruppo di lavoro nell'uso degli utensili e in ottica di ridurre al minimo le lavorazioni da effettuare; in termini compositivi, ovvero come far dialogare i diversi elementi tra loro dal punto di vista geometrico, dimensionale ed estetico. I concept di rifunzionalizzazione dei portabici sono strettamente intrecciati, dunque, alla capacità di osservazione e interpretazione di materiali, tecnologie e abilità tecniche.



Figura 2. La "miniera" di materiali di scarto a disposizione
[Fonte: elaborazione degli autori].

I materiali di scarto sono un'occasione per sperimentare direttamente "sul campo" le potenzialità e le difficoltà dei processi di progettazione circolare, in particolare, in ottica di riuso e *repurposing,* o rifunzionalizzazione, ossia l'utilizzo di «un prodotto o i suoi componenti in un ruolo per il quale non era stato originariamente progettato» (BS 8887-2:2009). Di conseguenza, un prodotto può essere riutilizzato per una seconda vita utile tal quale, eseguendo una funzione diversa da quella soddisfatta precedentemente, subendo minime modifiche o trasformazioni (Giorgi, 2024) (Fig. 3).



Figura 3. Esplorazione di materiali e componenti e prove di assemblaggio [Fonte: elaborazione degli autori].

3.2. Circular Design Sprint e processo di prototipazione

L'organizzazione ha previsto le seguenti attività: *harvest* dei materiali e delle tecnologie, prima pulizia dei materiali, definizione del concept di progetto, realizzazione dei prototipi.

Studenti e studentesse, organizzati in gruppi di 7/10 persone, hanno innanzitutto osservato e manipolato i materiali a disposizione e preso confidenza con strumenti e attrezzature presenti in laboratorio. Sono state eseguite alcune lavorazioni di prova, sperimentando anche diversi modi per connettere tra loro gli elementi in modo efficiente dal punto di vista strutturale e rapido rispetto alle lavorazioni necessarie per farlo. Ad esempio, i partecipanti hanno sperimentato lo scardinamento di pallet per ottenere assi, la levigatura, la foratura, il taglio di materiali di scarto, il disassemblaggio di un portabici e l'unione di elementi attraverso connessioni a secco come viti, chiodi e giunti. In questa fase è stato anche possibile osservare quali sono le difficoltà di lavorare con materiali imperfetti e semilavorati che, a differenza di quelli nuovi, richiedono tempi piuttosto lunghi per le lavorazioni tecniche di pulizia, rettifica e selezione.

Sempre in ottica di *repurposing*, i limiti dimensionali dei materiali (lunghezze e spessori), le loro caratteristiche fisico-meccaniche (resistenza a flessione, torsione e trazione), le geometrie degli oggetti e componenti (proporzioni, ingombri, equilibrio statico) e sensoriali (colori, texture, suoni) sono intesi come vincoli con i quali è necessario interagire in ottica di adattamento. Il concept di progetto — e il progetto stesso — prende forma proprio a partire da questi vincoli, in un'interazione dinamica tra ciò che il progettista si prefigura e desidera ottenere e ciò che i materiali gli consentono, o suggeriscono, concretamente di fare. Il progetto nasce dunque

da questo dialogo che passa attraverso la manipolazione diretta con i materiali, già in forma di prototipazione, e che mira a valorizzare al meglio le proprietà "native" degli stessi. In questo modo, un banner in PVC è stato riadattato a sistema di ombreggiamento, un cestino portarifiuti come elemento contenitore per piante, così come i pallet opportunamente assemblati sono diventati un supporto che consente l'appoggio di zaini, caschi, borracce e tutto quello che normalmente "ingombra" mentre si mette il lucchetto alla bicicletta (Fig. 4).

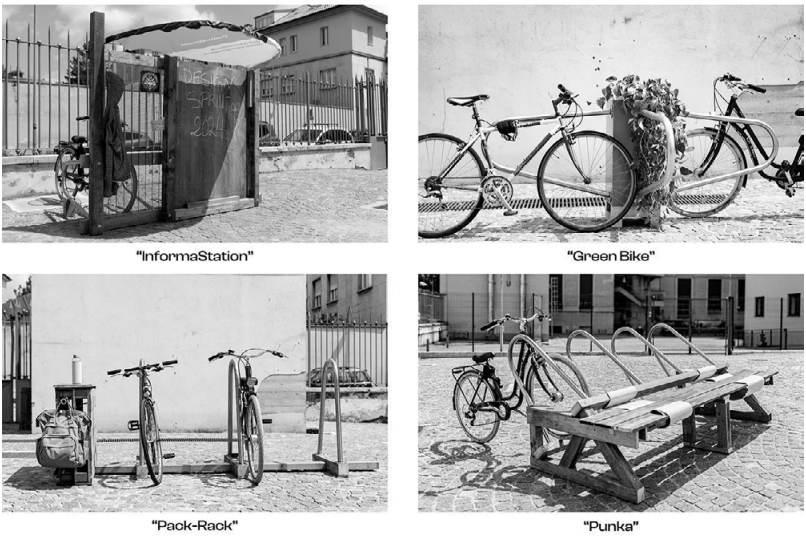


Figura 4. Prototipi finali [Fonte: Multimedia Lab, DAD, Politecnico di Torino].

4. Risultati e discussione

La progettazione adottata si basa su un processo che non nasce da un disegno su carta, ma da improvvisazioni formali e accostamenti funzionali che suggeriscono, anticipano, deviano e riformulano il progetto. Si procede per prove ed errori che vengono valutati in itinere, osservando se l'idea che si prefigura attraverso l'immaginazione trova

corrispondenza nella materia. Il risultato finale si disvela nel suo farsi. Poiché il *brief* non poneva vincoli precisi, se non quello di migliorare e ampliare la fruizione del portabici, l'atto progettuale corrisponde a uno spazio aperto di assemblaggi e disassemblaggi, fino alla composizione desiderata. Le diverse funzioni che sono state aggiunte ai quattro prototipi finali (una bacheca, una fioriera, una seduta, un appoggio per oggetti) non erano previste in anticipo, ma sono emerse proprio dal processo dialogico di rielaborazione di forme e funzioni pregresse e rivisitate dei materiali a disposizione.

Questa modalità di progettazione circolare — tra riuso, *repurpose* e *upcycling* — è possibile quando si ha a disposizione una varietà di materiali e oggetti diversi che possono essere valorizzati per una seconda vita. Si tratta di una modalità progettuale che prende avvio da ciò che è disponibile, superando la logica tradizionale del progetto: i materiali non sono più selezionati esclusivamente in base alle esigenze del progettista o alle dinamiche del sistema di attori e filiere coinvolti, ma diventano essi stessi generatori di opportunità, vincoli e direzioni progettuali.

Nella prospettiva di consolidare processi produttivi, d'uso e dismissione che rispondano ai principi dell'economia circolare, esercitarsi a progettare in questo modo permette di imparare a comprendere che i materiali non cessano mai di avere valore (economico, funzionale, espressivo) in senso assoluto ma che, piuttosto, è vantaggioso imparare a capire come mantenerlo trasformandolo. Il vantaggio non è solamente di tipo ambientale, in quanto si riduce, per esempio, l'estrazione di materie prime vergini o la dismissione in discarica, ma è anche economico e sociale. Nel caso dell'esperienza presentata, per quanto l'obiettivo principale dell'attività fosse di tipo didattico, avere a disposizione dei materiali dismessi ha permesso di arredare il cortile di una sede del campus universitario in sole otto ore, con un impegno economico pari a zero e valorizzando personale e infrastrutture già a disposizione dell'ateneo. Questa "miniera" di materiali ha permesso, così, di attivare una nuova rete di attori per valorizzare uno spazio esterno fruito da tutta la comunità di studenti e docenti (Fig. 5).



Figura 5. Gruppi di studenti con prototipi finali
[Fonte: Multimedia Lab, DAD, Politecnico di Torino].

5. Conclusioni e prospettive

L'esperienza di *campus-mining* consente di riflettere sul potenziale trasformativo di un approccio al progetto *material-driven* e situato. Considerare l'ambiente costruito – e i suoi spazi residuali di stoccaggio – come una "miniera urbana" richiede un cambiamento di paradigma: l'obiettivo di estendere il ciclo di vita dei materiali può essere conseguito ridefinendo il rapporto tra progetto, risorsa e contesto, e assumendo che forme e funzioni dipendano da ciò che è "disponibile". In questa prospettiva, riuso e *repurpose* non sono strategie residuali, bensì dispositivi progettuali capaci di attivare processi di valorizzazione delle qualità fisiche e simboliche della materia, di coinvolgere nuovi attori di filiera e di produrre innovazione attraverso l'adattamento.

Dal punto di vista operativo, la sperimentazione ha evidenziato alcune condizioni abilitanti: la disponibilità e mappatura preventiva dei materiali

dismessi; la presenza di tecnologie e attrezzature per l'autocostruzione; la collaborazione tra strutture gestionali e didattiche; la strutturazione di format intensivi, come il *design sprint*, in grado di integrare analisi, concept e prototipazione in tempi ridotti. Gli impatti osservati non si limitano ad aspetti ambientali come la riduzione dei rifiuti e il risparmio di risorse vergini, ma includono benefici economici (ottimizzazione delle risorse esistenti), sociali (attivazione della comunità accademica) e culturali (diffusione di una nuova sensibilità verso il valore persistente dei materiali).

Questo tipo di esperienza permette anche di riflettere su alcune sfide necessarie per scalare e replicare questo modello oltre la dimensione sperimentale e didattica. Da un lato, si evidenzia la carenza di sistematizzazione dei flussi di recupero e stoccaggio dei materiali e dall'altro, la difficoltà a integrare le pratiche di riuso nei protocolli gestionali e normativi. In prospettiva, l'istituzionalizzazione di pratiche di *urban mining* a scala di campus – e potenzialmente di quartiere – potrebbe essere favorita da un "laboratorio" di innovazione circolare, inteso come uno spazio di sperimentazione e coordinamento in cui didattica, ricerca e gestione convergono nella costruzione di modelli replicabili di economia circolare applicata all'ambiente costruito.

Ringraziamenti

Studenti e studentesse dell'insegnamento Progettare e sviluppare l'economia circolare, anno accademico 2023/2024; Green Team, Politecnico di Torino; Servizio Sostenibilità, Politecnico di Torino (Valentina Colaleo, Paola Biglia, Chiara Genta); LaSTIn - Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi, Dipartimento di Architettura e Design.

Riferimenti bibliografici

Arora, M., Raspall, F., Fearnley, L., & Silva, A. (2021). Urban mining in buildings for a circular economy: Planning, process and feasibility prospects. *Resources, Conservation and Recycling, 174*, 105754. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105754

Baratta, A. F. (2021). Dalle politiche per la circolarità delle risorse alla strategia zero rifiuti. *Agathon: International Journal of Architecture, Art & Design, 9*.

BS 8887-2:2009. (2009). Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE). Terms and definitions.

COM (2019). 640 final. European Commission. The European Green Deal.

COM (2020). 98 Final. European Commission. A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe. Available online: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF

Condotta, M., Zatta, E. (2020). Riuso del tempo in architettura: la pratica del reimpiego di prodotti e componenti edilizi= Reusing Time in architecture: The practice of reusing building products and components. *Techne, 10*(20), 113-121.

Da Cruz, A. M. R., & Cruz, E. F. (2025). Digital product passports in promoting circular economy: a conceptual data model. *IFAC-PapersOnLine, 59*(10), 969.

Giorgi, S. (2024). *Progettare la circolarità. Strategie e strumenti per l'economia circolare nel settore edilizio*. Milano: Franco Angeli.

Ghisellini, P., Ncube, A., Casazza, M., & Passaro, R. (2022). Toward circular and socially just urban mining in global societies and cities: Present state and future perspectives. *Frontiers in Sustainable Cities, 4*, 930061.

Hasibuan, G. C. R., Al Fath, M. T., Yusof, N., Dewi, R. A., Syafridon, G. G. A., Jaya, I., & Anas, M. R. (2025). Integrating circular economy into construction and demolition waste management: a bibliometric review of sustainable engineering practices in the built environment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 101159.

Lombardi, P., Genta, C., & Colaleo, V. (2023). Implementing Circular Economy in Universities. Successful Practices at Politecnico di Torino (Italy). *Journal of Sustainability Perspectives, 3*(1), 63-68.

Montacchini, E., Tedesco, S., & Di Prima, N. (2024). Engaging students in Circular Design: teaching experiences with (future) architects and designers. In *Proceedings of Conference on Sustainable Energy Education–SEED 2024* (pp. 979-987). Editorial Universitat Politècnica de València.

End-of-Life of building materials: innovative upcycling experiment for brick recovery

Jacopo Andreotti

PhD and research fellow, Politecnico di Torino, Department of Architecture and Design, Italy. *jacopo.andreotti@polito.it*

Abstract: The construction sector is one of the major contributors to Greenhouse Gas emissions and waste generation in Europe, making the adoption of decarbonisation and circular economy strategies particularly urgent. In this framework, construction and demolition waste, such as clay brick and ceramic-based materials, accounts for a significant fraction of both mass and volume. Although the brick industry has already integrated circular practices into production by incorporating secondary raw materials, end-of-life brick waste is still mainly managed through downcycling practices, leading to a loss of material value.

This paper presents an innovative approach to enhance the recovery of post-production and post-use brick waste through technological cross-fertilisation with the Autoclaved Aerated Concrete sector. The research, developed within the project '*Circolarità delle risorse materiche*' and carried out in collaboration between academic institutions and industrial partners, investigates the feasibility of producing a lightweight, porous material from crushed brick waste.

The experimental activity was organised into three sequential laboratory phases. The first two, based on traditional binders and AAC-like formulations, did not achieve satisfactory results due to issues such as sample fragmentation and disintegration. The third phase introduced a geopolymer-based approach, which resulted in cohesive specimens characterised by a widespread porous structure, with densities ranging from 700 to 950 kg/m^3 and porosity values up to 68%.

Preliminary results highlight the potential of the new material as a massive thermal insulation solution and as a component for wall cladding systems or suspended ceilings with sound-absorbing and hygrothermal regulation properties. Further performance testing and assessments of industrial scalability are currently ongoing, contributing to the development of new high-value circular pathways for end-of-life brick recovery.

Keywords: circular economy, upcycling, brick waste recovery, geopolymer & lime, brick mousse.

* Autore corrispondente

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introduzione

Il settore delle costruzioni è da molti anni il soggetto principale verso cui si rivolgono i piani strategici europei. Tali piani sono finalizzati a ridurre i consumi di risorse materiche ed energetiche e la produzione di rifiuti, poiché dal suddetto settore dipendono il 36% delle emissioni di anidride carbonica equivalente (CO_2eq) rilasciate annualmente a livello continentale (Ramboll et al., 2025).

In questo senso, l'Unione Europea (UE) ha da tempo identificato la rilevanza dei flussi materici (risorse in ingresso e rifiuti in uscita da un determinato sistema) attraverso il *Green Deal*; il cui obiettivo è promuovere interventi di prevenzione, riuso e riciclo di alta qualità. La transizione in esso illustrata verso un'economia attenta all'importanza della materia – non solo 'ambientale' ma anche 'culturale' (Andreotti et al., 2023) – è supportata da diverse direttive e piani *ad-hoc.*

La Direttiva Quadro sui Rifiuti (2008/98/CE, in continuo aggiornamento) ha fissato un target minimo al 2020 del 70% di rifiuti avviati a processi di riuso, riciclo e recupero. Da qui la crescente importanza rivolta ai rifiuti da C&D, dato che essi costituiscono una frazione voluminosa e pesante, specialmente se gli interventi riguardano edifici realizzati con: mattoni e blocchi forati, tegole, vetro, cemento e calcestruzzo (de Gier et al., 2024). La salvaguardia del 'valore della materia' (Baratta et al., 2023b) è supportata poi dal *Circular Economy Action Plan* (CEAP) – il cui obiettivo è quello di promuovere la riduzione dei tassi di rifiuti conferiti in discarica attraverso modelli virtuosi di recupero – e dal recente aggiornamento del *Construction Products Regulation* (CPR) (UE 3110, 2024), le cui principali novità riguardano: l'introduzione del passaporto digitale quale strumento atto a favorire la tracciabilità dei flussi materici e l'integrazione dei criteri ambientali sul ciclo di vita, in ottica di rendere obbligatoria la Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD) per tutti i prodotti da costruzione. Tale azione si inserisce in un più ampio pacchetto di iniziative, che passa attraverso l'aggiornamento della Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (EPBD IV) (UE 1275, 2024). Al suo interno, la verifica delle prestazioni energetiche è accompagnata dalla valutazione delle emissioni di CO_2eq lungo tutto il ciclo di vita del manufatto edilizio, dall'estrazione delle risorse (A) fino allo smaltimento delle stesse al termine della loro vita utile (C) (Giordano and Andreotti, 2023).

In questo scenario, l'Italia ha recepito il quadro di strumenti europeo sull'economia circolare. Si evidenzia una tendenza positiva per il 2025, rispetto alla media europea (<70%), con il 73% dei rifiuti speciali non pericolosi avviati a recupero e riciclo, a cui si somma il 9,9% destinato a incenerimento e a trattamenti biologici o fisico-chimici (ISPRA, 2025). Inoltre, i recenti aggiornamenti sui Criteri Ambientali Minimi (CAM) hanno introdotto informazioni più dettagliate in relazione agli studi *Life Cycle Assessment* (LCA) per gli interventi pubblici (MASE, 2025) e al principio *Do No Significant Harm* (DNSH). Tale principio, derivante dalla tassonomia europea, vincola gli investimenti pubblici legati al PNRR a dimostrare di non arrecare danni all'ambiente, promuovendo di fatto il disassemblaggio degli edifici e la transizione verso un'economia circolare.

La ricerca si inserisce quindi in un contesto dinamico e si focalizza, nell'ambito dei materiali da costruzione, sul comparto dei laterizi. Esso rappresenta per l'Italia – e per le regioni mediterranee del continente europeo – un importante riferimento da cui attingere risorse per la realizzazione di nuovi edifici o per la ristrutturazione degli esistenti. Il laterizio, sia esso inteso come mattone, blocco forato, tegole e coppi, travetti e pignatte, è un elemento caratteristico del patrimonio edilizio storico e contemporaneo; capace ormai da tempo di sfruttare i principi di economia circolare in fase di produzione, mediante l'additivazione di scarti nella miscela di base (Baratta et al., 2023a). Tuttavia, tale propensione ad accogliere e valorizzare scarti provenienti da altri settori non si verifica durante il suo fine vita, inteso come il momento in cui il prodotto non è più in grado di soddisfare i requisiti prestazionali per cui è stato progettato. In questa situazione il laterizio, classificato come rifiuto speciale non pericoloso (EER 170102 e 170103), subisce tradizionalmente un processo di riciclo che lo porta a divenire un 'aggregato recuperato',[1] le cui modalità di recupero vengono definite in riempimenti e colmate e confezionamento di malte e calcestruzzi; ovvero, processi di *downcycling* che riducono la prestazione e il valore della materia. Da qui l'obiettivo della ricerca di identificare nuove soluzioni di valorizzazione della materia, capaci di rispondere a specifiche esigenze di mercato, ambientali e culturali.

[1] D.M. 28 giugno 2024, n.127, Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione, altri rifiuti inerti di origine minerale, ai sensi dell'articolo 184-ter, comma 2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152/2006.

2. Proposta originale: cross-fertilizzazione tecnologica e di *know-how*

Nell'alveo delle ricerche portate avanti dal Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi Roma Tre, il progetto 'Circolarità delle risorse materiche'[2] si è confrontato con la necessità del settore dei laterizi di identificare nuovi modelli produttivi sostenibili. La ricerca – svolta in collaborazione con il Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino, l'azienda Gruppo Ripa Bianca di Santarcangelo di Romagna e la società Sfridoo di Bologna – ha così esplorato nuove modalità di recupero del laterizio post-produzione e post-uso, con l'obiettivo di rispondere alla domanda: "*è possibile recuperare il laterizio a fine vita, evitando che le operazioni di riciclo ne riducano il valore, la qualità e le funzionalità?*".

La soluzione al quesito ha richiesto una collaborazione multisettoriale e il trasferimento di tecnologie e di *know-how*, individuando, in principio, una serie di criticità (aziendali e di mercato) entro cui delineare uno spazio di sperimentazione. A livello aziendale, e per estensione a tutti gli stabilimenti produttivi di laterizio, le principali criticità riguardano il fabbisogno di metano, da cui derivano costi ed emissioni. Nonostante ciò, tali "derivati" sono giustificati dalla durabilità del materiale; il quale, senza alcuna operazione di manutenzione o riparazione, è in grado di mantenere le sue prestazioni per oltre 150 anni (TBE, 2020). Un'ulteriore criticità emersa durante il confronto con l'azienda riguarda il prodotto scartato post-produzione, il quale non è re-introducibile e deve essere smaltito. A livello di mercato, invece, i prodotti in laterizio non sono in grado, ad oggi, di fornire soluzioni leggere per tramezzature e controsoffitti o per svolgere funzioni di isolamento termico e acustico.

La ricerca ha così individuato un prodotto di riferimento, il Calcestruzzo Aerato Autoclavato (CAA). Conosciuto anche come calcestruzzo cellulare, il CAA (Figura 1) è un materiale sviluppato agli inizi del 1900 dall'architetto svedese John Axel Eriksson con l'obiettivo di valicare i problemi del legno relativi alla combustione, sensibilità all'umidità e continua manutenzione. Il CAA, costituito da una miscela di cemento, calce aerea, gesso, sabbia silicea acqua e polvere di alluminio, ha la capacità di "lievitare", ovvero di espandere il suo volume per effetto dell'ossidazione della polvere di alluminio:

[2] Finanziato tramite D.M. 10 agosto 2021, n.1061, Dottorati di ricerca su tematiche green e dell'innovazione: nuove risorse dal PON Ricerca e Innovazione 14-20.

dovuta al contatto con l'ambiente basico (pH superiore a 7) indotto dalla miscela di calce aerea e acqua. Tale reazione provoca la produzione di bolle di idrogeno; le quali attraversando il composto portano a un aumento del volume (fino al 500%) e a una riduzione del peso (compreso tra ca. 300 e 900 kg/m³ a seconda del *mix-design*).



Figura 1. Posa di un blocco in CAA e confronto tra blocchi con porosità differente [Fonte: AsmitA India Reality & Ecotrend].

L'attività sperimentale è stata quindi rivolta al trasferimento della tecnologia di produzione del CAA al settore dei laterizi. Partendo da alcune esperienze condotte nel panorama internazionale (Bukhari et al., 2023; Raj

et al., 2020) è stata intrapresa un'attività di laboratorio organizzata in tre campagne sperimentali sequenziali, il cui processo iterativo è finalizzato a ottenere dei campioni equiparabili al prodotto di riferimento.

3. Mousse di laterizio, iter sperimentale

Le campagne sperimentali sono state suddivise in base alla tipologia di legante e di inerti, singoli o in combinazione, questi ultimi costituiti principalmente da cocciopesto – o *chamotte* – ottenuto per polverizzazione di scarti di laterizio del Gruppo Ripabianca.

3.1 Prima campagna

La prima campagna ha lo scopo di comprendere la relazione tra diversi tipi di leganti - cemento Portland (PC), cemento naturale (NC) e calce idraulica naturale (NHL) – con il cocciopesto e la polvere di alluminio (utilizzata come agente aerante). In questo caso, il cocciopesto è impiegato come sostitutivo della sabbia silicea. Le attività sperimentali hanno sviluppato 17 campioni: nessuno dei quali ha soddisfatto i requisiti prestazionali come mostrato nella Figura 2.



Figura 2. Frantumazione (sinistra) e disgregazione (destra) dei campioni sviluppati nel corso della prima campagna sperimentale [Fonte: autore].

I campioni hanno infatti evidenziato due tipi di problemi: frantumazione e disintegrazione. Il primo problema, osservato nei gruppi di campioni NC e NHL, è causato dalla rapida presa dei leganti, che provocano un arresto dell'espansione ma non della produzione di idrogeno. Il secondo, invece, caratterizza il gruppo di campioni PC ed è dovuto alla lenta presa del legante, che innesca un'espansione incontrollata senza attivare le proprietà meccaniche del cemento.

3.2 Seconda campagna

La seconda campagna ha reintrodotto alcune sostanze presenti nella miscela di CAA e utilizza una combinazione di leganti. Più nel dettaglio, i 20 nuovi campioni sono realizzati con una frazione di chamotte (50%) e sabbia silicea (50%) e sono suddivisi in due gruppi di leganti: cemento Portland + cemento naturale (PCN) e cemento Portland + calce aerata (PCA). Come nella prima fase, i nuovi campioni non hanno soddisfatto gli obiettivi prefissati. I problemi evidenziati sono di due tipi (Figura 3): limitata espansione nei campioni PCN e disintegrazione per i campioni PCA. Un'analisi più dettagliata ha rivelato che i problemi sono riconducibili al cocciopesto. Esso comprende una frazione di silice (quarzo) meno reattiva rispetto alla sabbia e, dal punto di vista granulometrico, si presenta come una polvere le cui particelle sono più piccole di quelle dei leganti. Questa caratteristica non consente ai leganti di funzionare correttamente e sviluppare le resistenze meccaniche.



Figura 3. Limitata espansione (sinistra) e disgregazione (destra) dei campioni sviluppati nel corso della seconda campagna sperimentale [Fonte: autore].

3.3 Terza campagna

La terza campagna abbandona la formulazione in stile CAA per esplorare il tema dei geopolimeri (Sambucci et al., 2021; Vasíc et al., 2022). Si tratta di polimeri inorganici formati da reazioni chimiche tra sostanze alluminosilicate e soluzioni basiche (pH > 7). La reazione produce una rete tridimensionale (3D) di catene inorganiche con elevata resistenza meccanica. Il ricercatore ha sviluppato una serie di 13 miscele – visibili in Tabella 1 - combinando una soluzione basica, cocciopesto, polvere di alluminio, acqua con calce aerata, quest'ultima utilizzata per stabilizzare la reazione di espansione. Sebbene i geopolimeri siano in grado di consolidare anche a temperatura ambiente, si è deciso di essiccare i campioni in un forno a 80 °C per 10 ore, al fine di accelerare il processo di indurimento. Tutti i campioni, come mostrato nella Figura 4, sono risultati coesivi.

Tabella 1. Mix-design dei campioni realizzati con soluzione geopolimerica [Fonte: elaborazione dell'Autore].

	Cocciopesto (%)	Soluzione basica (%)	Calce aerea (%)	Polvere di alluminio (%)
G1	79,9	20,0	0	0,1
G2	82,9	17,0	0	0,1
G3	68,9	14,0	17	0,1
G4	65,2	13,0	21,7	0,1
G5	65,8	13,1	21,0	0,1
G6	67,3	13,4	19,2	0,1
G7	62,5	12,4	25,0	0,1
G8	65,2	13	21,7	0,1
G9	67,3	13,4	19,2	0,1
G10	68,9	13,7	17,3	0,1
G11	70,3	14	15,6	0,1
G12	69,7	13,8	16,4	0,1
G13	70,4	9,4	20,1	0,1

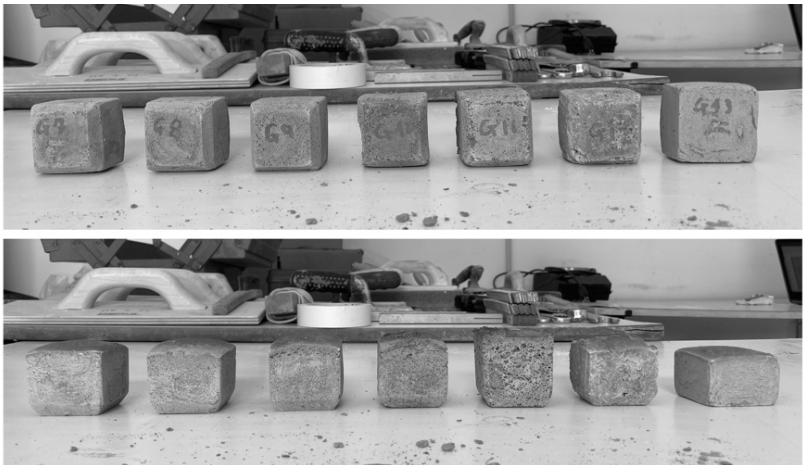


Figura 4. Provini sviluppati con combinazione di cocciopesto, soluzione geopolimerica e calce aerea [Fonte: autore].

4. Risultati e prospettive

La ricerca, attualmente in corso, è impegnata nell'attività di monitoraggio delle prestazioni in collaborazione con il Dipartimento di Mineralogia e Petrologia dell'Università di Granada e con il Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT) del Politecnico di Torino. I risultati dei test iniziali evidenziano che il contenuto di calce è inversamente proporzionale al fenomeno di espansione. In altre parole, i campioni con un contenuto di calce più elevato sono caratterizzati da un minor volume dei pori, il quale influenza la densità apparente del materiale. In questo senso, le misurazioni sui campioni G9 e G11 mostrano un intervallo di densità compreso tra 700 e 950 kg/m³ e una porosità che contraddistingue il 55-68% del materiale (per il CAA i valori di densità sono compresi tra 300 e 900 kg/m³ e di porosità tra 50 e 80%). I test si sono concentrati prioritariamente sullo studio della struttura porosa del materiale, al fine di comprendere le sue relazioni con le prestazioni termiche, acustiche e meccaniche, attraverso: prove idriche, resistenza ai cicli di gelo e disgelo e alla cristallizzazione dei sali e analisi al porosimetro (Tabella 2).

Tabella 2. Studio della struttura porosa del materiale e confronto con valori tipici per i prodotti CAA [Fonte: elaborazione dell'Autore].

Tipologia di prova	G9	G11	CAA
Assorbimento di acqua per immersione	Assorbimento libero (Ab) 57,19% e forzato (Af) 71,63; Coefficiente di saturazione (S) 66,77%; Grado di interconnessione dei pori (Ax) 20,16%; Porosità apparente (P) 64,4%	Assorbimento libero (Ab) 71,38% e forzato (Af) 88,09; Coefficiente di saturazione (S) 68,99%; Grado di interconnessione dei pori (Ax) 19,00%; Porosità apparente (P) 68,58%	Valori tipici di Af tra 27-55% (Abhilasha et al., 2023); Coefficiente di saturazione (S) n.d.; Grado di interconnessione dei pori (Ax) elevato (Laukaitis and Fiks, 2006); Porosità apparente (P) >70% (Qu and Zhao, 2017)
Resistenza al gelo disgelo	Estrema sensibilità alla gelività, il materiale non è applicabile in condizioni ambientali esterne dove la temperatura è prossima o inferiore a 0°C.		Estrema sensibilità in condizioni di elevata saturazione (punto critico 50-70%) (Narayanan and Ramamurthy, 2000).
Cristallizzazione dei sali	Scarsa sensibilità alla cristallizzazione dei sali, dovuta all'elevato grado di interconnessione dei pori (Ax) che consente ai sali di cristallizzare senza intaccare le proprietà meccaniche del materiale; possibile applicazione in ambienti esterni salini.		I sali, specialmente in alte concentrazioni, può danneggiare la struttura porosa e ridurre la resistenza meccanica (Abuku et al., 2018).
Porosimetria a intrusione di mercurio (1-1E-06 mm)	55,31%	47,01%	65-90% (Abhilasha et al., 2023)

I risultati preliminari dimostrano l'efficacia della proposta originale di individuare una nuova soluzione di recupero del laterizio a fine vita, riducendo il fenomeno di *downcycling*. Il materiale, sulla base dei primi riscontri prestazionali, non può essere utilizzato a fini strutturali ma, data la presenza di una struttura porosa capillare e diffusa, può trovare impiego come: 1) isolante termico massivo, 2) elemento di rivestimento, parietale o per controsoffitti, con funzione fono-assorbente e termo-igrometrica. Ulteriori test prestazionali e di trasferimento a scala industriale sono in corso di programmazione.

Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare il dott. Michele Marconi, l'arch. Mario Lazzaroni, il prof. Adolfo F.L. Baratta, il prof. Roberto Giordano, il prof. Giuseppe Cultrone e il prof. Jean-Marc Tulliani per il supporto alla ricerca.

Riferimenti bibliografici

Abhilasha, K.R., Lakhani, R., Mishra, R.K., Khan, S. (2023). Utilization of Solid Waste in the Production of Autoclaved Aerated Concrete and Their Effects on its Physio-mechanical and Microstructural Properties: Alternative Sources, Characterization, and Performance Insights. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1), 6. https://doi.org/10.1186/s40069-022-00569-x.

Abuku, M., Ogura, D., & Hokoi, S. (2018). Measurement and modeling of water sorption isotherm for salt-laden autoclaved aerated concrete. *Japan Architectural Review*, 1(1), 167–174. https://doi.org/10.1002/2475-8876.10022.

Andreotti, J., Montacchini, E., Tedesco, S. (2023). Schermi avanzati: il riuso di pareti in mattoni dell'esistente. *Costruire in Laterizio*, vol. 193, pp. 60-65. Maggioli S.p.A.: Santarcangelo di Romagna.

Baratta, A.F.L., Andreotti, J., Trulli, L., Calcagnini, L. (2023a). Product innovation for the ecological transition. Brick and glass recycling. *AGATHÓN | International Journal of Architecture, Art and Design*, 13, pp. 227–236. https://doi.org/10.19229/2464-9309/13192023.

Baratta, A.F.L., Calcagnini, L., Magarò, A. (2023b). Il Riciclaggio come processo creativo di innovazione. *RECYCLING: Il valore della materia nella transizione ecologica del settore delle costruzioni*, V, pp. 17-23. Anteferma Edizioni Srl: Conegliano (TV).

Bukhari, S.A., Patil, D., Gogate, N.G., Minde, P.R. (2023). Utilization of waste materials in non autoclaved aerated concrete blocks: State of art review, *MaterialsToday: Proceedings.* https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.334.

de Gier, A., Gottlieb, S.C., Buser, M. (2024). Categorizing construction waste: Closing the gap between European waste regulation and management practices. *Sustainable Futures*, 7, 100194. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100194.

Giordano, R., and Andreotti, J. (2023). DEC50: Building decarbonisation tools. *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, (26), 207–216. https://doi.org/10.36253/techne-14435.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (2025). Rapporto Rifiuti Speciali Edizione 2025: Dati di sintesi. Disponibile al sito: https://www.isprambiente.gov.it/it (consultato il 03.02.2026).

Laukaitis, A., & Fiks, B. (2006). Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Applied Acoustics*, 67(3), 284–296. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.07.003

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) (2025). Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento del servizio di progettazione e direzione lavori di interventi edilizi e opere di ingegneria civile, esecuzione di lavori, inclusi gli interventi di costruzione, ristrutturazione, manutenzione e adeguamento. Disponibile da: https://www.mase.gov.it/portale/cam-vigenti (consultato il 03.02.2026).

Narayanan, N., Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, *22*(5). https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0.

Raj, A., Borsaikia, A.C., Dixit, U.S. (2020). Manufacturing of Autoclaved Aerated Concrete (AAC): Present Status and Future Trends. *Advances in Simulation, Product Design and Development*. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9487-5_69.

Ramboll, BPIE, Tu Graz, and KU Leuven (2025). Analysis of Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of EU Buildings and Construction: Analysis of Results and Implications. Disponibile da: https://data.europa.eu/doi/10.2873/2247112 (consultato il: 03.02.2026).

Sambucci, M., Sibai, A., Valente, M. (2021). Recent Advances in Geopolymer Technology. A Potential Eco-Friendly Solution in the Construction Materials Industry: A Review. *Journal of Composite Science*, 5(4), 109. https://doi.org/10.3390/jcs5040109.

Tiles & Bricks Europe (2020). Internal Guidance Document on TBE PCR for Clay Construction Products. Disponibile da: https://www.tiles-bricks.eu (consultato il: 04.02.2026).

Unione Europea (2024). Direttiva 2024/1275 del 24 aprile 2024 sulla Prestazione Energetica nell'Edilizia. Disponibile al sito: https://eur-lex.europa.eu/homepage.html?locale=it (consultato il 03.02. 2026).

Unione Europea (2024). Regolamento 2024/3110 del 27 novembre 2024 che fissa norme armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e abroga il regolamento n. 350/2011. Disponibile al sito: https://eur-lex.europa.eu/homepage.html?locale=it (consultato il 03.02. 2026).

Vasíc, M.V., Terzić, A., Radovanović, Ž., Radojević, Z., Warr, L.N. (2022). Alkali-activated geopolymerization of a low illitic raw clay and waste brick mixture, An alternative to traditional ceramics. *Applied Clay Science*, 218, 106410. https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106410.

Qu, X., & Zhao, X. (2017). Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 135, 505–516. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208.

Riciclo delle macerie edilizie: dal QT8 di Milano all'Ucraina di oggi

Construction Debris Recycling: from QT8 Milan to Contemporary Ukraine

Matteo Ocone

Dottorando, Dipartimento ABC, Politecnico di Milano, Italy.

Docente a contratto, Dipartimento DISUS, Università telematica "eCampus", Italy.
matteo.ocone@uniecampus.it

Abstract: the management of construction and demolition waste (CDW) in post-conflict scenarios represents a critical challenge involving environmental, technical, and socio-cultural dimensions. This paper is structured as a comparative research study analysing the evolution of debris recycling practices through two case studies: post-war Italy (1945–1965) and contemporary Ukraine (2022–2026).

The comparison is developed through a set of indicators, including: (i) quantities of debris, (ii) building typologies, (iii) recycling technologies, (iv) regulatory frameworks, and (v) environmental and socio-cultural implications. The study proposes a comparative framework based on quantitative and qualitative indicators, offering a replicable model for analyzing post-conflict reconstruction strategies. The Italian case of Monte Stella (QT8, Milan) is examined as an early example of empirical in situ reuse, while the Ukrainian case is analysed through recent literature on large-scale debris management and circular construction strategies.

The results highlight a transition from emergency-driven and largely unsystematic reuse practices to technologically advanced and policy-supported circular economy approaches. The study contributes to the current debate on resilient reconstruction by proposing a comparative framework applicable to other post-conflict contexts.

Keywords: CDW recycling, circular economy, post-conflict reconstruction, recycled aggregates, comparative analysis.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Autore corrispondente

1. Introduzione

La ricostruzione post-bellica pone sfide complesse, dove l'urgenza di ripristinare la funzionalità urbana si scontra con la necessità di preservare la memoria collettiva e la sostenibilità ambientale. Questo studio si configura come un saggio di ricerca applicata che, attraverso un'analisi storico-comparativa, indaga l'evoluzione delle strategie di riciclo delle macerie in contesti post-bellici. L'obiettivo è mettere in dialogo un caso storico, il QT8 di Milano, 1945-1965, con un contesto contemporaneo, Ucraina 2022-2026, al fine di estrarre lezioni utili per la ricostruzione resiliente. La metodologia adottata si basa su analisi di fonti primarie (archivi storici e report tecnici), confronto sistematico di indicatori quantitativi e qualitativi (quantità di macerie, tecnologie di riciclo, quadro normativo, collaborazioni internazionali), integrazione di dati tecnici, sociali e culturali per valutare l'impatto delle strategie di riciclo sulla resilienza urbana. Il contributo si colloca nel dibattito sull'economia circolare applicata al settore delle costruzioni, offrendo una prospettiva storica e applicativa sul riuso dei materiali in contesti di crisi.

Il settore delle costruzioni è responsabile del 36 % del consumo globale di energia e del 40 % delle emissioni di CO_2. In contesti di distruzione bellica, queste dinamiche si amplificano a causa dell'enorme quantità di detriti prodotti; ad esempio, il conflitto in Ucraina ha generato oltre 100 milioni di tonnellate di macerie, equivalenti a 20–30 milioni di m^3 di calcestruzzo (JICA, 2024). In questo quadro, il tema del riciclo dei materiali da costruzione si inserisce nelle strategie europee per l'economia circolare, che promuovono l'aumento del tasso di recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione e la riduzione dell'uso di materie prime vergini (European Commission, 2020).

2. Il riuso delle macerie in Italia (1945-1965): il caso del Monte Stella a Milano (QT8)

Dopo la Seconda Guerra Mondiale, l'Italia si trovò a gestire 3 milioni di m^3 di macerie a Roma e 2 milioni a Milano, con una ricostruzione che puntava ad essere rapida e poco costosa, motivo per il quale spesso il Genio Civile optò per la demolizione totale, privilegiando la ricostruzione rispetto alla conservazione del patrimonio. Tuttavia, il progetto Monte Stella di Piero



Bottoni (1946–1956) rappresentò un cambio di paradigma che portò al riuso di 600 000 m^3 di macerie per creare un rilievo artificiale. L'intervento dimostrò come i detriti derivanti dalla distruzione bellica potessero essere utilizzati come materiale per la costruzione del paesaggio urbano (Bottoni, 1954), anticipando i principi dell'economia circolare, e dimostrando come il riuso *in situ* potesse coniugare memoria, funzionalità e innovazione.

Il progetto Monte Stella rappresentò un'eccezione nel panorama della ricostruzione italiana, caratterizzata prevalentemente da demolizioni totali e ricostruzione ex novo. I 600 000 m^3 di macerie furono riutilizzati senza trattamenti avanzati, attraverso demolizione manuale e riempimento paesaggistico, anticipando principi di economia circolare in assenza di un quadro normativo specifico (Bottoni, 1954). L'intervento dimostrò come il riuso *in situ* potesse coniugare funzionalità urbana, memoria collettiva e innovazione paesaggistica, sebbene rimanesse limitato a soluzioni non strutturali. Questo caso studio offre uno spunto per riflettere su come, anche in contesti di scarsità tecnologica, il detrito edilizio possa essere trasformato in una risorsa simbolica e materiale.

3. Il riuso delle macerie in Ucraina (2022-2026): innovazione tecnologica per il riuso del calcestruzzo

Il conflitto in Ucraina ha generato oltre 100 milioni di tonnellate di macerie (JICA, 2024), equivalenti a 20–30 milioni di m^3 di calcestruzzo, con picchi di 60 000 m^3 di detriti al giorno nelle aree più colpite (Safranov et al., 2024). A differenza dell'Italia del dopoguerra, la gestione di questo volume senza precedenti si avvale di tecnologie avanzate (demolizione selettiva, frantumazione meccanica, RCA) e collaborazioni internazionali (JICA, UNEP, UE), sebbene permangano barriere strutturali come la corruzione che registra il 23 % dei fondi per la ricostruzione dispersi (Transparency International, 2025) e la frammentazione istituzionale (Martsynyuk & Khandogina, 2025). Questo paragrafo analizza cosa è stato realizzato, le innovazioni tecnologiche e le sfide aperte, con riferimento a progetti pilota e dati quantitativi recenti: Tsyrkulyarne Budivnytstvo (Borodianka): Edifici in RCA e materiali bio-based; Stampa 3D a Leopoli: Riduzione del 40 % di cemento vergine; Rebuild Ukraine (UE): 12 cantieri con RCA a Mykolaiv e Kharkiv.

A differenza della situazione italiana del dopoguerra, la ricostruzione ucraina può contare su tecnologie avanzate di demolizione selettiva e riciclo dei materiali, grazie a processi di frantumazione e separazione. La demolizione selettiva consente di recuperare fino all'80 % dei materiali edilizi, riducendo del 30 % le emissioni di CO_2 rispetto alla produzione di aggregati vergini (Tam et al., 2018). Progetti come Tsyrkulyarne Budivnytstvo (Borodianka) dimostrano l'efficacia del calcestruzzo riciclato (RCA) in edifici a basse emissioni, combinato con materiali bio-based (legno, canapa) per bilanciare l'impatto ambientale (Salata, 2024). Tuttavia, solo il 40 % delle macerie viene effettivamente riciclato a causa di mancanza di infrastrutture nelle aree rurali (Safranov et al., 2024) e corruzione (Hanoshenko, 2025). Infatti, il calcestruzzo demolito può essere trasformato in aggregato riciclato utilizzabile per nuovi conglomerati cementizi, e questo processo consente di ridurre significativamente l'estrazione di sabbia e ghiaia (fino a 1,8 mila tonnellate di sabbia), e pietra naturale per ogni 1000 m^3 di costruito risorse naturali sempre più scarse. Numerosi studi dimostrano che l'utilizzo di *recycled concrete aggregates* (RCA) può ridurre il consumo di aggregati naturali senza compromettere le prestazioni meccaniche del calcestruzzo in molte applicazioni edilizie (Tam et al., 2018). In ambito europeo,



il riutilizzo degli aggregati riciclati nel calcestruzzo è regolato da normative tecniche specifiche, tra cui la norma EN 206, che stabilisce requisiti e limiti per l'impiego di materiali riciclati nella produzione di calcestruzzo strutturale; vale la pena qui ricordare le mancanze in termini di standard normativi specifici se parliamo di innovazioni come la stampa 3D. La stampa 3D di elementi strutturali utilizzando macerie frantumate è stata testata con successo a Leopoli, dove un prototipo di muro portante in RCA ha ridotto del 40 % l'uso di cemento vergine (Wakefield, 2025). Questo approccio richiede ancora standard normativi specifici per la certificazione strutturale, attualmente in fase di sviluppo (Shyshkin et al., 2023).

L'impiego di aggregati riciclati può ridurre in modo significativo le emissioni di CO_2 associate alla produzione di nuovi materiali da costruzione (Camarra, 2025). L'utilizzo di strumenti di valutazione ambientale come il Life Cycle Assessment (LCA) consente inoltre di quantificare i benefici ambientali del riuso, integrando tali pratiche nei processi di progettazione. Un ulteriore elemento innovativo è rappresentato dall'integrazione tra riciclo dei materiali e progettazione energeticamente efficiente: in diversi progetti pilota, il calcestruzzo riciclato viene utilizzato in edifici a basse emissioni o a energia quasi zero, combinato con materiali naturali e tecnologie di prefabbricazione (Capanna, 2016). La ricostruzione in Ucraina adotta il metodo dell'Integrated Design Process (IDP), che combina architettura, ingegneria e sostenibilità fin dalle fasi iniziali: l'edificio non è inteso solo come involucro, ma come un "ambiente di supporto" per una popolazione traumatizzata.



L'integrazione di materiali naturali come il legno e la canapa — che fungono da deposito di carbonio con valori di GWP (Global Warming Potential) negativi — permette di bilanciare l'impatto dei materiali strutturali. Questo però non raggiunge gli esiti previsti a causa di alcuni ostacoli. Le principali barriere includono questioni legate alla corruzione: il 23 % dei fondi destinato alla ricostruzione ucraina è stato disperso a causa di politiche illecite (Transparency International, 2025); la mancanza di coordinamento tra governo centrale ed enti locali rallenta l'implementazione di piani di riciclo di più ampio respiro (Martsynyuk & Khandogina, 2025); e, infine, nelle regioni rurali, solo il 20 % delle macerie viene effettivamente indirizzato a un piano di riciclo (Safranov et al., 2024). Per sopperire a queste problematiche è di rilievo la cooperazione internazionale. La collaborazione con JICA (Giappone), ad esempio, ha permesso l'introduzione di impianti mobili di frantumazione, mentre il programma UNEP ha formato 500 operatori locali sulla gestione sostenibile dei detriti (JICA, 2024). Inoltre, il progetto "Rebuild Ukraine", finanziato dall'UE, ha avviato 12 cantieri pilota per la ricostruzione con RCA in città come Mykolaiv e Kharkiv (Salata, 2024).

Il riuso delle macerie in Ucraina assume una dimensione terapeutica, come evidenziato da studi antropologici sulla materialità della memoria (Belardi, 2018). Progetti partecipativi, come la ricostruzione della scuola di Borodianka — dove i cittadini hanno riutilizzato mattoni originali per ricostruire l'edificio — dimostrano come il riciclo dei materiali possa diventare un rito collettivo di guarigione (Augé, 2003). Questo approccio riflette il concetto di kintsugi urbano, dove le 'crepe' della distruzione sono valorizzate come elementi di continuità storica, trasformando il trauma in resilienza comunitaria (Salata, 2024).

L'approccio contemporaneo riconosce che l'architettura deve oggi ridare senso a ciò che già esiste, risignificando i vuoti e modellando il costruito. La strategia di "costruire sul costruito" implica l'assunzione di responsabilità nel ripensare i suoli già urbanizzati, le volumetrie in disuso e il riuso di quanto resta, soprattutto quando c'è una forte valenza storico-simbolica del sopravvissuto alla distruzione.

4. Conclusioni

Il confronto tra il riuso delle macerie a QT8 Milano (1945–1965) e in Ucraina (2022–2026) rivela una transizione epocale: da un approccio empirico e simbolico (riuso *in situ* per paesaggio urbano) a una strategia tecnologica e sistemica (RCA, stampa 3D, economia circolare). Mentre a Milano il Monte Stella incarnava una rinascita paesaggistica, in Ucraina il riciclo dei materiali abbraccia sostenibilità ambientale, resilienza comunitaria e innovazione normativa (norma EN 206). L'analisi di un framework comparativo, basato su indicatori quantitativi (volumi di macerie, tecnologie) e qualitativi (quadro culturale, collaborazioni internazionali), tra l'esperienza italiana del secondo dopoguerra e la ricostruzione contemporanea dell'Ucraina evidenzia come il riuso delle macerie rappresenti oggi una componente strategica dell'innovazione nel settore delle costruzioni, che corrisponde al passaggio da una gestione emergenziale dei detriti a un approccio basato sull'economia circolare segna una trasformazione significativa nel modo di concepire la ricostruzione che vede il detrito come risorsa strategica e non più come ostacolo da rimuovere. L'impiego di aggregati riciclati nel calcestruzzo strutturale è oggetto di numerosi studi che ne dimostrano la fattibilità tecnica in specifiche condizioni progettuali (Xiao, 2018); nonostante

le barriere sul piano applicativo (corruzione e frammentazione istituzionale) bisogna sottolineare come anche la questione ucraina rappresenti una opportunità di cooperazione internazionale (RCA) per la ricostruzione post-conflitto. Per architetti e ingegneri, la sfida futura consiste nell'integrare le tecnologie di riciclo dei materiali nei processi di progettazione portando a interpretare il riuso delle macerie non solo come una necessità tecnica, ma anche come una strategia per ridurre l'impatto ambientale dei processi di ricostruzione, inquadrando il riuso delle macerie come un "kintsugi"[1] urbano dove la memoria materiale diventa strumento di rigenerazione sociale.

L'intelligenza ecologica impone oggi di guardare alle macerie con uno sguardo "a-valutativo", privo di pregiudizi, capace di trovarvi la semente per la ricostruzione. Mentre l'Italia ha offerto esempi isolati di genio pionieristico come il Monte Stella, l'Ucraina ha l'opportunità di sistematizzare queste pratiche attraverso tecnologie avanzate e standard di efficienza energetica elevati. In sintesi, questo studio dimostra come il detrito edilizio possa essere risorsa strategica per la ricostruzione resiliente, a condizione che tecnologia, normativa e partecipazione comunitaria siano integrate in un approccio circolare e transdisciplinare.

Riferimenti bibliografici

Augé, M. (2003). *Le temps en ruines*. Galilée.

Belardi, P. (2018). *Macerie prime: Ricostruire luoghi, ricostruire identità*. ABA Press.

Bottoni, P. (1954). *Il quartiere sperimentale QT8 della Triennale di Milano*. Editoriale Domus.

Camarra, C. (2025). *Progettare e ricostruire l'Ucraina: Uno sguardo verso un futuro di rinascita sostenibile* [Tesi di laurea, Università Telematica eCampus]. https://www.uniecampus.it

Capanna, A. (2016). *Progetti di riciclo: Cinque aree strategiche nella coda della cometa di Roma*. Aracne Editrice.

[1] Il Kintsugi è un'arte giapponese che ripara ceramiche rotte con lacca e polvere d'oro, il cui significato simbolico è trasformare le rotture e le imperfezioni in punti di forza e bellezza, non nascondendole ma valorizzandole, riflettendo resilienza, accettazione del passato e rinascita, rendendo l'oggetto (e la persona) ancora più prezioso e unico, legato ai principi dello Zen e del wabi-sabi.

Commissione Europea. (2020). *Piano d'azione per l'economia circolare: Per un'Europa più pulita e competitiva*. https://ec.europa.eu/environment/circular-economy

Hanoshenko, O. (2025). *Municipal solid waste and landfill management, reconstruction, and monitoring in post-war Ukraine*. https://forschung.boku.ac.at/en/projects/15388

Japan International Cooperation Agency. (2024). *Challenges of managing demolition waste (debris) in Ukraine*. https://www.jica.go.jp/english/

Martsynyuk, Y., & Khandogina, O. (2025). Key characteristics of war-related debris and their implications for local waste management. *Municipal Economy of Cities*. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-2-190-56-62

Safranov, T., Prykhodko, V., & Mykhailenko, V. (2024). Characteristics of demolition waste management in the regions of Ukraine. *Ukrainian Hydrometeorological Journal, 32*(1), 45–58. https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.07

Salata, S. (2024). Progettare la ricostruzione post-bellica in Ucraina: L'esperienza di Mykolaiv. *Urbanistica Informazioni, 314*, 9–12. https://doi.org/10.62661/ui314-2024-009

Shyshkin, E., Chernonosova, T., Haiko, Y., et al. (2023). Recycling of construction waste as an innovative direction of the program of post-war reconstruction of destroyed cities. *Cleaner Engineering and Technology*. https://doi.org/10.1002/cepa.2896

Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications. *Construction and Building Materials, 172*, 272–292. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.163

Transparency International. (2025). *Corruption in post-war reconstruction: The case of Ukraine*. https://www.transparency.org/

Wakefield, E. (2025, 2 giugno). In Ucraina le macerie di guerra diventano calcestruzzo per stampa 3D. *VoxelMatters*. https://voxelmatters.com

Xiao, J. (2018). *Recycled aggregate concrete: Structures and structural members*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53987-3

Upcycling dell'architettura industrializzata del secondo novecento: dall'inventario alle strategie di riuso delle componenti in acciaio

Upcycling of industrialized architecture from the second half of the 20th century: from inventory to reuse strategies for steel components

Cristian Tolù*

Dottorando, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Italy. *Cristian.tolu@uniroma2.it*

Stefania Mornati

Professoressa Ordinaria, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Italy. *Stefania.mornati@uniroma2.it*

Ilaria Giannetti

Professoressa Associata, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Italy. *Ilaria.giannetti@uniroma2.it*

Abstract: within the heritage of twentieth-century industrialised architecture, lightweight prefabrication systems represent a particularly significant field for investigating the reuse potential of building components, due to the standardisation of elements and the legibility of assembly processes. Within this framework, the present contribution proposes a procedure to translate industrialized buildings at the end of their service life into an inventory of traceable steel components and, subsequently, into estimated avoidable $kgCO_2eq$ emissions.

The work is structured into the following phases: the development of a GIS-HBIM census of industrialised buildings characterised by lightweight systems in the Lazio region; the identification of a homogeneous cluster of buildings with steel-based systems, corresponding to the BDS-Tecnosider school programme; and the in-depth investigation of the case study of the "Alessandro Volta" Technical Institute in Tivoli.

For this case study, an as-built BIM model was developed from a knowledge base derived from archival sources, technical documentation, on-site surveys, and recent technical and performance-related data, with the specific aim of identifying the building's steel components. The model was then used to generate an inventory of the steel elements currently present in the structure. On this basis, the Life Cycle Inventory was defined, and a preliminary LCA was carried out to quantify the

* Autore corrispondente

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

potential avoided $kgCO_2eq$ emissions from the reuse of the existing stock of steel components.

The study shows how a BIM/GIS census, integrated with information modelling and environmental assessment tools, can support the analysis of existing buildings by considering them as a source of reusable materials and components. From this perspective, the Tivoli case study provides a valuable testing ground for verifying replicable procedures for the identification, inventorying, and environmental valorisation of steel components in twentieth-century industrialised buildings.

Keywords: prefabricated buildings, steel, reuse, BIM, LCA.

1. Introduzione

Nel secondo Novecento la prefabbricazione ha sostenuto la crescita edilizia europea attraverso standardizzazione, modularità e ripetibilità (Giannetti, 2016a; Giannetti, 2016b). In Italia tali processi hanno interessato in modo significativo l'edilizia scolastica, spesso con strutture metalliche, componenti leggere e montaggio a secco (Giannetti, 2016b; Mornati, 2025, Giannetti, 2024). Una parte di questo patrimonio richiede oggi adeguamenti prestazionali, ma può essere letta anche come riserva di materiali e componenti. In questa prospettiva, decostruzione selettiva, riuso e riciclo assumono un ruolo centrale (Ente nazionale Italiano di Unificazione, 2020). Gli edifici realizzati con sistemi di prefabbricazione leggera, per organizzazione dei sottosistemi e leggibilità dei nodi, risultano coerenti con i principi del Design for Disassembly (International Organization for Standardization, 2020; Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica, 2023).

Ne consegue che, il censimento digitale, supportato da modelli informativi e spaziali, degli edifici industrializzati consente di localizzare, classificare e selezionare casi omogenei, avviando la costruzione di uno stock materiale potenziale (Mornati, 2025). L'integrazione tra GIS e BIM/HBIM collega i dati territoriali e storico-tecnici alla scala del componente (European Committee for Standardization, 2019). In questo quadro il contributo si concentra sull'acciaio impiegato nelle scuole prefabbricate del secondo Novecento, in ragione del suo ruolo strutturale e della riconoscibilità di profili, serialità e connessioni meccaniche, che facilitano scomposizione,

tracciabilità e quantificazione (Giannetti, 2024; Nawrocka et al., 2023; Soust-Verdaguer et al., 2023).

Il ricorso al modello BIM, inoltre, costituisce lo strumento centrale per mettere a sistema le analisi conoscitive con la costruzione di un inventario di componenti in acciaio, potenzialmente riutilizzabili in altri contesti. In tal senso, il modello rappresenta la base per la costruzione di una raccolta di dati ambientali associati a un prodotto, "Life Cycle Inventory", e la valutazione preliminare di tale potenziale per associarlo al riuso delle componenti, espresso in $kgCO_2eq$ potenzialmente evitabili (Soust-Verdaguer et al., 2023; Gao et al., 2024; European Committee for Standardization, 2011).

Il contributo si distingue per l'impiego congiunto di BIM e LCA, già ampiamente indagato in letteratura, per la valutazione di costruzioni esistenti ai fini del riuso delle componenti.

2. Metodo

Il metodo collega censimento, conoscenza dell'opera, BIM, disassemblaggio, inventario, LCI e LCA. Il censimento GIS-HBIM del patrimonio delle costruzioni industrializzate, caratterizzate da sistemi leggeri, nella regione Lazio, è assunto come base conoscitiva per individuare edifici omogenei per tipologia e sistemi costruttivi, con particolare riferimento a quelli caratterizzati da strutture in acciaio e sistemi a secco con connessioni leggibili (Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2017).

Segue la costruzione della base conoscitiva mediante fonti storiche e tecniche, rilievo dello stato di fatto e documentazione prestazionale, necessaria a ricostruire la logica assemblativa, la gerarchia dei sottosistemi e le condizioni attuali dell'edificio (Giannetti, 2024). Su questa base viene sviluppato il modello BIM as-built come supporto informativo per identificazione, classificazione ed estrazione quantitativa degli elementi in acciaio (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica, 2023; Studio Baffo S.r.l., 2024).

Il modello supporta, quindi, le analisi preliminari dello smontaggio dell'edificio considerando accessibilità, indipendenza, connessioni, standardizzazione, serialità e separabilità dei componenti (Tolù et al., 2024; Bologna et al., 2024). Da tale processo deriva l'inventario delle componenti in acciaio, definito da attributi minimi quali tipologia, profilo, posizione,

quantità e massa (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica, 2023; Nawrocka et al., 2023). Il BIM fornisce i dati per il Life Cycle Inventory, costruito sulle componenti effettivamente presenti nello stato attuale (European Committee for Standardization, 2011). Infine, l'analisi LCA attribuisce allo stock attuale un valore ambientale espresso in $kgCO_2eq$ potenzialmente evitabili.

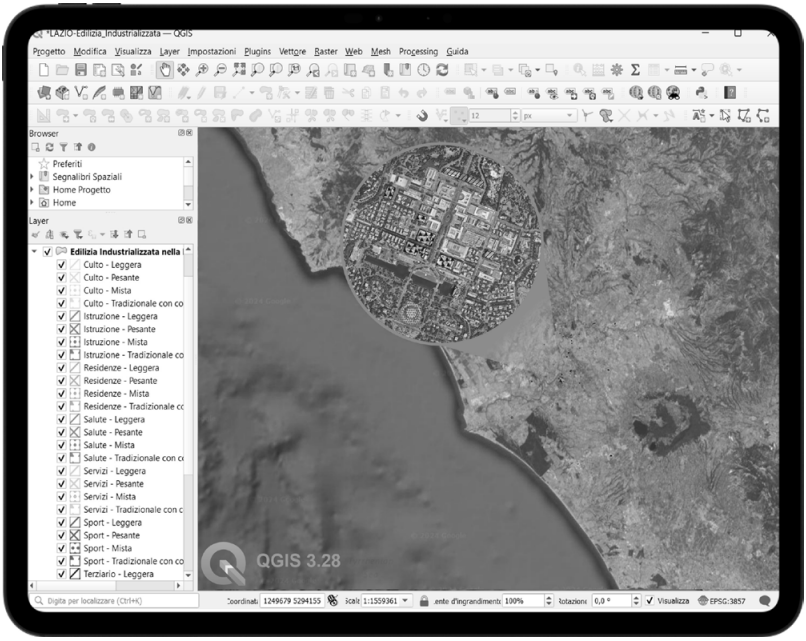


Figura 1. Censimento su piattaforma Web-GIS [Fonte: elaborazione degli autori].

Il modello supporta, quindi, le analisi preliminari dello smontaggio dell'edificio considerando accessibilità, indipendenza, connessioni, standardizzazione, serialità e separabilità dei componenti (Tolù et al., 2024; Bologna et al., 2024). Da tale processo deriva l'inventario delle componenti in acciaio, definito da attributi minimi quali tipologia, profilo, posizione, quantità e massa (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica, 2023; Nawrocka et al., 2023). Il BIM fornisce i dati per il Life Cycle Inventory,

costruito sulle componenti effettivamente presenti nello stato attuale (European Committee for Standardization, 2011). Infine, l'analisi LCA attribuisce allo stock attuale un valore ambientale espresso in $kgCO_2eq$ potenzialmente evitabili.

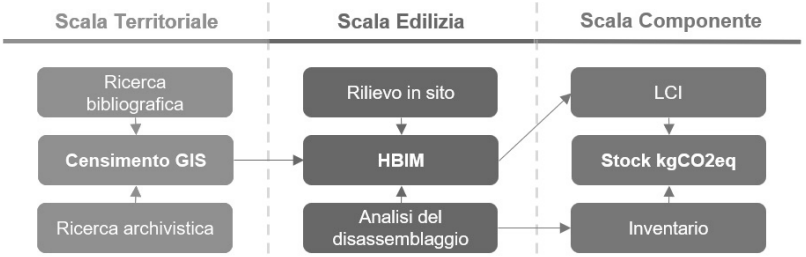


Figura 2. Workflow [Fonte: elaborazione degli autori].

3. Caso studio

Il metodo è stato applicato all'Istituto Tecnico Industriale "Alessandro Volta" di Tivoli, selezionato nel patrimonio censito per appartenenza al sistema BDS-Tecnosider, caratterizzato da una struttura metallica prefabbricata a secco, serialità dei componenti e leggibilità dei nodi bullonati (Mornati, 2025; Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2017; Tolù et al., 2024; Leveroni, 1968). Il complesso, articolato in più blocchi, presenta telai metallici a interasse regolare, travi principali e secondarie in profili standardizzati, controventi e coperture leggere, caratteristiche che ne rendono leggibile di la logica gi assemblaggio (Studio Baffo S.r.l., 2024; Archivio Centrale dello Stato, 2024; Archivio Ufficio Tecnico ITI A. Volta, 2024; Tecnosider S.p.A., 1962).

La procedura descritta si è, dunque, sviluppata secondo quattro fasi principali: i) conoscenza dell'opera e costruzione del modello BIM ii) valutazione della potenzialità di disassemblaggio; iii) costruzione dell'inventario dei componenti, iv) analisi LCA.

Relativamente alla prima fase, la conoscenza dello stato di progetto è stata costruita integrando le seguenti fonti archivistiche, bibliografiche e tecniche: Archivio Centrale dello Stato, archivio tecnico dell'Istituto,

documentazione di Roma Città Metropolitana, studi sul sistema Tecnosider e sul caso di Tivoli. Su tali basi sono stati ricostruiti impianto originario, logica modulare e principali dettagli costruttivi.

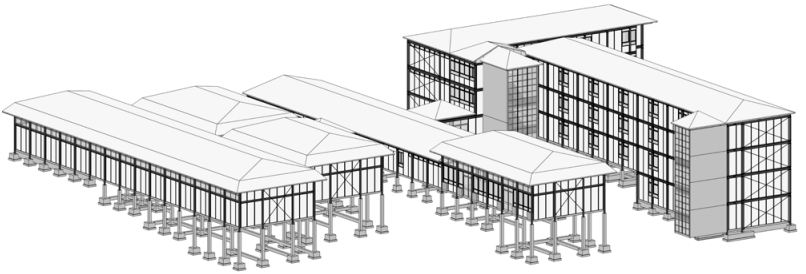


Figura 3. Istituto Tecnico Industriale Alessandro Volta a Tivoli [Fonte: elaborazione degli autori].

Lo stato as-built è stato definito mediante rilievi speditivi, geometrici, fotografici e acquisizioni laser scanner LiDAR. Su questa base è stato sviluppato il modello BIM con LOD G, in coerenza con la UNI 11337-4:2017 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2017). Nel modello sono confluite ulteriori informazioni provenienti da fonti e rilievi, comprese le proprietà materiche ricavate dalle analisi di vulnerabilità sismica e dalla documentazione tecnico-prestazionale fornita da Roma Città Metropolitana (Studio Baffo S.r.l., 2024; Tecnosider S.p.A., 1962).

Il modello informativo è stato, in seguito, utilizzato per interpretare il sistema costruito in termini di processo di disassemblaggio (Tolù et al., 2024; Bologna et al., 2024). L'analisi ha considerato accessibilità del sito, organizzazione delle operazioni di smontaggio, flessibilità dell'assetto spaziale, proprietà del sistema strutturale e livello di conoscenza storico-documentale disponibile. Il disassemblaggio ha così definito le condizioni preliminari per l'identificazione delle parti in acciaio inventariabili.

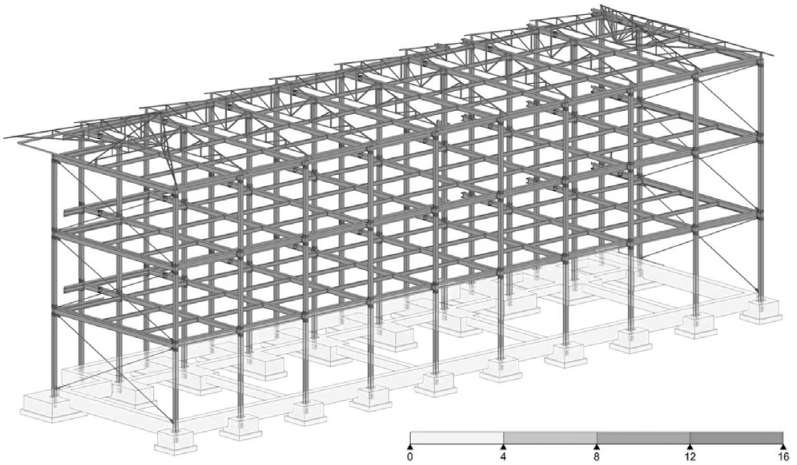


Figura 4. Analisi dell'indice di disassemblaggio [Fonte: elaborazione degli autori].

Dal BIM è stato quindi elaborato l'inventario delle componenti in acciaio presenti nell'edificio. L'inventario organizza tipologia, profilo, quantità, massa e ulteriori attributi, trasformando il manufatto in uno stock leggibile in funzione del riuso. Esso deriva direttamente dal modello BIM, assunto come base dati interrogabile per l'estrazione quantitativa delle componenti in acciaio.

Infine, ancora dal modello BIM sono stati estratti quantità e masse delle componenti in acciaio per costruire il Life Cycle Inventory. Su tale base, l'analisi LCA attribuisce allo stock attuale di acciaio un valore espresso in $kgCO_2eq$ potenzialmente evitabili, assumendo le componenti presenti come risorsa materiale disponibile. La valutazione è stata sviluppata in coerenza con le EN 15804 ed EN 15978, considerando per gli elementi riusabili i soli moduli A1-A3, in quanto contributi evitabili nel caso di riuso. La sostituzione è stata assunta in rapporto 1:1 rispetto a componenti equivalenti, sulla base della qualità dell'acciaio riscontrata in sito e delle indagini condotte nell'ambito delle recenti analisi di vulnerabilità sismica; i fattori di emissione sono stati selezionati consultando diversi database ed EPD, privilegiando i prodotti maggiormente rappresentativi e localizzati quanto più possibile in prossimità del contesto di studio. Sono stati esclusi

i trasporti, nell'ipotesi di riuso in sito, così come le fasi successive, in quanto dipendenti da futuri scenari progettuali, fermo restando il comune beneficio derivante dall'evitare i moduli A1-A3. Il caso studio diventa così banco di prova per una procedura che restituisce una misura preventiva del potenziale ambientale associato al riuso dello stock esistente.

Tabella 1. Estratto dell'inventario delle componenti in acciaio riutilizzabili. [Fonte: elaborazione degli autori].

Famiglia	Tipo	Lunghezza del taglio (m)	Conteggio
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	1.252	70
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	5.452	14
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	6.252	14
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	6.448	1
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	6.520	1
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	7.435	1
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	7.460	6
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	7.461	2
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	7.794	3
STR-BEAM-HE-STEEL	HE 120A	8.942	27
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	0.080	4
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	0.107	74
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	0.115	2
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	0.119	10
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	1.034	3
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	1.294	3
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	2.407	1
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	3.399	288
STR-BEAM-IPE-STEEL	IPE 180	3.694	6

4. Risultati

L'applicazione del metodo al caso studio ha trasformato il sistema edilizio in uno stock di componenti in acciaio riconoscibili, quantificabili e valutabili dal punto di vista ambientale. L'inventario, ricavato dal modello BIM as-built, ha restituito 18420 elementi in acciaio, per una massa complessiva pari a 216 777 tonnellate. Lo stock risulta caratterizzato da ripetitività tipologica, riconoscibilità geometrica e continuità materica, in coerenza con il sistema Tecnosider.

Dai dati estratti dal BIM è stato costruito il Life Cycle Inventory; la successiva LCA ha attribuito allo stock un valore preliminare pari a 2,13E+05 $kgCO_2eq$ potenzialmente evitabili. Il risultato quantifica il valore ambientale incorporato nello stock esistente e fornisce una base preventiva per qualificazione tecnica, selezione dei componenti e futuri scenari di valorizzazione.

Nello specifico, il dato risulta particolarmente rilevante poiché i moduli A1-A3, assunti come contributi evitabili nel caso di riuso, rappresentano circa il 93% delle emissioni associate agli elementi in acciaio, confermando la rilevanza di tale strategia per futuri scenari di valorizzazione.

Il metodo ha mantenuto continuità tra scala territoriale, edilizia e del componente, mostrando come un patrimonio censito possa essere reinterpretato come stock materiale e ambientale, disponibile a nuove utilizzazioni. Il caso Tivoli costituisce quindi un test applicativo estendibile ad altri edifici del medesimo cluster o a organismi con strutture in acciaio e sistemi a secco. Il BIM è stato usato per identificazione univoca degli elementi, estrazione delle quantità, costruzione dell'inventario e strutturazione dell'LCI.

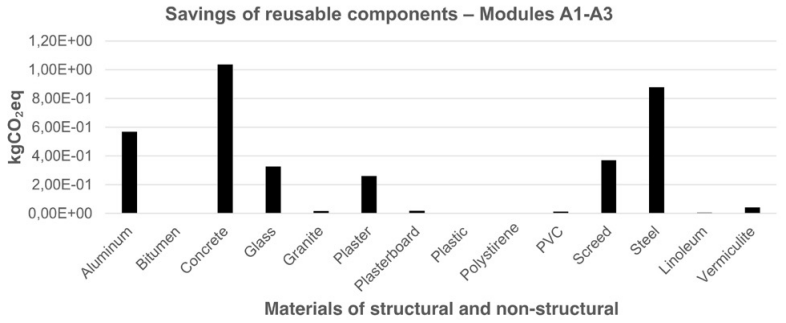


Figura 5. Impatti evitabile delle risorse caratterizzanti [Fonte: elaborato degli autori].

5. Conclusioni

Il contributo ha proposto un percorso che collega censimento GIS, conoscenza dell'opera, BIM, disassemblaggio, inventario delle componenti, LCI e LCA per valutare preliminarmente il potenziale di riuso delle componenti in acciaio di un edificio scolastico industrializzato. L'applicazione all'ITI "Alessandro Volta" di Tivoli ha verificato la coerenza della procedura e la possibilità di costruire, a partire dal modello informativo, un inventario mirato delle componenti in acciaio e una stima della CO_2eq potenzialmente evitabile.

Il censimento GIS-HBIM è stato usato, ai fini del raggiungimento del primo obiettivo della ricerca, per riconoscere uno stock edilizio omogeneo e selezionare casi pertinenti. Il secondo obiettivo era sviluppare un metodo capace di garantire la tracciabilità degli elementi, l'estrazione delle quantità e la costruzione della base dati necessaria all'LCI; in questa prospettiva, la ricostruzione di un modello BIM, basata sull'integrazione tra documenti storici e rilievi in sito, si è configurata come lo strumento più idoneo (Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2017; European Committee for Standardization, 2011; European Committee for Standardization, 2019). L'analisi ha mostrato che lo stock attuale dell'edificio può essere espresso anche in termini ambientali.

Il caso studio conferma l'utilità di un approccio progressivo che tiene in relazione scala territoriale, scala edilizia e scala del componente e che può essere ripreso per altri edifici del cluster Tecnosider e, con opportune verifiche, per ulteriori casi con strutture in acciaio e sistemi a secco. La replicabilità dipende da disponibilità di fonti, qualità del rilievo, coerenza del modello BIM e livello di dettaglio dell'inventario.

Riferimenti bibliografici

Archivio Centrale dello Stato (2024). "Documentazione tecnica e fotografica relativi all'ITI A. Volta a Tivoli", Fondo Pietro Barucci, Roma.

Archivio Ufficio Tecnico ITI A.Volta (2024). "Documentazione tecnica e fotografica relativa all'ITI A. Volta a Tivoli", Tivoli.

Bologna, A., Garcia-Fuentes, J. M., Giannetti, I. & Neri, G. (a cura di) (2024). Design Workshop Results. Upcycling Architecture in Italy: Forging and Promoting a Renewed Building Culture. Torino: Politecnico di Torino.

Ente Nazionale Italiano di Unificazione. (2017). "Edilizia e opere di ingegneria civile—Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni—Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti". (UNI 11337-4:2017).

Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2020). "Decostruzione selettiva – Metodologia per la decostruzione selettiva e il recupero dei rifiuti in un'ottica di economia circolare". Milano, UNI (UNI/PdR 75:2020).

European Committee for Standardization. (2011). "Sustainability of construction works—Assessment of environmental performance of buildings—Calculation method". (EN 15978:2011).

European Committee for Standardization. (2019). "Sustainability of construction works—Environmental product declarations—Core rules for the product category of construction products". (EN 15804:2012+A2:2019).

Gao, H., Wang, D., Du, X. e Zhao, Z. (2024). "An LCA-BIM integrated model for carbon-emission calculation of prefabricated buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 203, 114775. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114775

Giannetti, I. (2016a). "Project and prototype: Industrialized and prefabricated construction in Italy (1945-1980)", *TEMA*, 1, pp. 25-30.

Giannetti, I. (2016b). "The design of a system. Industrialized schools in Italy (1960-1975)", *TEMA*, 2.

Giannetti, I. (2024). Esercizi di industrializzazione: sperimentazione costruttiva per l'edilizia scolastica (1951-1979). Milano: FrancoAngeli.

International Organization for Standardization. (2020). Sustainability in buildings and civil engineering works—Design for disassembly and adaptability (ISO 20887:2020).

Leveroni, A. (1968). "Un istituto tecnico industriale a Tivoli", *Prefabbricare*, 11, pp. 45-48.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica. (2023). "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici". (D.Lgs. 36).

Mornati, S. (a cura di) (2025). La prefabbricazione leggera nel Lazio. Milano: FrancoAngeli.

Nawrocka, N., Machova, M., Jensen, R. L., Kanafani, K., Birgisdottir, H. e Hoxha, E. (2023). "Influence of BIM's level of detail on the environmental impact of buildings: Danish context", *Building and Environment*, 245, 110875. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110875

Soust-Verdaguer, B., Obrecht, T. P., Alaux, N., Hoxha, E., Saade, M. R. M., Röck, M., ... & Passer, A. (2023). "Using systematic building decomposition for implementing LCA: The results of a comparative analysis as part of IEA EBC Annex 72", *Journal of Cleaner Production,* 384, 135422. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135422

Studio Baffo S.r.l. (2024). "Documentazione tecnica sulle strutture. Analisi della vulnerabilità sismica".

Tecnosider S.p.A. (1962). "Elemento fondamentale per la realizzazione di costruzioni edili ad elementi prefabbricati con particolare impiego di materie metalliche", brevetto italiano n. 671799, depositato il 13/07/1962, Italia.

Tolù, C., Mornati, S. e Giannetti, I. (2024). "Enhancing the heritage of light prefabrication in Italy: A digital platform to support 'selective dismantling" in Cardaci, A., Picchio, F. e Versaci, A. (a cura di), *ReUSO 2024. Documentation, Restoration and Reuse of Heritage*, PUBLICA, Alghero. pp. 1612–1621.

Increasing circularity of small-scale wind turbines: the PANORAMA vertical axis prototype

Massimiliano Condotta
Associate Professor, Università Iuav di Venezia – Department of Architecture and arts, Italy. *condotta@iuav.it*

Tommaso Morbiato
Independent researcher, Windcity S.r.l., Italy. *tommaso@windcity.it*

Chiara Scanagatta
Researcher, Università Iuav di Venezia – Department of Architecture and arts, Italy. *cscanagatta@iuav.it*

Elisa Zatta*
Researcher, Università Iuav di Venezia – Department of Architecture and arts, Italy. *ezatta@iuav.it*

Abstract: despite the extensive research to optimise the performance of large- and small-scale wind turbines, little research has been conducted on design choices to improve the circularity of their components. Considering the relatively short life expectancy of these systems and, above all, their prospected contribution in increasing the sustainability of built and natural environments through diffused networks, this matter crucially shifts their impacts from the energy dimension to the material resources one.

Starting from this premise, the Interreg project PANORAMA tackled the issue by designing and producing a prototype of a vertical axis micro-wind turbine which implements recyclable, renewable and reused materials in a fully reversible assembly system. The exploration of alternative materials and reversible connections also allowed expanding the investigation to another domain of the project: the landscape integration of renewable energy production systems, including site restoration. The investigation resulted in improving the material efficiency of a renewable energy production system in a life-cycle perspective while preserving its performance, that will soon be field-tested.

The article frames the research by presenting the state of the art on large- and small-scale wind turbines, illustrating their difficult circular management despite current technological improvements. It then introduces the prototype and the theoretical framework behind its design, describing its technical features and the design choices on materials and assembly systems. The potential of implementing

* Corresponding author

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

reversibility, recyclable content, material substitution, and upcycling in these systems will then be described, in light of both their ecological relevance and the prospected diffused integration within urban and landscape contexts.

Keywords: micro-wind turbines, reversible installation, recyclable materials, renewable materials, upcycling.

1. Introduction

Renewables play a central role in the European strategy supporting a sustainable and just transition, a position recently upheld by the 2023 revision of the Renewable Energy Directive, raising the EU's binding target for the share of renewable energy to a minimum of 42.5 % by 2030 (European Parliament, 2023). Besides large-scale production plants, this framework also relies on prosumers and Renewable Energy Communities (RECs) to support small-scale green energy systems – photovoltaic (PV), wind and hydropower ones (Corasaniti et al., 2025). Intended as distributed and community-based, these elements could become widespread in future European urban and natural contexts. Nevertheless, the devices most used in these installations currently fail to comply with circular principles due to technological, financial and environmental challenges (Condotta et al., 2023). As in the coming decades these systems will be increasingly produced – and discarded, addressing their impacts across the entire life cycle is therefore essential. This will enable their full contribution to sustainable consumption and production patterns in the built environment.

Focusing on wind turbines (WTs), technological advancements further intensify this trend (Liu & Barlow, 2017) by shortening their average lifespan through increased repowering opportunities (Jadali et al., 2021) and the replacement of old components and models with more efficient ones (Jensen and Skelton, 2018). At the end of their life, even components that fall outside the scope of the Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (WEEE) are difficult to manage through circular patterns due to complex assembly systems and used materials.

Although modular, WTs are generally not designed for disassembly. This also applies to small-scale devices implemented in RECs (micro- and mini-WTs), which differ from large-scale units in configuration: the former ones employ a vertical axis system (VAWTs) rather than a horizontal one (HAWTs) (Table 1). Concerning materials, two modules in both HAWTs and VAWTs involve downcycling or even less suited processes once decommissioned: the foundations or base, realised in reinforced concrete, and the wind turbine blades (WTBs), usually made of glass fiber-reinforced plastics composites (GFRP), which are difficult to dispose of and often landfilled (Firoozi et al., 2024). To mitigate this drawback, current research explores the repurposing of decommissioned durable GFRP blades as structural components, promoting circularity within the construction industry (André et al., 2024) (Ramaswamy et al., 2025). On the other hand, the tower module is typically made from steel or aluminium alloys, ensuring higher recyclability rates.

Table 1. Different modules composing HAWTs and VAWTs. [source: authors].

HAWTs: main modules	
Module	**Function**
Tower	Elevates rotor to stronger winds, carries loads to the foundation
Nacelle	Houses gearbox, generator, brake and turbine control systems
Rotor	Converts wind energy into rotational mechanical torque
Blades (WTBs)	Capture wind and produce lift to spin the rotor
Foundations	Anchors the tower, transfers loads to the ground
VAWTs: main modules	
Module	**Function**
Structure	Holds rotor and shaft while resisting wind loads
Generator	Converts shaft rotation into electrical power
Central shaft	Vertical axis transmitting torque from blades to generator
Blades (WTBs)	Extract energy from wind flows
Bearings/base	Support shaft rotation, transfers loads to ground/structure

While issues related to assembly systems and materials concern both large- and small-scale WTs, the latter appears a more dynamic field of study as the scale factor encourages experimentation. Nonetheless, current research primarily focuses on efficiency improvements, such as aerodynamic optimization in the blades design (Yossri et al., 2021) or modular features easing WTs adaptation and resizing (Muñoz-Palomeque et al., 2025). Few studies address circular design, either by proposing material substitution strategies (Firoozi et al., 2024) or design for reuse (Gast et al., 2024); none suggest alternatives to their perceived permanent nature – a circumstance hindering WT's social acceptance, whereas a careful landscape integration should be fostered (Bianchini et al., 2022).

2. Aim and methods

This contribution illustrates a specific experimental study carried out as part of the Interreg project PANORAMA.[1] The project's aim is to support decision-making processes for the development of RECs through the installation of photovoltaic and wind systems, based on (i) local climate conditions, (ii) technical-economic feasibility, and (iii) landscape or urban integration. Within the research, a micro-VAWT prototype was designed and developed considering these three points and two key criteria: full reversibility and a low material footprint compared to current practice.

The paper presents the design of the prototype, detailing its technical features. It then examines strategies informed by circular principles and reduced material footprint across three modules of the WT: the base (reversibility), the structure (renewable material), and the blades (recyclable material, upcycling).

[1] The Interreg VI-A Italy-Austria 2021-2027 project PANORAMA "PiANificazione di cOmunità eneRgetiche AMbientalmente e pAesaggisticamente sostenibili - PlANung von umweltschOnenden und landschaftlich gerechten eRneuerbAren" (2023-2026) involves 7 partners: Università degli Studi di Udine, Research Studios Austria mbH, Università Iuav di Venezia, Consorzio BIM Piave, CML S.r.l., Consorzio NIP, Ökostrombörse Salzburg.

3. The prototype

3.1. General features and components

The prototype is an innovative small-scale H-rotor vertical axis wind turbine based on a Passive Variable-Geometry (PVG) technology, designed by the project partner CML srl.[2] Its dynamic functioning relies on an automatic wind-driven adjustment mechanism (passive) that regulates the blades configuration (variable geometry) in both radius (850 to 1050 mm) and pitch (max +/-20°), with no electronic input required. This allows to optimize the efficiency of the WT also in small-scale installations, leveraging the changing wind conditions at different elevations within urban and natural environments, and allowing an optimal efficiency also in case of turbulence. The prototype was designed to be readily integrated with PV systems and to operate entirely off grid.

Table 2 specifies the features of the prototype, while Figure 1 shows a digital mock-up which studies the proper WT integration in a natural context consistent with the project pilot areas (pre-alpine sites in the Italian and Austrian territory).

Table 2. Features of the prototype.

Module	Features
Structure	Three GL24h glulam beams of variable length, approx. 300 cm (consistent with the shaft positioning, 235 cm from the base)
Generator	IV Class, IEC 61400-2
Central shaft	Aluminium alloy extrusion EN AW-6063 T5, additive manufacturing PA12
Blades	Three elements, 1900 x 250 x 50 mm each
Bearings/base	External radius of the three beams at the base up to 90 cm
Foundation	Steel screw piles supporting a prefab concrete base

[2] CML co-founded Windcity srl, startup that develops small-scale wind turbines designed for urban and suburban environments.



Figure 1. Render of the prototype. [Source: authors, courtesy of Ivan Del Ponte].

Geographical and climate features of the pilot areas influenced the prototype dimensions, as its design was based on the local pattern of wind flows. Landscape integration was addressed minimising the base plinth and choosing finishings suited with the specific environment.

3.2. Materials and assembly systems

In terms of circularity, the modules were devised to be completely disassembled thanks to the use of mechanical connections, up to the reversible foundations.

Besides strictly mechanical and electric components, research maximised the use of recyclable, renewable, or upcycled content in the modules to enhance sustainability compared to current practice:

- The WT base must ensure the transfer of wind and shaft rotation loads to the ground; therefore, the foundation reversibility must be carefully balanced with the need of a device safely performing. The research group opted for a system of small steel helical anchors that can be screwed/unscrewed to the ground (Figure 2), linked by steel rods to a prefabricated concrete block providing the structure footing.



Figure 2. Reversible foundation system (screw piles). [Source: Tommaso Morbiato].

- The support structure consists of four glulam beams. All connections are reversible: flat and T-shaped steel plates are inserted in the beams' width to ensure the connection with the rotor and the concrete base respectively. While the steel plates are welded to the shaft, beams-plates fastening is achieved by through-hole bolts (Figure 3); the connection to the concrete base uses steel rods (Figure 4).



Figure 3. Connection of the glulam structure to the shaft.
[Source: authors, courtesy of Ivan Del Ponte].



Figure 4. Connection of the glulam structure to the prefabricated concrete base [source: authors, courtesy of Ivan Del Ponte].

- The blades design is the most complex part of a micro-VAWT: they must be lightweight while ensuring high resistance. Since the recycled content in GFRP blades is limited to 10 % to ensure the necessary mechanical strength, a material substitution strategy was adopted. The innovative design features a thin aluminium 'hull' structure, defining the geometric shape of the blade, enclosed by PVC sheets reclaimed from lorry tarpaulins (Figures 5 and 6).

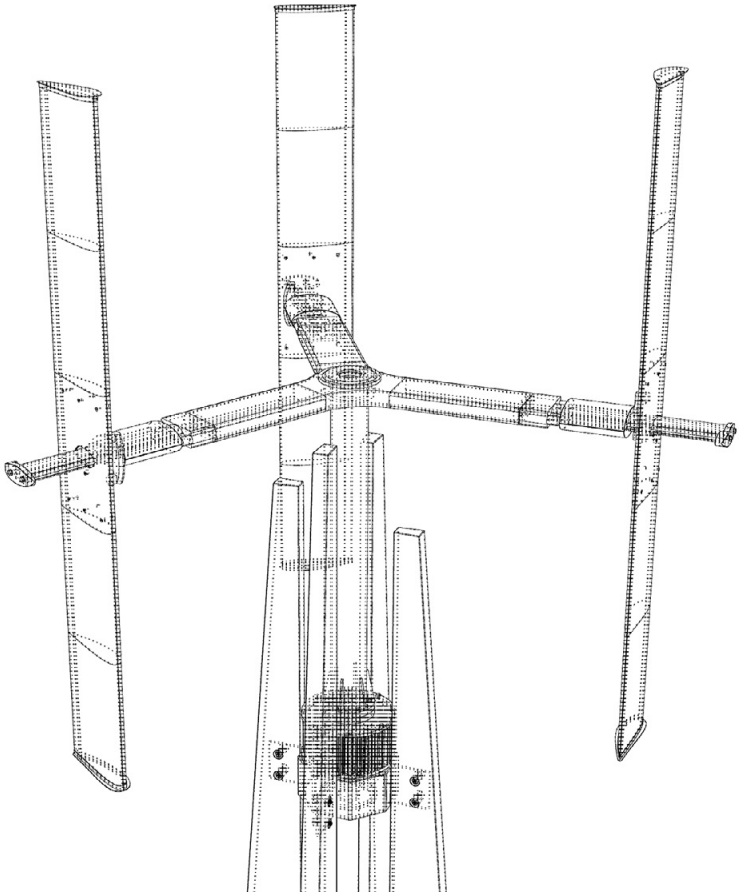


Figure 5. Micro-VAWT blades' technical drawing: detail.
[Source: authors, courtesy of Ivan Del Ponte].

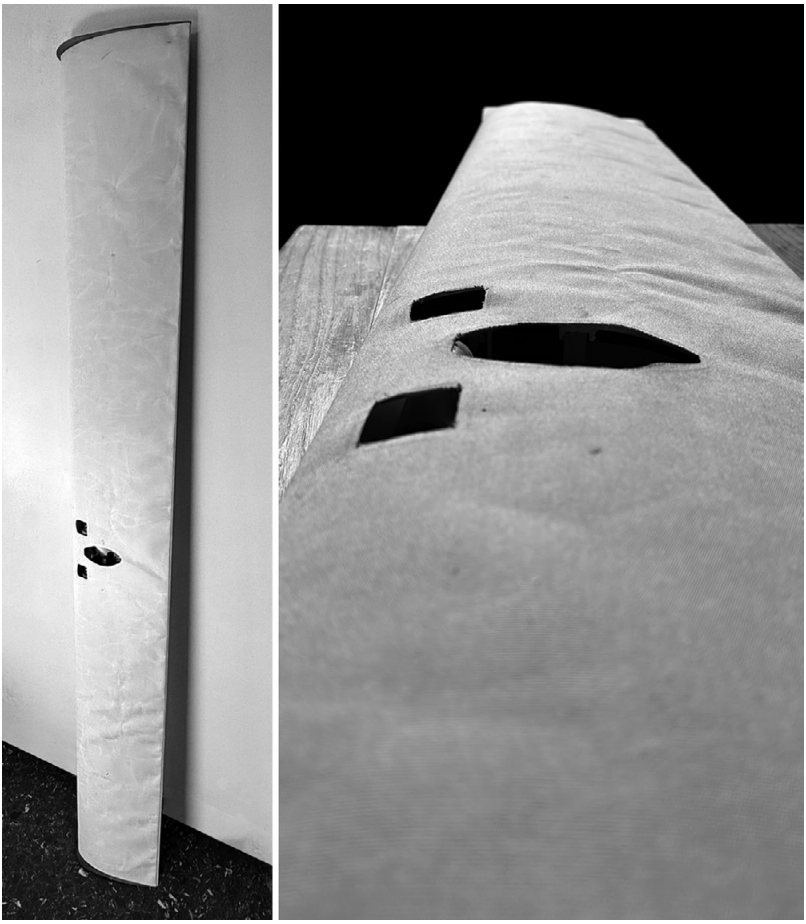


Figure 6. First prototype of the upcycled PVC blade envelope. [Source: CML srl].

The system assembly of the prototype is fully reversible, ensuring operational stability. Structural needs also informed the selection of the concrete base: although not an inherently circular material, the reversible connections to the screw piles enable full disassembly and reuse, in addition to site restoration. The structure design employs a renewable and less energy-intensive material compared to common alternatives: glulam. Albeit less durable and generally downcycled, the research group opted for it

to comply with the landscape integration criteria. While material choices for the base and structure remain subject to further investigation, the fully recyclable aluminium blades, also integrating upcycled PVC elements, represent the most innovative feature of the micro-WT design in terms of circularity.

The prototype was realised and it is expected to be installed in the pilot area in summer 2026, to validate the aluminium and PVC efficiency for the blades and the overall turbine aerodynamic performance, as well as the glulam durability.

4. Conclusion: circular strategies for micro-wind turbines

The research investigated circular improvements in the assembly systems and material footprint for micro-wind turbines, supported by the design and production of a prototype. Reversible connections were implemented in the whole WT, including a removable and reusable foundation system enabling full disassembly and site restoration. The devised blades, engineered using recyclable materials and upcycled elements, provide valuable insight into alternatives to the environmentally critical GFRP composites. The wood-based structure, designed to enhance integration within natural contexts, will be tested for durability and functionality once the prototype is installed.

The research is a first step in filling the state-of-the-art gaps in the circular design of wind turbines. By addressing both the necessary increase in renewable energy production and the lack of circularity of related devices, it supports the significant role of diffused small-scale installations in future sustainable built environments. The illustrated approach implements four strategies – reversibility, recyclable content, material substitution and upcycling, to reduce both material footprint and the degradation of natural or anthropogenic landscapes, also supporting increased acceptance of these technologies.

Bibliographic references

André, A., Bru, T., Abbasi, A. G., Sinha, S., Nunes, S., Juntikka, M., Kazmierczak, K., Egilsson, N. Ó., Frid, G., Sobczyk, M., & Haghani, R. (2024). A Holistic and Circular Approach for Managing End-of-Service Wind Turbine Blades. *Sustainability*, *16*(17), 7858. https://doi.org/10.3390/su16177858

Bianchini, A., Bangga, G., Baring-Gould, I., Croce, A., Cruz, J. I., Damiani, R., Erfort, G., Simao Ferreira, C., Infield, D., Nayeri, C. N., Pechlivanoglou, G., Runacres, M., Schepers, G., Summerville, B., Wood, D. and Orrell, A. (2022). Current status and grand challenges for small wind turbine technology, Wind Energy Science, *7*(5), 2003-2037, https://doi.org/10.5194/wes-7-2003-2022

Condotta, M., Scanagatta, C., Zatta, E. (2023). Lost in transition: The burden of material resources for renewable energy sources, in Baratta A., Calcagnini L., Magarò A. (eds.), *Recycling: Il valore della materia nella transizione ecologica del settore delle costruzioni. Atti del V Convegno Internazionale, 26 maggio 2023, Università degli studi di Roma Tre – Dipartimento di architettura*, pp. 68-79. Conegliano: Anteferma.

Corasaniti, S., Coppa, P., Atzori, D., & Rehman, A. U. (2025). Renewable Energy Communities (RECs): European and Worldwide Distribution, Different Technologies, Management, and Modeling, *Energies*, *18*(15), 3961, https://doi.org/10.3390/en18153961

Liu, P., & Barlow, C.Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management, 62*, 229-240, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007

European Parliament (2023). Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652.

Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., & Hejazi, F. (2024). Innovations in Wind Turbine Blade Engineering: Exploring Materials, Sustainability, and Market Dynamics. *Sustainability, 16*(19), 8564. https://doi.org/10.3390/su16198564

Gast, L., Meng, F., Morgan, D. (2024). Assessing the circularity of onshore wind turbines: Using material flow analysis for improving end-of-life resource management, *Resources, Conservation and Recycling, 204*, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107468

Jadali, A.M., Ioannou, A., Salonitis, K. et al. (2021). Decommissioning vs. repowering of offshore wind farms—a techno-economic assessment. *Int J Adv Manuf Technol, 112*, 2519-2532, https://doi.org/10.1007/s00170-020-06349-9

Jensen, J.P., Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *97*, 165-176, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041

Muñoz-Palomeque, E., Esteban, S., & Santos, M. (2025). Mechanical Design and Experimental Study of a Small-Scale Wind Turbine Model. *Machines, 13*(10), 929. https://doi.org/10.3390/machines13100929

Ramaswamy, N., Joshi, B., Song, G., Mo, Y.L. (2025). Repurposing decommissioned wind turbine blades: A circular economy approach to sustainable resource management and infrastructure innovation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 215*, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115629

Yossri, W., Samah B.A., Abdessattar A. (2021). Airfoil type and blade size effects on the aerodynamic performance of small-scale wind turbines: Computational fluid dynamics investigation, *Energy 229*, 120739, https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120739

Nano-silica engineered cementitious matrices for sustainable construction: coupling mechanical strength with reduced thermal conductivity

Andres Salas-Montoya

Associate Professor, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Colombia. *asalasmo@unal.edu.co*.

Abstract: improving the energy efficiency of buildings requires materials capable of reducing heat transfer while maintaining structural performance. Conventional strategies for lowering the thermal conductivity of cementitious materials typically rely on increasing porosity or incorporating lightweight fillers, which often reduce mechanical strength and durability. This study investigates an alternative approach based on microstructural engineering using colloidal nano-silica (NS). Ordinary Portland Cement (OPC40) and calcium sulfoaluminate (CSA) mortars were modified with nano-silica additions under controlled workability conditions to isolate intrinsic nano-scale effects. Mechanical strength development was evaluated from early to long curing ages, while steady-state thermal conductivity was measured using a guarded hot plate method following controlled specimen conditioning. Results indicate that an intermediate nano-silica dosage reduces thermal conductivity while maintaining or improving compressive strength in OPC40 systems. Microstructural observations reveal matrix densification and refinement of pore connectivity without the formation of macro-voids. These findings demonstrate that nano-silica can modify heat-transfer pathways through microstructural engineering, enabling multifunctional cementitious materials that combine structural capacity with improved thermal performance. The proposed approach provides a scalable pathway toward energy-efficient construction materials compatible with existing cement-based technologies. Additionally, the compatibility of these materials with recycling and circular construction strategies is discussed, highlighting their potential role in reducing both operational energy demand and material lifecycle impacts.

Keywords: nano-silica, cementitious mortars, thermal conductivity, microstructural refinement, sustainable construction materials.

* Corresponding author

BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introduction

The construction sector accounts for a significant portion of global energy consumption and greenhouse gas emissions (Benhelal et al., 2021; Cheng et al., 2023; Rodriguez-Morales et al., 2024; Zokaei et al., 2025). Buildings represent a large share of operational energy demand, particularly due to heat transfer through building envelopes (Cabeza et al., 2013; Chai & Fan, 2022; Santamouris & Vasilakopoulou, 2021). Cement-based materials dominate structural components in modern infrastructure; however, their relatively high thermal conductivity contributes to thermal bridging, reducing overall building energy efficiency (Hung Anh & Pásztory, 2021; Orsini et al., 2021; Ricklefs et al., 2017; Zhao et al., 2021).

Traditional approaches to reduce heat transfer in cementitious materials rely on increasing porosity or incorporating lightweight aggregates and insulating fillers (Penazzato et al., 2025). Although these strategies improve thermal insulation, they typically compromise mechanical strength and long-term durability (Nikmah et al., 2025; Yu et al., 2024). As a result, insulation and structural performance are usually addressed through separate material systems.

An alternative approach involves modifying cementitious materials at the microstructural scale (Siddesh et al., 2025). The mechanical and thermal behavior of hardened cement paste is governed by the topology of hydration products and pore networks (Liu et al., 2026). By altering the continuity and connectivity of these phases, it may be possible to influence heat transport while maintaining structural integrity (Lothenbach et al., 2007; Ricklefs et al., 2017).

Nano-silica (NS) has attracted considerable attention as a cementitious additive due to its high pozzolanic reactivity and its ability to promote heterogeneous nucleation of calcium silicate hydrate (C–S–H) (Kooshafar & Madani, 2020; Ranjan et al., 2024). Numerous studies have reported accelerated hydration and improved early-age mechanical properties in nano-silica-modified systems (Al-Mulali et al., 2026; Althoey et al., 2023a). However, most investigations focus primarily on mechanical performance or durability, while the influence of nano-silica on thermal transport remains comparatively underexplored.

This study evaluates whether nano-silica can modify the microstructure of cementitious matrices in a way that reduces thermal conductivity without compromising mechanical performance. Beyond performance enhancement, the work also considers the role of such nano-engineered systems within a broader circular economy framework, particularly their compatibility with design-for-recycling strategies and the incorporation of secondary materials. By combining mechanical testing, thermal conductivity measurements, and microstructural analysis, the study aims to identify a dosage range in which nano-silica enables multifunctional cementitious materials suitable for energy-efficient and sustainable construction while remaining compatible with future recycling and material recovery pathways.

2. Materials and experimental program

2.1. Materials

Two binder systems were investigated: Ordinary Portland Cement (OPC40) and calcium sulfoaluminate cement (CSA). A commercial colloidal nano-silica suspension was used as the nanomaterial additive. The suspension contained approximately 32.5 wt.% solids and exhibited alkaline pH conditions favorable for dispersion within cementitious systems. Particle characterization by transmission electron microscopy indicated nano-scale particles with an average diameter of approximately 25 nm. A polycarboxylate ether-based superplasticizer was used to control workability and assist nano-silica dispersion. Standardized siliceous sand was used as the aggregate phase for mortar production.

2.2. Mix design and dispersion strategy

Nano-silica was incorporated into the mixing water together with superplasticizer (SP) prior to cement addition to improve dispersion and minimize particle agglomeration. Mortars were produced using a constant binder-to-sand ratio. Nano-silica was investigated at different dosages relative to cement mass.

2.3. Mechanical testing

Compressive strength tests were conducted at several curing ages. Three specimens were tested for each mixture and curing age, and average values were reported for comparison between mixtures.

2.4. Thermal conductivity measurements

Steady-state thermal conductivity was measured using a guarded hot plate apparatus in accordance with standard testing procedures. To eliminate moisture-related variability, specimens were conditioned to constant mass prior to testing. Three replicate measurements were conducted for each mixture.

2.5. Microstructural analysis

Microstructural characterization was performed using scanning electron microscopy (SEM). Interpretation focused on matrix densification, pore connectivity, and interfacial transition zone characteristics.

3. Results and discussion

3.1. Influence of nano-silica on workability

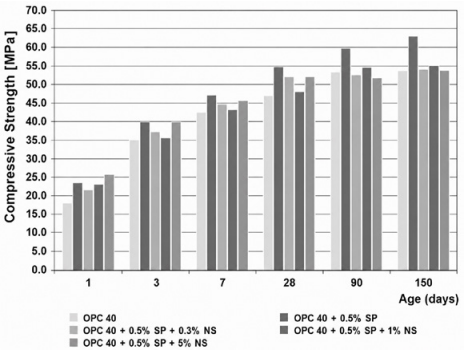
Fresh-state measurements showed that nano-silica significantly influenced mortar rheology. Without superplasticizer, nano-silica additions reduced flow due to increased water demand associated with the high specific surface area of the nanoparticles. The addition of polycarboxylate superplasticizer restored workability and enabled consistent casting conditions. The relationship between nano-silica dosage, superplasticizer content, and mortar flow spread is summarized in Table 1. The results highlight the strong rheological influence of nano-scale particles.

Table 1. Influence of nano-silica and superplasticizer dosage on mortar workability. [Source: authors].

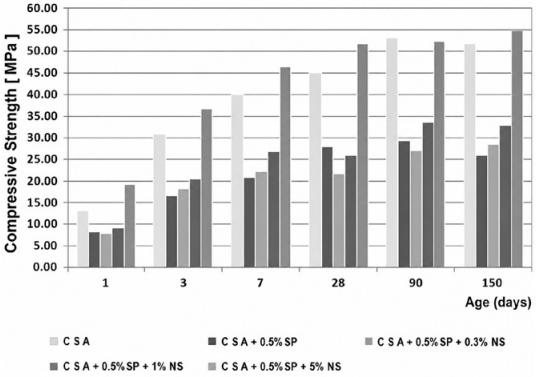
Mix	Cement	NS [%]	SP [%]	Mortar flow spread [%]
M1	OPC40	0	0	145
M2	CSA	0	0	128
M3	OPC40	0	0.5	142
M4	CSA	0	0.5	143
M5	OPC40	0.3	0.5	138
M6	OPC40	1	0.5	134
M7	OPC40	5	0.5	53
M8	CSA	0.3	0.5	122
M9	CSA	1	0.5	101
M10	CSA	5	0.5	64

3.2. Mechanical performance

Compressive strength results indicate that nano-silica additions improve early-age strength development in OPC40 mortars. The increase in compressive strength observed in nano-silica systems has been attributed to nucleation effects and accelerated hydration (Althoey et al., 2023b; Tabish et al., 2023; Taj et al., 2023). The evolution of compressive strength for OPC40 and CSA mortars containing nano-silica is presented in Figure 1. Intermediate nano-silica contents enhance early-age strength in OPC40 systems, while in contrast, CSA matrices exhibit greater sensitivity to admixture interactions. The presence of superplasticizer influences hydration kinetics, resulting in different strength development trends compared with OPC40 systems. These observations highlight the importance of binder-specific optimization when designing multifunctional cementitious materials.



[a]



[b]

Figure 1. Compressive strength development of nano-silica-modified cementitious mortars. (a) Strength evolution of OPC40 mortars. (b) Strength development of CSA mortars.

3.3. Thermal conductivity reduction

Thermal conductivity measurements were performed on OPC40 mortar specimens prepared according to standard NMX-C-060-ONNCCE procedures, with modifications introduced for nano-silica incorporation. The results show that thermal conductivity decreases as nano-silica content increases up to an intermediate concentration. Beyond this point, additional nano-silica does not produce further conductivity reduction and may

slightly increase thermal transport. The measured thermal conductivity values for OPC40 mortars are presented in Table 2.

Table 2. Steady-state thermal conductivity of nano-silica-modified mortars.

OPC40	SP	(NS)	Temp	K (w/mK)
M1	0	0	26.48	1.895
M2	0.5	0	26.35	2.292
M3	0.5	0.3	26.51	2.172
M4	0.5	1	26.65	1.998
M5	0.5	5	26.15	1.983

These results indicate the existence of an optimal nano-silica dosage range in which thermal conductivity reduction is achieved without compromising mechanical performance.

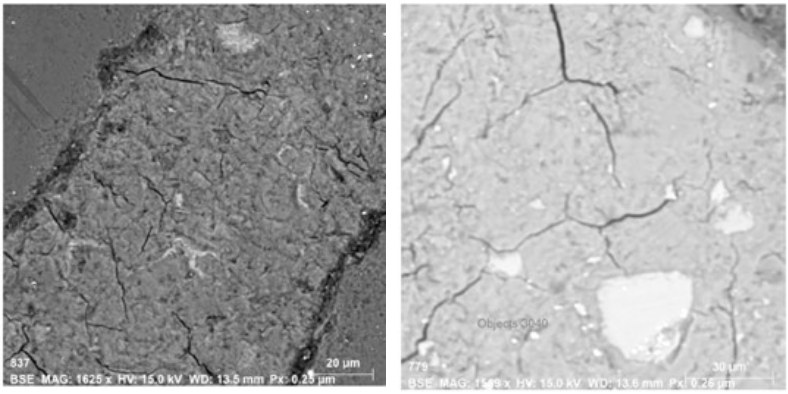
3.4. Microstructural interpretation

SEM observations indicate that nano-silica additions produce a denser and more homogeneous cementitious matrix. The interfacial transition zone between cement paste and aggregates appears more compact, and the pore structure exhibits increased refinement.

Representative SEM micrographs illustrating these microstructural differences are shown in Figure 2.

These observations are consistent with the nucleation effect of nano-silica, which promotes the formation of additional hydration products and refines the internal pore network. The resulting changes in pore connectivity may alter heat-transfer pathways while preserving the structural integrity of the matrix (Al-Mulali et al., 2026; Althoey et al., 2023a, 2023b; Tabish et al., 2023; Taj et al., 2023).

From a circular materials perspective, the observed microstructural densification suggests that nano-silica-modified matrices may exhibit improved stability during service life while maintaining a mineralogical composition compatible with conventional recycling processes, such as crushing and reuse as secondary aggregates.



(a) (b)

Figure 2. SEM micrographs illustrating the influence of nano-silica on mortar microstructure. (a) Reference mortar showing typical capillary pore structure. (b) Mortar containing an intermediate nano-silica dosage showing matrix densification and refined pore distribution.

4. Implications for sustainable construction

From a sustainable construction perspective, the results indicate that nano-silica can be used to engineer cementitious materials that simultaneously improve mechanical performance and reduce thermal conductivity through microstructural modification. Unlike conventional insulation strategies that rely on increased porosity or lightweight fillers, the nano-silica approach operates by refining the internal topology of the cement matrix, thereby preserving structural integrity while altering heat-transfer pathways. The lifecycle implications of nano-silica-modified cementitious materials, including their compatibility with recycling processes and circular construction strategies, are schematically illustrated in Figure 3 which is a schematic representation of material flow from raw material production to energy-efficient use, end-of-life processing, and recycling into new construction. The diagram highlights the role of nano-silica in enabling microstructural performance improvements while maintaining compatibility with design-for-recycling strategies and the incorporation of secondary materials.

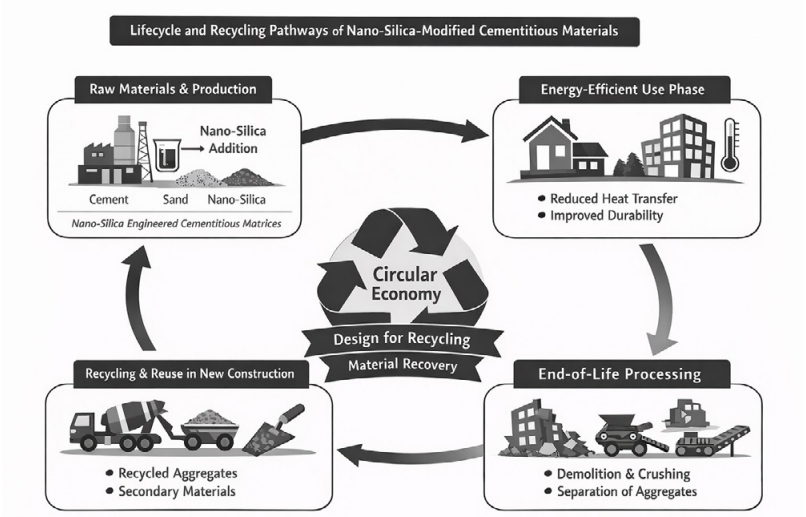


Figure 3. Lifecycle and recycling pathways of nano-silica-modified cementitious materials.

Importantly, this microstructural engineering approach is inherently compatible with circular economy principles. Because the reduction in thermal conductivity is achieved without introducing foreign phases such as polymeric inclusions or high-volume void systems, the resulting materials remain compositionally similar to conventional cementitious matrices. This characteristic facilitates end-of-life processing, including crushing, sorting, and reuse as recycled aggregates, without generating complex multi-material separation challenges.

Furthermore, the use of nano-silica does not preclude the incorporation of secondary materials commonly used in sustainable cement systems, such as supplementary cementitious materials (SCMs) or recycled fines derived from construction and demolition waste. On the contrary, the nucleation and densification effects associated with nano-silica may enhance the performance of such blended systems by compensating for variability in recycled material properties.

From a design-for-recycling perspective, nano-silica-modified cementitious materials offer a significant advantage over conventional thermal insulation solutions. By enabling thermal performance improvements at

the microstructural level, they reduce the need for multi-layered envelope systems composed of incompatible materials, thereby simplifying deconstruction and material recovery at the end of the service life.

Overall, these findings suggest that nano-silica-based microstructural engineering provides a pathway not only for improving operational energy efficiency but also for facilitating material circularity in the construction sector.

5. Conclusions

1. Nano-silica modifies the microstructure of cementitious matrices through heterogeneous nucleation and pore refinement.
2. An intermediate nano-silica dosage reduces thermal conductivity in OPC40 mortars while maintaining or improving compressive strength.
3. Constant-workability testing is essential to distinguish intrinsic nano-scale effects from rheological artifacts.
4. Microstructural observations indicate that conductivity reduction is associated with matrix densification and modified pore connectivity rather than increased porosity.
5. CSA binders exhibit different responses to admixture interactions, highlighting the importance of binder-specific optimization.
6. Nano-silica-based microstructural engineering offers a promising pathway for developing multifunctional cementitious materials suitable for energy-efficient and sustainable construction.
7. Nano-silica-modified cementitious systems remain compatible with circular economy strategies, as their improved thermal performance is achieved without introducing heterogeneous phases that hinder recycling. This enables their integration into design-for-recycling approaches and supports the use of secondary materials within sustainable construction systems.

Bibliographic references

Al-Mulali, M. Z., Aljoumaily, Z. S., Ibrahim, T. H., Albayati, A. H., Oukaili, N. K., Al-Kheetan, M. J., & Ghaffar, S. H. (2026). Performance Analysis of Cement Mortar Modified with Nano-Silica and Nano-Alumina. *Buildings*, *16*(5), 929. https://doi.org/10.3390/buildings16050929

Althoey, F., Zaid, O., Martínez-García, R., Alsharari, F., Ahmed, M., & Arbili, M. M. (2023a). Impact of Nano-silica on the hydration, strength, durability, and microstructural properties of concrete: A state-of-the-art review. *Case Studies in Construction Materials*, *18*, e01997. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01997

Althoey, F., Zaid, O., Martínez-García, R., Alsharari, F., Ahmed, M., & Arbili, M. M. (2023b). Impact of Nano-silica on the hydration, strength, durability, and microstructural properties of concrete: A state-of-the-art review. *Case Studies in Construction Materials*, *18*, e01997. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01997

Benhelal, E., Shamsaei, E., & Rashid, M. I. (2021). Challenges against CO2 abatement strategies in cement industry: A review. *Journal of Environmental Sciences*, *104*, 84–101. https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.020

Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Bartolí, E., & Inés Fernández, A. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *23*, 536–542. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.017

Chai, J., & Fan, J. (2022). Advanced thermal regulating materials and systems for energy saving and thermal comfort in buildings. *Materials Today Energy*, *24*, 100925. https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100925

Cheng, D., Reiner, D. M., Yang, F., Cui, C., Meng, J., Shan, Y., Liu, Y., Tao, S., & Guan, D. (2023). Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries. *Nature Communications*, *14*(1), 8213. https://doi.org/10.1038/s41467-023-43660-x

Hung Anh, L. D., & Pásztory, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, *44*, 102604. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102604

Kooshafar, M., & Madani, H. (2020). An investigation on the influence of nano silica morphology on the characteristics of cement composites. *Journal of Building Engineering*, *30*, 101293. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101293

Liu, J., Tan, Y., Zeng, Z., & Song, W. (2026). Hydration Mechanisms and Mechanical Property Evolution of Cemented Backfill Under Diverse Thermal Environments: A Review. *Minerals*, *16*(3), 276. https://doi.org/10.3390/min16030276

Lothenbach, B., Winnefeld, F., Alder, C., Wieland, E., & Lunk, P. (2007). Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *37*(4), 483–491. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.016

Nikmah, N. W., Abdullah, M., Khan, S., Mohamed, M. A., & Al-Fakih, A. (2025). A comprehensive review of the physico-mechanical properties of masonry units incorporating municipal solid waste. *Frontiers in Built Environment*, *11*. https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1621305

Orsini, F., Marrone, P., Santini, S., Sguerri, L., Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., & Presciutti, A. (2021). Smart Materials: Cementitious Mortars and PCM Mechanical and Thermal Characterization. *Materials*, *14*(15), 4163. https://doi.org/10.3390/ma14154163

Penazzato, L., Cosentino, L., Turco, C., Mateus, R., & Oliveira, D. V. (2025). Thermal properties of multi-purpose mortar mixtures: experimental characterization and influencing parameters. *Journal of Building Engineering*, *116*, 114701. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114701

Ranjan, M., Kumar, S., & Sinha, S. (2024). Nanosilica's Influence on Concrete Hydration, Microstructure, and Durability: A Review. *Journal of Applied Engineering Sciences*, *14*(2), 322–335. https://doi.org/10.2478/jaes-2024-0040

Ricklefs, A., Thiele, A. M., Falzone, G., Sant, G., & Pilon, L. (2017). Thermal conductivity of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *104*, 71–82. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.013

Rodriguez-Morales, J., Burciaga-Diaz, O., Gomez-Zamorano, L. Y., & Escalante-Garcia, J. I. (2024). Transforming construction and demolition waste concrete as a precursor in sustainable cementitious materials: An innovative recycling approach. *Resources, Conservation and Recycling*, *204*, 107474. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107474

Santamouris, M., & Vasilakopoulou, K. (2021). Present and Future Energy Consumption of Buildings: Challenges and Opportunities towards Decarbonisation. *E-Prime*, 100002. https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002

Siddesh, J. S., Shivaprasad, K. N., & Yang, H. M. (2025). Enhancing the thermal performance of cementitious composites: A comprehensive review of phase change material integration. *Applied Thermal Engineering*, *268*, 125849. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125849

Tabish, M., Zaheer, M. M., & Baqi, A. (2023). Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review. *Journal of Building Engineering*, *65*, 105676. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105676

Taj, K., Akturk, B., & Ulukaya, S. (2023). Influence of carbonation curing and nano-silica incorporation on compressive strength and micro-structural development of binary RMC-based systems. *Journal of Building Engineering*, *66*, 105856. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105856

Yu, Z., Shao, R., Li, J., & Wu, C. (2024). An in-depth review of phase change materials in concrete for enhancing building energy-efficient temperature control systems. *Journal of Energy Storage*, *104*, 114533. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114533

Zhao, Q., Lian, Z., & Lai, D. (2021). Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy and Built Environment*, *2*(1), 21–33. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.05.007

Zokaei, S., Siad, H., Lachemi, M., Mahmoodi, O., & Şahmaran, M. (2025). *Non-Portland Cement-Based Engineered Cementitious Composites* (pp. 293–303). https://doi.org/10.1007/978-3-031-61507-8_24

Analisi FT-IR di materiali alcalino-attivati ottenuti da fanghi di segagione

FT-IR analysis of alkali-activated materials produced from sawing sludge waste

Antonio D'Angelo

Borsista di ricerca, Università degli Studi di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Italy. *antoniodangelo2601@gmail.com*

Roberto Simonelli

Dottorando, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Dipartimento di Ingegneria, Italy. *roberto.simonelli@unicampania.it*

Michelina Catauro

Professore Ordinario, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Dipartimento di Ingegneria, Italy. *michelina.catauro@unicampania.it*

Sara Fasana

Professore Associato, Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG), Italy. *sara.fasana@polito.it*

Marco Zerbinatti

Professore Associato, Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG), Italy. *marco.zerbinatti@polito.it*

Luigi Mollo*

Professore Ordinario, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Dipartimento di Ingegneria, Italy. *luigi.mollo@unicampania.it*

Abstract: on-going interdisciplinary researchers are exploring the reuse of secondary raw materials from the ornamental stone-cutting industry. The project's overarching goal is to develop sustainable materials for technological innovation in construction, with a view to the circular economy. On this regard, Alkali-activated materials (AAMs) from sawing sludge wastes synthesized without any treatments or addition of supplementary sources have been investigated. AAMs represent a suitable sustainable alternative to the common widely used construction material Ordinary Portland Cement, responsible for the 8% of global carbon dioxide emissions. AAMs are inorganic materials obtained from the reaction of an alkaline activator with an aluminosilicate source. In this study five sawing sludge wastes have been activated with NaOH 4 and 8 M and characterized through Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. This latter allows to understand the covalent bonds formed in the consolidated materials. Moreover, the integrity test has been

* Autore corrispondente

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

carried out to understand the samples' stability. Water leaching from the integrity test has been used to measure pH and ionic conductivity. These results represent a step forward in the characterisation and optimisation of formulations and a starting point for their application in specific contexts.

Keywords: alkali-activated materials, sawing sludge waste, FT-IR characterization, sustainable binders.

1. Introduzione

Il cemento Portland ordinario rappresenta il materiale legante più utilizzato a livello globale nell'industria delle costruzioni, grazie alle sue prestazioni tecniche consolidate. Tuttavia, la produzione di cemento è associata a un significativo impatto ambientale. In particolare, la produzione del clinker, principale componente del cemento Portland, richiede elevate temperature di processo e comporta emissioni di anidride carbonica dovute sia alla decomposizione del carbonato di calcio durante la calcinazione sia alla natura dei combustibili utilizzati nei forni industriali, in larga parte derivati da rifiuti dell'industria chimica farmaceutica, o da copertoni esausti tritati. Complessivamente, il settore del cemento e del calcestruzzo contribuisce in maniera rilevante alle emissioni globali di CO_2, con una quota stimata intorno all'8% delle emissioni antropogeniche totali (Williams & Yang, 2024; World Economic Forum, 2025).

Alla luce di tali criticità ambientali, la ricerca scientifica si è progressivamente orientata verso lo sviluppo di materiali leganti alternativi, in grado di ridurre l'impatto ambientale associato alla produzione dei materiali da costruzione. In questo contesto, i materiali alcalino-attivati (Alkali-Activated Materials, AAMs) rappresentano una delle classi di materiali maggiormente investigate. Essi sono ottenuti mediante la reazione tra attivatori alcalini e precursori ricchi in alluminosilicati, generando matrici inorganiche con proprietà leganti potenzialmente impiegabili come alternativa ai sistemi cementizi tradizionali (Provis, 2018). Inoltre, tali materiali possono essere prodotti utilizzando sottoprodotti industriali o materiali di scarto, contribuendo alla valorizzazione dei rifiuti e alla riduzione del consumo di risorse naturali ed all'Economia sostenibile (Coppola et al., 2018; Zerbinatti & Vecchio. 2022, Chindaprasirt et al., 2026).

In generale, tra i potenziali materiali di partenza, particolare attenzione è stata rivolta ai residui generati delle attività di estrazione e lavorazione delle rocce ornamentali: i volumi degli scarti prodotti da taglio, levigatura e lucidatura, possono arrivare al 50% del volume iniziale del materiale estratto). Tra questi, i fanghi di segagione rappresentano una delle principali tipologie di residuo e sono costituiti da particelle fini di roccia disperse nell'acqua utilizzata per il raffreddamento degli utensili di taglio (Portale et al., 2024). In Europa la loro produzione annuale è stimata nell'ordine di milioni di tonnellate e può rappresentare una quota significativa dei rifiuti generati durante la lavorazione delle pietre naturali (Portale et al., 2024).

La gestione di tali residui rappresenta una problematica ambientale ed economica rilevante, poiché essi sono attualmente classificati come rifiuti speciali non pericolosi e il loro smaltimento comporta costi significativi.

Diversi studi hanno investigato l'applicazione di sistemi alcalino-attivati per la produzione di materiali alternativi a partire da residui lapidei e altri sottoprodotti industriali (Ulubeyli & Artır, 2024; Chindaprasirt et al., 2026), determinandone le caratteristiche chimico fisiche e le proprietà macroscopiche (Coppola et al., 2020; Ulubeyli & Artır, 2024). Ulteriori ricerche hanno inoltre esaminato sistemi alcalino-attivati basati su fanghi di segagione e altri precursori, evidenziando l'importanza della composizione delle miscele e delle condizioni di sintesi sulle proprietà finali dei materiali (Zafarana et al., 2026). Data l'elevata variabilità composizionale dei fanghi di segagione, c'è una grande necessità di valutare e approfondire le caratteristiche dei materiali alcalino-attivati da essi derivanti.

In questo lavoro, quattro fanghi di segagione e un loro mix sono stati attivati con idrossido di sodio (NaOH) 4M o 8M. La scelta dei materiali nasce dall'idea di valorizzare questi scarti e di ottimizzarne l'utilizzo, unendo le conoscenze del gruppo di SinTesi Lab del Politecnico di Torino e di Chimica delle Tecnologie del Dipartimento di Ingegneria dell'università della Campania "Luigi Vanvitelli", presso cui sono avvenute le sintesi e la caratterizzazione. I materiali ottenuti sono stati caratterizzati con la spettroscopia infrarossa a trasformata di Fourier (FT-IR) e con test d'integrità per valutarne la stabilità. Le acque di rilascio dei test d'integrità sono state utilizzate per misurare il pH e la conducibilità ionica (CI).

2. Materiali e metodi

I quattro fanghi di segagione e il mix senza alcun tipo di trattamento, sono stati attivati in ambiente alcalino con NaOH 4M o 8M. Le soluzioni attivanti sono state preparate dissolvendo pellet di NaOH puro in acqua distillata (entrambi acquistati da Sigma-Aldrich). La nomenclatura dei campioni e le composizioni sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Composizione dei materiali. [Fonte: elaborazione degli autori].

	Nome campione	Quantità Fango (g)	NaOH 8M (mL)	NaOH 4M (mL)
Fango 1	AAM1.1	10	4	-
	AAM1.2	10	-	4
	AAM1.3	10	3	-
Fango 2	AAM2.1	10	4	-
	AAM2.2	10	-	4
	AAM2.3	10	3	-
Fango 3 (mix)	AAM3.1	10	4	-
	AAM3.2	10	-	4
Fango 4	AAM4.1	10	4	-
	AAM4.2	10	-	4
	AAM4.3	10	3	-
Fango 5	AAM5.1	10	4	-
	AAM5.2	10	-	4
	AAM5.3	10	3	-

L'analisi FT-IR è stata eseguita su dischi di KBr contenenti 5 mg di campione utilizzando un apparecchio Prestige21 Shimadzu, dotato di un rivelatore DTGS KBr (solfato di triglicina deuterata con finestre in bromuro di potassio). Gli spettri FT-IR sono stati registrati, dopo 28 giorni di invecchiamento, nell'intervallo di 4000–400 cm^{-1} con una risoluzione di 2 cm^{-1} (60 scansioni) e successivamente elaborati tramite i software IRsolution e Origin. Il test d'integrità è stato effettuato ponendo i campioni in modo statico in acqua distillata con rapporto peso-volume 1:100. L'acqua di rilascio del test

è stata utilizzata per misurare il pH e la conducibilità ionica. Quest'ultime sono state effettuate con pHmetro e conduttimetro Hanna Instrument.

3. Risultati

La Figura1 (A-E) mostra gli spettri FT-IR dei fanghi di segagione e dei materiali attivati in ambiente alcalino. Come possiamo notare, tutti questi spettri sono accomunati dalla presenza di picchi a 3443 -3450 cm^{-1}, dovuti allo stretching O-H di gruppi ossidrilici o molecole d'acqua adsorbite sulla superficie (Tehrani et al., 2024). A questa banda è anche associata al bending H-O-H a circa 1650 cm^{-1}. I picchi a 1437 e 1384 cm^{-1} possono risultare dalla formazione di carbonati – vibrazione dei gruppi C-O- da attribuire probabilmente alla presenza di calcio nel precursore o a possibili fenomeni di efflorescenza sulla superficie dei materiali consolidati. Infatti, i carbonati spesso figurano in campioni di pietra naturale (Gecer et al., 2019). I picchi nella regione di 1100-1000 cm^{-1} indicano spesso la presenza di vibrazioni Si-O-T (T= Si o Al). Tali segnali possono essere attribuibili anche alla presenza di SiO_2 e gel C-S-H. Infine, nelle regioni del finger printing da 800 a 400 cm^{-1}, sono presenti diversi segnali relativi a eventuali ossidi di metalli derivanti dai precursori.

In Tabella 2 sono riportati i dati relativi al superamento del test d'integrità e le misure di pH e CI derivanti dalle acque di rilascio dei test. Come possiamo notare dalla tabella solo i campioni AAM2.1, AAM2.3 ed AAM3.1 hanno superato il test d'integrità. In tutti gli altri casi, la struttura macroscopica dei campioni si è completamente disgregata a contatto con acqua. Questo indica che la maggior parte dei fanghi utilizzati deve essere associata a fonti di allumino-silicati supplementari al fine di ottenere materiali correttamente attivati. In entrambi i campioni AAM2.1 e 2.3, la concentrazione della soluzione attivante era a una concentrazione 8M, suggerendo una maggiore reattività in presenza di concentrazioni maggiori dell'attivante. Di conseguenza sia i valori di pH (rispettivamente 11,4 e 11,2) e di CI (0,19 e 0,18 S/m) erano alti, indicando un maggior rilascio di ioni. Per quanto concerne il campione AAM3.2, essendo una miscela composta dal fango 5 e da sabbia, il campione si è consolidato in ambiente alcalino con NaOH 4M.

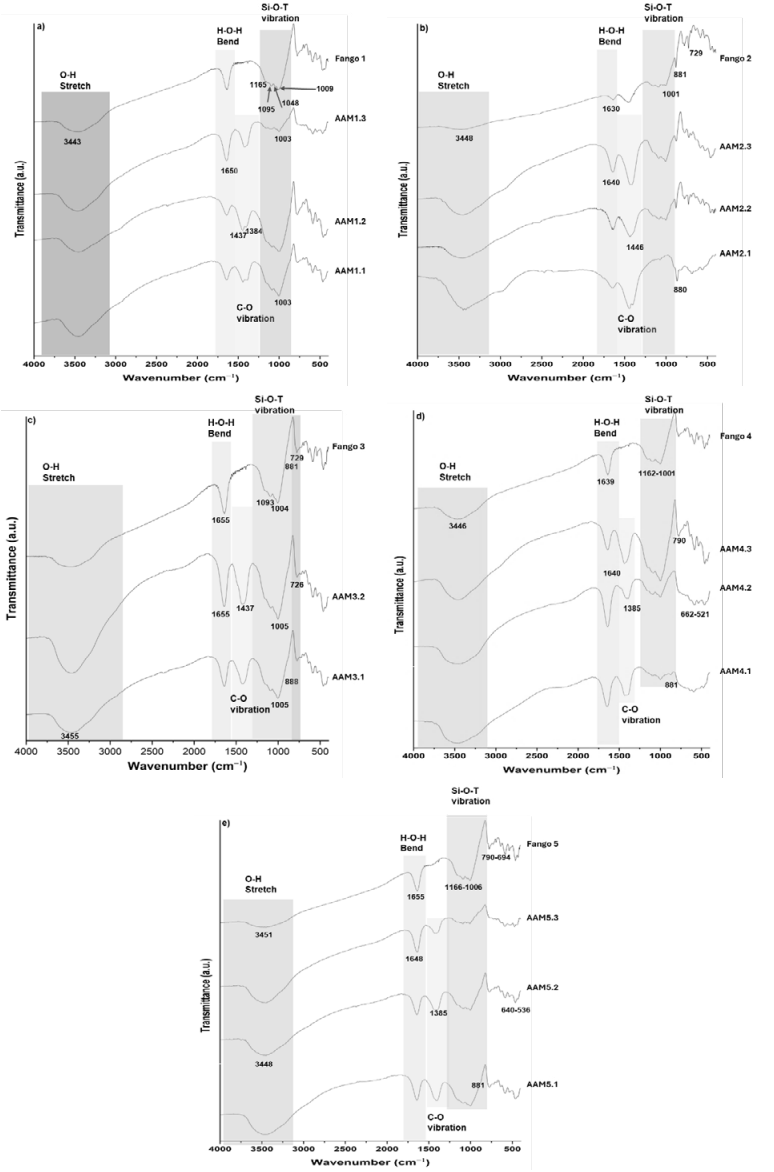


Figura 1. Spettri FT-IR dei fanghi di segagione precursori e dei campioni alcalino-attivati. [Fonte: elaborazione degli autori].

Tabella 2. Integrità, CI e pH delle acque di rilascio dei test d'integrità. [Fonte: elaborazione degli autori].

	Integrità	CI (S/m)	pH
AAM1.1	NO	0,14	12,6
AAM1.2	NO	0,18	11,2
AAM1.3	NO	0,17	11,9
AAM2.1	SI	0,19	11,4
AAM2.2	NO	0,16	10,7
AAM2.3	SI	0,18	11,2
AAM3.1	NO	0,14	11,0
AAM3.2	SI	0,12	11,1
AAM4.1	NO	0,31	12,4
AAM4.2	NO	0,13	11,0
AAM4.3	NO	0,18	11,3
AAM5.1	NO	0,25	12,1
AAM5.2	NO	0,24	12,1
AAM5.3	NO	0,12	11,2

4. Conclusioni

In questo lavoro, AAMs sono stati prodotti a partire da 5 fanghi di segagione senza alcun utilizzo di altri precursori. L'analisi FT-IR ha confermato la presenza di gruppi ossidrilici e molecole d'acqua adsorbite, bande associate ai carbonati e segnali attribuibili a vibrazioni Si-O-T (T = Si o Al), indicativi della presenza di specie silico-alluminatiche. Il test d'integrità ha mostrato che solo i campioni AAM2.1, AAM2.3 e AAM3.2 hanno mantenuto la stabilità in acqua, mentre gli altri si sono disgregati. Nei campioni AAM2.1 e AAM2.3, attivati con NaOH 8M, si osservano valori relativamente elevati di pH e conducibilità ionica. Nel complesso, i risultati indicano che la maggior parte dei fanghi di segagione richiede l'aggiunta di ulteriori fonti alluminosilicatiche per ottenere materiali alcalino-attivati stabili.

Riferimenti bibliografici

Chindaprasirt, P., Srikhadkao, N., Rattanasak, U., Sata, V., Jitsangiam, P., Nuithitikul, K., & Jaturapitakkul, C. (2026). Upcycling industrial waste into zero-clinker alkali-activated binders for low-carbon construction. *Iscience, 29*(4). https://doi.org/10.1016/j.isci.2026.115281

Coppola, L., Coffetti, D., & Crotti, E. (2018). Pre-packed alkali activated cement-free mortars for repair of existing masonry buildings and concrete structures. *Construction and building materials, 173*, 111-117. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.034

Coppola, B., Palmero, P., Montanaro, L., & Tulliani, J. M. (2020). Alkali-activation of marble sludge: Influence of curing conditions and waste glass addition. *Journal of the European Ceramic Society, 40*(11), 3776-3787. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.068

EP 16 801 599.8 - European Patent. Building Material obtained from an alkaline activation of sawing sludge of stone materials and process for producing such building material.

Geçer, A., Büyükutku, A., & Gültekin, F. (2019). Reservoir descriptions of the Kömürlü and Penek Formations near Erzurum, East Anatolia, Turkey. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 9*(3), 1677-1693. https://doi.org/10.1007/s13202-019-0645-6

Portale, S., Mazzoleni, P., & Barone, G. (2024). Alkali activated binders based on rock sawing sludges: Synthesis, characterization and future perspectives. *Construction and Building Materials, 450*, 138669. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138669

Provis, J.L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research, 114*, 40-48. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009

Tehrani, P., Arjomand, M. A., Behbahaninia, A., & Kargari, N. (2024). Compatibility studies of NASH and CASH gels in alkali-activated geopolymer mortar. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 43*, 3737-3747.

Ulubeyli, G. Ç., & Artır, R. (2024). Synthesis and Characterization of an Alkali-Activated Binder from Blast Furnace Slag and Marble Waste. *Materials, 17*(21), 5248. https://doi.org/10.3390/ma17215248

Williams, F., Yang, A. (2024). Potential of reducing CO_2 emissions in cement production through altering clinker compositions, *Industrial & Engineering Chemistry Research 63*, 17158-17167. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01885

World Economic Forum, 2025. A value chain approach to decarbonizing cement and concrete. Disponibile da: https://www.weforum.org/stories/2025/09/a-value-chain-approach-to-decarbonizing-cement-and-concrete/ (consultato il:10.03.2026).

Zafarana, S. E., Barone, G., & Mazzoleni, P. (2026). Preliminary evaluation of Design of Experiments (DoE) approach for the performance prediction of basalt sawing sludge-metakaolin-based Alkali Activated Materials (AAMs). *Applied Materials Today, 48*, 103116. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2026.103116

Zerbinatti, M., Vecchio, F. (2022). Alkali-activated mortars from rock muds. Experimental mix-design and tests for the prototyping of sustainable building products, in Dassori E, Morbiducci R., (a cura di) *Memoria e Innovazione. Memory and Innovation, Atti del Convegno ColloquiAte 2022*, Edicom Edizioni, Genova 2022. ISBN: 9788894593747

Digital Twin e Material Passports per la valutazione dell'effetto serra degli edifici: un focus sulla fase di fine vita

Digital Twins and Material Passports for assessing buildings' global warming potential: a focus on the end-of-life stage

Roberto Giordano*

Full Professor, Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Italy. *roberto.giordano@polito.it*

Federica Gallina

PhD Candidate, Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Italy. federica.*gallina@polito.it*

Benedetta Quaglio

PhD Candidate, Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Italy. *benedetta.quaglio@polito.it*

Abstract: the growing relevance of the Whole Life Carbon (WLC) paradigm in the European building sector, reinforced by Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings, makes a methodological reflection on Life Cycle Assessment (LCA) practices increasingly necessary. In particular, the modelling of end-of-life modules (C1–C4) and benefits beyond the life cycle (Stage D) still appears to rely heavily on hypothetical scenarios and static coefficients. This paper proposes an integrated framework based on Digital Twins (DT) and Material Passports (MP), aimed at exploring the potential of an approach that can overcome some of the limitations of LCA when understood as a predominantly predictive and static tool, and orient it towards a more data-informed form of assessment. By continuously monitoring materials and building performance, the model may help reduce uncertainty associated with Stages C and D, thereby improving the soundness of environmental estimates and supporting circular management strategies.

Keywords: dynamic LCA, Digital Twin, Material Passports, whole life carbon, end-of-life assessment.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Autore corrispondente

1. Introduzione

L'adozione del framework Level(s) (European Commission, 2020) e la recente revisione della Direttiva europea sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD IV) hanno rafforzato l'attenzione sulla stima del Global Warming Potential (GWP) lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio, in coerenza con l'impostazione della norma prEN 15978:2024 - Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method, che articola il ciclo di vita in fasi e moduli (Figura 1), che comprendono: estrazione delle materie prime e produzione dei prodotti da costruzione (A1–A3), trasporto e processo di costruzione (A4–A5), fase d'uso dell'edificio (B1–B7), fase di fine vita (C1–C4) e benefici e impatti oltre i confini del sistema (D).

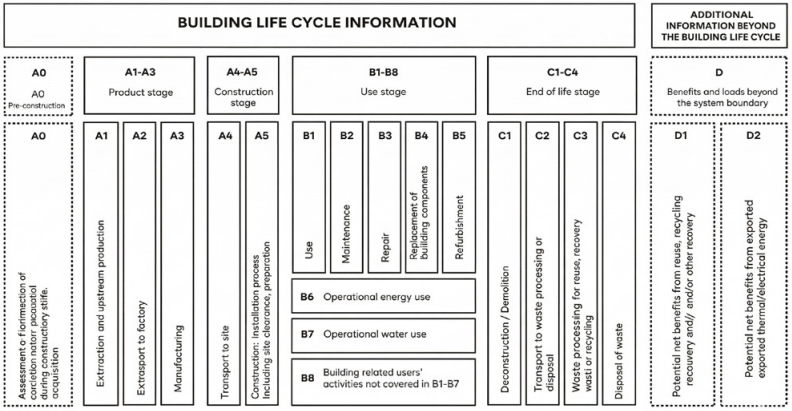


Figura 1. Scope of Life Cycle stages and modules. [Fonte: PR EN 15978:2024].

In questo contesto, la metodologia Life Cycle Assessment (LCA), pur rappresentando il principale riferimento riconosciuto e promosso a livello europeo per il calcolo del GWP relativo agli edifici (Fnais et al., 2022), presenta ancora alcuni limiti riconducibili alla sua natura prevalentemente statica: il calcolo, infatti, viene effettuato mediante fattori di emissione specifica, senza tenere conto dell'evoluzione nel tempo del mix energetico, delle modalità di produzione in opera, delle tecniche di assemblaggio o

disassemblaggio e delle modalità di gestione dei rifiuti a fine vita. La letteratura più recente sull'LCA dinamica evidenzia come l'inclusione esplicita della dimensione temporale possa condurre a risultati differenti rispetto all'approccio statico, sia in termini di GWP complessivo sia nella distribuzione delle emissioni di CO_{2eq} lungo il ciclo di vita, con implicazioni rilevanti per le strategie di decarbonizzazione del settore edilizio (Salati et al., 2024). Al tempo stesso, la diffusione di strumenti digitali per la tracciabilità dei materiali e l'aggiornamento delle informazioni di esercizio – quali i *Material Passport* (MP) e i *Digital Twin* (DT) – apre nuove possibilità per una modellazione più accurata del fine vita. In particolare, i MP, integrati nel modello informativo BIM, possono mettere a disposizione dati strutturati relativi alla composizione, alla recuperabilità e al potenziale di riciclo dei componenti nelle fasi di manutenzione, ristrutturazione e demolizione (Atta et al., 2021) mentre i DT, alimentati da sensori IoT e modelli predittivi, possono contribuire a una valutazione più in linea con l'evoluzione temporale delle prestazioni energetiche e emissioni in atmosfera di gas climalteranti (Petri et al., 2025).In tale prospettiva, l'integrazione tra LCA dinamica, MP e DT delinea un possibile nuovo quadro metodologico, potenzialmente in grado di ridurre il disallineamento tra le valutazioni statiche e il comportamento reale dell'edificio, in particolare nei moduli del ciclo di vita C e D.

Alla luce delle criticità evidenziate, il paper si propone di sviluppare un framework concettuale per l'integrazione tra MP e DT, finalizzato a supportare una valutazione LCA più dinamica delle fasi di fine vita (C1–C4) e dei benefici oltre il ciclo di vita (modulo D). Il lavoro adotta un approccio metodologico di tipo concettuale, basato su una lettura critica della letteratura relativa alla LCA dinamica e agli strumenti digitali per il settore edilizio.

Il principale contributo consiste nella definizione di un metodo che metta in relazione dati statici relativi ai materiali e dati dinamici relativi al comportamento dell'edificio, con l'obiettivo di ridurre le incertezze nella stima del Global Warming Potential.

2. Material Passports e Digital Twin: fondamenti teorici

I Material Passports (MP) sono strumenti digitali concepiti per documentare in modo strutturato le caratteristiche dei materiali e dei componenti edilizi, includendo informazioni sulla composizione, sulla disassemblabilità,

sul potenziale di riuso e, più in generale, sulle possibilità di recupero e valorizzazione a fine vita (Honic et al., 2021), costituendo una base informativa rilevante, nella misura in cui rendono disponibili dati utili lungo le diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio, riducendo le discontinuità informative tra progettazione, gestione e fine vita.

Il Digital Twin (DT), invece, può essere inteso come una rappresentazione digitale dinamica dell'edificio fisico, alimentata e aggiornata tramite flussi di dati provenienti da sensori, sistemi di gestione e archivi informativi (Grieves & Vickers, 2017). Rispetto ai modelli informativi statici, il DT consente di restituire lo stato operativo e prestazionale dell'edificio in modo più continuativo.

L'integrazione tra MP e DT rende quindi possibile associare dati relativamente stabili nel tempo, quali la composizione e il potenziale di riuso dei componenti, a informazioni variabili, quali lo stato di degrado, l'esposizione ambientale e i cicli di manutenzione, creando le condizioni per una valutazione LCA progressivamente aggiornata e più aderente al comportamento reale dell'edificio. In Figura 2 si presenta uno schema illustrativo del sistema che integra i dati statici del MP (caratteristiche dei materiali e potenziale di riciclo) con le capacità computazionali del DT (dati in tempo reale e simulazioni di scenari).



Figura 2. Framework per l'integrazione di Material Passport e Digital Twin nell'ottimizzazione dinamica del GWP durante la fase di End of Life (EoL). [Fonte: elaborazione degli autori].

3. Dalla previsione alla gestione del fine vita dell'edificio

La fase di fine vita dell'edificio è tradizionalmente modellata nella LCA mediante scenari standardizzati, coefficienti medi e assunzioni semplificate relative alla demolizione, al trasporto, al trattamento e allo smaltimento. Tale impostazione, pur necessaria in assenza di dati specifici, restituisce una rappresentazione solo parziale dei processi nei moduli C1–C4, in cui le emissioni dipendono in misura rilevante dalle condizioni dell'edificio, dal grado di selettività delle operazioni, dall'organizzazione logistica e dalla qualità dei materiali in uscita. In questa prospettiva, l'impiego congiunto di MP e DT consente di sostituire una parte delle ipotesi convenzionali con informazioni più aderenti al caso reale, migliorando la rappresentatività della modellazione del fine vita.

3.1. C1 – Demolizione o decostruzione

Nel modulo C1 rientrano le operazioni di demolizione tradizionale, di demolizione selettiva e di decostruzione dell'opera. Le emissioni di gas a effetto serra che si verificano durante tali operazioni, in una LCA statica, vengono stimate sulla base delle risorse energetiche impiegate per unità di massa o di superficie; tuttavia, le emissioni effettive dipendono dalle condizioni strutturali dell'edificio, dalla presenza di materiali pericolosi, dalla durata del cantiere e, soprattutto, dal grado di selettività adottato.

Processi maggiormente orientati alla decostruzione possono infatti comportare un incremento dei tempi e delle risorse impiegate in C1, ma consentono una migliore separazione dei materiali, con effetti potenzialmente favorevoli sulle fasi successive e sui benefici attribuibili oltre i confini del sistema. In questo quadro, il MP fornisce informazioni dettagliate su stratigrafie, sistemi di montaggio, presenza di sostanze pericolose e potenziale di riuso o di riciclo, consentendo di pianificare con maggiore accuratezza la demolizione selettiva (Honic et al., 2021). Il DT, integrando modelli informativi, dati da sensori e informazioni da ispezioni in sito, può invece supportare la simulazione delle sequenze operative, dei tempi di esecuzione e delle interferenze di cantiere, consentendo il confronto ex ante tra diverse opzioni di fine vita e contribuendo a ridurre l'incertezza nella stima dei consumi energetici e del GWP attribuito al modulo C1 (Kaewunruen et al., 2025).

3.2. C2 – Trasporto

Il modulo C2 comprende il trasporto dei rifiuti dal sito di demolizione agli impianti di trattamento, di recupero o di smaltimento. In questo caso, le emissioni di gas effetto serra dipendono in larga misura dalle distanze percorse, dalla tipologia dei mezzi impiegati, dai fattori di carico e dall'organizzazione logistica complessiva. In una LCA statica, tali aspetti vengono spesso rappresentati tramite distanze standard e scenari di conferimento medi, che non riflettono la variabilità reale dei flussi. L'adozione del MP consente di migliorare la stima preventiva delle masse per frazione merceologica e di individuare scenari di recupero preferenziali. Il DT, integrando dati di progetto, informazioni operative e variabili logistiche, può supportare una pianificazione coordinata tra demolizione e trasporto, simulando scenari alternativi di consolidamento dei carichi e di programmazione temporale dei conferimenti. In tal modo, il modulo C2 può essere modellato in modo più realistico, riducendo l'incertezza sui flussi e migliorando la stima del GWP associato al trasporto.

3.3. C3 – Trattamento per riuso, riciclo e recupero

Il modulo C3 include le operazioni di trattamento finalizzate al riuso, al riciclo o al recupero energetico dei rifiuti da costruzione e demolizione. Il GWP di questo modulo dipende principalmente dall'efficienza degli impianti, dal mix energetico impiegato e dalle percentuali effettive di recupero raggiunte; un ruolo decisivo è svolto anche dalla qualità dei materiali in ingresso, che ne determina la reale valorizzazione. In questo senso, il MP può fornire informazioni utili sullo stato di conservazione, sulla tipologia di connessioni, sulle contaminazioni e sulle possibilità di recupero dei componenti, supportando la scelta tra il riuso, la preparazione al riutilizzo o altre forme di recupero (Honic et al., 2021). Il DT, se integrato con i MP e con sistemi di tracciabilità dei flussi, consente di mettere in relazione le modalità operative adottate nella fase C1 con gli esiti effettivi del trattamento in C3, monitorando la destinazione dei materiali e migliorando la rappresentatività delle percentuali di recupero considerate nel modello LCA. Ciò rende possibile una stima più coerente sia degli impatti del trattamento sia dei potenziali benefici derivanti nelle fasi successive (Kaewunruen et al., 2025).

3.4. C4 – Smaltimento

Il modulo C4 riguarda le operazioni di conferimento in discarica, l'incenerimento senza recupero energetico e i trattamenti specifici per i rifiuti pericolosi. Per alcune tipologie di rifiuti da costruzione e demolizione, questa fase rappresenta ancora uno dei principali contributi al GWP, soprattutto nei casi in cui le percentuali di recupero risultino limitate (Antunes et al., 2023). Anche in questo caso, la modellazione convenzionale si basa spesso su scenari di smaltimento medi, che non riflettono appieno la composizione reale dei flussi né la presenza di frazioni problematiche o pericolose. Il MP può contribuire a ridurre tale incertezza già in fase progettuale, favorendo la separabilità e la sostituibilità dei materiali e dei componenti e orientando le scelte verso soluzioni che massimizzino il riuso e il riciclo, riducendo la quota destinata alla discarica. Il DT, aggiornando nel tempo le informazioni sulla disponibilità impiantistica, sui vincoli normativi e sulle condizioni operative, può supportare il confronto tra percorsi alternativi di smaltimento e contribuire a una valutazione più aderente degli impatti ambientali associati al modulo C4.

Nel complesso, l'integrazione tra MP e DT non elimina la necessità di ricorrere a scenari semplificati nei moduli C1–C4, ma consente di costruirli su basi informative più solide e specifiche rispetto al singolo edificio. In questo senso, il passaggio da una logica puramente previsionale a una logica di gestione e di aggiornamento dei dati di fine vita rappresenta un elemento centrale per rafforzare la qualità della modellazione LCA e per preparare una stima più robusta dei benefici attribuibili al di là del sistema nel modulo D.

4. Oltre il ciclo di vita

La fase D contabilizza i benefici e/o i carichi ambientali derivanti dal riuso, dal riciclo e dal recupero energetico dei materiali oltre i confini del sistema analizzato, includendo gli effetti di sostituzione di materiali o di vettori energetici. La sua modellazione dipende in misura rilevante dalla qualità e dalla coerenza delle informazioni generate nei moduli C, in particolare con riferimento alle quantità effettivamente conferite alle destinazioni di riuso, di riciclo o di dismissione in discarica.

Tra le principali criticità metodologiche rientrano l'incertezza relativa alla quantità e alla qualità dei rifiuti generati dai processi di manutenzione, l'allocazione dei benefici e la difficoltà di rappresentare correttamente fenomeni fortemente influenzati dalle condizioni ambientali e operative reali. In questo contesto, il MP può contribuire a rafforzare la robustezza del modulo D, mettendo a disposizione dati più affidabili sulla composizione, sulla qualità e sul potenziale di riuso o di riciclo dei materiali. Inoltre, la disponibilità di informazioni sulle frazioni biogeniche e sui contenuti di cemento può migliorare la quantificazione dei potenziali benefici associati alle caratteristiche di stoccaggio del carbonio o alla carbonatazione secondaria. Il DT, mediante un approccio integrato e aggiornabile nel tempo, può supportare il monitoraggio delle condizioni ambientali dell'edificio. Integrando dati operativi e logistici, nonché informazioni esterne relative al contesto normativo, tecnologico e di mercato, il DT può inoltre consentire l'aggiornamento delle valutazioni al variare delle condizioni al contorno, riducendo l'incertezza nella quantificazione dei benefici oltre il ciclo di vita. In tal senso, la digitalizzazione non incide esclusivamente sul modulo D, ma rafforza il collegamento tra i moduli C e D, contribuendo a una maggiore coerenza metodologica, a una migliore tracciabilità dei flussi di materia e di carbonio e a una stima più affidabile dei benefici ambientali complessivi del fine vita.

Si riporta di seguito la Tabella 1, che riassume il quadro metodologico del contributo, mettendo a sistema le criticità della LCA convenzionale con le potenzialità derivanti dall'integrazione di strumenti digitali nelle fasi di fine vita (C1–C4) e oltre il ciclo di vita (D). Nello specifico, la tabella evidenzia come il MP funga da database tecnico fondamentale per superare la staticità dei coefficienti medi, fornendo dati sulla composizione, sulla disassemblabilità e sul potenziale di recupero dei materiali. Parallelamente, il DT abilita una modellazione dinamica tramite la simulazione di scenari operativi in tempo reale, consentendo di ottimizzare i flussi logistici, i processi di decostruzione e il monitoraggio dei benefici ambientali effettivi. Il confronto strutturato nelle colonne dimostra quindi come la sinergia tra questi strumenti consenta di ridurre l'incertezza nelle stime del GWP, trasformando la valutazione ambientale da una mera previsione progettuale a un processo di gestione informato lungo l'intero ciclo di vita.

Tabella 1. Quadro sinottico delle criticità metodologiche della LCA convenzionale e dei contributi risolutivi derivanti dall'integrazione di MP e DT per le fasi di fine vita (C1–C4) e i benefici oltre il ciclo di vita (D).

Modulo	Criticità nella LCA convenzionale	Contributo Material Passport (MP)	Contributo Digital Twin (DT)
C1 – Demolizione / decostruzione	Consumi, tempi, selettività e masse separabili stimati in modo semplificato	Dati su composizione, connessioni, sostanze pericolose e potenziale di recupero	Simulazione delle sequenze operative e stima più realistica degli impatti
C2 – Trasporto	Distanze, carichi e logistica rappresentati tramite scenari medi	Stima delle masse per frazione e supporto alla scelta dei percorsi di conferimento	Pianificazione dei trasporti e simulazione di scenari alternativi di carico e conferimento
C3 – Trattamento per riuso, riciclo e recupero	Incertezza su qualità dei flussi e percentuali effettive di recupero	Dati su stato di conservazione, contaminazioni e recuperabilità dei componenti	Collegamento tra modalità di C1 ed esiti effettivi di trattamento in C3
C4 – Smaltimento finale	Scenari medi di smaltimento e scarsa aderenza alla composizione reale dei rifiuti	Riduzione della quota destinata a smaltimento e migliore gestione delle frazioni problematiche	Confronto tra alternative di smaltimento in funzione di vincoli operativi e impiantistici
D – Benefici e carichi oltre il confine del sistema	Incertezza su tassi di sostituzione, qualità dei materiali recuperati e allocazione dei benefici	Dati su potenziale di riuso/riciclo, contenuto biogenico e contenuti cementizi	Aggiornamento delle valutazioni in relazione a condizioni operative, normative e di mercato

5. Conclusione

L'integrazione tra MP e DT delinea un potenziale cambiamento epistemologico necessario all'evoluzione della metodologia LCA nel settore delle costruzioni. In questo quadro, il principale contributo del lavoro consiste nella definizione di un framework concettuale capace di mettere

in relazione dati statici sui materiali e dati dinamici sul comportamento dell'edificio, al fine di rendere più solida la valutazione del GWP nelle fasi di fine vita e oltre il confine del sistema. Sebbene la letteratura riconosca il potenziale dei sistemi digitali per la sostenibilità, rimangono ancora aperte sfide cruciali legate all'interoperabilità dei dati e alla definizione di standard semantici condivisi lungo l'intera filiera. Tuttavia, il framework proposto dimostra come il superamento di una LCA intesa come mero strumento previsionale e statico consenta di affrontare le incertezze intrinseche alla fase di fine vita (fasi C e D). I dati tecnici forniti dai MP si integrano con le capacità di monitoraggio continuo e di simulazione dei DT, trasformando la valutazione ambientale in un processo dinamico di gestione delle emissioni di gas climalteranti.

Tale prospettiva risulta particolarmente rilevante per il dibattito sul riciclo e sul riuso in architettura, poiché consente di sostenere strategie di decostruzione selettiva, migliorare la tracciabilità dei flussi di materia e orientare in modo più consapevole le scelte tra riuso, riciclo e smaltimento finale.

In conclusione, questo approccio non solo migliora la trasparenza e la solidità delle stime relative al GWP, ma risponde direttamente alle nuove esigenze normative introdotte nel panorama europeo. Il fine vita non viene così trattato come una fase modellata esclusivamente tramite ipotesi medie e coefficienti statici, bensì come un processo informato dai dati, più aderente alle condizioni reali dell'edificio. Estendere i benefici della digitalizzazione oltre la fase operativa dell'edificio è un passaggio fondamentale per sostenere strategie di gestione circolare efficaci e guidare la transizione verso un parco edilizio climaticamente neutro.

Riferimenti bibliografici

Antunes, A., Silvestre, J., Costa, H., Carmo, R., & Cellis Julio, E. (2023). Reducing the environmental impact of building end-of-life through interrelated demolition strategies, transport distances, and disposal scenarios. *Journal of Building Engineering, 77*, 107484. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108197

Atta, I., Bakhoum, E., & Marzouk, M. (2021). Digitising material passports for sustainable construction projects using BIM. *Journal of Building Engineering, 44,* 103258. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103233

Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings. (2024). Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union.

European Commission. (2020). Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings: User manual 2 – Setting up a project to use the Level(s) common framework (Version 1.1)—Publications Office of the European Union.

European Committee for Standardisation. (2024). Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method (prEN 15978:2024).

Fnais, A., Rezgui, Y., Petri, I., Beach, T., Yeung, J., Ghoroghi, A., & Kubicki, S. (2022). The application of life cycle assessment in buildings: Challenges, and directions for future research. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 27*, 1122–1145. https://doi.org/10.1007/s11367-022-02058-5

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behaviour in Complex Systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

Honic, M., Kovacic, I., Aschenbrenner, P., & Ragossnig, A. (2021). Material Passports for the end-of-life stage of buildings: Challenges and potentials. *Journal of Cleaner Production, 319*, 128702. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128702

Kaewunruen, S., O'Neill, C., & Sengsri, P. (2025). Digital twin-driven strategic demolition plan for circular asset management of bridge infrastructures. *Scientific Reports, 15*, Article 10554. https://doi.org/10.1038/s41598-025-94117-8

Petri, I., Amin, A., Ghoroghi, A., Hodorog, A., & Rezgui, Y. (2025). Digital twins for dynamic life cycle assessment in the built environment. *Science of the Total Environment, 993*, 179930. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179930

Salati, M., Costa, A. A., & Silvestre, J. (2024). A comprehensive review of dynamic life cycle assessment for buildings: Exploring key processes and methodologies. *Sustainability, 17*(1), 159. https://doi.org/10.3390/su17010159

Il passaporto digitale per la tracciabilità della circolarità dei prodotti edilizi

The Digital Passport for the traceability of the circularity of building products

Adriana S. Sferra*

Prof.ssa Associata di Produzione e gestione dell'ambiente costruito, Sapienza Università di Roma Dipartimento di Pianificazione, Design e Tecnologia dell'Architettura, Italy. *adriana.sferra@uniroma1.it*

Giuseppe Piras

Prof. Associato di Produzione e gestione dell'ambiente costruito, Sapienza Università di Roma Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Energetica, Italy. *giuseppe.piras@uniroma1.it*

Francesco Muzi

Ing. Dottore di Ricerca in Energia e ambiente, Sapienza Università di Roma Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Energetica, Italy. *francesco.muzi@uniroma1.it*

Abstract: one of the challenges facing the Italian construction sector in its transition to industry 4.0 is undoubtedly the standardization of transparent procedures for measuring environmental impacts.

The sector is far from meeting current standards, due of its being advanced craftsmanship rather than industrialization, the fragmentation of the supply chain, the design principles and approaches, maintenance and decommissioning of buildings, the construction techniques used, the building materials, regulatory and economic issues and, in general, a widespread lack of environmental awareness.

In view of the need for profound renewal and the achievement of circularity, digitalization and decarbonization objectives, action must be taken through the close integration of operators, phases and procedures in a shared, coordinated manner.

This approach could deliver objective economic, social and environmental benefits in line with EU directives and help to meet the EU's 2030-2050 commitments.

This contribution aims to share the ongoing results of research funded by Sapienza University of Rome, as part of Large Research Projects (2024-2025) for the development and operation of the Digital Building Product Passport, an innovative tool to support project proposals.

* Autore corrispondente

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

The case study of PV modules illustrates ongoing experimentation aimed at establishing a labelling system for physical and digital traceability, and for sharing and updating lifecycle information managed by various operators.

Digitized information throughout the products' entire life cycle will be shared and updated via a platform and stored until the products are discarded and subsequently reused.

Keywords: green supply chain, digital passport, PV modules, building waste, BIM.

1. Digitale, circolare e tracciabile: il nuovo orizzonte

Il comparto delle costruzioni è il secondo settore produttivo dell'Unione Europea in termini economici, di conseguenza, offre un enorme potenziale per contribuire al Green Deal europeo (EC, 2019) e al Programma Strategico per il Decennio Digitale 2030. (EC, 2022). (Fig. 1).

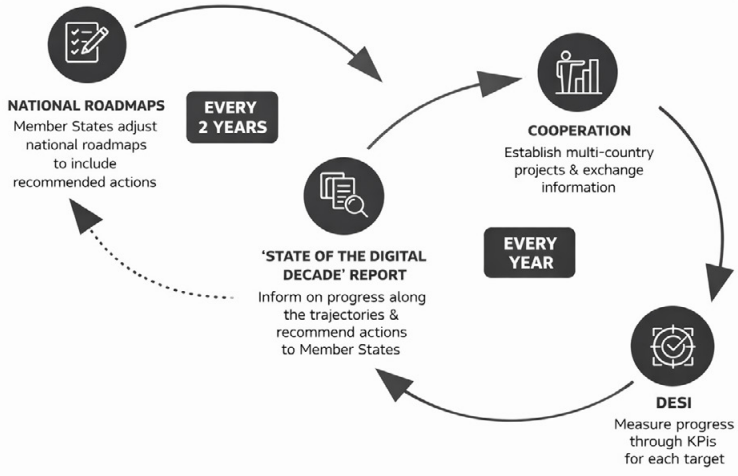


Figura 1. In coerenza con il Programma Strategico del Decennio Digitale 2030, l'Indice dell'Economia e della Società Digitale (DESI) utilizza un insieme di indicatori per misurare i progressi annuali, sia a livello nazionale che dell'UE, verso gli obiettivi fissati per il 2030. [Fonte: EC, 2022].

Tuttavia, questo ampio settore produttivo deve anche affrontare numerose sfide, tra cui crisi come le conseguenze della pandemia di Covid-19, le guerre in corso, la sicurezza dei lavoratori, l'emergenza climatica, i reati ambientali, la rapida trasformazione digitale e la transizione da un'economia lineare a quella circolare. In Italia, in linea con la Direttiva Green Deal, l'indice di circolarità è considerato un aspetto chiave per ripensare il settore, per il quale occorre introdurre riferimenti condivisi e prevedere controlli. (Eurostat, 2025).

In questo contesto, la tracciabilità dei prodotti da costruzione è determinante per garantire il rispetto delle normative e degli standard di qualità e può contribuire a ottimizzare la sostenibilità del settore edilizio riducendo sprechi, inefficienze e rifiuti. (Davari et al., 2023). Per implementare un sistema di tracciabilità efficace, occorre registrare e monitorare ogni fase del ciclo di vita dei prodotti, dalla produzione alla consegna in cantiere, fino al successivo riuso, riciclo, recupero o conferimento in discarica.

La digitalizzazione dei processi di tracciabilità riduce il rischio di errori manuali e consente di aggiornare in tempo reale le informazioni di ciclo di vita dei prodotti, migliorandone ulteriormente l'efficienza operativa. (Bernardo & Mazza, 2025). Questa innovazione di processo può favorire la competitività dell'intero settore attraverso la trasparenza e l'affidabilità delle attività facilitando la comunicazione dei diversi attori coinvolti: committenti, utenti, enti normatori, produttori, imprese di costruzione, manutentori, imprese di demolizione e gestione dei rifiuti, associazioni di categoria ed infine, il cantiere quale luogo di destinazione di tutti i flussi di materia e di energia in entrata e in uscita.

Condividendo gli obiettivi del VII Convegno Internazionale Re-Cycling verso una architettura rigenerativa anziché estrattiva, portatrice di valori e memoria collettiva e nella convinzione che includere fra gli input di progetto il riuso e il riciclo richieda l'utilizzo di prodotti certificati e tracciabili durante l'intero ciclo di vita, questo contributo presenta le prime risultanze di una ricerca in progress per la predisposizione e il funzionamento del *Digital Product Passport (DPP)*.

Il DPP, promosso dall'Unione Europea (EC, 2024a), è un documento digitale che inventaria/registra il prodotto fisico a cui è associato, incluso il suo posizionamento georeferenziato. Attraverso il DPP si delinea l'obbligo dei produttori di dichiarare le prestazioni ambientali di ciclo di vita dei

propri prodotti, e si richiedono informazioni digitalizzate lungo la catena di approvvigionamento.

Il DPP essendo fra i principali strumenti per decarbonizzare, digitalizzare, rendere circolari le filiere produttive e promuovere l'acquisto, uso e dismissione consapevoli da parte dei cittadini, sottolinea il ruolo molto significativo dei prodotti. (EC, 2024b). (Fig. 2).

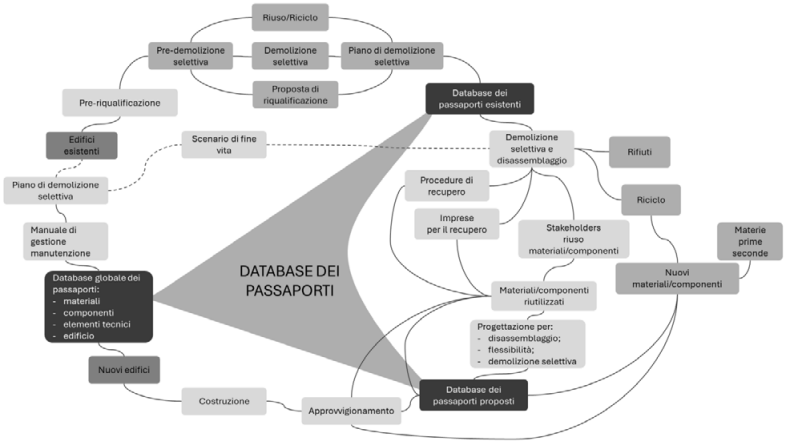


Figura 2. Le attività di riuso/riciclo/recupero durante tutte le fasi del Processo Edilizio possono essere velocizzate in modo efficace ed efficiente con il supporto del passaporto digitale dei prodotti. [Fonte: Ri-elaborazione degli Autori dati Costa & Hoolahan, 2024].

2. La metodologia messa a punto nella ricerca

Obiettivo della ricerca è formulare una proposta operativa per la predisposizione e il funzionamento del passaporto digitale dei prodotti edilizi e rendere disponibili, attraverso una piattaforma dedicata, le informazioni tecniche e ambientali sul ciclo di vita di un prodotto fisico, in formato digitale. Per quanto attiene la metodologia, la ricerca è articolata in fasi (Fig. 3):

A) Studio della filiera del settore edilizio finalizzato all'elaborazione di un quadro sinottico che identifichi e descriva le principali cause degli impatti ambientali, associate alle diverse categorie produttive,

e alla formulazione di ipotesi di riorganizzazione secondo la logica della Green Supply Chain (GSC). (Ecovadis, 2021).

B) Predisposizione di un database dei prodotti caratterizzato da informazioni raccolte secondo criteri coerenti con le procedure *Product Environmental Footprint (PEF) e Organization Environmental Footprint (OEF) (*EC, 2021), per la standardizzazione delle prestazioni ambientali. Successivamente, le informazioni del database saranno digitalizzate, convertite in un formato interoperabile (IFC) (ISO 22057, 2022) ed infine rese accessibili ai diversi soggetti interessati.

C) Organizzazione dei prodotti del database in famiglie secondo le modalità definite dalle *Product Categories Rules (PCR)* (ISO/TS 14027, 2023) finalizzata all'individuazione delle categorie di prodotti casi di studio.

D) Implementazione del DPP delle categorie di prodotti selezionate. Il sistema di etichettatura digitale messo a punto integra modellazione BIM, dati ambientali certificati e tecnologie di identificazione digitale ed è articolato in quattro step sequenziali:

   1. elaborazione del modello/famiglia BIM ad alto Livello di Dettaglio (LOD) (UNI, 2017); contenente tutti i dati caratterizzanti il DPP (EC, 2024a);
   2. inserimento nel modello BIM dei dati ambientali estratti dal database elaborato durante la ricerca (oppure download del modello BIM già parametrizzato realizzato dal produttore); successiva sistematizzazione dei modelli BIM in schede/file con tabelle proprietà dei prodotti in formato BIM proprietario e IFC per l'interoperabilità;
   3. predisposizione di un QR code dinamico per l'identificazione univoca e la tracciabilità del prodotto reale e del suo modello digitale. Il QR code non contiene i dati, ma un identificativo (URL) che rimanda a una piattaforma cloud; ciò consente l'aggiornamento continuo delle informazioni di ciclo di vita del prodotto associato senza dover modificare il QR code: ogni scansione dello stesso restituisce i dati più recenti disponibili. L'aggiornamento avviene tramite interfaccia di gestione con accessi differenziati sia per i diversi attori autorizzati coinvolti sia per la tracciabilità delle modifiche attraverso sistemi di *versioning* e log delle operazioni;

4. predisposizione sul cloud della piattaforma *Circular Building Products* nella quale gli operatori della filiera condivideranno le informazioni tecnico-ambientali di ciclo di vita dei prodotti previa realizzazione di un sistema di verifica dei dati, della definizione dei livelli di accesso e dell'interfaccia utente per la raccolta dei dati finalizzata alla realizzazione del database dei Passaporti Digitali.

E) Elaborazione di linee guida operative e check list dettagliate per elaborare i DPP.

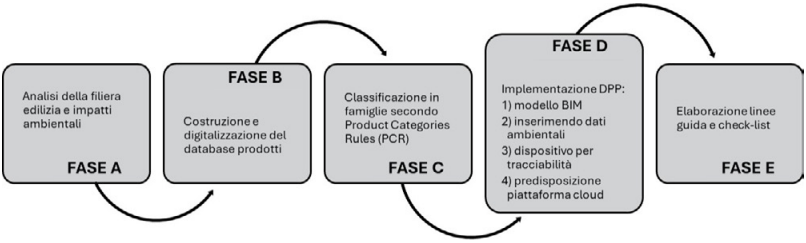


Figura 3. Le fasi della metodologia della ricerca dall'analisi della filiera all'elaborazione delle linee guida. [Fonte: elaborazione autori].

3. Una esemplificazione: il DPP dei moduli fotovoltaici (FV)

Le prime sperimentazioni si riferiscono alla predisposizione del DPP dei moduli FV. Nel primo step è stato elaborato il modello BIM (livello di dettaglio LOD 300) del modulo FV, concepito come contenitore informativo interoperabile predisposto per l'integrazione con database esterni. Nel secondo step, il modello è stato arricchito con i dati ambientali estratti dalle EPD digitali del modulo FV e con dati tecnici e amministrativi, inclusi quelli richiesti dai meccanismi di incentivazione nazionale. (GSE, 2026).

Nel terzo step è stato generato un QR code dinamico associato univocamente al modulo FV e l'identificativo (URL) che rimanda al prototipo di una piattaforma cloud (in fase di ultimazione); ogni scansione restituisce i dati più recenti disponibili e l'aggiornamento è gestito tramite interfaccia web con accessi/permessi differenziati: produttore, installatore, utente,

manutentore, gestore fine vita; la tracciabilità delle modifiche è gestita attraverso un sistema di controllo open source.

Il QR code così generato, e il relativo dataset, integrato in una piattaforma digitale centralizzata, attualmente in fase di sviluppo, supporterà l'accesso multi-attore e abiliterà il monitoraggio delle prestazioni, la manutenzione predittiva e la tracciabilità durante il ciclo di vita.

Sono in corso simulazioni in GIS relative a diverse ipotesi di trasporto dei moduli fino al cantiere. Per la visualizzazione dinamica in sovrapposizione tra prodotto fisico e digitale si procede attraverso l'utilizzo di sistemi di realtà estesa (Ecorys, 2021). (Figs. 4, 5).

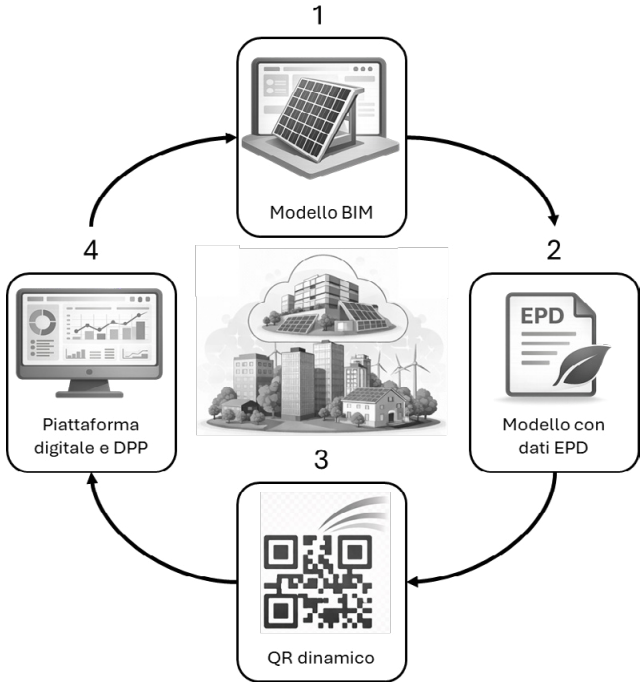


Figura 4. Il sistema di etichettatura digitale messo a punto integra: il modello BIM dei moduli FV predisposto per l'integrazione con database esterni; dati ambientali certificati estratti dalle EPD; QR code dinamici e relativi dataset caricati in una piattaforma digitale centralizzata. (Fonte: elaborazione autori).

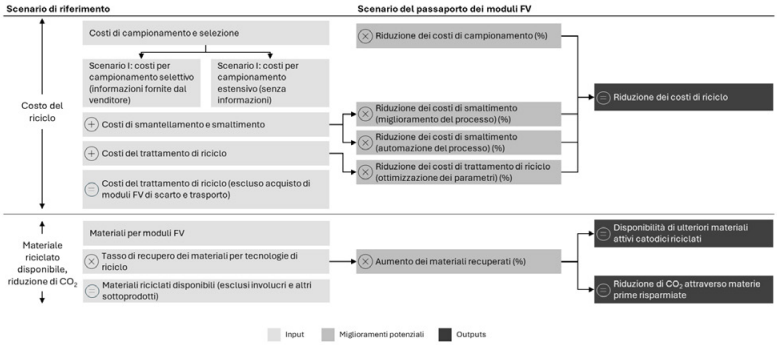


Figura 5. Nello scenario del passaporto per moduli FV, la trasparenza e tracciabilità delle informazioni consente di ridurre i costi di riciclo e le emissioni di CO2, aumentare i ricavi e garantire la disponibilità di altri materiali aggiuntivi. [Fonte: elaborazione degli autori].

4. Prime conclusioni, come proseguire

Gli apporti della ricerca in corso possono essere valutati sotto due profili, uno in termini di metodologia adottata, l'altro in termini di contenuti e/o risultanze operative da porre a disposizione degli operatori del processo.

Per quanto attiene alla metodologia di lavoro, si evidenzia soprattutto che la predisposizione del DPP deve essere condotta garantendo la trasparenza e la standardizzazione dei dati ambientali di ciclo di vita. Inoltre, il sistema di etichettatura messo a punto si configura come una infrastruttura digitale a supporto del processo progettuale, decisionale e operativo degli interventi, sia pubblici che privati. Tale infrastruttura è finalizzata a garantire l'interoperabilità dei DPP e a facilitare lo scambio e l'aggiornamento delle informazioni tra operatori economici e stakeholder.

Per quanto attiene le risultanze, è emerso che la predisposizione del DPP dei moduli FV è agevolata dalle caratteristiche di un settore "maturo" (produttori, installatori, utenti, normativa, incentivi GSE), già pronto ad accogliere questa innovazione. Ciò ha permesso, da un lato, di sperimentare concretamente questo nuovo strumento per la tracciabilità dell'impatto ambientale di ciclo di vita dei prodotti edilizi, anche nella prospettiva della sua applicazione ad altri prodotti; dall'altro invece, ha evidenziato le

principali criticità da affrontare nel caso di passaporti digitali relativi a prodotti di piccole/medie dimensioni, utilizzati ad esempio nella realizzazione di pareti o solai.

Riferimenti bibliografici

Bernardo, G., Mazza, A. (2025). *Designing With invisible hands Digital product passports and AI in the new Made in Italy*. Roma: tab edizioni,

Costa, A. R., Hoolahan, R. (2024). *Materials Passports: Accelerating Material Reuse in Construction*, Lancaster University and Orms Designers & Architects Ltd, London

Davari, S., Jaberi, M., Yousfi, A., Poirier, E. (2023). A Traceability Framework to Enable Circularity in the Built Environment, *Sustainability*, *15*(10), 8278. https://doi.org/10.3390/su15108278

EC (2019). The European Green Deal COM/2019/640. Disponibile da: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 (consultato il: 20.01.2026).

EC (2021). Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organizations 2021/2279. Disponibile da: https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2021/2279/oj/eng (consultato il: 11.02.2026).

EC (2022). Digital Decade - Policy Programme 2030 (EU) 2022/2481. Disponibile da: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2022/2481/oj (consultato il: 20.01.2026).

EC (2024a). Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) 2024/1781. Disponibile da: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng (consultato il 18.03.2026).

EC (2024b). Ecodesign Impact Accounting Report. Disponibile da: https://www.vhk.nl/downloads/Reports/EIA/2024%20EIA%20IV%20Overview%20Report.pdf (consultato il: 20.01.2026).

Ecorys (2021). Report XR and its potential for Europe. Disponibile da: https://xreuropepotential.com/assets/pdf/ecorys-xr-2021-report.pdf (consultato il: 11.02.2026).

EcoVadis (2021). EU Policy Recommendations for Sustainable Supply Chains. Disponibile da: https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/from-crm/eu-policy-recommendations-for-sustainable-supply-chains.pdf (consultato il: 20.01.2026).

Eurostat (2025). Circular material use rate. Disponibile da: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/DDN-20251119-1 (consultato il: 11.02.2026).

GSE (2026). Conto Energia Disponibile da: https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/conto-energia/gestione-moduli (consultato il: 11.02.2026).

ISO 22057 (2022). Sustainability in buildings and civil engineering works. Data templates for the use of environmental product declarations (EPDs) for construction products in building information modelling (BIM) Disponibile da: https://www.iso.org/standard/72463.html (consultato il: 20.01.2026).

ISO/TS 14027 (2023). Environmental labels and declarations-Development of product category rules Disponibile da: https://www.iso.org/standard/66123.html (consultato il: 20.01.2026).

UNI 11337 (2017). Edilizia e opere di ingegneria civile - Parte 4 Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti. Disponibile da: https://store.uni.com/uni-11337-4-2017 (consultato il: 25.03.2026).

Hyperlocal architecture in regeneration strategies for the Abruzzo region

Donatella Radogna

Professor, Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura, Italy. dradogna@unich.it

Luciana Mastrolonardo*

Assistant Professor, Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura, Italy. *l.mastrolonardo@unich.it*

Maria Chiara Capasso

Researcher, Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura, Italy. *mariachiara.capasso@unich.it*

Valeria Lualdi

PhD student, Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura, Italy. *valeria.lualdi@phd.unich.it*

Abstract: the regeneration of fragile inner territories, characterised by depopulation, abandoned built stock, and undervalued natural and cultural heritage, represents one of the most pressing challenges in contemporary architectural research. In response to this condition, the paper presents the HYLA (HYperLocal Architecture) approach, a method for designing hyperlocal building systems that draws exclusively on material resources, craft skills, and waste flows available within a radius of approximately 1 km around the intervention site. The acronym HYLA encapsulates the core principle of the method: restricting the design and construction process to a hyper-localised radius in order to minimise environmental impact, strengthen territorial identity, and activate short supply chains.

The method is structured in four sequential phases: (i) systematic resource mapping within the defined perimeter; (ii) material selection and classification according to biological and technical loops; (iii) definition of performance requirements based on available resources and contextual conditions; and (iv) design–build validation through self-construction. The approach is tested through two case studies in the Abruzzo region (Italy): the unfinished structure known such as "La City" in Pescara, located near the airport and the Cammino d'Abruzzo pilgrimage route, and the high-altitude municipality of Calascio, a mountain village of approximately 130 inhabitants.

* Corresponding author

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

For each context, the systematic resource mapping informed the definition of performance requirements and material selection, distinguishing between biological loop materials as wool, clay, chestnut timber, plant fibres, assigned to short-life-cycle functions, and technical loop materials reserved for reversible structural elements. Three simplified modules serving slow tourism infrastructure were designed and realised through a self-build process involving architecture students, configured as a full-scale design–build educational experience. This allowed participants to engage directly with recovered materials, reversible joints, and dry construction techniques, advancing a Design for Deconstruction and Reuse (DfDR) approach in which end-of-life decommissioning is considered from the earliest stages of design.

The public exhibition of the prototypes operated as an instrument for community engagement, sharing the core themes of the project: the value of zero-kilometre supply chains, the potential of waste materials as architectural resources, and the need to orient tourism development in inner areas toward slower and more sustainable forms of territorial use.

Keywords: hyperlocal architecture, circular economy, design for deconstruction and reuse, slow tourism, inner areas regeneration.

1. Introduction

The uniqueness and characteristics of the Abruzzo region, shaped by the coexistence of coastal, hill, and mountain environments, correspond to conditions of social and economic imbalance.

The coastal strip exhibits a higher level of urbanisation, defined by more or less densely built and populated centres that sometimes suffer from overcrowding due to influxes of seaside tourism. This condition has caused, particularly along certain stretches of the coastline, a significant alteration of the natural environment, most evident in the medium-sized city of Pescara.

The hill and, especially, the mountain environment experience a diametrically opposite condition in which both negative and positive aspects can be identified. The negative aspects, accelerated and highlighted by disastrous events such as earthquakes and pandemics, relate to long-standing processes of depopulation and abandonment, while the positive ones lie in the attractive potential of natural beauty, the built heritage, and local traditions and cultures.

This scenario makes it possible to outline a picture of regeneration needs that derive essentially from the need to activate processes of environmental, social, and economic rebalancing among different contexts (Di Giovanni & Salzano, 2025). The processes to be activated are configured such as the desire to exercise the resilience capacities of places, where the feasibility of this hypothesis is reinforced by the particularly short distances between coast, hills, and mountains in the region under examination. In this specific case, resilience capacities are not only those expressed by human capital and built and natural systems, but also those linked to the coexistence of diametrically opposed needs (i.e., overcrowding versus depopulation) and the proximity of the places that express such needs.

This contribution presents the approach adopted in the experience conducted on the case studies of the city of Pescara and the municipality of Calascio (AQ), aimed at promoting processes of rebalancing between the coast and the hinterland through diverse forms of slow tourism (related to sport, food and wine cultures, natural landscape beauty, the built and cultural heritage in general, and art). The approach is based on the recognition of essential factors of the natural and built environment and the social system from which to hypothesise and organise possible initiatives and actions.

2. Objectives and methodology

With reference to the general objective of creating synergies between coastal resources and those of the inland areas, aspiring to conditions better than those preceding the crises (earthquakes, pandemics, depopulation, etc.) and alluding to the concepts of bouncing and leaping forward (Sargolini et al., 2026), the specific objectives were established based on the recognition of available resources. These resources correspond to: the population (concentrations and flows), abandoned built stock that can be recovered and reused, connection systems, and tourism attractors (natural and cultural beauty, facilities and services, etc.).

Regarding population conditions, as already mentioned, the municipalities chosen for defining the criteria and developing the design experiments present diametrically opposite characteristics: Pescara, a coastal

city with approximately 119 000 inhabitants, and Calascio, a mountain village with approximately 130 inhabitants.

The established objectives are:

- to identify recoverable or reusable built systems, or to propose new systems with works based on the principles of hyperlocal architecture;
- to connect the interventions in the coastal area with those in the hinterland, integrating existing routes;
- to enhance the qualities of the contexts.

The adopted methodology is based on these objectives and proposes an evolutionary regeneration process that gradually extends from Pescara towards the hinterland, providing a concrete example through case study experimentation.

2.1 The HYLA Method

The HYLA (HYperLocal Architecture) approach is structured in sequential and iterative phases, each of which informs the next and is subject to feedback from subsequent stages (Figure 1).

Phase 1 — Resource Mapping. A systematic survey of the material and immaterial resources available within a radius of approximately 1 km around the intervention site. This radius corresponds to an area walkable in under one hour, which defines the operational field for sourcing materials, craft skills, storage infrastructure, and maintenance networks (Geissdoerfer et al., 2017). The mapping targets waste flows from local enterprises (construction sites, commercial activities, port and fishing industries), by-products from agricultural and pastoral activities, materials from building demolitions and renovations, and biomass from urban and peri-urban green management (pruning waste, forest management residues).

Phase 2 — Material Selection and Classification. The mapped resources are classified according to the distinction between biological and technical loops, following circular economy principles. Renewable materials as wood, plant fibres, wool, clay are assigned to biological loop functions (insulation, finishes, cladding) characterised by shorter life cycles, facilitating their replacement and return to the biosphere at the end of their useful life. Non-renewable materials: metals, mechanical components, are assigned

to technical loop functions (structural elements, connections) intended for longer durability and multiple reuse cycles. Selection criteria include: local availability and abundance, compatibility with reversible assembly techniques, minimal need for industrial reprocessing, and capacity to fulfil the identified performance requirements.

Phase 3 — Performance Requirements Definition. The available resources, together with the environmental characteristics of the site and the intended functional programme, are translated into specific building performance requirements. These include structural capacity, thermal and hygrothermal performance, durability under local climatic conditions, and compatibility with seasonal assembly and disassembly cycles. The requirements are not imposed a priori but emerge from the dialogue between what the territory offers and what the programme demands.

Phase 4 — Design–Build Validation. The building modules are designed and constructed through a self-build process, employing exclusively dry construction techniques, reversible mechanical connections, and component standardisation. This phase serves both as technical validation of the design hypotheses and as an educational experience through international design–build workshops. The deconstruction potential of each module is verified during this phase, ensuring that the principles of Design for Deconstruction and Reuse (DfDR) are embedded from the earliest design stages.

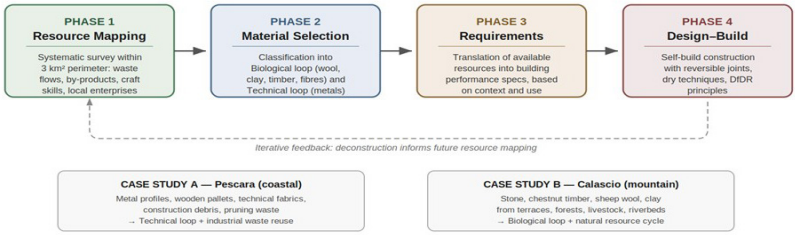


Figure 1. The HYLA (HYperLocal Architecture) methodological framework: four-phase process from resource mapping to design–build validation, with iterative feedback loop. [Source: authors].

2.2 Case Studies

The case study selected for the city of Pescara is the unfinished and never-used building known as "La City", located in a partially degraded area, near the airport and the Cammino d'Abruzzo route — that is, in a strategic position to receive and redistribute tourists across the regional territory. "La City" is a large building consisting of reinforced concrete columns and floor slabs rising across four levels (Figure 2). Through analysis of community needs, the services available in the immediate surroundings, and the technological and environmental characteristics of the existing structure — and with the objective of promoting social and economic regeneration both locally and towards the hinterland — several possible uses have been proposed. These include low-cost accommodation for short and long periods for both residents and tourists, spaces for the inclusive dissemination of art and culture, park-and-ride facilities (car-to-bicycle), and services and infrastructure for cycle tourism (Figure 3).



Figure 2. The unfinished reinforced concrete structure known as "La City", Pescara located near the airport and the Cammino d'Abruzzo route. [Source: authors].[1]

Establishing the intended uses requires the completion of the existing structure (consisting solely of raw-finish slabs and columns). Therefore, a further objective of the experience is to propose reversible hyperlocal works such as: vertical enclosures and partitions, and the addition of functional layers to existing floor slabs (insulation and finishing) for parking, housing, and collective activities (study, work, leisure); and the addition of complete enclosures through infill interventions (Immersive Boxes) for artistic and cultural performances.

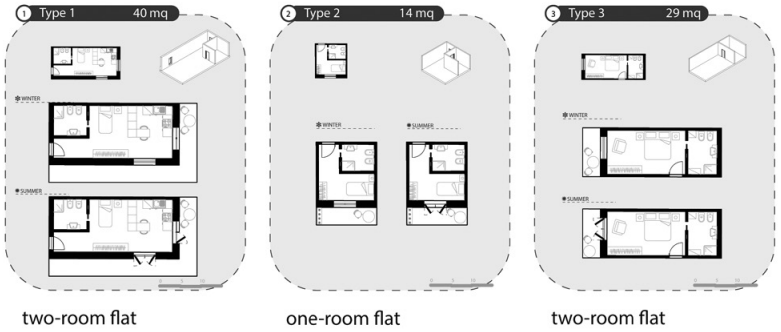


Figure 3. Design proposal for low-cost accommodation within the "La City" structure, showing reversible hyperlocal infill systems for short- and long-term stays. [Source: authors].

As regards the municipality of Calascio (Figure 4), following consultation with the local administration and the resident community, it was decided to launch a design experiment to define hyperlocal building modules to serve cycle tourism needs, including overnight shelters, first aid stations for people and bicycles, and information boxes. All planned building works, in addition to being based on the principles of hyperlocal architecture, provide for the future reusability of technological units and their components.



Figure 4. The high-altitude environmental context of Calascio (AQ), showing the landscape of dry-stone terraces, chestnut forests, and mountain pastures that constitute the resource base for the HYLA approach. [Source: authors].

3. Results

The territorial and environmental characteristics of the two selected contexts determine very different sets of requirements for the proposed hyperlocal works. In both cases, however, the process of defining requirements begins with the systematic resource mapping described in Phase 1 of the HYLA method: an area walkable in under an hour, which defines the field for sourcing materials, craft skills, storage infrastructure, and maintenance networks (Geissdoerfer et al., 2017).

3.1 Territorial and Environmental Characteristics and Requirements of Hyperlocal Building Systems

The coastal context of Pescara is characterised by a high availability of construction and industrial waste flows interceptable within the defined 3 km^2

radius: metal profiles and inert materials from urban demolitions, wooden pallets discarded by commercial and port activities, and technical fabrics recovered from the fishing and boating industries. The mapping around "La City" also revealed construction debris from university renovation sites and pruning waste from nearby parks and tree-lined avenues. The requirements of the hyperlocal building systems for Pescara derive from the nature of the existing structure — a raw reinforced concrete frame of four levels, devoid of any enclosure elements — and from the mixed functional programme defined in the analysis.

The high-altitude context of Calascio imposes severe environmental constraints, marked thermal fluctuations, significant snowfall, persistent winds, which translate into stringent performance requirements for the building modules intended for accommodation and first aid services. The mapping of a radius of approximately 1 km identified the following material resources: stone from dry-stone walls of abandoned terraces, chestnut timber from forest management, sheep wool from livestock farming, and clay from mountain riverbeds (Forlani & Mastrolonardo, 2014).

The selected materials belong entirely to the biological loop of the circular economy: at the end of the artefact's life cycle, all components can be returned to the natural environment or reused in new construction cycles without generating waste. The modules are also designed for seasonal management: assembly in spring, use during the summer trekking season, and partial dismantling in autumn to preserve the most sensitive components during the winter season.

3.2 Circular Strategies and Material System

Across both case studies, the HYLA approach adopted the distinction between biological and technical loops as a guiding criterion for the selection and functional assignment of materials. At a theoretical level, renewable materials, wood, plant fibres, wool, clay, are assigned functions with shorter life cycles, such as insulation, finishes, and cladding, in order to facilitate replacement and return to the biosphere at the end of their useful life. Technical loop materials, metals, mechanical components, are reserved for structural elements intended to endure over time and to be reused across multiple construction cycles.



Figure 5. Two of the three modules realised during the HYLA summer school in Pescara, showing the use of recovered materials (wooden pallets, metal profiles) assembled with reversible mechanical connections. [Source: Note 1].

At the international construction workshop in Pescara (HYLA summer school, September 2025), work focused on support artefacts for services rather than on closed and insulated enclosures, in order to test, in an experimental and rapid manner, the construction possibilities using pre-determined, locally available waste materials. Priority was therefore assigned to the direct reuse of materials recovered from the territory, with reversible mechanical connections and component standardisation, ensuring the highest possible use value for the materials throughout the entire life cycle of the artefact (Figure 5).

3.3 Deconstruction and Reuse

The application of the reuse practice within the summer school led to the design and construction of three simplified modules serving slow tourism between Pescara and Calascio. Dry construction techniques were employed, capable of facilitating end-of-life decommissioning and disassembly of the building system, ensuring the recovery, reuse, or recycling of components. This approach seeks to go beyond the concept of Design for Disassembly, moving towards Design for Deconstruction and Reuse as proposed by Selvaraj and Chan (2024), shifting from demolition to deconstruction, considering decommissioning from the earliest stages of the building system design process, favouring interlocking connections and the full reversibility of interventions without damaging individual components (as De Gregorio et al., 2020).

In the HYLA experience, the use of the direct reuse practice proved central, as it allows drawing on different types of materials, from construction sites, decommissioned buildings, and deconstruction activities, at zero kilometres. In this way, a short supply chain is created, capable of reducing the impacts related to transport and the embodied energy of materials (Capasso, 2025). Favouring recovered materials means eliminating the energy costs arising from the reprocessing phases associated with recycling, and reducing the impact that the construction sector has on the extraction of natural resources. The practice of direct reuse is a model based on the circular economy that requires not only regulatory and political effort to ensure its sustainability (Selvaraj and Chan, 2025) and safety, but also a cultural effort to convert the idea of waste into a resource.

Environmental benefits: evidence from the literature. Although no primary Life Cycle Assessment (LCA) was conducted on the HYLA modules, secondary data from the literature support the environmental rationale of the approach. Research has demonstrated that natural insulation materials of local origin, such as sheep's wool, can reduce CO_2eq emissions by up to 98% compared to commercial synthetic alternatives such as polystyrene, while cellulose fibre achieves reductions of approximately 75% (Zabalza Bribián et al., 2011). Sheep's wool, used as insulation in the Calascio modules, has an embodied energy of only 6 MJ/kg, compared to 101 MJ/kg for polyurethane foam and 26 MJ/kg for glass mineral wool (GreenSpec, cited in Local Surveyors Direct]. Furthermore, recent studies have shown that the use of locally sourced, low-carbon materials can reduce material embodied carbon by approximately 40% and transport-related carbon footprint by approximately 39% compared to conventional construction materials [Hla Toe Aung et al., 2024). These findings, combined with the zero-kilometre sourcing strategy and the elimination of industrial reprocessing through direct reuse, suggest that the HYLA approach could achieve an overall GWP reduction in the range of 30–50% compared to equivalent conventional construction, a hypothesis that future primary LCA studies on the HYLA prototypes should verify.

It is precisely in this perspective that, in the HYLA context, the choice to work exclusively with reuse materials sourced from the Pescara area represented a generative constraint, which made it possible to orient the construction solutions towards the maximum exploitation of the intrinsic characteristics of each recovered material, rather than compensating for their limitations with additional products or processing. This approach could be combined with the reuse of building elements which, beyond the benefits of reuse itself, carries with it a strong connection to the historical and cultural identity of the territory (Zatta, 2025). To this end, an abacus of available elements was provided to the summer school students, who were able to reuse or re-employ them in the design of new systems.

4. Conclusions

The experiments conducted document the rapid validation of the hyperlocal approach in radically different contexts in terms of scale, density,

climate, and resource availability. In both cases, the application of the principles of reuse and circularity at a hyperlocal scale makes it possible to reduce the consumption of new resources and the environmental impact associated with the transport and production of construction materials. Evidence from the literature suggests that such strategies, combining zero-kilometre sourcing, biological-loop materials, and direct reuse, can achieve GWP reductions in the range of 30–50% compared to conventional techniques, a finding that underscores the environmental relevance of the HYLA approach and warrants future validation through dedicated LCA studies on the constructed prototypes.

Yet the process revealed that the most significant added value lies beyond the purely technical dimension: it resides in the participatory phases of co-design and community listening, conducted in direct dialogue with local administrations. This co-design dimension is not a preliminary formality but a structural component of the hyperlocal method itself.

The connection between the two poles of the system, the coastal city and the mountain village, via the Cammino d'Abruzzo configures a replicable model: the same design philosophy, adapted to the specificities of each context, produces coherent interventions that support the development of slow tourism as a tool for territorial rebalancing. The construction modules tested can be iterated along the entire route of the Cammino, generating a network of lightweight, reversible infrastructures that are materially rooted in the territories they traverse.

Equally central to the research was the construction phase itself, which proved to be far more than a technical verification of the design hypotheses. The self-build experience of the HYLA summer school brought together architecture students from profoundly different academic and cultural traditions, Italian and Korean schools among them, generating an unexpected but generative confrontation between distinct approaches to making, material culture, and spatial thinking. Working side by side on the same physical artefact, with the same recovered materials and reversible joints, exposed participants to construction logics and tacit knowledge that no design studio exercise can replicate. This cross-cultural, hands-on dimension enriched the research with perspectives that transcend any single disciplinary or national tradition, and points to the international

design–build workshop as a privileged instrument for advancing hyperlocal architecture research.

Future research should include primary LCA analyses of the HYLA modules, systematic monitoring of the seasonal assembly–disassembly cycles in Calascio, and the extension of the resource mapping methodology to additional contexts along the Cammino d'Abruzzo.

[1] The project was designed and built in self-construction during the Summer School — HYperLocal Architecture (HYLA) — to support slow tourism, funded by the Newseason project, PNRR National fund.

Bibliographic references

Capasso, M.C. (2025). LCA and Cumulative Energy Demand of hemp building products. *Agathón, 18*, pp. 276–293. https://doi.org/10.69143/2464-9309/18162025

De Gregorio, S., De Vita, M., De Berardinis, P., Palmero, L., & Risdonne, A. (2020). Designing the Sustainable Adaptive Reuse of Industrial Heritage to Enhance the Local Context. *Sustainability*, *12*, 9059. https://doi.org/10.3390/su12219059

Di Giovanni, E., & Salzano, D. (2025). Atti del Workshop Aree interne, spopolamento e rigenerazione territoriale, Fisciano (SA), 26 novembre 2024, Cnr, Istituto di studi sul Mediterraneo, Cnr Edizioni, 2025, pp. 11–15. https://doi.org/10.48217/MNLSDG01

Forlani, M.C., & Mastrolonardo, L. (2014). Sustainable building and local resources. TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment, (7), 194–203. DOI: 10.13128/Techne-14550

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., & Hultink, E.J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production, 143*, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Hla Toe Aung, M.T., Tha Pyae Sone Aung, P., & Eaindray Khaing, N. (2024). Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings. *Ain Shams Engineering Journal, 15*(5), 102680.

Local Surveyors Direct (n.d.). The pros and cons of sheep's wool insulation for your home. Available at: https://www.localsurveyorsdirect.co.uk/pros-and-cons-sheep's-wool-insulation-your-home [Accessed March 2026].

Sargolini, M., Brunetta, G., Galuzzi, P., Radogna, D., & Vitillo, P. (2026). *Dopo il terremoto. Strategie e metodi per la rigenerazione di aree vulnerabili*. Carocci, Roma, pp. 37–41.

Selvaraj, S., & Chan, T.M. (2025). Recommendations for implementing circular economy in construction: direct reuse of steel structures. *Journal of Construction Steel Research, 214*, 108439. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108439

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment, 46*(5), 1133–1140. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002

Zatta, E. (2025). *Elementi del riuso: il valore di prodotti e componenti edilizi nella progettazione sostenibile e circolare*. IUAV University dissertation.

Hyper-Local Self-Built Infrastructures for Slow Tourism

Matteo Clementi*

Associate Professor, Politecnico di Milano, Department of Architecture and Urban Studies, Italy. *matteo.clementi@polimi.it*

Tae Han Kim

Full Professor, Sangmyung University, Department of Green Smart City, Republic of Korea. *taehankim@smu.ac.kr*

Jae Young Lee

PhD student, Sangmyung University, Department of Green Smart City, Republic of Korea. *hongyi968563@gmail.com*

Abstract: this paper presents the outcomes of the summer school *HYLA: Hyper-Local Architecture to Support Slow Tourism*, focused on the design and self-construction of modular architectural devices intended to serve the Cammino d'Abruzzo pathway. The project explores hyper-local architecture as an approach that integrates local cultural, environmental, and material contexts into sustainable building practices, promoting circular economy dynamics in inland areas.

The proposed system consists of small-scale, modular, and easily dismountable timber structures designed to support slow tourists traveling on foot or by bicycle. Conceived as open-source and community-managed devices, the modules provide basic services such as shelter, temporary storage, and renewable-powered charging for e-bikes and electronic devices. At the same time, they are designed for hybrid, year-round use, supporting small productive activities linked to pastoralism and emerging local supply chains.

Circularity operates at two levels: in material sourcing—through the reuse of locally available construction waste, reclaimed timber, and second-generation photovoltaic panels—and in service integration, by embedding renewable energy production and low-impact mobility within a broader bioregional development framework. The photovoltaic system is dimensioned to guarantee at least one full e-bike recharge per day (300–400 Wp per unit), with scalability according to seasonal demand.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Corresponding author

By linking tourism infrastructure with local resource cycles and community participation, the project proposes a replicable, low-cost model for activating sustainable territorial metabolism in fragile inland contexts.

Keywords: hyper-local architecture, slow tourism infrastructure, circular economy, bioregional development, modular self-construction.

1. Introduction

This paper presents selected outcomes of the summer school *HYLA: Hyper-Local Architecture to Support Slow Tourism*, held in September 2025 in Pescara, which brought together students and faculty from the Sangmyung University (South Korea), the University of Chieti–Pescara, and the Politecnico di Milano. Hyper-local architecture refers to a design philosophy that prioritizes the integration of local cultural, environmental, and social contexts into architectural practice. The notion of hyper-local architecture extends beyond the mere use of locally sourced materials, encompassing a design approach that integrates localized energy systems, place-based production chains, and community-driven construction processes. This approach promotes the use of locally sourced materials, local energy sources, and local production and construction techniques, fostering sustainable building processes that resonate with community identity and specific territorial needs. "HYLA: Hyper-Local Architecture to Support Slow Tourism" focused on the design of small-scale architectural devices intended to support slow tourism. These are temporary or semi-temporary micro-architectures that function as infrastructural nodes for tourists traveling on foot or by bicycle along interconnected routes, specifically the Cammino d'Abruzzo pathway (Figure 1).

The underlying idea of the proposal is to interpret the design of carbon-neutral facilities for slow tourism within existing settlements as a first step toward a broader strategy aligned with bioregional development (Magnaghi, 2020; Bolognesi & Magnaghi, 2021). The aim is to transform specific portions of the territory toward a more sustainable territorial metabolism, particularly regarding energy, water, and food consumption.

More specifically, this paper addresses the creation of a support infrastructure for tourism that simultaneously fosters innovative dynamics related to the local circular economy in inland areas. In this context, circularity assumes two distinct but interconnected meanings:

1. Material and energy circularity, guiding the selection of construction materials and energy supply strategies in order to reduce costs and activate virtuous local economic cycles that maximize territorial benefits.
2. Service-integrated circularity, embedded within the tourism model itself. Slow tourism is inherently linked to sustainability, and in the case of inland territories historically shaped by resource-based cultures, it must also engage with principles of bioregional development.

The proposal presented here aims to support both tourism activities and small-scale productive initiatives. The issues of mobility and temporary storage are addressed through devices that can recharge electric bicycles, temporarily store luggage or transport equipment, and at the same time support emerging productive chains that naturally intersect with responsible slow tourism.

In order to ensure year-round usability, the infrastructure is conceived as a hybrid system. On the one hand, it serves slow tourism; on the other, it supports small productive activities linked to pastoralism and new circular supply chains that require temporary storage, small-scale transformation, and distribution.

During the summer school, students were encouraged to design a modular system that is easily disassembled and oriented toward self-sufficiency in terms of energy and materials supply.

The modules are lightweight and easy to assemble or dismantle as needed, allowing them to be stored when not in use.

The system supports the basic daily activities of slow tourists throughout the year, including:

- Moving and communicating
- Temporarily resting
- Eating

During periods of lower tourist attendance, the infrastructure can be repurposed to support small-scale experimental production chains. For

instance, it may facilitate the collection, temporary storage, initial processing, and distribution—via cargo bikes—of raw wool, which is currently often regarded as a low-value by-product and difficult-to-manage waste material within pastoral economies.

By enabling this seasonal functional shift, the system operates as a flexible territorial device capable of adapting to fluctuating demand. This hybrid use reinforces circular economy principles by extending the lifecycle and utilization rate of the infrastructure while simultaneously reactivating marginal local resources and micro-supply chains (Geissdoerfer et al., 2017; Pomponi & Moncaster, 2017).

In this way, the architectural device transcends its role as a tourism support structure and becomes part of a broader regenerative territorial strategy, linking mobility infrastructure with local productive ecologies.

2. Methodological approach

The system was conceived as an open-source project, intended to be made available to the local community and designed to be managed and implemented directly by local actors. The methodological framework adopted in this research is structured in three main phases: (1) resource mapping through the Local Atlas of Energy and Matter, (2) stakeholder engagement and needs assessment, and (3) design-build experimentation through self-construction processes.

This approach differs from conventional circular economy frameworks in construction, which typically focus on material efficiency or lifecycle optimization, by integrating spatial, social, and productive dimensions within a place-based design process.

As an open-source initiative, the methodological approach proposed during HYLA is based on a tool previously tested in other research contexts: the Local Atlas of Energy and Matter (Atlante Locale di Energia e Materia) (Migliore et al. 2026).

The Atlas collects information regarding locally available materials at no cost, including construction waste streams and discarded resources, together with data related to locally available renewable energy sources (Figure 2). These datasets are organized within a territorial information system and structured according to a square grid that subdivides the

areas crossed by major local routes, starting from the Cammino d'Abruzzo. The Atlas therefore operates not only as a descriptive tool but also as a projective device, enabling the translation of territorial data into design decisions grounded in locally available resources.

The second step of the methodology involves identifying and understanding the needs of local stakeholders. In this specific case, attention was given to public-oriented activities in the municipality of Calascio, with particular focus on cooperatives providing services connected to municipal functions. The local cooperative *Vivi Calascio* highlighted specific needs related to the management of tourism services and the rental of electric bicycles, which it directly operates.

Discussions with the local administration also revealed emerging initiatives of strategic interest, such as the recently established School of Pastoralism and the development of a new camping area in the valley below the historic settlement.

Based on the mapping of local resources and the identification of community needs, students proposed a lightweight infrastructure grounded in self-construction processes and the local sourcing of materials. The aim was to create a system that could respond simultaneously to tourism-related functions and to emerging productive and educational activities linked to the territory.

The modularity and flexibility of the proposed layout allow the system to adapt to different numbers of users, depending on site-specific conditions and its relationship with the existing urban fabric and the surrounding natural environment.

All components are designed to be removable by two people and transportable using means readily available within the local community. Road transport constraints were also taken into account: given a maximum vehicle width of 2.55 m (e.g., standard trucks), individual disassembled elements must comply with these dimensional limits.

The route shown in Figure 1 illustrates the articulation of the Cammino within the Abruzzo region. By overlaying a 1000 × 1000 m grid onto this area. The Cammino d'Abruzzo is divided into several segments, encompassing both major urban centers and remote inland areas characterized by high landscape quality and small historic settlements. This diversity enabled students to design in two contrasting territorial contexts: densely

populated areas and sparsely inhabited inland landscapes. Although the project is exploratory in nature, its effectiveness can be assessed through a set of qualitative indicators, including:

- adaptability of the system to different uses and seasonal conditions;
- integration with local material and energy flows;
- degree of community involvement in the self-construction process;
- capacity to support emerging local productive chains.

These criteria allow the system to be evaluated not only in technical terms but also in relation to its social and territorial impact.

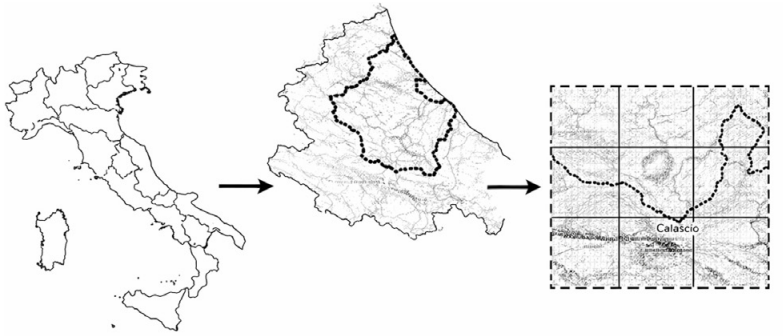


Figure 1. The route of the Cammino d'Abruzzo within the Abruzzo region and the portion crossing the settlement of Calascio on a 1000m-side grid.

Supported activities and users

Although the broader intervention area includes both urban and inland contexts (Radogna, 2022; Radogna & Vasapollo, 2026) the proposal discussed in this paper focuses specifically on the area of Calascio, a small mountain village in the Province of L'Aquila (Abruzzo, Italy), characterized by a high-quality landscape, a limited resident population, and a strong historical link to pastoral and transhumance traditions.

The primary users of the project are:

- Slow tourists
- WWOOFers (Willing Workers on Organic Farms)

The designed devices support both tourist mobility—providing renewable-powered charging stations for e-bikes and electronic devices—and local production chains, including the recharging of transport vehicles used for goods distribution and the storage and redistribution of local products in areas where direct sale is not feasible due to distance constraints. Figures 3, 4 and 5 illustrate one of the proposals forming part of the overall infrastructure system, developed during the summer school and realized through a hands-on self-construction workshop with the students

3. Local materials

The thematic structure of the Local Atlas of Energy and Matter organizes information according to a set of categories related to locally available materials and energy sources. In particular, it includes:

- Waste streams generated by the local community.
- Waste associated with local construction and productive activities.
- Waste derived from agricultural activities.
- Materials made available by local natural ecosystems.
- Locally available renewable energy sources, with particular emphasis on solar energy.

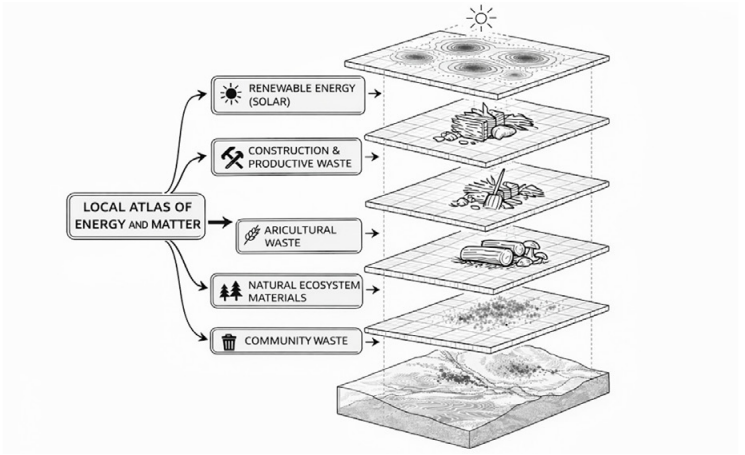


Figure 2. Representation of the thematic categories included in the Local Atlas of Energy and Matter and related to the context of Calascio.

The design proposals developed by the students are therefore grounded in the optimized use of these categories. The proposed system is conceived as materially adaptable, allowing for the selection of different resource streams depending on their actual availability during the construction phase.

This flexibility enables the infrastructure to operate as a dynamic, resource-responsive system, capable of adjusting to temporal variations in local material flows and reinforcing the circular relationship between construction processes and territorial metabolism.

The devices are based on a modular structural system inspired by the Segal method, but reinterpreted through triangular portal frames (Broome, 1986; McKean, 1989). The structures are built in timber and conceived to reuse discarded shoring beams and locally sourced pine planks.

The photovoltaic panels used in the prototypes were former exhibition panels of an older generation, still functional and available at no cost.

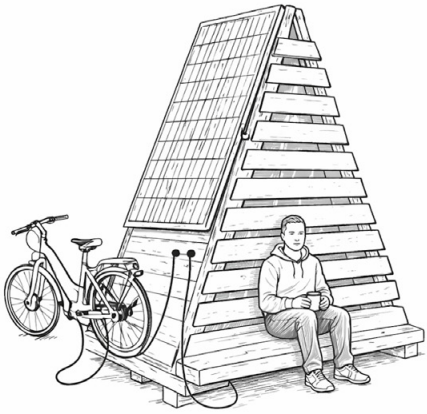


Figure 3. View of one of the devices supporting cycling mobility, designed for charging and temporary storage of electric bicycles, as well as for powering small electronic equipment.

Envelope elements are designed to provide different performance levels depending on the hosted activities. In the case of e-bike charging stations and temporary storage units, the enclosure consists of reclaimed spruce

construction boards. More broadly, the proposed system can be positioned within contemporary construction approaches based on modularity, design for disassembly, and self-build practices, which aim to reduce material consumption while increasing adaptability over time.

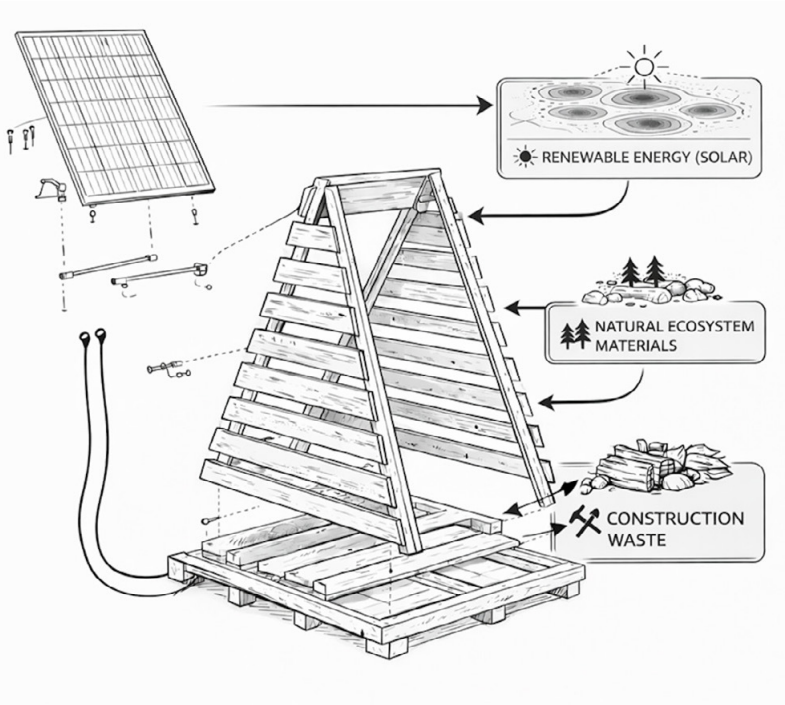


Figure 4. Exploded axonometric view of the same device, illustrating the origin of the materials used in relation to the Local Atlas of Energy and Matter.

Further developments currently being investigated within graduate thesis research explore the adaptation of the same system into small temporary shelters for travelers. In this configuration, locally sourced wool could serve both as an insulation material and as a resource for the production of padded resting elements or short-stay sleeping solutions, strengthening the circular link between slow tourism and local pastoral economies.

The use of raw wool—often considered a low-value by-product of pastoral activities—allows the reactivation of marginal local supply chains while reducing reliance on industrial insulation materials (Pomponi & Moncaster, 2017; Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Among the potential applications of wool within the proposed devices, its use as a support material for green walls is also envisaged. In this case, wool can function in the form of felt panels or as a biodegradable substrate capable of retaining moisture and nutrients. Such applications are consistent with research highlighting the hygroscopic, thermal, and biodegradable properties of natural fibers in building envelopes and vegetated systems (Asdrubali et al., 2015).

Furthermore, the project hypothesizes the cultivation of plant species directly related to wool processing within the local bioregional context. These include plants with high saponin content, such as *Saponaria officinalis*, traditionally used for washing wool, as well as dye plants suitable for natural fiber coloration. Integrating these species into the territorial system would not only reduce the environmental impact of chemical treatments but also strengthen the link between architectural infrastructure, local agriculture, and craft production.

By combining architectural devices with productive landscapes and local material cycles, the proposal expands the concept of infrastructure beyond tourism support, framing it as a catalyst for regenerative territorial practices.

The replicability of the proposed system depends on a set of context-specific conditions, including the availability of local material streams, the presence of community-based actors, access to small-scale renewable energy sources, and the adaptability of the modular system to different climatic and territorial contexts.

Rather than proposing a universal solution, the project defines a transferable methodological framework that can be adapted to different inland territories through the reinterpretation of locally available resources.

4. Energy supply

The width of the modular system is designed to accommodate a photovoltaic module positioned along the short side (approximately 1200 mm

wide). Depending on solar exposure and hosted activities, the system can integrate one or two panels, with an installed peak power between 400 and 800 Wp.

The photovoltaic generator was dimensioned to ensure at least one full e-bike charge per day. Typical e-bike batteries range from 400 to 700 Wh; assuming a reference value of 500 Wh and accounting for system losses due to conversion and storage, the daily energy demand is approximately 0.6 kWh.

Photovoltaic output depends on local solar irradiation and module orientation. Under conservative assumptions for Apennine contexts—considering limited winter sun exposure, partial shading, and non-optimal tilt—a peak power of around 300–400 Wp is sufficient to guarantee a complete recharge on most suitable days. This configuration also provides additional capacity for partial charging or small auxiliary loads such as lighting, USB outlets, or monitoring devices.

In cases of intensive use (multiple users per day) or concentrated tourist seasons, the system can be scaled linearly (e.g., 600–800 Wp for two full charges per day), maintaining the same calculation logic while verifying roof surface availability and site shading conditions.

5. Self-Construction and collaborative implementation

The project was designed and built in self-construction during the Summer School – BIP- Hyper Local Architecture to support slow tourism founded by Newseason project PNRR National found; Università degli Studi "G. D'Annunzio" (D. Radogna, L. Mastrolonardo, A. Basti) , Politecnico di Milano (M. Clementi), Sangmyung University (T. Kim, B. An, K. Ryuo), tutor: M.C. Capasso, S. De Gregorio, V. Lualdi, M. Romano, A. Vasapollo, J. Lee, J. Seo, M. Kim, students: E. Epifanio, F. Lelii, S. Citoli, S. Volpe, A. Jeon. This design-build experience represents a key component of the research, enabling the direct testing of the proposed system through hands-on experimentation and community engagement**.**

Further developments of the system are currently underway in collaboration with Federico Angeloni (service designer), with the aim of adapting the structure to host a removable solar-powered micro-laundry. This

device is designed to enable on-site washing of small quantities of raw wool through the use of locally available renewable energy sources.

This experimentation is part of the project *TAM – La cultura è un fiume (https://tam-morcone.it/)* and builds upon a series of workshop-based activities focused on mapping rural metabolism in the municipality of Morcone, in the Campania Region, developed during the Rural Design Week 2026.

This ongoing research and experimentation further demonstrates the adaptability of the proposed system and its potential to support emerging circular production chains linked to local pastoral practices.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the local company Abruzzo Service for their technical support and for the provision of materials essential to the implementation of local renewable energy solutions within the project.



Figure 5. Some photographs of the self-construction workshop held in September 2025.

Bibliographic references

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002

Bolognesi, M., Magnaghi, A. (2021). Le condizioni del dialogo fra montagna e città: l'esempio della bioregione urbana delle Alpi Apuane, in *Urbano montano. Verso nuove configurazioni e progetti di territorio*. Franco Angeli

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy*.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., & Hultink, E.J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production, 143*, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Magnaghi, A. (2020). The territorialist approach to urban bioregions, in Fanfani D., & Matarán Ruiz A. (Eds.], *Bioregional planning and design: Perspectives on a transitional century*, pp. 33–61. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45870-6_3

McKean, J. (1989). *Learning from Segal: Walter Segal's Life, Work and Influence*. Birkhäuser.

Migliore, M., Bartezzaghi, G., Caputo, P., Clementi, M., Del Curto, B., Dessì, V., ... & Valassina, S. (2026) Bioloop: Empowering Peri-Urban Communities in Circular Solutions for Resilient and Participatory Economies, in H. Mahmoud, S. E. Bibri (eds.), *Innovative Technologies and Circular Solutions for Sustainable Urban Communities - Volume 1, Advances in Science, Technology & Innovation*, https://doi.org/10.1007/978-3-031-99036-6_9

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055

Radogna, D. (2022). Resilienza e rigenerazione nei territori fragili. Il caso dell'Abruzzo interno [Resilience and regeneration in fragile territories. The case of inland Abruzzo]. *Techne – Journal of Technology for Architecture and Environment*, *23*, 112–121

Radogna, D., Vasapollo, A. (2026) Towards an Evolutionary Regeneration from the Coast to the Inland Areas of Abruzzo to Activate Transformative Resilience, *Sustainability*, *18*(2), 827. https://doi.org/10.3390/su18020827

Designing and self-constructing in mountain contexts: prototyping for the Abruzzo inner areas (Italy)

Antonio Vasapollo*

PhD student, Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura, Italy. *antonio.vasapollo@phd.unich.it*

Stefania De Gregorio

Researcher, Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura, Italy. *stefania.degregorio@unich.it*

Miju Kim

PhD student, Department of Green Smart, Sangmyung University, Republic of Korea. *2026D3002@sangmyung.kr*

Abstract: the design and construction of architectural facilities serving mountain tourism (overnight shelters, refreshment points, information boxes, bike stations, etc.) represent a privileged field of experimentation in which architecture confronts extreme constraints and highly impactful operational conditions (transport logistics, limited water resources, severe climatic conditions, and a restricted construction time window). In response to these challenges, the paper presents a method for designing modular architectures for mountain tourism that employs prefabricated components to enable rapid assembly by non-specialized personnel, draws on local material supply chains, and integrates the self-build phase as an opportunity to promote environmental awareness within the community. The method is tested through the design of a reversible module serving the inner areas of Abruzzo (Italy), specifically addressing cycle tourism in the mountainous territory of the Municipality of Rocca Calascio. A full-scale prototype of a shelter module was realized through a self-build process involving architecture students, configured as a real-scale design–build educational experience. This allowed participants to engage directly with materials, joints, and construction techniques, developing a detailed understanding of construction constraints and the system's potential for refinement. The public exhibition of the prototype transformed it into a tool for awareness-raising, triggering spontaneous interactions with students, faculty members, and citizens. The installation operated as an infrastructure for community engagement, sharing the core themes of the project: the value of local material supply chains, the opportunities for reuse and upcycling of waste materials

* Corresponding author

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

in architecture, and the need to steer tourism development in inner areas toward slower and more sustainable forms of use.

Keywords: selective demolition, supply local chain, sustainable materials, community engagement, reuse.

1. Introduction

The design and construction of architectures serving mountain tourism (overnight shelters, refreshment points, information boxes, bike stations, etc.) constitute a privileged testing ground in which architecture is confronted with extreme constraints and operating conditions with a high impact on design decisions. Mountain architecture presents specific challenges that radically condition design and building choices (Dini and Girodo 2018; Miczka, 2025). Transport logistics is the first critical constraint: the absence of road access often requires the use of aerial transport. The time window available for construction is further restricted to 4–5 months per year, constrained by weather conditions and by wildlife protection regulations related to noise pollution. During construction phases, a peculiar "refuge–construction site coexistence" occurs, in which the facility must nonetheless guarantee a minimum level of operation as a safety outpost and emergency shelter for mountain users. The scarcity of water resources constitutes an additional essential constraint, requiring strict control of water use both during construction and in ordinary operation. Finally, extreme climatic conditions demand architectural and material solutions specifically designed to ensure mechanical resistance and adequate thermal insulation.

In response to these constraints, the analysis of international examples reveals the emergence of two distinct design models. The first, which can be defined as a high-tech prefabricated model, privileges the use of innovative composite materials, modular transport by helicopter, and preassembly/assembly carried out by specialized technical staff. Representative examples of this approach include the Gervasutti Bivouac by LEAPfactory (SUCAI, 2011), the Alpine Shelter Skuta designed by OFIS Architects (OFIS, 2015), the Shelter Santnerpass by Senoner Tammerle

Architekten (STA, 2024), and the bivouac designed by Carlo Ratti Associati (CRA, 2025). The second model, identifiable as a traditional low-tech community-based approach, instead prioritizes the use of local materials, traditional construction techniques, manual onsite building, and the direct involvement of non-specialist volunteers. In this approach, self-build acquires the status of an educational and social process, becomes an infrastructure for ecotourism, and transmits traditional building skills beyond a purely productive dimension. Significant examples include the Oberetteshütte Refuge in South Tyrol, rebuilt in 1988 (Oberettes, n.a.), the Muma Hut designed by WeWilder in Romania (WeWilder, 2020), and the Scottish Bothies managed by the Mountain Bothies Association (MBA, n.a.). The latter, founded in 1965, manages about 100 shelters in the Scottish Highlands and northern England. The Druimnashallag bothy is a building dating back to 1891 on the west coast of Scotland, abandoned for 70 years and currently under renovation (2023–ongoing) by 41 volunteers. This bothy exemplifies the lowtech community model through the absence of public funding, the use of local materials, traditional techniques and an entirely voluntary management structure. Starting from the analysis of these two polar design models, this contribution proposes and tests, through a concrete case study, a third hybrid model that combines the strengths of both approaches (Mastrolonardo and Clementi, 2024). This innovative model employs prefabricated components to facilitate rapid assembly by nonspecialist personnel, draws on local material supply chains, and integrates the selfbuild phase as an opportunity for proenvironmental awareness-raising within the community. Local materials also include those obtained from selective demolition and recovery processes, whose functional upcycling allows the maintenance of performance levels adequate to the new use. (De Gregorio, 2018). Within this design paradigm, the mountain shelter should guarantee also maintainability by nonspecialist users, an essential requirement considering that adverse weather conditions may prevent qualified technical interventions for extended periods. Selfbuild thus becomes a social and educational event for the local community, fostering proenvironmental behaviours through learning by doing (Tummers, 2016). The involvement of the local community goes beyond the dimension of environmental awareness-raising to become an expression of territorial identity. Local materials and the direct participation of inhabitants enable

the community to recognise its own cultural identity in the built artifact, encouraging practices of care and maintenance of the common good (Golden, 2017; Heffernan and De Wilde, 2020; Dipasquale et al., 2024).

2. Method

The research adopts a research-by-design approach, structured in five partially overlapping and iterative phases:

1. Contextual analysis of the inner Abruzzo areas was conducted, focusing on the territory of Rocca Calascio, considering environmental and climatic conditions, logistical constraints, regulatory landscape framework, availability of local and reclaimed materials, and tourist flows related to cycling and slow tourism.
2. Definition of performance requirements: reversibility (including minimal foundations), modularity, adaptability to climate change, flexible use, off-grid autonomy (renewable energy production and rainwater collection/management), use of sustainable materials and components, and provision of adequate environmental comfort for users.
3. Concept and module design: integration of prefabricated solutions with local material supply chains, considering from the design phase the possibility of assembly/disassembly by non-specialized personnel.
4. Prototyping through self-construction (design–build): a design–build workshop with students, organized into teams and preceded by technical training sessions. The temporary installation in a public space allowed the collection of qualitative feedback from students, faculty, and local citizens.
5. Evaluation and system refinement: the construction system was recalibrated based on on-site observations and collected feedback. The final evaluation compared the requirements (defined in phase 2) with the observed performance, assessing constructive feasibility, replicability, educational effectiveness, and the potential scalability of the model to other mountain contexts.

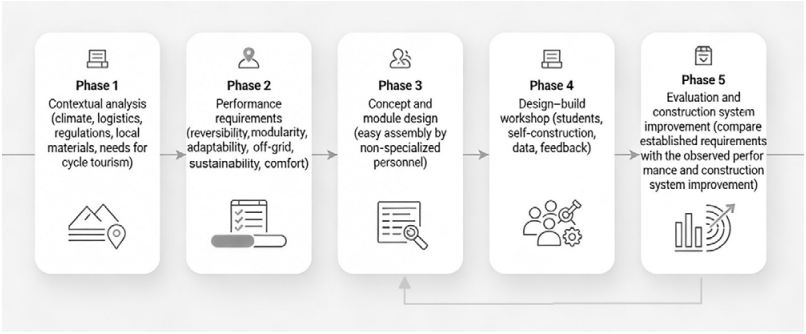


Figure 1. Method flow. [Source: authors' elaboration].

3. Results and discussion

The analysis of the context (phase 1) of Rocca Calascio, at approximately 1492 m a.s.l., has highlighted severe logistical constraints: limited road accessibility, extreme climatic conditions, and strict landscape protection requirements, with a growing demand for sustainable tourism infrastructure, making it an ideal testing ground for the hybrid model proposed in this research. The regulatory framework defined by the CAI imposes stringent requirements related to the classification of facilities. The facilities located more than four hours' walk away or accessible only by helicopter, require extreme logistical management (CAI, Annex 1, 2021). The analysis of the territory allowed us to identify sustainable local circular supply chains: waste materials from the post-earthquake reconstruction sites in L'Aquila (about 30 km away); conifer wood and sheep wool from the livestock supply chains present in the Campo Imperatore area (about 33 km away). The requirements defined in phase 2 directly informed both the concept and the constructive logic of the system. The design concept[1] develops a compact, box-like shape with a single-pitched roof to ensure durability and comfort in extreme weather conditions. The windows on two sides offer

[1] The project was designed and built in self-construction during the Summer School – BIP- Hyper Local Architecture to support slow tourism founded by Newseason project NRRP National fund; Università degli Studi "G. D'Annunzio" (D. Radogna, L. Mastrolonardo, A. Basti) , Politecnico di Milano (M. Clementi), Sangmyung University (T. Kim, B. An, K. Ryuo), tutor: M.C. Capasso, S. De Gregorio, V. Lualdi, M. Romano, A. Vasapollo, J. Lee, J. Seo, M. Kim, students: E. Epifanio, F. Lelii, S. Citoli, S. Volpe, A. Jeon. The research was supported also by a research grant from Sangmyung University.

panoramic views and maximize natural lighting. The project is conceived as a set of three modular functional units: a Waiting Area, a Refuge, and a Charging Area for e-bikes.



Figure 2. Overall view of the modules in the context of Rocca Calascio [Source: see Note 1].

The structural frame relies on a dry assembly of lightweight prefabricated components, connected through bolted joints and steel plates, with no invasive anchorage to the ground. Wooden platforms serve as ballast foundations, ensuring structural stability while preserving the full removability of the artifact. This approach responds directly to the CAI regulatory framework for fixed bivouacs and mountain support points (CAI, 2021), which requires minimal environmental footprint and guarantees the restorability of the site to its natural condition. The materials/components recovered from construction sites in L'Aquila were used in the design of the construction system: scaffolding tubes and joints, repurposed as the primary structural skeleton; timber boards and battens originally destined for formwork and temporary works, employed for cladding and internal partitions; wooden platforms serving the dual function of flooring and foundation ballast, pallets for the internal lining and to house the sheep's wool insulation and installations in their cavity. The construction system has been designed

to allow for dimensional flexibility of the casing in order to manage system integration and thermal insulation according to the intended use of the module and the relative needs of its users. The module can be constructed either through self-construction at altitude with air transport of materials, or through pre-assembly in the workshop and subsequent modular transport.

The design–build workshop structured the construction process as a simultaneous building and evaluation event. Student teams, following targeted technical training sessions, assembled the module using common tools, generating systematic data on assembly times, recurring errors, and problem-solving strategies. The participation of students from several universities and different countries (Italy and Republic of Korea) constituted an added value, as it brought together heterogeneous technical backgrounds and cultural perspectives, enriching the collective design discourse and fostering mutual learning dynamics within the design–build process. The observed results validated the constructive feasibility and educational effectiveness of the model, as well as its potential scalability to other mountain contexts with analogous constraints.

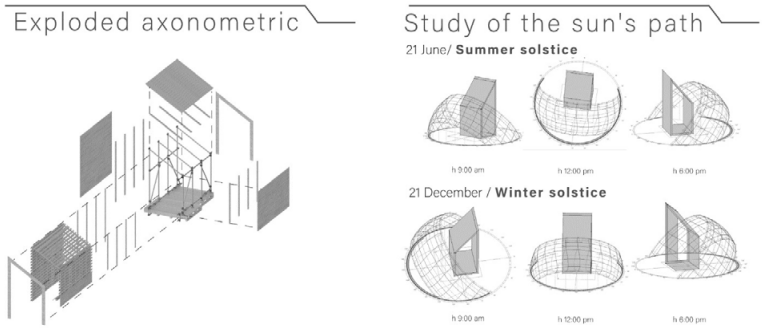


Figure 3. Exploded axonometric of the prototype module + study of the sun's path. [Source: see Note 1].

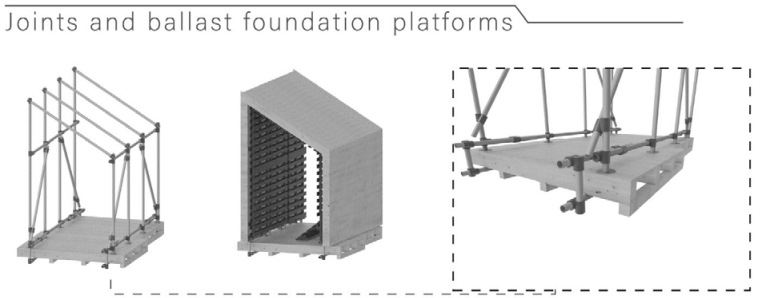


Figure 4. Details of the constructive joints and ballast foundation platforms. [Source: see Note 1].

The design–build workshop has confirmed the educational value of full-scale prototyping: the group of five participants dedicated 4 days of the summer school to design, then built the prototype in one day (8 hours) and an afternoon of work; the main construction challenge concerned



Figure 5. Assembly phases of the module during the workshop and construction site photography [Source: see Note 1].

the assembly of the roof, made complex by the height of the structure. Students acquired situated knowledge of construction processes, materials and joints, and developed collaborative problem-solving skills that are difficult to achieve in conventional studio settings. Dismantling, including the sorting and storage of recovered materials, was completed in just two hours. The temporary public exhibition of the prototype transformed it into a tool for awareness-raising, triggering spontaneous interactions with students, faculty members, and citizens. In this configuration, the installation operated as an infrastructure for community engagement, making visible and tangible the core themes of the project: the value of local material supply chains, the opportunities for reuse and upcycling of waste materials in architecture, and the need to steer tourism development in inner areas toward slower and more sustainable forms of use.

4. Conclusions

The research demonstrates that a hybrid approach to designing and self-constructing modular architectures for mountain tourism can effectively reconcile the demanding constraints of high-altitude contexts with goals of environmental sustainability, territorial identity and educational impact. The application of a research-by-design methodology, tested through the Rocca Calascio case study, has shown that the prototyped module is constructively feasible with non-specialised labour, adaptable to different functions and potentially replicable in other sites characterized by similar conditions. The proposed method outlines a transferable framework in which mountain architecture is conceived not only as technical infrastructure but also as a catalyst for circular local economies and collective learnings.

Bibliographic references

CAI – Club Alpino Italiano (2021). *Regolamento strutture ricettive del Club Alpino Italiano*. Milano: Club Alpino Italiano. Effective January 1, 2021. Available at: https://www.cai.it/wp-content/uploads/2024/04/Regolamento-strutture-ricettive-del-CAI-20201.pdf

CAI – Club Alpino Italiano (2021). *Regolamento strutture ricettive del Club Alpino Italiano — Allegato 1: Classificazione delle strutture ricettive*. Milano: Club Alpino Italiano.

CRA (2025). Available from https://carlorattiassociati.com/project/a-digitally-fabricated-bivouac-ahead-of-the-2026-olympics/ (accessed: 15.01.2026).

De Gregorio, S. (2018) (Ri-uso)^{n}. Le potenzialità del fine vita dei componenti in legno e in acciaio. Monfalcone: EdicomEdizioni.

Dini, R., Girodo, S. (2018)."Shelters in the night. The role of architecture in the process of understanding high-altitude areas." *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (106-1). https://doi.org/10.4000/rga.3919

Dipasquale, L., Ammendola, J., Montoni, L., Ferrari, E. P., & Zambelli, M. (2024). Harnessing vernacular knowledge for contemporary sustainable design through a collaborative digital platform. *Heritage*, *7*(9), 5251-5267. https://doi.org/10.3390/heritage7090247

Golden, E. M**.** (2017). *Building from tradition: Local materials and methods in contemporary architecture.* Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315693705

Heffernan, E., & De Wilde, P. (2020). Group self-build housing: A bottom-up approach to environmentally and socially sustainable housing. Journal of cleaner production, 243, 118657. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118657

MBA. Available from https://www.mountainbothies.org.uk/ (accessed: 17.11.2025).

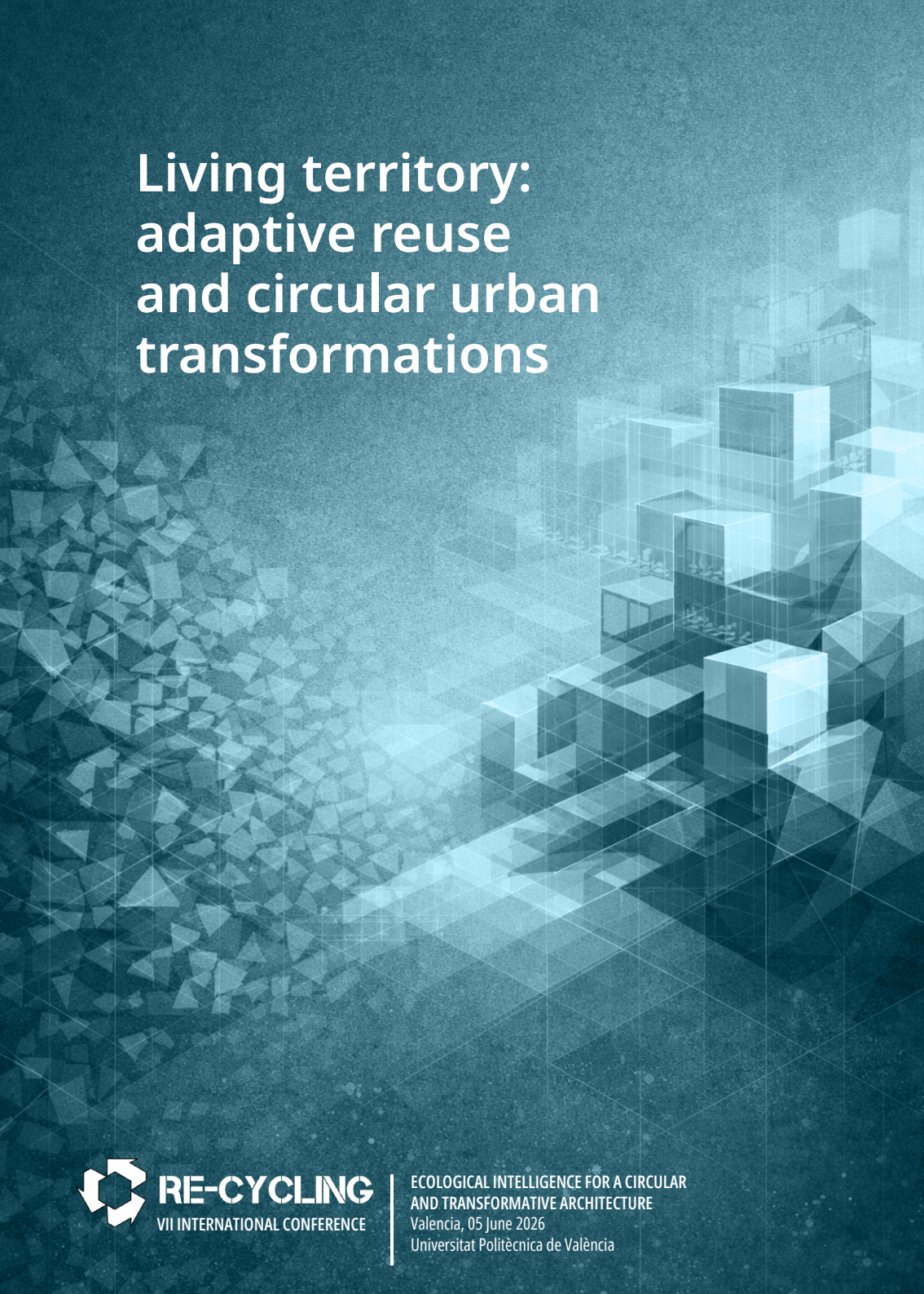
Miczka, J. (2025). Adapting mountain huts in the Western Alps to climate change: stakeholder adaptation strategies. *Mountain Research and Development, 46*(1), 00011. https://doi.org/10.1659/mrd.2025.00011

Mastrolonardo, L., Clementi, M. (2024). Industry 4.0 and Bioregional Development. Opportunities for the Production of a Sustainable Built Environment. In: Barberio, M., Colella, M., Figliola, A., Battisti, A. (eds) Architecture and Design for Industry 4.0. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36922-3_16

Oberettes. Available from https://www.oberettes.it/english.html (accessed: 12.01.2026).

OFIS (2015). Available from https://ofis.si/eng/home.html (accessed: 12.01.2026).
STA Senoner Tammerle Architekten (2024). Available fromhttp://www.senonertammerle.it/i_progetti.html (accessed: 12.01.2026).
SUCAI (2011). Available from https://www.sucai.it/bivaccogervasutti/ (accessed: 10.01.2026).
Tummers, L. (2016). Governing "Sustainable Urban Development" Through SelfBuild Cohousing Groups in Gothenburg. International Journal of Urban and Regional Research
WeWilder (2020). Available from https://www.archdaily.com/office/wewilder (accessed: 11.12.2025).

Living territory: adaptive reuse and circular urban transformations



RE-CYCLING
VII INTERNATIONAL CONFERENCE

ECOLOGICAL INTELLIGENCE FOR A CIRCULAR AND TRANSFORMATIVE ARCHITECTURE
Valencia, 05 June 2026
Universitat Politècnica de València

Costruire per il riuso. Pionierismi italiani per l'abitare provvisorio (1936-1945)

Building for reuse. Italian pioneers for temporary housing (1936-1945)

Laura Greco*

Professoressa associata, Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Italy.
laura.greco@unical.it

Francesco Spada

Assegnista di ricerca, Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Italy.
francesco.spada@unical.it

Abstract: the interest in the reuse of construction systems and components has favoured in recent decades a reconsideration from an environmental point of view of building industrialization, and of prefabricated systems, for their ability to support the topics –typical of reuse– of containing the consumption of resources, preventing the formation of waste, and maintaining the qualities of the original component. While reuse was a frequent practice in traditional masonry construction, it experienced a significant arrest in the first half of the twentieth century, even if some typologies, such as that of temporary constructions, escaped this trend. In the Italian context, the phenomenon is associated with prefabricated constructions aimed at the emergency building sector and settlements in the territories of the Italian colonies in East Africa in the 1930s and to demountable housing for the post-war emergency. The cases presented in these notes concern buildings developed in Italy with wooden and metallic structures and light curtain walls made with sandwich panels. These are buildings that no longer exist, or unrealized projects, which can only be investigated through archival documents. The construction histories of these examples reveal an *ante litteram* idea of buildings as resources intended for multiple uses. The values of these buildings and projects, developed between advanced expertise and proto industrialization, are the refinement of design processes, the development of components for walls, floors and roofs that can be demounted and reused, and the improvement of the connections.

Keywords: prefabrication, reuse, Italy, temporary buildings, twentieth century.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introduzione

L'interesse maturato per il riuso di sistemi e componenti edilizi ha favorito negli ultimi decenni una riconsiderazione in chiave ambientale dell'industrializzazione edilizia, e dei sistemi prefabbricati in particolare. Questi procedimenti, infatti, mostrano di assecondare le potenzialità del riuso come pratica capace di supportare, più di altre, la conservazione delle risorse e contenere la produzione degli scarti, nonché di favorire il mantenimento delle qualità formali, tecnologiche e culturali proprie del componente originario, senza richiedere impegni energetici e lavorazioni supplementari, se non quelle strettamente connesse allo smontaggio e alla ricollocazione dell'elemento stesso. Il riuso, diffuso nella prassi edilizia tradizionale a matrice muraria, ha subito una decisa frenata nella prima metà del Novecento, anche se alcune vicende, come quella delle costruzioni temporanee, sfuggono a questa tendenza. Nel contesto italiano, il fenomeno è legato a costruzioni prefabbricate rivolte al mercato dell'edilizia di emergenza, agli insediamenti nei territori delle colonie italiane in Africa Orientale degli anni Trenta e alle cellule abitative smontabili per l'emergenza postbellica.

2. Costruire per il riuso tra programma e contingenza

I casi presentati in queste note riguardano edifici prefabbricati temporanei, destinati alla residenza, messi a punto in Italia tra gli anni Trenta e Quaranta dello scorso secolo. Gli studi sviluppati finora sul tema, soprattutto nel campo delle ricerche sulle tecniche costruttive del Novecento, hanno messo in luce una produzione basata soprattutto su realizzazioni con strutture a matrice lignea o metallica (Greco, 2021; Greco & Spada, 2023; Morganti & Tosone, 2011) e tamponamenti leggeri realizzati con pannelli sandwich (Bertolazzi, 2017). Il repertorio è condizionato dall'esperienza autarchica e dalle politiche di espansione nei territori coloniali (Zagnoni, 1993), e influenzato dall'esperienza internazionale che ha preso forma negli anni Venti in Germania, in Inghilterra e negli Stati Uniti (D'Orazio, 2008). Il filone coloniale, alimentato dall'intraprendenza dei produttori più che dall'innovazione metodologica dei progettisti, provvede a definire, con strumenti convenienti sistemazioni essenziali nella fase di infrastrutturazione logistica ed economica dei territori. Gli esempi esaminati in questo studio sono tra i meno noti, e si distinguono nella produzione dell'epoca per la

smontabilità dei componenti, così da assicurare il riutilizzo degli stessi elementi, in luoghi e tempi diversi, nel medesimo schema tipologico, o in configurazioni modificate. Si tratta di edifici non più esistenti, o, in alcuni casi, di progetti non realizzati, indagabili solo attraverso i documenti d'archivio. Tra le pieghe delle storie costruttive che ne descrivono i caratteri emerge una sperimentazione *ante litteram* sulla gestione dell'edificio come risorsa da valorizzare per utilizzi molteplici, che prova un atteggiamento peculiare dei produttori stessi, interessati a questa visione dell'oggetto edilizio tanto da dedicarvi risorse, nonostante la domanda limitata e incerta, legata a contesti politici ed economici specifici. I presupposti da cui queste esperienze muovono sono però diversi dagli odierni principi di economia di risorse e di riduzione degli scarti nei processi di costruzione/demolizione. In quelle vicende la regola che accomuna il programma di produttori e progettisti è il principio di economia che forgia, per restare ai casi presentati in queste note, tanto il pragmatismo delle proposte di imprese come Palini, Pasotti e L'Invulnerabile, che ricercano la sintesi tra fattibilità costruttiva e rispondenza ai dettati di flessibilità funzionale della committenza, quanto il fondamento morale dell'operazione progettuale di Vittorio Gandolfi e Luigi Canella, adatto anche a conferire –nelle intenzionalità degli autori– qualità estetica alla dimensione costruttiva. Questi eventi suggeriscono un focus sulle sperimentazioni industrializzate alla piccola scala, sollecitate da condizioni di contesto anomale e indirizzi della domanda segnati dalla provvisorietà d'uso (Greco & Spada, 2023).

In termini costruttivi, queste piccole storie di industrializzazione si distinguono per diversi aspetti. Nella stagione autarchica degli anni Trenta, la valorizzazione di filiere produttive basate sullo sfruttamento dei residui provenienti dalla lavorazione del legno sostiene la diffusione di semilavorati come gli isolanti termoacustici (Populit, Eraclit, Tekton, CelBes, Celotex). Sul piano esecutivo, l'avanzamento compiuto nei cicli di produzione e di assemblaggio tra la metà degli anni Trenta e il dopoguerra, comporta la revisione dei sistemi di unione tra i componenti della struttura, e tra questi e i pannelli di tamponamento, anche per facilitare la reversibilità dell'apparecchiatura costruttiva. La necessità di razionalizzare le fasi di trasporto e montaggio, soprattutto nel periodo coloniale, promuove il criterio dell'intercambiabilità degli elementi, primi fra tutti i pannelli (di parete, di solaio e di copertura). Infine, il tema della standardizzazione dimensionale,

morfologica e tecnologica degli elementi assume in questi casi una finalità ulteriore, al di là della mera razionalizzazione dei processi di fabbricazione, trasporto e assemblaggio, che definisce i presupposti tecnici perché gli elementi possano essere intercambiabili, riutilizzabili, ricollocabili, seppure all'interno del medesimo schema costruttivo.

3. Le case in legno per le colonie italiane in Africa Orientale

Le realizzazioni italiane sono parte del mosaico di sperimentazioni estere, che negli anni 1930-40 sono promosse in Europa soprattutto dai progettisti, e di cui giova ricordare, per l'evidente e fortunata integrazione tra design del componente e standardizzazione produttiva, i padiglioni smontabili di Jean Prouvé per il Ministero dell'aeronautica e per il Genio (1939), prodromici delle proposte di case coloniali destinate ai territori francesi in Africa (1946-1953). Nella serie delle *maisons tropicales* la ricerca si incentra su soluzioni leggere a matrice metallica, sull'integrazione di dispositivi per il controllo climatico (solaio rialzato, coperture a impluvio ventilate, facciate *brise soleil*) e sull'attento studio degli arredi. La produzione italiana, da parte sua, privilegia le strutture lignee, pur non escludendo applicazioni a telaio metallico; punta sulla neutralità tipologica delle proposte, adattabili a residenze, uffici, servizi; soffre i limiti di scelte costruttive che non riescono a fronteggiare contesti climatici differenti, se non per pochi e insufficienti correttivi (solaio rialzato, portico perimetrale, essenziale isolamento termico delle pareti); sconta la difficoltà di queste soluzioni a rappresentare l'immagine dell'impero secondo i canoni estetici riconosciuti nel dibattito politico e architettonico dell'epoca. In estrema sintesi, il ricorso agli edifici smontabili non si consolida come opzione costruttiva prevalente, ma si afferma come campo di sperimentazione utile al più generale avanzamento della produzione di componenti prefabbricati.

La produzione della ditta Giuseppe Palini e Figli si distingue negli anni Trenta per la messa a punto di un sistema adatto alla realizzazione di edifici smontabili con diverse destinazioni d'uso, destinati, dal 1936, ai territori italiani in Africa Orientale.[1] Una soluzione riferita al mercato coloniale è un

[1] Per l'analisi della produzione di Palini si segnala la documentazione dell'Archivio INA-Assitalia, Fondo Colonie (d'ora in poi INA). In particolare, si veda la Lettera del dott. Borghesani per conto della Palini & Figli a INA. Lettera del 4.8.1936, INA, fascicolo 1.2.2.

padiglione a pianta rettangolare (12,12×8,98 m), composto di tre vani con annessi servizi (Figura 1).

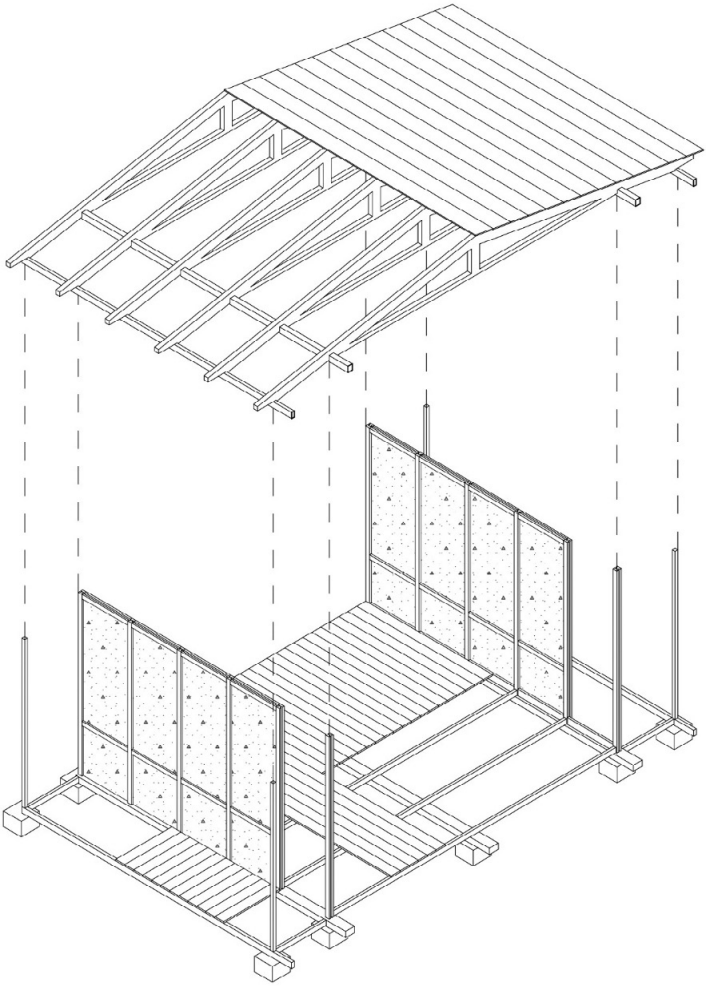


Figura 1. Padiglione Palini per abitazione presentato alla Fiera di Milano nel 1936. [Fonte: elaborazione di F. Spada].

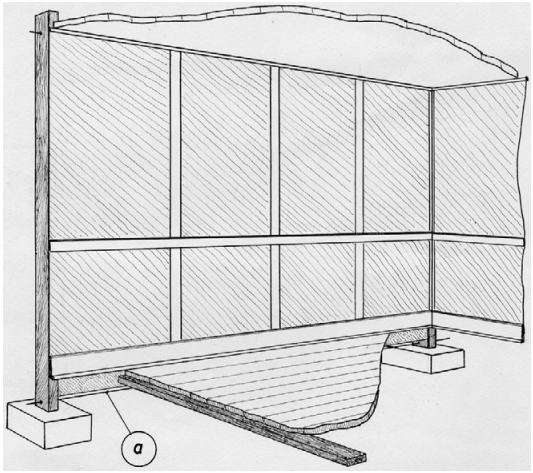


Figura 2. Brevetto Legnami Pasotti n. 353302 del 1937. [Fonte: Archivio Centrale dello stato, Roma – Ufficio Italiano Brevetti e Marchi, d'ora in poi ACS-UIBM].

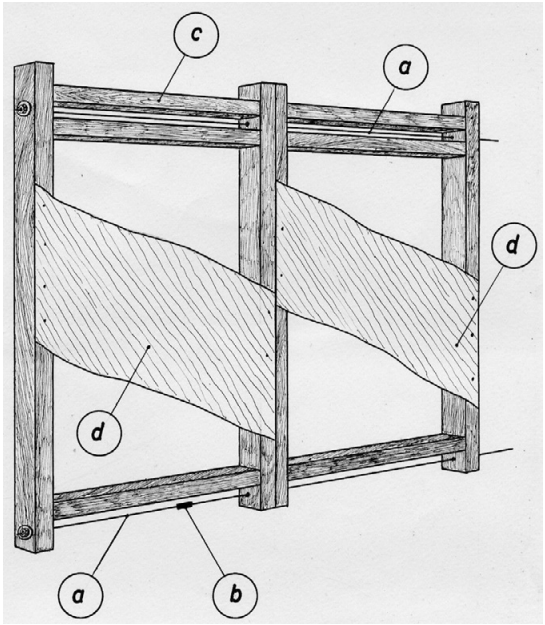


Figura 3. Brevetto Legnami Pasotti n. 353302 del 1937. [Fonte: ACS-UIBM].

L'apparato costruttivo è composto di elementi standard disposti su reticoli modulari. La copertura a padiglione è impostata su capriate smontabili e sovrastanti terzere di irrigidimento trasversale, su cui è disposto il tavolato di sostegno delle lastre di eternit.[2] Gli elementi di chiusura modulari (100×100 cm e 100×250 cm) sono generalmente composti di pannelli sandwich con strato isolante di Celbes e rivestimento di lastre di eternit e, all'interno, di faesite.

Soluzioni competitive, sempre destinate alle colonie italiane sono sviluppate anche da Legnami Pasotti, che nel 1937 deposita il brevetto n. 353302 concernente "Costruzioni edili smontabili ottenute a mezzo di elementi che formano contemporaneamente trave e parete" (Figura 2; Figura 3). Il sistema, basato su connessioni reversibili, comprende i traversi dell'intelaiatura che resistono a compressione, i tiranti metallici di collegamento che assorbono gli sforzi di trazione, i pannelli di rivestimento che contrastano le azioni di taglio e, infine, i solai, che irrigidiscono le pareti nel piano orizzontale.[3]

4. Case e villaggi smontabili per l'emergenza e la ricostruzione postbellica

Nel periodo bellico i sistemi lignei smontabili sono ancora in larga parte protagonisti della ricerca costruttiva sugli edifici temporanei, come testimonia la "Costruzione tipo 043" proposta da Legnami Pasotti, che si distingue per la "massima solidità e l'eccezionale rapidità di montaggio o smontaggio degli elementi" (Red., 1944a, p. 113-115).

Nello stesso frangente, la collaborazione tra Vittorio Gandolfi e Luigi Tanzi, titolare di un'azienda attiva nel settore del legno, si sostanzia nel prototipo di una casa prefabbricata in legno, ampliabile e smontabile in 48 ore. La struttura, combinata con pannelli rivestiti di larice, è composta di un'intelaiatura lignea di montanti, travi di base a sostegno del solaio inferiore, e traversi superiori per il supporto della copertura (Red., 1944b). Questo schema è affine alle unità abitative dei centri di attesa per senza tetto di Luigi Canella, nei quali il progettista considera "la possibilità di

[2] La descrizione del sistema è tratta dai disegni del padiglione coloniale presentato alla Fiera di Milano nel 1936, INA, fascicolo 1.2.2.

[3] A questo brevetto si fa riferimento nella fornitura all'Azienda Miniere Africa Orientale (AMAO) di edifici smontabili "tipo Africa" per l'insediamento di Ugarò. Archivio Centrale dello Stato-Roma, AMAO, Busta 7, Missiva AMAO Roma agli uffici di Asmara del 14/07/1939.

recupero e di riutilizzazione dei materiali stessi" parte essenziale del suo programma (Canella & Radici, 1944, p. 94-95). Le abitazioni sono basate su una struttura di tubi Innocenti, facilmente recuperabili dopo la dismissione degli edifici e tamponamenti prefabbricati.

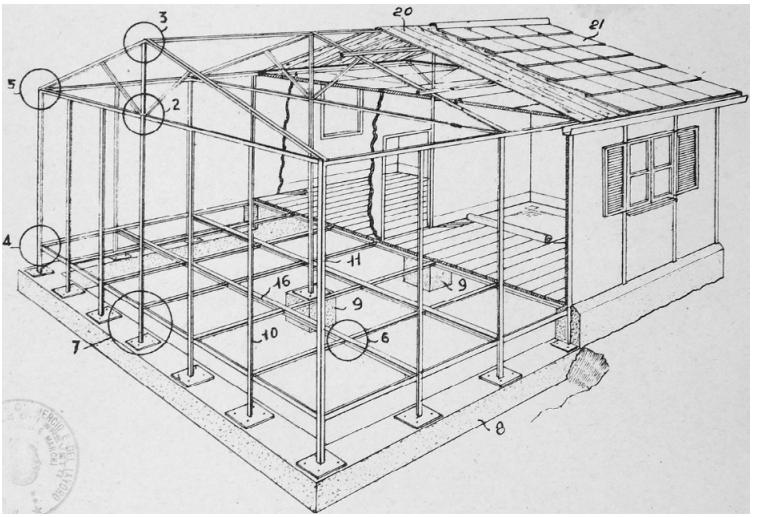


Figura 4. Schema costruttivo casa prefabbricata smontabile L'Invulnerabile, brevetto "Sistema per la costruzione rapida di case prefabbricate" [Fonte: ACS-UIBM, brevetto n. 412259 del 1946].

Agli anni del dopoguerra risalgono anche due brevetti dell'impresa L'Invulnerabile, già nota per le case smontabili di epoca coloniale a struttura metallica, che si distinguono per la razionalizzazione del collegamento tra struttura e pannelli di tamponamento. Il brevetto n. 412259 del 1946 è relativo a un "Sistema per la costruzione rapida di case prefabbricate smontabili" che impiega profili metallici per pilastri e traversi, e capriate per la copertura. La particolarità del ritrovato risiede nell'uso di ferri a doppio T con un'ala mobile, che facilita il montaggio/smontaggio dei pannelli leggeri di vario tipo con interposto strato isolante (Figura 4; Figura 5). Il brevetto n. 450964 del 1949, relativo a "Sistemi di costruzione leggera ad ossatura metallica e pannelli di materiali naturali o artificiali", si basa su profili sagomati di lamiera metallica da saldare per ottenere sezioni scatolari, e dotati

di alette, in parte mobili, per l'infilaggio dei pannelli di tamponamento, smontabili, e associabili a camere d'aria e strati coibenti (Figura 6).

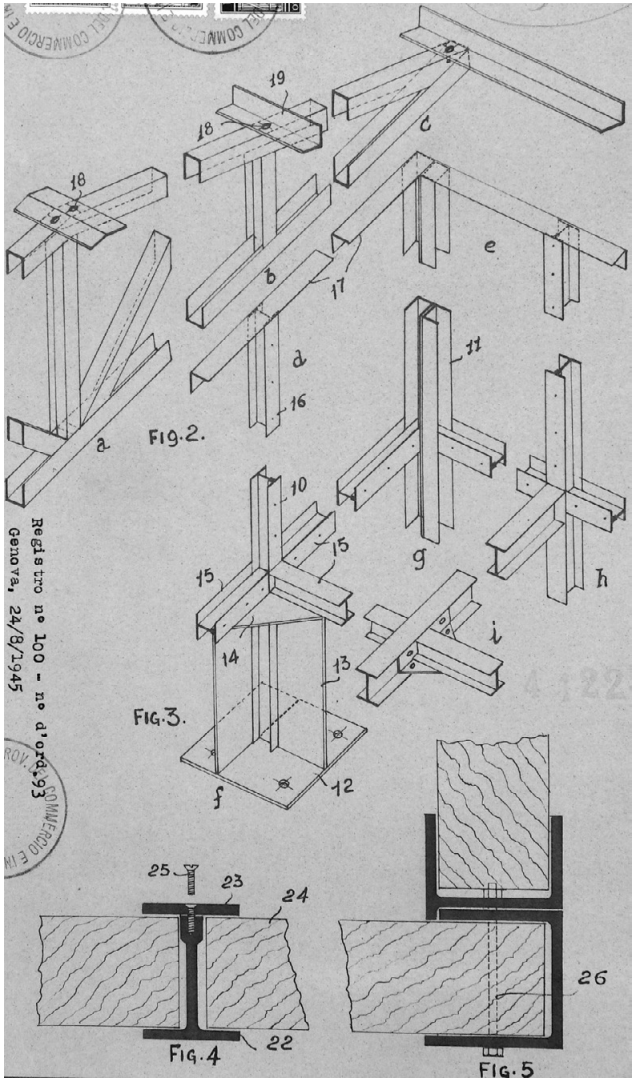


Figura 5. Dettagli nodi tipo della struttura e connessioni tra montanti e pannelli. [Fonte: ACS-UIBM, brevetto n. 412259 del 1946].

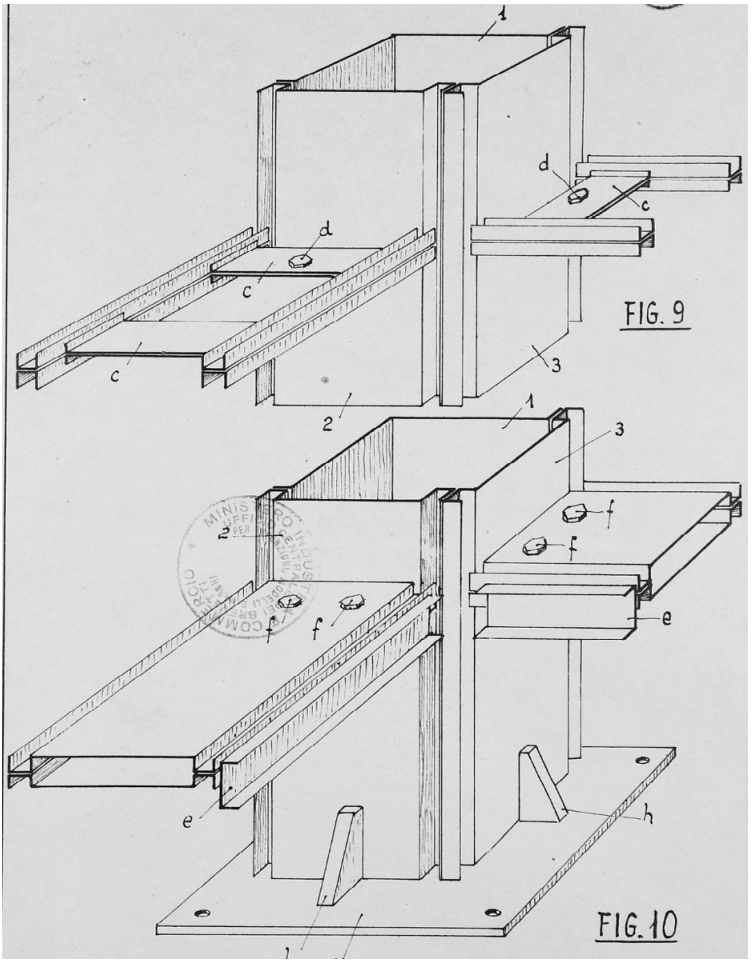


Figura 6. Profilati e connessioni tipo della struttura
[Fonte: ACS-UIBM, brevetto n. 450964 del 1949].

5. Conclusioni

La cura per il progetto di processi produttivi e di assemblaggio compatibili con il riuso dei componenti è uno dei lasciti delle sperimentazioni italiane sull'abitare provvisorio considerate in queste note. Un contributo

ascrivibile soprattutto all'iniziativa dei produttori, maturato tra le contingenze del periodo autarchico che portano in primo piano la filiera del legno, e la falsa partenza dell'industrializzazione edilizia negli anni della ricostruzione, durante i quali, nonostante il dibattito sulla realizzazione in serie degli edifici (si veda il lavoro sul tema della rivista *Cantieri*), la prefabbricazione rimane – nei fatti – una parte minoritaria del confronto sulle tecniche per la ricostruzione. Ciononostante, rimane inalterata la forza di questi pionerismi costruttivi, forgiatisi tra artigianato evoluto e protoindustrializzazione edilizia, il cui valore si concretizza anche nell'affinamento dei processi progettuali, nello sviluppo della componentistica per pareti, solai e coperture smontabili e riutilizzabili e nel perfezionamento della versatilità delle connessioni.

Acknowledgments

Le immagini sono pubblicate "Su concessione del Ministero della Cultura", come da dichiarazione di utilizzo inviata all'Archivio Centrale dello Stato (Com. N. 871/2026).

Riferimenti bibliografici

Bertolazzi, A. (2017). Gli isolanti termici (1920-1940). Tecniche e materiali nella costruzione italiana. Milano: Franco Angeli.

Canella, L., Radici, R. (1944). Centri di attesa per senza tetto. *Domus*, 195, pp. 93-104.

D'Orazio, M. (2008). Contributi alla storia della costruzione metallica. Progetti e realizzazioni degli anni '30 per l'edilizia abitativa. Firenze: Alinea.

Greco, L., Spada, F. (2023). Case a catalogo. Temi, progetti e prototipi italiani (1932-1962). Roma: Gangemi.

Greco, L. (2021). Italian temporary prefabricated constructions (1933-1949), Projects, Patents and Prototypes. *Tema*, 7/2, pp. 42-53.

Morganti, R., Tosone, A. (2011). La casa metallica. Prototipi e progetti alla Triennale di Milano 1933-1954. *Costruzioni metalliche*, 1, pp. 65-74.

Zagnoni, A. (1993). Abitare l'altopiano. La casa coloniale per l'Africa Orientale. in Gresleri G., Massaretti P.G. e Zinoli S. (a cura di*), Architettura italiana d'Oltremare*, Marsilio, Venezia. pp. 215-230.

Red. (1944a). Costruzioni smontabili in legno. *Domus*, 195, pp. 113-115.
Red. (1944b) Una casa di legno ad elementi smontabili. *Domus*, 203, pp. 392-399.

Riuso eco-orientato del patrimonio produttivo del Mediterraneo. La Tonnara di Avola

Eco-friendly reuse of the Mediterranean's productive heritage. The Tonnara di Avola

Rosa Maria Giusto*

Ricercatore T.D., Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze Applicate e Sistemi Intelligenti "Eduardo Caianiello", Italy. *rosamaria.giusto@cnr.it*

Mario Buono

Professore Ordinario, Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Dipartimento di Ingegneria, Italy. *mario.buono@unicampania.it*

Abstract: tuna fisheries represent a significant part of the historical, cultural, and architectural heritage of the Mediterranean, and Sicily in particular.

The need to preserve and redevelop structures otherwise destined for abandonment and obsolescence, through their repurposing, pushes us to rethink these spaces primarily as productive settlements with strong anthropological, historical, social, and collective value, as well as laboratories for experimentation and knowledge.

The opportunity to intervene in the Avola tuna fishery, along the southeastern coast of Sicily, before its state of abandonment permanently removes it from public knowledge and enjoyment, offers the opportunity to identify and propose cultural and collective themes and functions aimed at rediscovering and enhancing a regional production and economic network that brings together the Mediterranean's identity values, with the stories, knowledge, and techniques to be shared and passed down. This is achieved through enhancement interventions that introduce new ways of enjoying and understanding a tangible and intangible cultural heritage that needs to be rediscovered and reinterpreted, combining them with the establishment of an observatory for the study and protection of the marine environment and the activities historically connected to it.

Considering the dense network of tuna fisheries that populate the coasts of Sicily, many of which are in ruins, proposing solutions that integrate and connect previous knowledge with opportunities for future research and experimentation

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

can represent a model for the redevelopment, protection, and eco-oriented reuse of productive cultural heritage from an ecological and Mediterranean perspective.

Keywords: Mediterranean tuna fisheries, eco-oriented reuse, productive heritage, musealisation.

1. Introduzione

Testimoni di cultura tecnica e saperi materiali e produttivi, gli impianti industriali dismessi rappresentano un'opportunità formidabile per attuare strategie di valorizzazione del patrimonio storico costruito che ne favoriscano la riconversione e il riuso in un'ottica "ecologica", capace di orientare il progetto verso soluzioni rigenerative, basate su un ciclo continuo di trasformazione, adattamento e cura.

La presenza diffusa di insediamenti produttivi dismessi sul territorio italiano porta con sé il tema della reversibilità di edifici e contesti, connotati il più delle volte da un considerevole valore paesaggistico depauperato dall'abbandono e dall'incuria, offrendo l'opportunità di trasformare nuovamente in risorse beni e realtà lasciate al loro progressivo isolamento.

Non si tratta di proporre interventi di sostituzione edilizia o di speculare su beni e siti spesso collocati in aree dall'inestimabile valore paesaggistico, ma di conferire alle vocazioni culturali e produttive dei luoghi la funzione di guida per orientare, riconoscere e ricostruire i nessi tra storia, memoria e progetto innescando processi di valorizzazione mirati e consapevoli che favoriscano sviluppo sostenibile e crescita futura.

È questo il caso delle tonnare, stabilimenti produttivi per la cattura, la lavorazione e la conservazione del pesce che hanno attraversato la storia del Mediterraneo, connotando interi tratti della costa meridionale della nostra penisola e, in particolare, della Sicilia.

Il recupero e la valorizzazione della Tonnara di Avola (Figura 1), in provincia di Siracusa, costituisce in tal senso una formidabile opportunità per avviare un processo di conservazione e tutela di una struttura produttiva dal notevole valore storico-architettonico e paesaggistico che attualmente versa in uno stato di totale abbandono e degrado, favorendo nel contempo la conoscenza e "messa in rete" dell'intero sistema territoriale delle

tonnare della costa sud-orientale dell'isola, composto di ben 12 stabilimenti nella sola provincia di Siracusa, tra cui le più note tonnare di Vendicari e Marzamemi, oltre quelle di Porto Palo di Capo Passero, Stampace e Santa Panagia.

La presenza di numerosi siti archeologici e di centri dall'elevato valore storico artistico e paesaggistico nel territorio circostante testimonia la necessità di valorizzarne la fruizione a partire dalla ricostruzione della rete di connessioni economiche e culturali che le connota, di cruciale importanza per lo sviluppo della zona.



Figura 1. Veduta del complesso della Tonnara di Avola
[Fonte: https://lnx.virtualsicily.it].

L'integrazione della struttura avolese nel territorio circostante rappresenta un aspetto principale del progetto di riqualificazione e valorizzazione e rientra in un programma di gestione del patrimonio culturale basato sullo sviluppo integrato di tali beni e su un approccio sistemico fondato sulle vocazioni culturali del luogo.

Trattandosi di insediamenti produttivi fortemente legati alle tradizioni, collocati in contesti paesaggistici particolarmente favorevoli, le tonnare rappresentano delle risorse ambientali di eccezionale valore in grado d'incidere significativamente sulle politiche di trasformazione e rinnovamento

urbano, favorendo strategie di riqualificazione territoriale incentrate sulla realizzazione di strutture innovative di fruizione collettiva, quali musei e centri di formazione e di ricerca (Sposito, 2007, p. 11), come avvenuto per il complesso museale allestito negli spazi della Tonnara dei Florio a Favignana.

Lo studio sulla tonnara di Avola fornisce l'opportunità per proporre temi e funzioni culturali e collettive finalizzati alla riscoperta e valorizzazione di un circuito produttivo ed economico a carattere territoriale, tenendo insieme i valori identitari del Mediterraneo, con le storie, i saperi, le tecniche da condividere e tramandare attraverso interventi di musealizzazione che favoriscano la conoscenza e la fruizione di tali insediamenti produttivi abbinandoli all'istituzione di un osservatorio per lo studio e la protezione dell'ambiente marino e costiero e delle attività ad essi storicamente connesse.

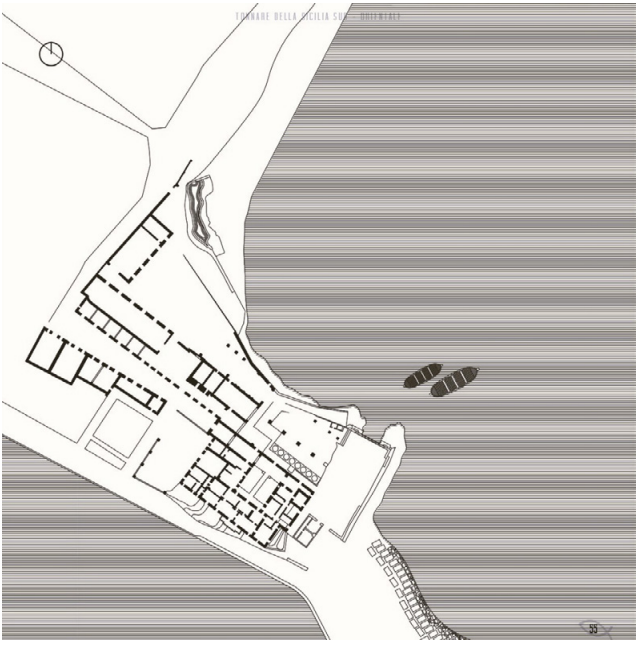


Figura 2. Planimetria della Tonnara di Avola - scala 1:1000.
[Fonte: Gennuso, 2020-2021].

L'approccio progettuale mira a sottolineare come il riuso adattivo del patrimonio culturale possa contribuire a ri-attivare i valori culturali, economici, sociali ed ecologici del territorio divenendo rigenerativo in termini di economia circolare, in linea con orientamenti dell'Unione Europea che sottolineano la centralità del patrimonio culturale quale risorsa per lo sviluppo sostenibile, il benessere e la qualità della vita (Convenzione di Faro, 2005).

La conferenza NEMO – Network of European Museums Organisations - Museums 2030 "Sharing recipes for a better future", (Estonia, novembre 2019) ha posto l'accento sul ruolo nodale svolto dai musei quali partner ideali per rendere accessibili gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile a un pubblico diversificato di utenti e visitatori. In quest'ottica, il recupero del patrimonio edilizio che compone la fitta rete di tonnare diffusa nel Mediterraneo e la trasformazione del complesso di Avola in luogo di produzione di cultura e divulgazione della conoscenza legata agli ambienti marini, contribuirebbe fattivamente a integrare gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (OSS) delle Nazioni Unite con l'Agenda 2030, coniugando il tema della valorizzazione e trasmissione del patrimonio culturale con le strategie di riutilizzo ecologico e la limitazione degli impatti ambientali.

1.1. Il complesso della Tonnara di Avola

Le tonnare, quali luoghi di produzione, sono caratterizzate da spazi e tipologie costruttive di particolare rilievo nell'ambito dell'archeologia industriale. Inoltre, quali beni culturali relazionali, testimoniano memorie e tradizioni storicamente fondate, da vivificare e riproporre attraverso itinerari e percorsi di conoscenza incentrati sulla riscoperta e valorizzazione dei cicli e sistemi produttivi, oltre che delle modalità aggregative e di lavoro che videro coinvolte comunità di tonnaroti e gabellati, rais e proprietari, rivelando aspetti legati al valore antropologico e sociale di tali strutture produttive.

Il primo insediamento della tonnara di Avola, risalente al XVII secolo, era situato alla foce del fiume Asinara, da cui trasse la denominazione originaria di Tonnara di Fiume di Noto. Dello stabilimento si ha notizia dai documenti notarili relativi ai contratti e ai diversi passaggi di proprietà avvenuti a partire dal 1633.

La struttura, danneggiata dal sisma del 1693 e sottoposta alle incursioni dei pirati, venne ricostruita e ampliata nel 1726 ad opera dell'aristocratico

e filantropo Ludovico Tornabene, che fece edificare gli alloggi dei gabellati, una chiesa, e le officine per la lavorazione del tonno. Di tale complesso non è rimasta alcuna traccia, nonostante l'importanza dei lavori effettuati.

Agli inizi del XIX secolo è documentato il trasferimento dell'esercizio della tonnara dalla foce di Fiume di Noto alla Marina di Avola, in seguito all'acquisizione di un lotto di terreno di proprietà del monastero della SS. Annunciatrice, di fronte al mare, dove furono edificati i primi magazzini. Di tali fabbricati precari non è stata individuata l'esatta ubicazione, né la destinazione d'uso.

Dallo Stato delle Sezioni del 1844 si rileva che in Contrada Pantanello ad Avola risultavano di proprietà di Michele Tornabene, affittuario della tonnara: "circa 9-10 magazzini, una casa terrana di 3 stanze, una casa di 5 stanze, un'altra casa di 2 stanze, una chiesa, una casa terrana di 6 stanze, delle stalle e da ciò che risulta, in tale anno, una tonnara dismessa". Inoltre, nella medesima fonte è riportato che "nei terreni limitrofi alla proprietà dei Tornabene, si trova di proprietà del Comune una casa terrana per un posto sanitario, di supporto presumibilmente all'esercizio della tonnara. Un'altra casa terrana, costituita da 2 stanze e da magazzini di proprietà del Regio erario, risulta adibita sicuramente a Dogana in funzione dell'attività della tonnara". A quella data, quindi, l'attività della tonnara era chiaramente documentata.

Nella seconda metà dell'800 la proprietà passa ai Nicolaci di Villadorata di Noto e, da questi, al cavaliere Carlo Loreto di Avola che, a inizio del Novecento, riorganizza l'impianto conferendovi l'aspetto attuale.

Risale al 1896, in seguito alla rettifica dei confini, la nuova denominazione di "tonnara di Avola", dovuta sia alla nuova ubicazione nel borgo di Marina Vecchia di Avola, sia al passaggio di proprietà ai Loreto, amministratori competenti e noti proprietari terrieri della zona.

Attualmente il complesso di Avola occupa un'ampia area costiera originariamente ai margini dell'abitato – denominata "Marina vecchia" – in cui vivevano i tonnaroti e in cui si svolgevano le attività legate alla pesca. Ad essa è andata saldandosi nel tempo un'intensa urbanizzazione le cui caratteristiche formali e tipologiche assumono un carattere minore rispetto all'edilizia del centro storico, di cui la tonnara costituisce un avamposto a ridosso del mare.

L'impianto dell'insediamento, con gli edifici e le strutture annesse, è di tipo irregolare, distribuito su un terreno pianeggiante, in lieve pendio verso la costa.

Nonostante il suo stato di rudere, la struttura ricopre una superficie di circa 5000 mq testimoniando l'importanza economica e territoriale assunta nel tempo (Figura 2).



Figura 3. Veduta della chiesa con accanto la ciminiera in laterizio [Fonte: Lippi Guidi, 1993].

2. Gli spazi della Tonnara. Modelli per il riuso

Le prime notizie sulla conformazione spaziale e organizzativa dei complessi per la pesca e la conservazione del tonno risalgono a uno studio del 1575 del protomedico Gian Filippo Ingrassia che ne delineò lo schema-tipo distributivo composto di edifici articolati intorno a una corte interna, sul modello del *Baglio* di tipo rurale, diffuso sul territorio siciliano.

Il complesso di edifici a servizio della tonnara prendeva il nome di *malfaraggio* o *marfaraggio* ed era costituito dalla loggia esterna, dal locale per il ricovero delle barche, dal deposito per gli strumenti, dai magazzini per il pesce, dalle abitazioni dei gabellati, oltre che dal "palazzotto" del proprietario che comincia a comparire a partire dal XVIII secolo. All'interno del complesso sorgeva spesso anche una piccola chiesa le cui dimensioni variavano in funzione dell'importanza assunta dalla tonnara.

Nonostante alcune funzioni specifiche indispensabili, l'impianto a terra non è però riconducibile a "una tipologia definibile in termini di destinazioni, dimensioni e linguaggio formale". Trattandosi di un'attività stagionale, le funzioni e gli spazi delle tonnare "si relazionano e si sviluppano anche in ragione del successo che la pesca del tonno conobbe in taluni periodi storici rispetto ad altri". Per questa ragione, "ogni marfaraggio rappresenta un patrimonio storico e architettonico, culturale e antropologico a sé, la cui lettura complessa rivela il rapporto tra insediamenti umani e contesti naturali e ambientali" (Sposito, 2007, p. 26), da raccontare e da trasmettere.

L'attuale complesso della tonnara di Avola comprende una piccola chiesa a navata unica, datata al 1726, attorno alla quale si sono distribuiti nel tempo i nuovi fabbricati destinati ad accogliere le funzioni della tonnara. Osservando la conformazione e la distribuzione attuale degli edifici destinati alle attività produttive, si può constatare come essi si siano andati aggregando intorno alla chiesa senza alterarla o intaccarne i prospetti, ma lasciando che continuasse ad emergere, nitida, rispetto ai volumi dell'intero nucleo produttivo (Figura 3).

La ricostruzione novecentesca della tonnara comprende il palazzetto del proprietario che emerge dall'intero complesso sul mare, con gli

ambienti seminterrati adibiti a depositi del carbone e del sale. All'abitazione del proprietario segue la loggia, circondata su tre lati dal mare e ampliata durante i mesi estivi, di piena attività, fino a comprendere un grande recinto coperto con il tetto di paglia, adibito alle attività di essiccazione del pescato.

Sul lato opposto è ancora visibile il grande arco a tutto sesto che introduceva agli spazi dove venivano tirate in secco e ricoverate le barche durante il periodo invernale.

Tra il 1915 e il 1920 vennero impiantati gli opifici per l'inscatolamento del tonno, riconoscibili per l'impianto regolare e la lunga torre ciminiera in laterizi (Figg. 4, 5 e 6).



Figura 4. Il complesso della Tonnara di Avola nel 2020.
[Fonte: fotografia degli autori].



Figura 5. Gli opifici della Tonnara nel 2020. [Fonte: fotografia degli autori].



Figura 6. Le arcate degli opifici e il filare di pilastri nelle immagini del 2020. [Fonte: fotografie degli autori].

Accanto allo stabilimento sono disposti gli ambienti per le vasche dell'olio e quelli per le attrezzature necessarie all'inscatolamento, che documentano la fase di industrializzazione del processo.

L'opportunità di riscoprire le storie legate alla pesca del tonno attraverso il recupero e la musealizzazione della Tonnara di Avola mira a preservarne le strutture superstiti tramandando l'eredità culturale di una pratica comune a gran parte dei popoli del Mediterraneo, contribuendo ad avviare un processo sistemico di salvaguardia e tutela dei numerosi opifici marini che popolano le coste della Sicilia per promuoverne il riuso funzionale, attivando percorsi di studio e di conoscenza incentrati sulla fruizione e sulla valorizzazione di tali importanti insediamenti produttivi.

Riferimenti bibliografici

Catalogo generale dei Beni Culturali, Scheda ICCD 14777662 Tonnara Avola. Disponibile su: https://catalogo.beniculturali.it/detail/ArchitecturalOrLandscapeHeritage/1900261131-2 (consultato il: 12.02.2026).

Dall'Occa Dell'Orso, A. (2013-2014). *Suspended Lines. Rotte tra Terra e Mare*. Facoltà di Architettura e Società, Politecnico di Milano.

Gennuso, G. (2020-2021). *Al capolinea del sud della Sicilia Una proposta di allestimento per la tonnara di Marzamemi*. Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino.

Giusto, R.M. (2019). Cultural Heritage and integrated conservation. The landscape oasis of Vendicari, in De Joanna, P., Passaro, S. (a cura di). *Sustainable technologies for enhancement of the natural landscape and built environment*. Luciano: Napoli. pp. 81-101.

Sposito, C. (a cura di) (2007). *Le tonnare. Storia e Architettura*. Flaccovio: Palermo.

Lippi Guidi, A. (1993). *Tonnare, tonnaroti e malfaraggi della Sicilia sud-orientale*. Zangara: Siracusa.

Riuso adattivo e riciclo: una rilettura dei processi di trasformazione urbana di Campo Santa Maria ad Amiternum

Adaptive reuse and recycling: re-reading urban transformation processes at Campo Santa Maria ad Amiternum

Mariangela De Vita*

Ricercatrice, Dipartimento di Ingegneria, ICT e Tecnologie per l'Energia e i Trasporti e Centro Interdipartimentale Scienza delle Città, CNR; Dipartimento di Ingegneria civile, edile - architettura e ambientale, UNIVAQ, Italy. *mariangela.devita@cnr.it*

Alfonso Forgione

Professore Associato, Dipartimento di Scienze Umane, UNIVAQ, Italy. *alfonso.forgione@univaq.it*

Abstract: the relationship between reuse of built spaces and recycling of construction materials is commonly addressed in contemporary research as a set of parallel or alternative end-of-life strategies. Engineering-oriented studies predominantly frame reuse and recycling within life cycle assessment (LCA) comparisons, while architectural research on structure changes in fruition modes tends to privilege spatial continuity and functional transformation. This paper argues that such a compartmentalized view risks overlooking historical and operational conditions in which spatial reuse and material recovery formed a tightly coupled transformation process.

Taking the late antique transformations of *Amiternum* (Italy) as a critical case, the study proposes a processual re-reading of the building site in which re-functionalization of spaces and systematic material spoliation and reprocessing occurred simultaneously: the *Amiternum* evidence suggests a construction regime based on opportunistic material flows, localized decision-making and adaptive spatial reconfiguration. The paper investigates how and why such integration was possible, whether it generated material and organizational advantages, and to what extent similar logics remain applicable, or have become structurally constrained, in contemporary construction systems.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

On this basis, the research advances an interpretative framework that reconnects adaptive reuse, material recycling and construction-site dynamics within a unified analytical perspective. The contribution does not propose a new assessment tool; instead, it reframes existing circular economy and LCA debates by foregrounding the building process as the critical interface where spatial and material transformations co-evolve. The study ultimately questions whether current circularity paradigms adequately capture the operational realities of building transformation and identifies directions for more process-aware methodologies.

Keywords: adaptive reuse, construction site, material recycling, circular economy, life cycle assessment.

1. Introduzione

Negli ultimi anni il paradigma dell'economia circolare ha influenzato la ricerca e la pratica nel settore delle costruzioni promuovendo strategie per estendere la vita utile degli edifici e ridurre i rifiuti da costruzione e demolizione. In questo quadro, due linee d'azione hanno assunto particolare rilievo: il riuso adattivo degli edifici esistenti e il riciclo dei materiali da costruzione.

La letteratura di matrice ingegneristica affronta riuso e riciclo soprattutto attraverso modelli di Life Cycle Assessment (LCA) e analisi di fine vita (EoL), confrontando scenari alternativi - riuso, riciclo, discarica - in termini di prestazioni ambientali (Zheng et al., 2025; Ng & Chau, 2015; Minunno et al., 2020). Di contro, la ricerca architettonica e urbana sul riuso adattivo privilegia continuità spaziale, trasformazione funzionale e valori culturali: l'*adaptive reuse* è interpretato come strategia progettuale capace di prolungare la vita dell'organismo edilizio (Foster, 2020). In molti casi, però, la dimensione materiale della trasformazione e le dinamiche operative di recupero e reimpiego dei materiali nello stesso cantiere di riuso adattivo rimangono sullo sfondo (De Gregorio & De Vita, 2025).

Approcci integrati e interdisciplinari alla gestione delle risorse nel settore edilizio, che riconoscono l'interconnessione tra scelte di progetto, riuso e riciclo (Addis, 2012; Rathmann, 1997) risultano spesso organizzati per blocchi tematici, riproducendo una compartimentazione concettuale e

disciplinare: ne consegue che il riuso adattivo e il riciclo dei materiali sono spesso interpretati come strategie parallele o opzioni alternative di fine vita; rimane, invece, meno esplorata la loro possibile co-evoluzione entro i medesimi processi di trasformazione del costruito, soprattutto nel cantiere di riuso dove riconfigurazione spaziale, smontaggio selettivo e reimpiego dei materiali si intrecciano operativamente.

A tal fine si presenta una rilettura delle trasformazioni tardoantiche del V-VI secolo d.C. di Campo Santa Maria ad *Amiternum*, caso storico in cui rifunzionalizzazione degli spazi e recupero/rifusione dei materiali avvengono in stretta compresenza (Forgione et al., 2021). Il contributo propone un quadro interpretativo di tipo processuale che si differenzia dagli approcci correnti all'economia circolare nel settore delle costruzioni, generalmente orientati a scenari di fine vita. In particolare, l'attenzione viene spostata sul cantiere come interfaccia operativa in cui riuso spaziale e riciclo materiale co-evolvono. Piuttosto che essere interpretati come strategie alternative, riuso e riciclo sono qui letti come processi interdipendenti, integrati all'interno di un medesimo ciclo di trasformazione del costruito.

2. *Amiternum*: rilettura processuale di riuso spaziale e riciclo materiale

Nel sito di *Amiternum* le trasformazioni tardoantiche nell'area sud-occidentale del sito mostrano la compresenza di riconversioni funzionali e attività metallurgiche finalizzate alla rifusione di elementi provenienti dagli edifici romani dismessi (Forgione et al., 2021). Tra V e VI secolo, ambienti del tessuto edilizio imperiale risultano rioccupati e riconfigurati per nuove funzioni produttive e, successivamente, per l'impianto del complesso battesimale (Figura 1). Lo spazio costruito non viene semplicemente abbandonato: viene adattato attraverso interventi puntuali che ne consentono la continuità d'uso pur nel cambio di funzione. Parallelamente, nello stesso settore urbano si attivano processi sistematici di spoliazione e rifusione: fornaci, scorie, colature e semilavorati attestano un'attività metallurgica organizzata, finalizzata al recupero di piombo, ferro e leghe bronzee (Forgione et al., 2021).

In particolare, le evidenze stratigrafiche indicano la contemporaneità tra il cantiere del complesso battesimale e le attività metallurgiche svolte

negli ambienti adiacenti, con operazioni di rifusione, ri-forgiatura e accumulo di scarti che si svolgono nello stesso arco temporale: *Amiternum* suggerisce un "modello" di trasformazione in cui smontaggio selettivo, riuso degli ambienti e reimpiego dei materiali sono fasi interdipendenti di un unico ciclo operativo. L'assenza di strati di crollo e la presenza di tracce di smontaggio sistematico indicano un processo intenzionale di dismissione finalizzato al recupero dei materiali, piuttosto che un abbandono passivo delle strutture. L'organizzazione spaziale dell'area mostra inoltre una chiara articolazione funzionale interna allo stesso edificio, con compresenza di aree di lavorazione attiva, spazi di scarico delle scorie e ambienti destinati allo stoccaggio dei materiali.

Questa esperienza contrasta con rappresentazioni lineari del fine vita, nelle quali riuso e riciclo sono scenari alternativi successivi alla dismissione. Nel caso tardoantico la trasformazione segue una logica in cui flussi di materia e pratiche di riadattamento spaziale co-evolvono entro un "metabolismo" locale del cantiere.

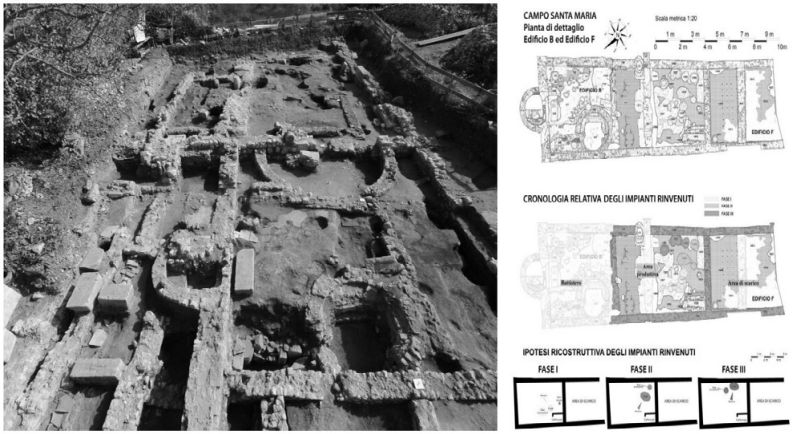


Figura 1. A sinistra: vista del battistero; a destra: planimetria dell'area produttiva (Edificio F) antistante l'edificio battesimale (Edificio B), con indicazione della sequenza degli impianti e loro ipotesi ricostruttiva.

3. Discussione

La letteratura mostra come le "gerarchie" tra riuso e riciclo dipendano in modo sensibile dalle ipotesi di modellazione adottate (Zheng et al., 2025); gli strumenti correnti basati sul metodo LCA risultano efficaci nel confronto tra scenari alternativi, ma tendono a semplificare la dimensione operativa del processo edilizio, soprattutto quando applicati a contesti caratterizzati da elevata integrazione tra fasi e attività.

Il caso di studio consente inoltre di individuare un insieme di principi operativi che caratterizzano l'integrazione tra riuso adattivo e riciclo materiale: i) co-dipendenza tra spazio e materia: la riconfigurazione spaziale e il recupero dei materiali non costituiscono fasi successive ma processi reciprocamente condizionanti; ii) decisione localizzata: le scelte relative al riuso e al riciclo avvengono alla scala del cantiere, in funzione della disponibilità immediata di risorse e delle esigenze contingenti; iii) flussi materiali opportunistici: i materiali vengono reimpiegati, trasformati o rifusi in base a condizioni situate, piuttosto che secondo schemi predefiniti; iv) sovrapposizione funzionale degli spazi: attività di smontaggio, lavorazione e costruzione coesistono all'interno dello stesso sistema spaziale.

Tali principi, desumibili dalle evidenze archeologiche, consentono di interpretare il processo edilizio non come una sequenza lineare di fasi distinte, ma come un sistema adattivo in cui configurazione spaziale e metabolismo materiale co-evolvono all'interno di un medesimo contesto operativo. In questo senso, la rappresentazione del fine vita come momento separato e successivo rispetto all'uso appare riduttiva rispetto alla complessità dei processi osservati.

Se messi in relazione con i sistemi costruttivi contemporanei, i principi emersi dal caso di *Amiternum* suggeriscono la necessità di superare modelli lineari a favore di approcci più adattivi e sensibili alle condizioni operative del cantiere. Tuttavia, nei contesti attuali tale integrazione risulta spesso ostacolata da fattori strutturali quali la forte specializzazione delle filiere produttive, la separazione tra fasi di demolizione, trattamento e costruzione, nonché la crescente complessità dei quadri normativi.

Nonostante tali limiti, il caso analizzato consente di individuare alcune possibili direzioni di riflessione per il progetto contemporaneo: a) la ri-localizzazione delle attività di trattamento dei materiali in prossimità del

cantiere; b) l'integrazione tra decisioni progettuali e disponibilità effettiva di risorse materiali; c) l'adozione di sistemi costruttivi reversibili, in grado di facilitare lo smontaggio selettivo e il reimpiego.

In questa prospettiva, la corretta integrazione tra riuso adattivo e riciclo dipende dalla capacità di modellare l'intero processo edilizio orientandolo verso principi di reversibilità costruttiva e tecnologica, prossimità tra smontaggio e reimpiego e maggiore capacità decisionale locale.

La specificità storica del caso di *Amiternum* non implica una trasferibilità diretta ai contesti contemporanei; al contrario, esso può essere assunto come dispositivo analitico utile a interrogare criticamente i modelli attuali e a rendere visibili dimensioni processuali spesso trascurate nelle rappresentazioni standard della circolarità nel costruito.

4. Conclusioni

Il contributo rilegge criticamente il rapporto tra riuso degli spazi e riciclo dei materiali nel dibattito sulla circolarità del costruito. Le evidenze mostrano come riconfigurazione spaziale e recupero materiale siano processi interdipendenti. Il caso di *Amiternum* evidenzia la co-evoluzione tra disponibilità di materiali, organizzazione del cantiere e trasformazione degli spazi: si distingue tra riuso tradizionale, centrato sul cambio d'uso, e riuso adattivo, più legato alla dimensione materiale e tecnologica condizionata dalle caratteristiche e dalla lavorabilità dell'esistente. Tuttavia, tale integrazione è difficile nei sistemi edilizi contemporanei, segnati da specializzazione, regolazione tecnica e filiere separate. Sul piano metodologico si propone di affiancare agli approcci basati sul fine vita una maggiore attenzione ai processi di cantiere nel riuso adattivo, integrando LCA con analisi operative e spaziali per rappresentare meglio la complessità reale. Il riuso adattivo emerge così non solo come estensione della vita degli edifici ma come ambito in cui si ridefiniscono le relazioni tra spazio, materia e tecnologia. Il dialogo con il riciclo diventa quindi un terreno per sviluppare metodologie integrate e orientate al processo, la cui applicabilità nei contesti attuali richiede ulteriori verifiche.

Riferimenti bibliografici

Addis, B. (2012). *Building with reclaimed components and materials: A design handbook for reuse and recycling*. London: Routledge. https://doi.org/10.4324/9781849770637

De Gregorio, S., & De Vita, M. (2025). The Metamorphosis of the Built Heritage: A Systematic Review of Adaptive Reuse Research. *Multi-scale Perspectives on Building Heritage Conservation and Sustainable Cities*, 65-80. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90363-2_5

Foster, G. (2020). Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts. Resour*ces, Conservation and Recycling, 152*, 104507. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507

Forgione, A., Campanella, L., & Siena, M. (2021). Gli impianti metallurgici di Campo Santa Maria ad Amiternum: indicatori della destrutturazione della città antica e dei suoi spazi tra V e VI secolo d.C, *Fasti Online Documents & Research, 501*.

Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M., & Gruner, R. L. (2020). Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices: A circular economy case study of a modular building. *Resources, Conservation and Recycling, 160*, 104855. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104855

Ng, W. Y., & Chau, C. K. (2015). New life of the building materials—recycle, reuse and recovery. *Energy Procedia, 75*, pp. 2884–2891. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.581

Rathmann, K. (1997). *Recycling and Reuse of Building Materials*. University of Idaho.

Sakthibala, R. K., Vasanthi, P., Hariharasudhan, C., & Partheeban, P. (2025). A critical review on recycling and reuse of construction and demolition waste materials, *Cleaner Waste Systems, 12*, 100375. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100375

Xia, B., Ding, T., & Xiao, J. (2020). Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies. Waste Management, 105, pp. 268–278. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.015

Zheng, B., Yang, Y., Chan, A. P. C., Jiang, W., & Bao, Z. (2025). A meta-analysis of environmental impacts of building reuse and recycling. *Journal of Cleaner Production, 520*, 146149. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146149

The superuse of urban warehouses to activate built environment stock

Jacopo Gasparotto*

PhD Student, Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, Italy.
jacopo.gasparotto@polito.it

Abstract: the construction sector is currently facing a structural crisis linked to resource scarcity, dependence on non-local supply chains, and the limits of the linear model. Although the circular economy has been adopted as a reference paradigm, the persistence of traditional design logics —grounded in material abundance and standardization— limits its effective implementation. Within this framework, architectural design continues to privilege new resources, while the existing built heritage remains largely underutilized.

This paper analyses reuse strategies applied to urban material capital, arguing that building warehouses can evolve from logistical spaces into operational infrastructures for the circular transition. Selected case studies show that reuse warehouses are predominantly structured as logistical platforms capable of intercepting and redistributing materials, yet rarely equipped with a transformative design dimension able to activate material stock.

To address this limitation, the emerging strategy of *superuse* —an advanced form of material reuse— is proposed. By taking recovered materials as the starting point of the design process, *superuse* challenges the linear sequence of conventional design and recognizes material contingency as a generative condition.

For *superuse* to operate systematically and be accessible to practitioners, however, it requires an enabling tool. The paper therefore introduces an extended material passport, conceived not only as a device for technical traceability but as an instrument of project activation. By integrating typological decomposition and prefiguration of potential uses, the advanced material passport facilitates the co-determination of design and material, enabling warehouses to function as active infrastructures and supporting the broader diffusion of circular reuse practices.

Keywords: circular design practices, urban material stock, urban warehouses, superuse, material passport.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introduzione

Il settore delle costruzioni europeo affronta oggi una crisi strutturale. L'inefficienza nell'uso delle risorse, la crescente scarsità di materie prime e la dipendenza da filiere non di prossimità mettono in discussione la sostenibilità della concezione lineare che ha da sempre contraddistinto il processo edilizio (European Commission, 2023). In risposta a tali criticità, l'economia circolare è stata progressivamente assunta come paradigma di riferimento (Geissdoerfer et al., 2017, p. 760; Kirchherr et al., 2018, p. 223). Tuttavia, la persistenza delle logiche progettuali tradizionali – fondate su disponibilità costante e standardizzazione – ne limita l'effettiva applicazione. In particolare, alcune strategie circolari come il riuso, pur sostenute da linee guida, politiche e best practices (European Investment Bank, 2024; European Commission, 2024; Rotor / Opalis, 2022), restano confinate a interventi episodici.

L'attuazione sistemica del riuso richiede una revisione delle logiche operative e culturali del progetto, mettendo in discussione presupposti quali reperibilità illimitata, omogeneità dimensionale e subordinazione del materiale al progetto. Senza tale revisione, il riuso resta marginale e il patrimonio costruito di conseguenza continua a essere una risorsa ampiamente inespressa. Al contrario, essa dovrebbe essere interpretata come stock materiale stratificato e dinamico dotato di valore tecnico e culturale, reintegrabile tal quale in nuovi cicli d'uso.

Tra le strategie circolari emergenti, il *superuso* dei materiali e dei componenti edilizi – inteso come forma avanzata di riuso capace di attribuire nuove funzioni a materiali recuperati – rappresenta uno degli approcci più diretti, capace di valorizzare tale patrimonio preservando l'integrità dei componenti e promuovendo un cambiamento delle logiche progettuali tradizionali.

In questa prospettiva, i magazzini del riuso, intesi come centri dedicati alla raccolta e gestione di materiali provenienti da demolizione, dismissione o manutenzione, assumono un ruolo chiave tra demolizione e nuova progettazione, contribuendo ad attivare lo stock urbano valorizzandone il potenziale di *superuso*. Tuttavia, permane una criticità di natura operativa, legata all'assenza di strumenti capaci di supportarne l'applicazione.

L'obiettivo è proporre uno strumento operativo capace di supportare tale pratica, rendendo sistemica l'attivazione dello stock e favorendo il ruolo trasformativo dei magazzini. In tale prospettiva si propone un'estensione del passaporto dei materiali, convenzionale, orientata al supporto progettuale e alla valorizzazione dei materiali recuperati.

2. Configurazioni operative dei magazzini del riuso

Per magazzino del riuso edilizio si intende uno spazio che intercetta e organizza flussi di materiali già esistenti all'interno della città. Rientrano in questa categoria sia i centri di riuso di iniziativa privata, orientati alla redistribuzione di componenti recuperati, sia i depositi pubblici e i magazzini comunali che si dedicano alla gestione dei materiali impiegati nella manutenzione dello spazio urbano.

Da una mappatura in corso, che si inserisce e amplia ricognizioni già avviate (Opalis, 2017), si possono individuare due tipologie di magazzini del riuso: le piattaforme logistiche, spazi di intermediazione tra demolizione e nuova progettazione in cui materiali e componenti recuperati selettivamente vengono catalogati, stoccati e rivenduti, garantendone la circolazione nel mercato edilizio; le officine trasformative, spazi operativi che affiancano alla gestione dello stock materiale, lavorazioni tecniche e attività di rielaborazione.

2.1 Magazzini del riuso come piattaforme logistiche

Le piattaforme logistiche sono la forma di magazzini del riuso più comune, da una lettura dello stato dell'arte si evidenzia come, in diversi contesti europei, si attestano come poli consolidati della filiera del riuso. Tale configurazione risulta però orientata alla dimensione logistica e commerciale, mentre appare meno sviluppata una componente trasformativa interna, capace di valorizzare le caratteristiche dei componenti e di orientare lo stock verso nuove prefigurazioni. In assenza di questa dimensione, il riuso tende a ridursi a mera sostituzione di elementi, senza incidere sulle logiche culturali e operative del progetto.

Tra questi, i magazzini Norfolkreclamation (Norfolk Reclamation, 2012) e Oude Bouwmaterialen (Oude Bouwmaterialen, 1974), rappresentano configurazioni tipiche di questa impostazione logistica (Figure 1 e 2).



Figura 1. Derribos Andres, 1990 (Valencia, Spagna), Ombygg, n.d. (Oslo, Norvegia), Norfolk Reclamation, 2012 (Norfolk, Inghilterra).



Figura 2. Oude Bouwmaterialen, 1974 (Eemnes, Paesi Bassi), Rebuild Site, 2021 (Carlisle, Inghilterra), Altholz Deifel, 2013 (Schlier, Germania).

2.2 Magazzini del riuso come officine trasformative

Meno comuni sono i magazzini a vocazione trasformativa, in quanto richiedono elevate competenze e attrezzature. Alcuni casi, come Abacus (Abacus Stone Sales, 1990) e Fabege (Fabege, 2005), affiancano allo stoccaggio attività di trasformazione inedite e lavorazioni tecniche sui materiali recuperati (Figura 3).



Figura 3. Abacus Stone Sales, 1990 (York, Inghilterra), Magazzino M.A.S., 2014 (Saint-Christol-lès-Alès, Francia), Fabege, 2005 (Stoccolma, Svezia).

Uno dei casi più emblematici si colloca nel contesto belga con l'attività dell'architetto Marcel Raymaekers. Con la fondazione di *Queen of the South* (1972) (Queen of the South, 1972; Vande Capelle et al., 2023), il tradizionale deposito di materiali viene trasformato in laboratorio di sperimentazione. Il magazzino non opera più soltanto come spazio di stoccaggio o intermediazione commerciale, ma come luogo di scomposizione e ricomposizione, in cui componenti provenienti da demolizione vengono ridotti in sottosistemi e reimmessi nel ciclo edilizio come unità autonome di progetto. La provenienza storica e la funzione originaria degli elementi perdono centralità rispetto al loro potenziale trasformativo. In questo approccio, lo smontaggio diventa operazione progettuale e il magazzino si configura come interfaccia attiva.

L'esperienza di Raymaekers evidenzia una prima forma di officina del riuso costituendo uno snodo decisivo nella genesi di una pratica che, a partire dagli anni Duemila, verrà sistematizzata da studi come Superuse Studios (Superuse Studios, 2012), Rotor (Rotor, 2016) e Lendager Group (Lendager Group, 2011), portando un'intuizione eccentrica verso una pratica strutturata.



Figura 4. Il Magazzino di Marcel Raymaekers e il suo progetto House Kelchtermans: calotte di aerei militari convertiti in lucernari.

3. Magazzini comunali dal potenziale inespresso: il caso studio di Torino

I magazzini comunali nascono come officine di trasformazione dello stock materiale a servizio della città, integrando alla funzione di deposito attività di lavorazione e adattamento dei componenti recuperati. Nel tempo, questa dimensione trasformativa si è progressivamente ridotta attraverso un processo di contrazione degli spazi e diminuzione delle risorse destinate alla gestione e catalogazione dei materiali.

Oggi i magazzini comunali di Torino rappresentano un'infrastruttura fondamentale per la gestione e la manutenzione dell'ambiente urbano: raccolgono materiali provenienti da smantellamenti e sostituzioni,

conservando una parte significativa dello stock materiale cittadino. Ciononostante, si configurano prevalentemente come centri funzionali alla gestione ordinaria nei quali il potenziale progettuale dello stock non è più pienamente espresso.

In particolare, due magazzini risultano interessanti per la loro storia e le loro potenzialità: il magazzino della pietra e il magazzino del verde.

Il magazzino della pietra nasce come deposito temporaneo per materiali da smantellamento e scorte destinate a nuovi interventi urbani, inizialmente legati al cimitero monumentale e poi estesi all'intero territorio cittadino. Vi si conservano pietre piemontesi e, in quantità minore, altri materiali per l'arredo urbano. L'accesso è riservato al Comune, che attinge al deposito per interventi legati soprattutto al suolo.

Nel tempo, la riduzione degli spazi e la dismissione delle officine di lavorazione hanno limitato la sua funzione trasformativa. Questo fattore ha fatto sì che parte degli interventi urbani sono sviluppati a partire dalla disponibilità effettiva degli elementi presenti in deposito, adattandosi alle dimensioni e alle geometrie delle pietre esistenti. Si tratta però di pratiche al momento non strutturate spinte da esigenze economiche.



Figura 5. Magazzino della pietra del Comune di Torino [Foto dell'autore].

L'organizzazione del materiale avviene attraverso una classificazione fisica per tipologie in settori dedicati. Tuttavia, la limitata disponibilità di

personale e le difficoltà di movimentazione rendono tale ordinamento discontinuo e difficilmente aggiornabile; inoltre, l'assenza di una catalogazione digitale e la prevalente trasmissione orale delle conoscenze espongono il patrimonio materiale al rischio di perdita di valore e memoria.

Nel magazzino del verde si riscontrano condizioni analoghe, pur con una maggiore varietà tipologica dei materiali e con alcune operazioni di manutenzione ancora svolte dagli addetti. Vi si accumulano: sottostrutture metalliche, arredi urbani, attrezzature per parchi pubblici, pavimentazioni in verde armato, cartelli stradali, fioriere e oggetti abbandonati.

Qui si registra un'esperienza significativa: un dipendente/artista del magazzino ha avviato un processo di rielaborazione di alcuni materiali, trasformandoli in sculture installate nei parchi pubblici della città, contribuendo alla valorizzazione del materiale e generando un interesse che attrae diversi visitatori. Tale iniziativa, se pur non concerne l'ambito delle costruzioni, evidenzia come, a partire da una sensibilità interna e da una volontà progettuale, il materiale possa essere reinterpretato oltre la mera sostituzione funzionale. Si tratta però di un'azione episodica, che non si traduce in una riorganizzazione del magazzino come spazio trasformativo.



Figura 6. Magazzino del verde del Comune di Torino e il laboratorio dell'artista [Foto dell'autore].

Questo quadro pone dunque una questione centrale: come il magazzino può tornare ad essere spazio di trasformazione del materiale? E con quali strumenti?

4. Verso un *super-passaporto* dei materiali

L'analisi dei magazzini evidenzia differenti configurazioni del rapporto tra stock, gestione e progetto. In quelli europei prevale un'organizzazione orientata alla tracciabilità, che garantisce efficienza nella redistribuzione ma con una limitata interpretazione progettuale. Solo alcuni casi, come quello di Raymaekers, l'attivazione dello stock avviene attraverso un'operazione trasformativa fondata sulla scomposizione e sull'intuizione progettuale, pur in assenza di sistemi di tracciamento. Il caso torinese si colloca in una posizione intermedia: dispone di uno stock parzialmente organizzato e di una volontà trasformativa presente ma non strutturata, questi aspetti lo rendono aperto ad una possibile ridefinizione delle proprie dinamiche operative.

In tale prospettiva, il passaporto dei materiali si configura come strumento di connessione tra gestione logistica e attivazione progettuale. Nelle linee guida e progetti europei esso è prevalentemente concepito come dispositivo di tracciabilità per materiali di nuova produzione e, pur contemplando indicazioni relative al riuso a fine vita, queste rimangono spesso generiche o confinate a un piano teorico (Buildings As Material Banks (BAMB), 2017), mentre nel presente contributo viene reinterpretato come strumento operativo per il *superuso* di materiali recuperati.

Il super-passaporto è attualmente in fase di elaborazione e si propone di ampliare gli aspetti considerati da quello convenzionale raccogliendo informazioni più specifiche su:

- Storia, provenienza, cicli di utilizzo e indicazioni sul reperimento
- Caratteristiche materiche, dimensionali e sensoriali
- Informazioni sul disassemblaggio
- Scenari di riconfigurazione
- Esempi applicativi

Il *super-passaporto* così inteso non si limita alla registrazione oggettiva di dati, ma integra informazioni qualitative quali memoria materiale e prefigurazioni di usi alternativi. Senza prescrivere funzioni determinate, amplia

il campo delle possibilità progettuali e rende esplicite le potenzialità latenti del componente. Applicato ai magazzini, diventa quindi uno strumento che rende consultabile lo stock e offre un supporto decisionale orientato al progetto agli operatori del settore.

5. Conclusioni

Per una transizione effettivamente circolare dell'ambiente costruito occorre un cambio di paradigma: dal progetto che ordina nuovi materiali al progetto che negozia con lo stock esistente. Ciò implica una revisione dei presupposti che oggi rendono il riuso difficilmente integrabile nei processi ordinari di progettazione. Si tratta, prima ancora che di un adeguamento tecnico, di un mutamento culturale del progetto.

In questo quadro, i magazzini edilizi rappresentano infrastrutture già presenti nel territorio, capaci di rendere accessibile lo stock urbano. Tuttavia, in assenza di una pratica che lo assuma come risorsa primaria e di strumenti in grado di renderlo impiegabile in modo strutturato, i magazzini tendono ad operare come spazi di gestione e redistribuzione, rimanendo privi di una reale funzione trasformativa.

Il super-passaporto si configura come uno strumento attivatore, che traccia il valore culturale e materiale dell'esistente, rende esplicite le potenzialità di *superuso* e contribuisce a scardinare l'immaginario che associa il riuso a una condizione di minor valore.

Oltre ai magazzini, la città può essere interpretata come riserva materiale diffusa, in cui strutture dismesse e obsolete rappresentano uno stock attivabile. La vera sfida consiste nel riconfigurare il progetto architettonico come dispositivo culturale e operativo capace di riorganizzare il rapporto tra infrastruttura, patrimonio e sua trasformazione, contribuendo così a estendere e consolidare l'impiego delle pratiche circolari all'interno dei processi ordinari del progetto.

Riferimenti bibliografici

Abacus Stone Sales. (1990). Disponibile da: https://www.abacusstonesales.co.uk/ (consultato il: 27.02.2026).

Altholz Deifel (2013). Disponibile da: https://www.altholz-deifel.de/ (consultato il: 27.02.2026).

Buildings As Material Banks (BAMB) (2017). *Materials passports*. European Union Horizon 2020 Programme. Disponibile da: https://www.bamb2020.eu (consultato il: 27.02.2026).

Derribos Andres (1990). Disponibile da: https://cys-derribosandres.com/ (consultato il: 27.02.2026).

European Commission (2024). *Procurement strategies: Integrating reuse in large-scale projects and public procurements*. European Circular Economy Stakeholder Platform. Disponibile da: https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/reuse-toolkit-procurement-strategies (consultato il: 27.02.2026).

European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (2023). *Transition pathway for construction* (First edition). Bruxelles: European Union. Disponibile da: https://transition-pathways.europa.eu/system/files/2025-06/Transition%20Pathway%20Construction%2015%20March%202023%20final.pdf (consultato il: 27.02.2026).

European Investment Bank (2024). *A guide for circularity in the urban built environment*. Lussemburgo: European Investment Bank. Disponibile da: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2025-02/a-guide-for-circularity-in-the-urban-built-environment.pdf (consultato il: 27.02.2026).

Fabege. (2005). Disponibile da: https://www.fabege.se/en/ (consultato il: 27.02.2026).

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., & Hultink, E.J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?, *Journal of Cleaner Production, 143*, 757–768.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2018). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, *Resources, Conservation and Recycling, 127*, 221–232.

Lendager Group (2011). Disponibile da: https://lendager.com/ (consultato il: 27.02.2026).

Magazzino M.A.S. – Materiaux Anciens du Sud (2014). Disponibile da: https://www.materiauxanciensdusud.com/ (consultato il: 27.02.2026).

Norfolk Reclamation (2012). Disponibile da: https://norfolkreclamation.co.uk/ (consultato il: 27.02.2026).

Ombygg. (n.d.). Disponibile da: https://www.ombygg.no/ (consultato il: 27.02.2026).

Opalis. (2011). Dealers Sand Box. Disponibile da: https://opalis.eu/en/sandbox/dealers/list (consultato il: 27.02.2026).

Oude Bouwmaterialen (1974). Disponibile da: https://oudebouwmaterialen.nl/ (consultato il: 27.02.2026).

Queen of the South (1972). Architectural antiques – Marcel Raymaekers. Disponibile da: https://queenofthesouth.be (consultato il: 27.02.2026).

Rebuild Site (2021). Disponibile da: https://www.rebuildsite.co.uk/ (consultato il: 27.02.2026).

Rotor. (2016). Disponibile da: https://www.rotordb.org/en (consultato il: 27.02.2026).

Rotor / Opalis (2022). *Vademecum Offsite Reuse*. Bruxelles: Rotor. Disponibile da: https://opalis.eu/sites/default/files/2022-02/Vademecum_offsite_reuse-Rotor.pdf (consultato il: 27.02.2026).

Superuse Studios (2012). Disponibile da: https://www.superuse-studios.com/nl/ (consultato il: 27.02.2026).

Vande Capelle, A., Colon, S., Devlieger, L., & Westcott, J. (2023). *Ad hoc baroque: Marcel Raymaekers' salvage architecture in postwar Belgium*. Bruxelles: Rotor vzw/asbl.

Urban circularity and circular development: governance, infrastructure and limits of the ecological transition

Pablo Altaba Tena*

Technical architect, Universitat Politècnica de València, Architectural Construction Department. Spain. *pabalte@csa.upv.es*

Abstract: urban circularity has emerged as a key framework for addressing the environmental and socio-economic challenges associated with contemporary urbanisation. However, much of the literature on the circular economy has focused on industrial production systems and material efficiency, often overlooking the spatial, institutional and infrastructural conditions required for circular transitions in cities. This article develops a theoretical discussion on the concept of circular urban development and its implications for governance, infrastructure and territorial transformation. Drawing on research on circular cities, adaptive reuse and urban metabolism, the paper examines how circular development reframes urban sustainability as a systemic transformation of urban systems of provision, including energy, water, food, housing and mobility. The analysis explores the conditions under which circular strategies generate environmental and social benefits, the institutional and planning mechanisms required to sustain them, and the structural limitations that affect their implementation. The article argues that circular urban development should not be understood as a fixed planning model but as an evolving framework whose effectiveness depends on the capacity of urban institutions to integrate ecological metabolism, infrastructure and social justice within long-term urban strategies.

Keywords: circular urban development, urban governance, adaptive reuse, urban metabolism.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Corresponding author

1. Introduction

The transition towards circular cities has evolved from a discourse focused on material efficiency to a structural reformulation of urban development. Recent literature argues that circularity cannot be reduced to the optimisation of production chains or incremental improvements in waste management, but rather requires intervention in urban provisioning systems (energy, water, construction, food, mobility) and in the infrastructures that articulate the city's metabolism (Williams, 2021). The concept of circular development, developed by Williams (2023), proposes precisely this expansion: circularity must be territorialised and governed at the urban scale, integrating adaptation, ecological regeneration, and cycle closure within a single operational framework. This perspective is particularly relevant because it shifts the emphasis from the 'object' (building, material, product) to the 'urban condition' that enables circularity: available land, compatible uses, sectoral coordination, and institutional frameworks capable of sustaining long-term horizons.

This conceptual shift coincides with the centrality that the European Green Deal gives to the rehabilitation of the building stock, urban regeneration and the reduction of emissions in cities (Wolf et al., 2021). However, the literature warns that climate ambition does not depend solely on political rhetoric, but on specific institutional factors: municipal capacity to act on high-emission sectors, consistency between emissions inventories and action plans, and control over energy infrastructure (Rivas et al., 2021). Urban circularity must therefore be evaluated as a policy for transforming the urban metabolism and, simultaneously, as a policy of capabilities: without instruments, competences and funding, circularity risks becoming a set of fragmented 'good practices'. In this context, urban circularity appears simultaneously as a transformative promise and as a field of tensions. The adaptive reuse of the built environment, the regeneration of industrial land, and the integration of nature-based solutions have demonstrated environmental and social potential, but they have also revealed measurement limitations, distributional problems, and dependence on robust regulatory frameworks (Foster, 2020; Szopińska-Mularz et al., 2025; Canet-Martí et al., 2021). Based on this theoretical foundation, the article poses three research questions: (1) Under what conditions does urban circularity

produce verifiable environmental and social effects when deployed as systemic transformation? (2) What planning instruments and institutional configurations enable such transformation? (3) What structural limitations (in terms of governance, market, and territorial justice) condition its transformative capacity?

2. Urban circularity and territorialisation

The literature identifies European experiences in which circularity is articulated as infrastructural assembly, that is, as the integration of urban cycles and services. In Stockholm Royal Seaport, the integration of greywater reuse, organic waste management, and port soil regeneration demonstrates that circularity operates as a coupled system rather than the sum of sectoral actions (Williams, 2023). In Amsterdam, municipal strategies have promoted material exchange platforms and circular public procurement policies, reinforcing the role of planning as a mediator between private innovation and public regulation (Williams, 2021). These experiences, however, also reveal a critical point: circularity does not "emerge" spontaneously through the accumulation of projects, but rather through the creation of enabling conditions (storage spaces, reverse logistics, regulatory adaptation and multi-stakeholder coordination).

These European experiences (Figure 1) allow us to understand circularity as an infrastructure-assemblage strategy that connects material, energy, and territorial flows. However, its translation into specific urban contexts depends on particular institutional, economic and spatial conditions. In the Spanish case, the discussion on urban circularity is set within a framework characterised by an ageing and heterogeneous building stock, strong real estate pressures in metropolitan areas and the need to accelerate energy rehabilitation without reproducing territorial inequalities.

Here, the analysis by Rivas et al. (2021) is particularly relevant: municipalities that achieve the greatest climate ambition align measures with emissions inventories and dare to act in high-emission sectors, including transport, which is traditionally diffuse at the local level. This finding suggests that urban circularity, if it is to have an impact on the climate, must be integrated with mobility, housing, and energy policies, rather than remaining confined to material management.

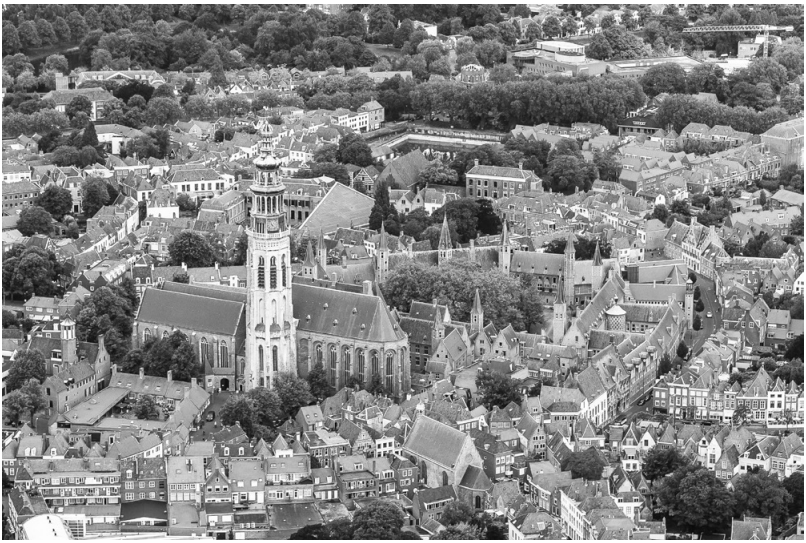


Figure 1. Middelburg (Zeeland, Netherlands), a delta city shaped by water management and regional infrastructures, illustrating circularity as the integration of material, energy and territorial flows across urban and environmental systems [Source: public domain].

The regeneration of industrial brownfields, for its part, provides a crucial territorial axis. Sessa et al. (2022) argue that the Green Deal can serve as a framework for reorienting the regeneration of industrial land towards sustainable, productive areas, capable of integrating eco-efficiency, energy synergies, and territorial innovation. In a country with a highly artificialised coastline and pressure on urban land, this agenda allows us to rethink urban growth not as expansion, but as the reconversion of already urbanised areas. In this context, circularity is not only a material issue but also a policy for land, urban metabolism, and the temporalities of urban transformation.

To this dimension must be added the discussion of the adaptive reuse of the built stock, which, in recent literature, appears as one of the strongest links between circularity, sustainability and urban form. Foster (2020) shows that extending the useful life of buildings reduces resource extraction, embodied energy, demolition waste and emissions associated with replacing the existing stock. Foster and Saleh (2021) go one step further by proposing an investment opportunity index for the adaptive reuse

of heritage in European cities, precisely because the circular transition requires not only normative principles but also comparable territorial decision-making instruments. Along the same lines, the systematic review by Szopińska-Mularz et al. (2025) argues that adaptive reuse contributes directly to several Sustainable Development Goals, with particular emphasis on education, sustainable cities and institutional partnerships. In this way, urban circularity ceases to be an exclusively environmental agenda and moves to the intersection between urban policy, material culture and multi-level governance.

Furthermore, some studies on heritage reuse emphasise that the relationship between sustainability and heritage extends beyond resource savings. Mazzetto (2023), in analysing heritage conservation and reuse strategies aimed at sustainable urban growth, insists that these processes can reinforce habitability, collective identity and the symbolic value of the built environment when integrated into broader urban development policies. Although the context is not European, the argument is relevant to the Spanish debate, where the rehabilitation of historic fabrics and consolidated urban areas is halfway between heritage preservation, economic revitalisation and the right to the city. This cultural dimension reinforces the idea that urban circularity should not be reduced to a logic of efficiency. However, it should also be understood as a policy of material continuity, urban memory and the re-signification of what already exists.

3. Governance, measurement and justice: tensions in the circular project

The transformative potential of urban circularity lies in the convergence of infrastructure, governance and justice. In terms of infrastructure, European cases show that closing cycles requires investments and management mechanisms that are rarely sustained by market incentives alone. Wolf et al. (2021) insist that the Green Deal will only be sustainable if it is accompanied by public investment and explicit attention to regional inequalities, thus shifting circularity from the technical realm to that of socio-economic cohesion (Wolf et al., 2021).

From a governance perspective, Williams (2023) warns that over-reliance on the market limits the circular transition: until circular activities

are fully competitive, planning must provide a stable regulatory framework that enables land, instruments, and sectoral coordination. Research by Rivas et al. (2021) reinforces the idea that climate ambition is sustained when municipal capacities to influence energy and mobility exist and when climate plans are not mere declarations but programmes consistent with the local emissions profile.

Measurement introduces another relevant tension. Foster (2020) emphasises that public decision-makers often lack the tools to estimate the environmental benefits of adaptive reuse and, as a result, tend to favour demolition and new construction based on immediate cost criteria. The index subsequently proposed by Foster and Saleh (2021) addresses this gap by operationalising the "opportunity" for investment in adaptive reuse in European cities through composite indicators. However, this move also raises an epistemological question: what is measurable (emissions, waste, investment) can displace what is meaningful but less quantifiable, such as cultural value, urban rights, or social cohesion (Figure 2).



Figure 2. Jardín del Turia as green infrastructure in the former riverbed of Valencia [Source: public domain].

Another relevant dimension of urban circularity concerns the incorporation of nature-based solutions and the reorganisation of urban food provisioning systems. Recent literature on urban agriculture and circular

metabolism shows that food production within the city can play a significant role in closing nutrient, water and biomass cycles, contributing to the reduction of external dependencies and the strengthening of urban resilience (Canet-Martí et al., 2021). However, these systems also pose challenges in terms of governance and material-flow management, as they require a precise understanding of the metabolic inputs and outputs that flow through urban systems. Circularity, therefore, is not limited to industrial or construction processes but involves a reconfiguration of urban socio-ecological systems. In this regard, the contribution of Canet-Martí et al. (2021) is particularly valuable because it shifts the discussion from mere efficiency to the articulation between resources, food security, resilience and the territorial design of ecological infrastructures.

Similarly, processes of adaptive reuse of heritage and existing urban structures reveal that circularity can generate social tensions when urban transformation processes do not incorporate inclusive decision-making mechanisms. Research on historic urban landscapes in heterogeneous urban contexts shows that adaptive reuse can both strengthen social cohesion and intensify conflicts between urban actors when certain urban values are prioritised over others (Yarza Pérez and Verbakel, 2022). These tensions are not marginal; they indicate that circularity can become a tool for selective valorisation of the territory if deliberative mechanisms and explicit criteria of spatial justice do not accompany it. Thus, the circular transition does not depend solely on technological or environmental innovations, but on the capacity of urban institutions to integrate social, territorial and ecological dimensions into planning processes. From this perspective, urban circularity should not be understood as a closed repertoire of solutions, but as a field of negotiation between environmental objectives, property regimes, governance capacities and distributive conflicts. Adaptive reuse, industrial regeneration and nature-based solutions share the same core problem: they all require institutional coordination, assessment of long-term benefits and sufficient social legitimacy to sustain transformations that affect urban uses, values and temporalities. Therefore, the true scope of circular development is not only in its ability to close material cycles, but also in its capacity to politically reorder the conditions under which those cycles become viable, legitimate, and socially sustainable.

4. Conclusions

The questions posed at the beginning of the article allow us to identify three fundamental dimensions for understanding the scope and limits of urban circularity. First, the review shows that circularity can generate verifiable environmental and social benefits when it is conceived as a transformation of the urban metabolism and implemented through infrastructural assemblies, stable regulation, and strong institutional capacities. The integration of material and energy cycles, as well as coordination between urban sectors, are key conditions for circularity to move beyond the experimental scope of pilot projects.

Second, the analysis confirms that the sustainability of these strategies depends largely on urban governance and the planning instruments available. The possibility of intervening in structural sectors such as energy, mobility or the rehabilitation of the built environment determines the degree of real ambition of urban policies. In this sense, circularity cannot be interpreted solely as technical innovation, but rather as an institutional reorganisation that redefines competences, capacities and forms of coordination between levels of government.

Finally, the study highlights that urban circularity is subject to structural tensions related to impact measurement, economic rationality and the territorial distribution of benefits. Assessment frameworks and comparative indices help guide decisions, but they also risk privileging the quantifiable if explicit criteria for social, cultural, and distributive value are not provided. Similarly, urban regeneration processes associated with circular strategies can generate dynamics of territorial valorisation that require governance mechanisms capable of integrating environmental sustainability and urban justice. In the Spanish context, where the rehabilitation of the built environment, metropolitan mobility and the regeneration of industrial land are simultaneous fronts of transformation, urban circularity offers an opportunity to reorient urban development towards less expansive models that are more focused on the conversion of existing structures. In this sense, urban circularity appears less as a closed planning model than as an operational hypothesis for urban transformation, whose validity will depend on its ability to articulate urban metabolism, institutional governance and territorial equity in a single ecological transition project.

Bibliographic references

Canet-Martí, A., Pineda-Martos, R., Junge, R., Bohn, K., Paço, T. A., Delgado, C., Alenčikiene, G., Skar, S., & Baganz, G. (2021). Nature-based solutions for agriculture in circular cities: Challenges, gaps, and opportunities. *Water, 13*(18), Article 2565. https://doi.org/10.3390/w13182565

Foster, G. (2020). Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts. *Resources, Conservation and Recycling, 152*, Article 104507. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507

Foster, G., & Saleh, R. (2021). The circular city and adaptive reuse of cultural heritage index: Measuring the investment opportunity in Europe. *Resources, Conservation and Recycling, 175*, Article 105880. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105880

Mazzetto, S. (2023). Heritage conservation and reuses to promote sustainable growth. *Materials Today: Proceedings, 85*, 100–103. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.269

Rivas, S., Urraca, R., Bertoldi, P., & Thiel, C. (2021). Towards the EU Green Deal: Local key factors to achieve ambitious 2030 climate targets. *Journal of Cleaner Production, 320*, Article 128878. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128878

Sessa, M. R., Russo, A., & Sica, F. (2022). Opinion paper on Green Deal for the urban regeneration of industrial brownfield land in Europe. *Land Use Policy, 119*, Article 106198. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106198

Szopińska-Mularz, M., Prokop, A., Wikiera, M., Bukowy, W., Forsman, F., & Vikström, S. (2025). Adaptive reuse of urban structures as a driver of sustainable development goals: A systematic literature review. *Sustainability, 17*(11), Article 4963. https://doi.org/10.3390/su17114963

Williams, J. (2021). Circular cities: What are the benefits of circular development? *Sustainability, 13*(10), Article 5725. https://doi.org/10.3390/su13105725

Williams, J. (2023). Circular cities: Planning for circular development in European cities. *European Planning Studies, 31*(1), 14–35. https://doi.org/10.1080/09654313.2022.2060707

Wolf, S., Teitge, J., Mielke, J., Schütze, F., & Jaeger, C. (2021). The European Green Deal: More than climate neutrality. *Intereconomics, 56*(2), 99–107. https://doi.org/10.1007/s10272-021-0963-z

Yarza Pérez, A. J., & Verbakel, E. (2022). The role of adaptive reuse in historic urban landscapes towards cities of inclusion. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, 15*(2), 306–339. https://doi.org/10.1108/JCHMSD-05-2022-0074

Monte de' Cocci in Rome. The testimonial value of historical waste, between Italy and Spain

Adolfo F.L. Baratta
Associate Professor, Roma Tre University, Department of Architecture, Italy.
adolfo.baratta@uniroma3.it

Francesca Romana Stabile
Associate Professor, Roma Tre University, Department of Architecture, Italy.
francescaromana.stabile@uniroma3.it

Antonio Magarò*
Research Fellow, Roma Tre University, Department of Architecture, Italy.
antonio.magaro@uniroma3.it

Massimo Mariani
Research Fellow, Roma Tre University, Department of Architecture, Italy.
massimo.mariani@uniroma3.it

Abstract: Monte Testaccio in Rome is an artificial hill with a complex history, that has formed the backdrop to the Testaccio district and, indirectly, of Rome itself over the centuries.

The setting for people's games in the Middle Ages, a shooting range in the 17th century, and an anti-aircraft post in the 20th century, despite being simply a hill made of what we would now call packaging waste, it is a huge and complex historical archive rich in data that is still emerging today.

The paper offers an interpretation of the history of "Monte de' Cocci" (the popular name of Monte Testaccio) based on Italian research compared with the main Spanish ones on this topic, given that the artificial hill formed over the centuries has been studied by Spanish universities, because it is composed of fragments of amphorae from Andalusia.

After a brief introduction defining the historical evolution of this famous Roman landmark, from the days of the Empire to the present day, the main Spanish research projects carried out since the 19th century are described, which have contributed to the creation of a fundamental historical archive consisting of the systematic cataloguing of amphora fragments.

The description of the survey method proposed by Dressel in 1871, which is still valid today, anticipates the decoding of the so-called "tituli picti", inscriptions made with a brush and reed pen, the interpretation of which has made it possible

* Corresponding author

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

to reconstruct much of the economic history of the Roman Empire. In addition, the methods used to stack oil amphorae waste are detailed, which allowed them to be consolidated into a substructure that still stands today and enabled the inscriptions to be preserved to the present day.

The article concludes with a description of the main recent research in Italy and Spain.

Keywords: Monte de' Cocci, Testaccio, waste from oil amphorae, tituli picti, Italian Spanish research.

1. Introduction

Mount Testaccio, known in Roman dialect as "Monte de' Cocci", is an artificial hill about 36 metres high (50 metres above sea level) that is a real landmark between the Aurelian Walls and the River Tiber. The name derives from the Latin "Mons Testaceus", which translates as "Mount of Terracotta Amphorae", as it was formed by the accumulation of the remains of these containers.

Over time; it has been hypothesised that it was the accumulation of pottery production errors, or that it was formed from the rubble of Rome destroyed by the fire attributed to Nero, or even that it was made of cinerary urns from pagan cemeteries desecrated by Christians. In the Middle Ages, the idea spread that the hill had originated from the accumulation of the remains of containers that had arrived in Rome containing tributes from the provinces (Remesal Rodríguez, 1997). Today we know that "Monte de' Cocci" consists almost exclusively of fragments of millions of oil amphorae, most of which originate from Baetica, now known as Andalusia, in Spain.

In the 10th century, Monte de' Cocci was just a landmark. The legend that it was founded where the Tiber was easy to cross had given the neighbourhood the honour of being the birthplace of Rome. Therefore, as early as 1140, in a manuscript preserved in the municipal library of Cambrai (France), there are some notes on the "Sunday of Testaccio", a festival on which the Pope went to the hill to watch a symbolic fight between man and animals (ludi carnevalarii). The artificial slope of Testaccio

was the ideal place for a game ("la ruzzica de' li porci") in which two pigs, two heifers and farmyard animals were thrown down the hill at breakneck speed on carts. The people were called upon to capture these animals, injured or killed during the race, and to celebrate the last days before Lent with their meat. These games were a source of competition for the districts, as evidenced by many writings dating back to the late 14th and early 15th centuries (Figure 1). The main game was bullfighting, governed by a veritable manual, described in the "Libro Terzo degli Statuti del Comune di Popolo" (1360-1363). Young champions, representing the districts, faced the bull that was released at the top of the mountain and enraged during its mad dash towards the slopes, where it was killed by the winner. This practice, of great historical and cultural value, has nevertheless led to the loss of much archaeological material (Guarino, 2012), and it was not an isolated case. In 1600, the eastern slope of the hill became the target for bombing practice by Castel Sant'Angelo, until the area became attractive for commercial use. In fact, the interior of "Monte de' Cocci" has an ideal microclimate for wine storage. In 1670, Pietro Ottini and Domenico Coppitelli purchased 200 "canne" (an ancient unit of measure) of land adjacent to the hill to open "grottini" (small caves) to be used as taverns (Reale Accademia dei Lincei, 1881). In a short time, the entire perimeter of the hill became saturated with shops (Figure 2), giving rise to the nineteenth-century tradition of the "ottobrate romane" (Roman October festivals), celebrated by poets and writers.

At the same time, the possibility of excavating had made a quantity of clay materials available to the point that in 1742 a law was enacted that provided for fines and imprisonment for offenders.

Other wars have left indelible scars on the hill: in 1849, during the attack by French troops, the Papal States installed artillery batteries on the summit of Monte Testaccio, which required modifying the profile of the hill and creating actual roads. To defend themselves, the French bombarded the area heavily, causing enormous archaeological damage. Similarly, during the Second World War, anti-aircraft batteries were installed on the hill, whose concrete platforms are still visible today.

The spirituality of the place has never been lost. In the mid-18th century, a Via Crucis was established, exploiting the analogy between "Monte de' Cocci" and Golgotha.

Due to these modifications, only the northern slope retains its original shape (Dressel, 1878; Orano, 1914).



Figure 1. Thomassin Philippe, The Testaccio festival held in Rome.

2. Testaccio during the Roman Empire

The earliest origin of the name, which extends from the district to the hill, is documented by an inscription dating back to the 8th century AD, located on the door of the Church of Santa Maria in Cosmedin in Rome, which mentions the donation of land "qui sunt in Testaccio" (Cafini & D'Alessandro, 2010).

However, Monte de' Cocci began to form during the Augustan period (27 BC – 14 AD) and was used as a landfill until the 3rd century AD, not only because of its proximity to the river port, but also because of the presence of the "Emporium" and the "Porticus Aemilia". These are key structures for understanding the port, commercial and logistical system of ancient Rome.

The "Emporium" developed from the 2nd century BC onwards to cope with the city's population growth after the Third Punic War. According to

Titus Livius, it was originally an annex to a portico built "extra portam", outside the "Porta Trigemina", in the Servian Walls.

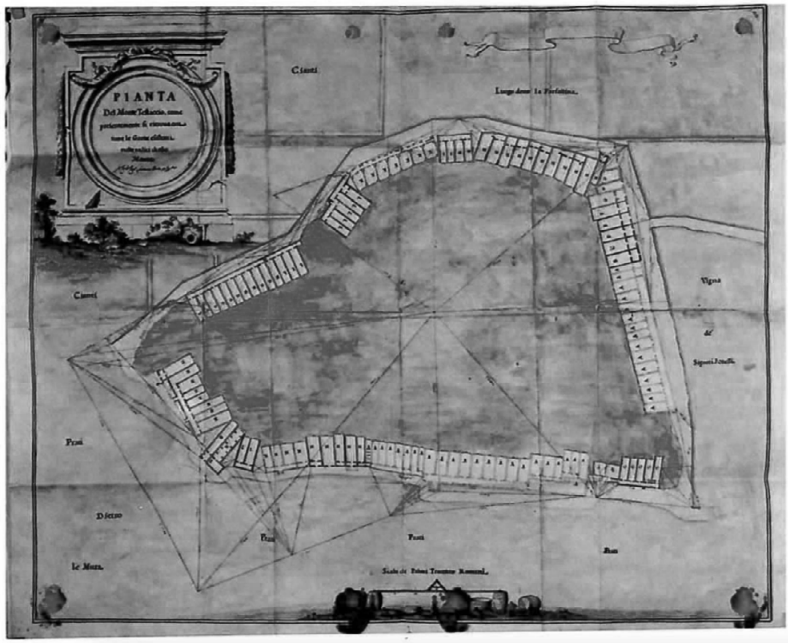


Figure 2. Carlo Fontana, Map of the caves of Monte Testaccio, 1695.

The ruins of the "Porticus Aemilia" consist of 3-metre-high arches, built in "opus incertum", whose functional identity is still the subject of archaeological debate. In this regard, the following theories are opposed.

- Classic identification (Gatti, 1934).
- Granary theory (Tuck, 2000).
- Theory of the naval arsenal (Cozza & Tucci, 2006).

Gatti was the first to connect some fragments of the "Forma Urbis Romae" with historical events. The letters (AEMI)LIA stand out in these fragments, and by superimposing the ancient map onto the modern topography, Gatti hypothesises a building 487 metres long and 60 metres wide, divided into 50 naves, stretching towards the Tiber on four steps. The building

would have been the portico built by the "aediles" Marcus Aemilius Lepidus and Lucius Aemilius Paullus in 193 BC, to support the Emporium (Figure 3).

Tuck points out that the structure was a "horreum", or granary: Tuck's interpretation of the fragments of the "Forma Urbis Romae" is that they indicated the word (CORNE)LIA.



Figure 3. Overlaying the map of the neighbourhood with the remains of the "Forma Urbis Romae" and identifying Mount Testaccio.

Therefore, he identifies the building as "Horrea Cornelia", a granary commissioned by Lucius Cornelius Sulla in the 1st century B.C. Cozza and Tucci hypothesise that the building was an arsenal without commercial function. The stepped structure extending towards the river supports this theory. It is certain that over time the "Porticus" and the "Emporium" underwent significant transformations. Even the Mount changed its shape and nature over time, becoming something very different from what it is today.

2.1. Italian Spanish archaeological interest and the first scientific investigations

Gomonde (1853) argues that the formation of the hill dates to the Late Empire. Reifferscheid (1865) highlights the absence of Greek stamps on the terracotta waste and hypothesises that it originated in the western provinces. Finally, Padre Bruzza (1872) proposes that the amphorae originated in the province of Baetica. The introduction of a scientific method in archaeological research on Monte Testaccio is attributed to Heinrich Dressel. He divided the surface of the hill into regular sectors and systematically recorded every find for each grid square, indicating altitude, any inscriptions, etc.

Among this information, Dressel searches for any stamps to trace the kilns, but thanks to a fortuitous storm, he discovers the so-called "tituli picti", or painted inscriptions that only appears when hydrated. In fact, since the amphorae contained oil, an organic material, they were subject to strong bacterial proliferation, which was neutralised by sprinkling the shards with lime, with the advantage of eliminating the bad smell and consolidating the debris. The lime created an opaque film that over time had covered the ink inscriptions, which reappeared once wet (Figure 4).

Dressel also discovered that almost all the amphorae were distinctly spherical in shape and likely came from the same place, while a small percentage were made of thinner terracotta, now identified as African amphorae (Dressel, 1878).

The "tituli picti" bore codes, which Dressel deciphered: they were composed of four parts, each of which he associated with Greek letters.

- Alpha indicates the weight of the empty amphora, approximately 30 kilograms.

- Beta indicates the net weight of the contents, approximately 70 kilograms.
- Gamma lists the names declined in the genitive case, indicating ownership. Dressel hypothesises that these were the producers, but Heron de Villefosse (1914) clarifies that these are the names of the transporters and merchants.

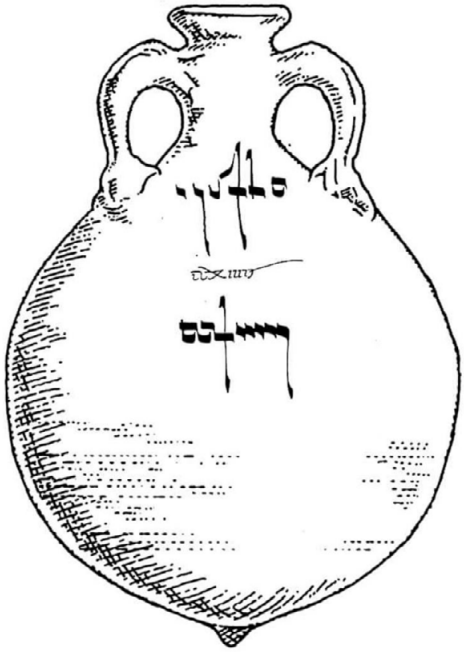


Figure 4. Dressel 20 amphora, with painted titles in evidence [Source: Caruso, 1985].

- Delta is a complex inscription that provided customs verification data. It begins with the letter R (probably for "Recensitum", meaning "Checked") followed by the names of the major export centres in Baetica, such as Hispalis (Seville), Corduba (Cordoba) and Astigi (Ecija). This is followed by confirmation of the official weight and then a series of names, customs officials responsible for checks. Finally, the titulus gives the date of shipment.

Dressel demonstrated that the accumulation was not disordered, but followed a precise logic, which was also constructive due to the sprinkling of quicklime on the ceramic fragments. He also confirmed the time frame that determined its formation and origin.

Nevertheless, it seemed impossible that these amphorae came from a single trade route. Hirschfeld (1888) had found numerous amphorae identical to those of "Monte de' Cocci" in Gaul and had hypothesised that they might have come from France. This theory was confirmed by the studies of Heron de Villefosse (1914), who, in reconstructing the names of some merchants from the "tituli picti", traced them back to Gallic families. Bonsor (1888), exploring the banks of the Guadalquivir and Genil rivers in Andalusia, discovered the remains of the ancient Roman kilns where the amphorae were produced, potentially dispelling any doubts and confirming Dressel's theories. Hübner (1903) definitively linked the kilns discovered by Bonsor with the accumulation at "Monte de' Cocci".

In the early 1960s, a major campaign was launched to map the kilns and ceramic production facilities in Baetica (Ponsich, 1974), while a series of wide-ranging studies was initiated on Mount Testaccio (Rodriguez Almeida, 1972).

In this regard, the study of the formation phases of Monte Testaccio has been the subject of parallel Italian and Spanish research, the results of which have brought to light retaining walls made of oil amphorae.

The amphorae were lined up without their bases and filled with fragments of ceramic material to give them weight and stability. Behind this massive facing, tonnes of shards were dumped up to the height of the amphorae, and on this embankment a new row of amphorae was built, further back, proceeding in terraces.

In the southern sector, a platform dating back to 179 A.D. has been identified; the deposit was interrupted and resumed in 205 A.D. with the creation of a new platform, which grew until 221 A.D. The step between the two was further filled in between 228 and 230 A.D. In addition, the eastern side formed a third platform, which was unfortunately destroyed (Figure 5).

Finally, it should be noted that, with the aim of reducing the volume of the mound, there was an evolution in the crushing of the shards: in

the 2nd century A.D., there were about 600 kg of fragments in one cubic metre of mound, which in the 3rd century A.D. became about one ton, confirming the greater compaction (Remesal Rodríguez, 2017).

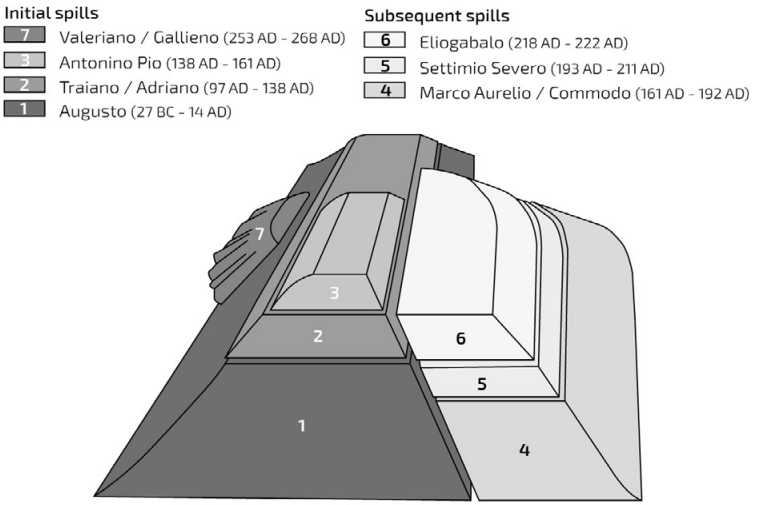


Figure 5. Stages in the development of "Monte de' Cocci" [source: Authors on Remesal Rodríguez, 2017].

3. Conclusions

The research work carried out in Italy and Spain regarding "Monte de' Cocci" is of great importance due to the testimonial value of this type of waste.

Thanks to research led by University of Barcelona and Sapienza University of Rome, it has been possible to calculate the density and volume of the artificial hill. Given the quantities of fragments lost over the centuries due to human destruction, the remains are equivalent to the contents of around 25 million amphorae, a figure that could more than double if the destroyed materials were included. In terms of demographic impact, the olive oil transported in these vessels represented a volume sufficient to meet half the annual nutritional requirements of one million inhabitants, roughly

corresponding to the estimated population of Rome at the time, for a full 250 years. If lost material is included in the calculations, the mound alone could potentially have covered the entire dietary requirements of a million people for that same period (Remesal Rodríguez, 2017).



Figure 6. View of "Monte de' Cocci" [Source: ICCD, Historical Photography Archive, early XX century, from Stabile, 2023].

The "tituli picti" have revealed new names of merchants, but also transporters and customs magistrates. Finally, the origins from other parts of the world have been measured more accurately, estimating a percentage between 10 and 15% of amphorae from North Africa (Radaelli, 2021). In addition to Italy and the Roman universities, which are at the forefront of the study of "Monte de' Cocci", the University of Barcelona has published six volumes entitled "Estudios sobre el Monte Testaccio", which bring together the results of numerous excavation campaigns (Blazquez et al., 1999-2004).

The success of this research is due to the application of a wide range of disciplines, ranging from traditional topographical surveys to advanced computer science applied to archaeology. Thanks to the Centro para el

Estudio de la Interdependencia Provincial en la Antigüedad Clásica (CEIPAC) and leading European projects such as EPNet (funded by the ERC), the research methodology has taken another significant step forward. A close interdisciplinary collaboration has been established, involving mathematicians to develop theoretical models, physicists specialising in network theory to understand the complex logistical distribution of the amphorae, and computer scientists who have structured the databases into advanced ontological systems based on metadata.

Furthermore, research into the site's geotourism impact should not be underestimated. From a geological and landscape perspective, the hill is an interesting example of anthropogenic morphogenesis. This hill, which has become naturalised over time, is now an archaeological site protected by the Special Superintendency for Archaeological Heritage of Rome. When assessed using the 'Site Value for Geotourism' (VSG) quantification model, Monte Testaccio scored 17, placing it in the category of medium geotourism value. This score is the result of a combination of its high scientific (geomorphological) interest and its valuable historical and archaeological aspects (Pica et al., 2014).

Bibliographic references

Blázquez, J.M., Remesal Rodríguez, J., Aitlahsen, Y. (1999-2004). *Estudios sobre el monte Testaccio (Roma)*, Barcelona (ES): Universitat de Barcelona.

Bonsor, G.E. (1888). Marcas de alfareros romanos. *Memorias de la Sociedad Arqueológica de Carmona*, 1, pp. 56-62.

Bruzza, L. (1872). Sopra vari oggetti ritrovati sul Testaccio e nell'Emporio. Bulletino dell'Instituto di Corrispondenza Archeologica, pp. 134-145.

Cabral Bernardo, G. (2014). Porticus Aemilia: Emporium, Navalia e Horrea em um unico colosso. *Mare Nostrum*, 5, pp. 124-149. https://doi.org/10.11606/issn.2177-4218.v5i5p124-149

Caruso, L. (1985). Roma Centro, Testaccio. Roma: Palombi editore.

Cozza, L., Tucci, P.L., (2006). Navalia. *Archeologia Classica*, 57(7), pp. 175-202.

Cafini, M.L., D'Alessandro, L. (2010). Anfore adriatiche a Roma. Rinvenimenti nell'area del nuovo mercato Testaccio. *Rei Cretariae Romanae Fautorum Acta*, 41, pp. 93-100.

Dressel, H. (1878). Ricerche sul Monte Testaccio. *Annali dell'Instituto di Correspondenza Archeologica*, pp. 118-192.

Gatti, G. (1934). Saepta Julia e Porticus Aemilia nella Forma Severiana. *Bullettino della Commissione Archeologica Comunale di Roma*, 62, pp. 123-149.

Gomonde, W. (1853). Adunanza de 25 Febrajo 1853. *Bulletino dell'Instituto di Corrispondenza Archeologica*, 85.

Guarino, R. (2012). Carnevale festa civica nei ludi di Testaccio. *Roma moderna e contemporanea*, XX (2), pp. 475-497.

Hirschfeld, O. (1888). Inscriptiones Galliae Narbonensis Latinae. *Corpus Inscriptionum Latinarum*, XII.

Heron de Villefosse, A. (1914). Deux armateurs narbonnais Sextus Fadius Secundus Musa et P. Olitus Apolonius. *Mémoires de la Société des Antiquaires de France*, pp. 153-180.

Hübner, E. (1903). Nuevas fuentes para la geografía antigua de España. *Efemeris Epigraphica*, IX.

Orano, D. (1914). *Come vive il popolo a Roma. Saggio demografico sul quartiere Testaccio*, Croce: Pescara.

Pica, A.; Del Monte, M.; Fredi, P.; Vergari, F. (2014). Il valore geoturistico dei geositi del centro storico di Roma. in Melelli, L.; Pauselli, C.; Cencetti, C. (a cura di). *Dialogo intorno al Paesaggio. Percezione, Interpretazione, Rappresentazione*. Tomo II, Perugia: Università degli Studi di Perugia, pp. 156-168.

Ponsich, M. (1974). *Implantation rurale antique sur le Bas-Guadalquivir I*. Parigi: Casa de Velázquez.

Reale Accademia dei Lincei (1881). *Notizie dagli scavi di antichità*. Roma: Coi tipi del Salviucci.

Reifferscheid, A. (1865). Il monte Testaccio. *Bulletino del Instituto di Corrispondenza Archeologica*" XI, pp. 235-240.

Radaelli, E. (2021). Not only Monte Testaccio: Reflections about the Presence of Baetican Olive Oil Amphorae in Rome (and Ostia) during the Middle Imperial Age (2nd–early 3rd Centuries AD) Emerging from the Findings at the 'Terme di Elagabalo' in Rome. in Grzelak-Krzymianowskiej, A.; Woźniak, M.J. (eds), *Rzym a Półwysep Iberyjski Inspiracje i powiązania na przestrzeni dziejów*, Lodz (PL): University of Lodz Press, pp.363-381. https://doi.org/10.18778/8220-421-6.19

Remesal Rodríguez, J. (1997). Arva: prospecciones en un centro productor de ánforas Dressel 20 (Alcolea del Río, Sevilla). *Pyrenae*, 28, pp. 151-178.

Remesal Rodríguez, J. (a cura di) (2017). The Roman Economy. New Perspectives. Barcellona: Universidad de Barcelona.

Rodriguez Almeida, E. (1972). Novedades de epigrafía anforaria del Monte Testaccio. *Recherches sur les amphores romaines*, pp. 107-240.

Stabile, F.R. (2023). *Testaccio, il quartiere operaio di Roma Capitale dal 1870 agli interventi dell'Istituto per le Case Popolari*. Roma: Edizioni Quasar.

Tuck, S.L. (2000). A new identification for the Porticus Aemilia. *Journal of Roman Archaeology*, 13, pp. 175-182. https://doi.org/10.1017/S1047759400018845

Regenerative approaches to industrial heritage: circular adaptive reuse toward culture

Gaia Garofali*

PhD Student, Sapienza University of Rome, Planning Design Technology of Architecture Department, Italy. *Gaia.garofali@uniroma1.it*

Paola Altamura

Assistant Professor, Sapienza University of Rome, Planning Design Technology of Architecture Department, Italy. *Paola.altamura@uniroma1.it*

Serena Baiani

Associate Professor, Sapienza University of Rome, Planning Design Technology of Architecture Department, Italy. *Serena.baiani@uniroma1.it*

Abstract: adaptive reuse is a valorisation strategy involving transformations compatible with the existing structure, including changes of use. The recovery of disused industrial heritage plays a strategic role in the energy and circular transition, converting derelict contexts into new centers of socio-cultural and economic value. European initiatives highlight cultural services as tools for fostering more inclusive and resilient cities. This contribution proposes a reference framework with strategic design guidelines to structure adaptive reuse interventions on industrial heritage, viewed as both a historical legacy and a resource for future development. Through an analysis of international cases — including production plants, storage and logistics warehouses and energy facilities — best practices were identified based on adaptive reuse principles, circular design strategies, and processual dimension. From three emblematic cases, five strategic guidelines were derived, focusing on the creation of flexible and adaptable cultural spaces, the use of circular and bio-based materials, the enhancement and valorisation of historical memory, the activation of participatory and co-design processes, and the integration of low-carbon, bioclimatic energy solutions. Future research will expand the range of typological groups, further refine the guidelines for each category, and develop measurable KPIs to systematically assess the environmental, economic, and social sustainability of adaptive reuse interventions.

Keywords: adaptive reuse, industrial heritage, circular design, participatory process, cultural activities.

* Corresponding author

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introduction

The adaptive reuse of a building is generally defined as a valorisation strategy involving a transformation — including a change of use — compatible with the original structure, usually at the end of its first life cycle (Carswell, 2011). Beyond physical preservation, this approach generates opportunities for inclusion, social cohesion, and neighbourhood revitalisation, through the regeneration of urban fabrics and the building of new community relationships (Foster, 2020). The present research is situated within this context, drawing upon previous studies (Baiani et al., 2024) that explore the adaptive reuse of contemporary heritage through the lens of circularity.

Building on the EU Commission's "A New European Agenda for Culture" (2018), multi-annual work plans for 2023–26 prioritize cultural participation and its social impact. These plans address heritage safeguarding against climate change while integrating culture's role in health, well-being and access to culture for all.

Within this framework, European initiatives and programmes (CLIC, 2017–2021) oriented towards the repurposing of existing building stock, assign a central role to cultural services as tools for promoting more inclusive and resilient cities through the reuse of built heritage. In the Urban Agenda, document (2019), cultural heritage is identified as a resource and an opportunity, through actions operating on "Transformation, Adaptive Reuse and Urban Reconversion" (Pillar 3) and "Cultural Services and Culture for Inclusive Cities" (Pillar 5), outlining an integrated vision of culture as a lever for social, economic and territorial innovation (European Commission, 2019). A further relevant aspect is the interpretation of built heritage as a resource mine, capable of fostering the integration between conservation and adaptive reuse, contributing to climate mitigation through savings in energy and materials (Luciano et al., 2023).

The analysis of the state-of-the-art highlights that most of the available reference frameworks remain strictly at a strategic level: while they address crucial themes such as social participation or the circularity of materials and resources, they often lack a translation into technical and operational guidelines. This approach results in complex and fragmented intervention models which, in the absence of a comprehensive framework capable of

integrating systemic strategies with architectural choices, remain difficult to implement in practice. This contribution, therefore, intends to fill this gap by defining intervention principles to guide design choices toward a concrete and tangible circular operability.

2. Research aims and methodology

The state of the art identifies industrial heritage as a strategic field for adaptive reuse strategies from a circularity perspective, conceived as both a legacy of the past and a resource for future development (UNESCO, 1972).

A fundamental step was gaining knowledge of the characteristics of disused industrial heritage: through a selection of cases, it was possible to define an analytical methodology focused on criteria of adaptive reuse of the existing built stock and on the predominant conversion to cultural functions, identifying international best practices and considering aspects of resource circularity as well as heritage management and protection.

The cases were subsequently clustered according to functional, technological, and morphological criteria, identifying three typological categories for comparative analysis:

- production plants: modular spaces tailored to manufacturing phases;
- storage and logistics warehouses: large, flexible open spans for storage and movement;
- energy facilities: robust structures with high technical volumes.

For each category, a number of significant case studies were selected on the basis of broader research, analysing three main aspects:

- adaptive reuse intervention principles: including "box in the box" logic, rooftop superimposition, façade modifications (such as suspension systems or interposed insertions) and potential side extensions;
- circular design strategies: focusing on flexibility, disassembly, material reuse, the use of biobased materials and circular management of ecological resources;
- processual dimension: linked to heritage nature and protection models, and stakeholder participation in both intervention and use, mapping for each case the level of building protection, the governance model and eventual participatory processes.

Subsequently, the analysis of three emblematic cases for each category allowed for the identification of recurring strategies. These approaches were translated into five guiding principles for intervention aimed at steering the adaptive reuse of disused industrial heritage toward material and resource circularity, environmental sustainability, social participation and cultural valorisation as a driver for urban regeneration.

3. Results

3.1. Comparative framework of seven case studies

The selected case studies (Figure 1), categorized by typological-functional group, represent diverse circular design strategies, intervention modalities (Table 1) and different heritage management models, including protection, ownership, funding, and eventual participatory process (Table 2).

The first typological-functional group concerns production plants. The analysis focused on the Civic Centre Cristalleries Planell 1015 in Spain, the LocHal Library in Tilburg and the Cau Dat Tea Village in Vietnam.

The Civic Centre Cristalleries Planell 1015, in Barcelona, was realised by preserving the two historically listed façades of the former factory, adopting a box-in-the-box strategy. The new internal volume houses, across multiple levels, the civic centre spaces dedicated to cultural and social activities, including multipurpose halls, workshops, meeting spaces and community services. The building was designed according to bioclimatic principles, incorporating natural ventilation, solar chimneys and thermal mass to reduce energy demand (H Arquitectes, 2016).

The LocHal Library (Tilburg), a former locomotive depot, was transformed into a cultural hub as part of the railway district regeneration. The project preserves the original atmosphere of the building and integrates new structures, with highly flexible interior spaces achieved through adjustable curtains that modulate light and sound and demarcate distinct functions (European Heritage Awards Archive, 2020).

The second group, storage and logistics warehouses, includes the Gare Maritime in Belgium and the Fenix Museum of Migration in the Netherlands.



Figure 1. Overview of the seven best practices selected in the research, including the original and new function after adaptive reuse [Source: authors' elaboration].

The Fenix Museum (Rotterdam) transforms a historic warehouse into a cultural hub with an open exhibition space, an external public square and a central spiral staircase built in timber and steel with a deconstructable system. The project integrates a green roof, rainwater harvesting and a shallow geothermal plant, exploiting the proximity of the Maas River (Piñeiro, 2025).

The third group, energy facilities, refers to the Centrale Idroelettrica di Fies in Italy and the Grande Halle de Colombelles in France.

The Centrale Idroelettrica di Fies was reused by preserving the structure and adapting the spaces to a flexible and specialised cultural programme, encompassing performance, linguistic and training activities. The project adopts an essential architectural language, enhancing the materials - iron, timber, glass and concrete - used with restraint and according to criteria of legibility and reversibility (Dellanna, 2016).

Table 1. Comparison of the seven best practices in terms of adaptive reuse principles of intervention and circular design principles. [Source: authors' elaboration].

	Adaptive reuse principles of intervention				Circular design strategies				
	Internal (box in the box)	On the roof (superposition)	In façade (adding/ hanging/in between)	Side extension	Design for Flexibility	Design for Disassembly	Reused materials	Biobased materials	Ecological resources circular management
Civic centre Cristalleries Planell 1015	x	x	x						x
LocHal			x		x				x
Cau Dat Tea Village		x	x	x			x	x	
Gare Maritime	x					x		x	x
Fenix Museum of Migration		x			x			x	x
Centrale Fies						x			
Grande Halle De Colombelles	x		x		x	x	x	x	x

Table 2. Comparison of the seven best practices in terms of governance model - including heritage protection, ownership and type of management -, and participatory process. [Source: authors' elaboration].

	Legally protected building	Ownership	Type of Management	Participatory process
Civic centre Cristalleries Planell 1015	The building is protected by the heritage authority and represents an expression of Catalan Modernism (Spain)	Public	Publicly funded	-
LocHal	Municipal monument (Netherlands)	Public	Privately funded	-
Cau Dat Tea Village	-	Private	Publicly funded	-
Gare Maritime	Protected as industrial heritage (Belgium)	Private	Publicly funded	Stakeholder participation in planning activities
Fenix Museum of Migration	-	Private	Privately funded	
Centrale Fies	Protected historical-artistic and industrial heritage (Italy)	Private	Publicly funded	Stakeholder participation in planning activities
Grande Halle De Colombelles	-	Public	Privately funded	Stakeholder engagement during the development of the building's functional program

3.2. Comparative table of three case studies

From the seven cases described, three projects were selected, one for each typological-functional group, representative of the intervention strategies and circular design principles in the adaptive reuse of disused industrial heritage.

The Cau Dat factory (Figure 2), a project representative of the first group, was originally a tea factory built in 1929 in Vietnam and transformed in 2020, based on a project by Bo Design & Construction, into a tea museum and cultural centre. The project (at a cost of approximately 200 $/m^2$)

prioritizes material reuse by recovering degraded external sheet metal partitions - partly treated and partly replaced with polycarbonate panels - and regenerating the original steel supporting structure. Art installations using bio-based materials (tea leaves and earth-acrylic mixtures) further link industrial heritage to local culture. From an intervention strategy perspective, the project combines façade work involving the replacement of closures with the addition of side volumes that expand the spaces dedicated to cultural activities. It also includes the construction of a ramp that integrates with the existing structures, allowing access to the roof of one of the pavilions, making it usable and thus creating a strategy of overlapping on the roof (Bo Design, 2021).



Figure 2. Cau Dat Tea Village, images from the adaptive reuse intervention. [Source: authors' elaboration].

Gare Maritime (Figure 3), a project representative of the second group, involves the preservation of seven connected warehouses, with three main corridors and four platforms made of iron, cast iron and glass, with Art Nouveau-style pillars and arches. Based on the "box in the box" principle, the intervention adopts a modular system inserted into the original structure: CLT modules with FSC-certified oak finishes, lightweight and renewable materials of European origin. Compared to a similar intervention in reinforced concrete, this choice has avoided the emission of 3,500 tonnes of CO_2. These two-story modules provide flexible spaces for offices, retail and cultural activities.

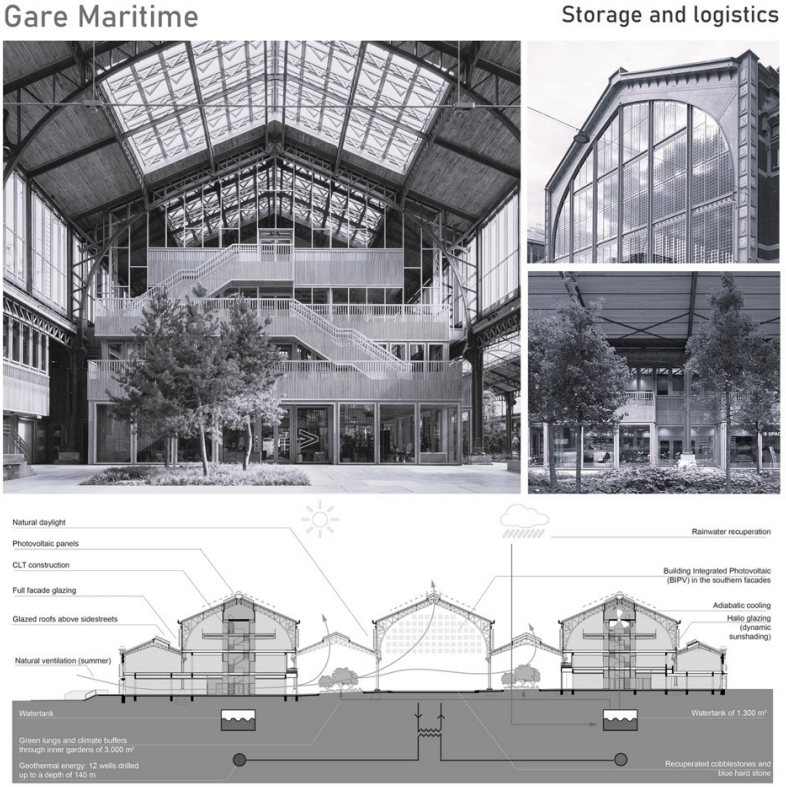


Figure 3. Gare Maritime, images from the adaptive reuse intervention, including an environmental strategic section. [Source: authors' elaboration].

Circular strategies prioritize bio-based and reused materials - such as bluestone and timber sleepers - while sustainability is enhanced through rainwater harvesting for irrigation, geothermal heat pumps, glass facades integrating solar cells and 17 000 m² of PV panels on the roof, ensuring maximum energy efficiency (Bureau Bouwtechniek, 2018).

The Grande Halle de Colombelles (Figure 4), a project representing the third group, is located on a former metallurgical site in Caen, closed in 1993. The intervention preserves the remaining industrial heritage, including a large cooling tower and two original concrete naves. Following a "box-in-the-box" strategy, two wooden levels were inserted into the naves to host a café, workshops and co-working spaces.



Figure 4. Grande Halle de Colombelles, images from the adaptive reuse intervention. [Source: authors' elaboration].

The project stands out for two innovative aspects: participation and material reuse. By co-constructing the programme with public and private actors, the site becomes a "participatory laboratory". The permanent management of the building is public, led by the Municipality of Colombelles with the involvement of private actors for specific cultural and commercial activities. In parallel, circular design strategies were coordinated by the WIP association, which selected, tested and supplied reclaimed demolition materials through technical dossiers. The reused elements include rock wool insulation, cast iron and steel radiators, timber for railings and stairs, sanitary fixtures and solid wood doors. This dual strategy proves the viability of circular, participatory and low-impact architectural practices (Encore Heureux Architectes, 2019b).

4. Discussion and conclusions

The systematic analysis of the selected case studies has culminated in the definition of five guiding principles for intervention, aimed at providing a robust framework for the circular adaptive reuse of industrial heritage into cultural hubs:

1. the creation of modular and flexible cultural and social spaces to ensure adaptability to users' needs;
2. the use of circular and biobased materials in the reuse of disused industrial buildings;
3. the enhancement of the historical memory of sites through intervention strategies on the existing fabric (such as box-in-the-box, superimposition, and lateral extensions), which allow new functions to be introduced without compromising the integrity of the existing building;
4. the activation of participatory and co-design processes for the definition of functional programmes;
5. the integration of zero-CO_2 energy solutions based on bioclimatic principles and the circular management of natural resources.

A current limitation of the research is the restricted selection of typological-functional groups, which will be expanded to broaden the research results validity and transferability. Future development aim to refine the strategic guiding principles for intervention for each group and to enable

systematic verification through measurable KPIs. The proposal is thus to structure a framework for assessing the environmental, economic and social sustainability of compatible transformations for the circular adaptive reuse of industrial heritage toward culture.

Bibliographic references

Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. (2024), Circular Contemporary Heritage. Design Experimentations on Conservation and Reuse Aiming at Material Resource Efficiency and Decarbonization, in Bartolomei, C., Ippolito, A., Vizioli, S.H.T. (eds) *Contemporary Heritage Lexicon. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham.* https://doi.org/10.1007/978-3-031-61245-9_20

Bo Design & Construction (2021). Cau Dat Farm Da Lat. Available from: https://www.bodcsg.com/projects/cau-dat-farm-da-lat (accessed: 24.02.2026).

Bureau Bouwtechniek (2018). Gare Maritime. Available from: https://b-b.be/en/portfolio/gare-maritime (accessed: 24.02.2026).

Carswell, A.T. (2011). Adaptive reuse, in Robbins P., Cohen N. e Golson J.G. (a cura di), *Green Cities: An A-to-Z Guide*, SAGE Publications, Thousand Oaks, pp. 5–8.

Dellanna, S. (2016). Centrale Fies. Divisare. Available from: https://divisare.com/projects/289758-sergio-dellanna-centrale-fies (accessed: 24.02.2026).

Encore Heureux Architectes (2019a). Grande Halle. Available from: https://encoreheureux.org/fr/projets/grande-halle (accessed: 24.02.2026).

Encore Heureux Architectes (2019b). Dossier de présentation: Réhabilitation d'une halle industrielle en tiers-lieu – Grande Halle de Colombelles. Available from: https://www.leoffdd.fr/fichiersprojets/5fda2d59ebbbe.pdf (accessed: 24.02.2026).

European Commission (2019). CCH Orientation Paper: Final Public Version. Available from: https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/cch_orientation_paper_-_final-public_version.pdf (accessed: 24.02.2026).

European Heritage Awards Archive (2020). LocHal, Tilburg. Available from: https://europeanheritageawards-archive.eu/laureates-1978-2022/detail/lochal-tilburg?cHash=25a982f8afacf728647e2bca05dc2060 (accessed: 24.02.2026).

Foster, G. (2020). Circular Economy Strategies for Adaptive Reuse of Cultural Heritage Buildings to Reduce Environmental Impacts. *Resources, Conservation and Recycling*, *152*, Article 104507. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507

H Arquitectes (2016). Cristalleries Planell 1015. Available from: https://www.harquitectes.com/en/proyectos/cristalleries-planell-1015/ (accessed: 24.02.2026).

Luciano, A., Altamura, P., Baiani, S., & Cutaia, L. (2023). The building stock as an urban mine. The case of the circular regeneration of disused buildings. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *33*, 1–18.

Piñeiro, A. (2025). MAD Architects' Fenix Museum of Migration opens in Rotterdam's City Harbor. *ArchDaily*. Available from: https://www.archdaily.com/1030145/mad-architects-fenix-museum-of-migration-opens-in-rotterdams-city-harbor (accessed: 24.02.2026).

UNESCO (1972). *Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage*. Paris: UNESCO. Available from: https://whc.unesco.org/archive/convention-en.pdf (accessed: 24.02.2026).

Urban Agenda for the EU (2019). *Sustainable and Circular Re-use of Spaces and Buildings*. Available from: https://www.urbanagenda.urban-initiative.eu/sites/default/files/migration_files/handbook-online.pdf (accessed: 24.02.2026).

Riuso e memoria: gli elementi della Certosa nel tessuto urbano di Serra San Bruno

Reuse and memory: Charterhouse elements in Serra San Bruno's urban fabric

Lorenzo Russo*

Dottorando, Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Italy.
lorenzo.russo@unical.it

Giuseppe Fortunato

Professore di seconda fascia, Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Italy. *giuseppe.fortunato@unical.it*

Abstract: the research investigates the identity relationship between Serra San Bruno and the Charterhouse of Santo Stefano del Bosco, with particular attention to the consequences of the 1783 earthquake and the subsequent dispersion and reuse of stone and decorative materials within the urban fabric. The fragmentary nature of the documentary sources and the dispersion of the decorative apparatuses have made the philological reconstruction of the original layout problematic; at the same time, the reuse of columns, jambs, bas-reliefs, and sculptures in local churches and dwellings has produced a stratified built landscape, a carrier of identity meanings and practices of cultural reappropriation.

The project adopts an interdisciplinary approach that integrates a critical reading of archival sources, dialogue with scholars and local communities, *in situ* reconnaissance, and digital surveying using photogrammetry and laser scanning. The 3D information models produced open up the possibility of the virtual relocation of the fragments and the creation of an open digital archive, accessible to users with varying levels of expertise. Such tools foster the safeguarding, augmented experience, and promotion of both tangible and intangible heritage. The technical experiments undertaken during the survey campaign demonstrate how digitalisation and community participation can virtually recompose dispersed traces and strengthen the cultural resilience of the territory.

Keywords: augmented reality, virtual tour, Charteuse, Serra San Bruno, 3D survey.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introduzione

L'impiego storico di elementi ornamentali provenienti da complessi distrutti o dismessi —colonne, stipiti, cornici, bassorilievi, volti di angeli e cherubini— costituisce una pratica diffusa e stratificata nel tempo, animata da motivazioni economiche, funzionali, simboliche e rituali.

Tale riciclo, spesso dettato dall'immediatezza del bisogno costruttivo e dalla scarsità di risorse, si accompagna a scelte deliberate di memoria collettiva: frammenti di edifici sacri o civili vengono reimpostati in nuove architetture come segni tangibili di continuità e appartenenza. Accanto all'economia materiale, il reimpiego assume valenze identitarie e apotropaiche, poiché elementi figurativi e simbolici vengono collocati in posizioni visibili per proteggere, consacrare o legittimare nuovi spazi. Questo processo genera paesaggi costruiti ibridi, in cui la stratificazione di materiali e significati rende leggibile una storia di perdite e riappropriazioni; al contempo, la dispersione contestuale degli elementi originari complica la ricostruzione filologica degli apparati decorativi e architettonici di partenza. Nel contesto della conservazione e della ricerca storica, il fenomeno del riuso impone una riflessione metodologica che coniughi l'analisi materiale, la documentazione archivistica e le tecnologie digitali: solo attraverso un approccio integrato è possibile ricomporre, anche virtualmente, la trama delle relazioni tra frammento e contesto, restituendo valore storico e culturale a manufatti altrimenti disarticolati e favorendo pratiche di tutela e valorizzazione sensibili alle dinamiche locali.

2. Serra San Bruno e la sua certosa

La presente ricerca,[1] si incentra sulle vicissitudini che hanno caratterizzato la chiesa tardo cinquecentesca interna alle mura della Certosa di Santo Stefano del Bosco a Serra San Bruno. Fondata nel 1091, costituì per secoli il fulcro religioso, economico e culturale del territorio serrese; la sua evoluzione architettonica e decorativa (Gritella, 1991) raggiunse particolare ricchezza tra Cinque e Seicento grazie a committenze che richiamarono artisti di rilievo (Panarello, 2010).

[1] La ricerca - finanziata coi fondi dell'Unione Europea *Next Generation EU* - fa parte di un progetto PRIN (Progetto di Rilevante Interesse Nazionale) più vasto che mette al centro la digitalizzazione e la valorizzazione dei beni culturali e vede coinvolte tre sedi universitarie italiane (UniCal, UniNa, UniNettuno) coordinate dal prof. Riccardo Florio.

Il catastrofico terremoto della Calabria meridionale del 1783 rappresenta uno spartiacque decisivo: una sequenza sismica di forte intensità provocò il crollo esteso della fabbrica monastica e la perdita di gran parte dell'apparato decorativo e delle collezioni librarie e archivistiche. La distruzione non fu soltanto materiale, ma anche documentaria: molte fonti andarono disperse o confluirono in archivi istituzionali e collezioni private, rendendo frammentaria la memoria storica del complesso e ostacolando ricostruzioni filologiche complete.

A seguito del sisma, il destino della Certosa si articolò in due fenomeni concomitanti e interconnessi: da un lato l'abbandono progressivo della fabbrica, aggravato dalle soppressioni degli ordini religiosi e dalle vicende politiche dell'Ottocento; dall'altro il riutilizzo diffuso dei materiali lapidei e ornamentali (colonne, stipiti, bassorilievi, volti di angeli e cherubini) nel tessuto edilizio del centro storico di Serra San Bruno. Questi elementi, reimpiegati in chiese, facciate e abitazioni private (Pisani, 2021), divennero segni tangibili di continuità identitaria ma anche fonte di dispersione contestuale del patrimonio originario (Figura 1).



Figura 1. Alcuni elementi decorativi riadoperati nelle costruzioni nel centro abitato di serra San Bruno [Fonte: elaborazione degli autori].

La dispersione assunse forme molteplici: trasferimenti documentati verso archivi come quelli della Cassa Sacra e altre istituzioni, collocazione di opere in chiese locali e l'uso di materiali della Certosa come cava per l'edilizia privata (Figura 2), pratica che alterò ulteriormente la leggibilità dell'impianto originario. Tale frammentarietà delle fonti e degli oggetti rende oggi complessa la ricostruzione dell'assetto primitivo e impone approcci integrati di ricerca.

Questo quadro storico giustifica l'attuale necessità di rilievo digitale, ricomposizione virtuale e una estesa campagna di rilievo 3D come strumenti per ricostruire, documentare e valorizzare un patrimonio la cui integrità materiale è stata compromessa dal sisma e dalle vicende successive.



Figura 2. Schema del centro antico di Serra San Bruno con individuazione della posizione dei principali elementi provenienti dai ruderi della certosa e riciclati nelle costruzioni [Fonte: elaborazione degli autori].

3. Acquisizione 3D e ottimizzazione dei modelli dell'apparato scultoreo

La fase di acquisizione digitale di alcuni elementi riflettenti dell'altare maggiore di Cosimo Fanzago —originariamente collocato nella chiesa della

Certosa e oggi custodito nella chiesa dell'Addolorata— ha richiesto una rigorosa pianificazione metodologica. Se non adeguatamente governate, le riflessioni speculari compromettono in modo significativo l'affidabilità delle acquisizioni, sia fotogrammetriche sia basate su laser scanner. Tuttavia, data la delicatezza delle opere, è stato escluso l'impiego di metodi invasivi, quali l'uso di spray opacizzanti o di tecnologie basate sulla proiezione di pattern (Karami et al., 2023; Kim et al., 2024). A valle di specifiche sperimentazioni in ambiente controllato, si è optato per la tecnica della polarizzazione incrociata. L'applicazione di filtri orientati a 90° sulle fonti luminose e sull'obiettivo, congiuntamente all'utilizzo di un piatto rotante e della fotocamera posizionata su treppiede per effettuare scatti a 0°, +30° e -30° (rispetto all'asse z), ha permesso di ridurre al minimo i riflessi speculari (Figura 3).



Figura 3. Allestimento per la turntable photogrammetry a polarizzazione incrociata della statuetta raffigurante Sant'Ambrogio (su disegno di Cosimo Fanzago, XVII secolo). Visibili la fotocamera su treppiede, le luci con i filtri applicati e il piatto rotante. [Fonte: foto degli autori].

I fotogrammi ottenuti, elaborati in *Agisoft Metashape*, hanno generato modelli 3D ad altissima risoluzione. Infine, per ottimizzarne la gestione computazionale, i modelli sono stati semplificati tramite un algoritmo basato sulla salienza dei dettagli (dos Anjos et al., 2023), che ha garantito una decimazione meno aggressiva nelle aree ricche di particolari plastici e più spinta sulle zone piane, preservando intatta l'accuratezza geometrica originale. Ciò ha permesso la definizione di una linea metodologica utile non solo alla corretta digitalizzazione dei manufatti, ma anche alla loro successiva ottimizzazione per l'integrazione in sistemi di fruizione aumentata (Figura 4).

4. Strategie digitali per informare e per ricucire la frammentarietà

Integrando immagini storiche, rilievi e modelli 3D ottimizzati e apparati informativi, sono stati realizzati applicativi interattivi calibrati su differenti livelli di immersività: il *virtual tour SerraVT* (Figura 4), destinato alla fruizione online su scala territoriale, e l'applicazione di realtà aumentata *CARthusian* (Figura 5), concepita per l'esplorazione *in situ*. Per rispondere alla necessità di rendere fruibile a larga scala il patrimonio superstite, superando i vincoli spaziali e temporali della visita fisica, è stato realizzato il progetto *SerraVT*, contenitore digitale multidimensionale, progettato per integrare modelli, fotografie sferiche e informazioni storico-archivistiche. Il *workflow* metodologico per la costruzione del *tour* ha richiesto uno specifico protocollo di acquisizione e post-produzione dei dati. La documentazione degli spazi urbani e architettonici ha integrato in primo luogo riprese da terra e riprese aeree. Per le postazioni terrestri è stata impiegata una fotocamera reflex montata su testa panoramica e per le riprese aeree del contesto urbano e delle piazze interessate, si è fatto ricorso a un drone DJI Air 2S.

Il montaggio dell'esperienza interattiva è stato infine eseguito nell'ambiente software *3DVista Virtual Tour*, importando le mappe panoramiche e i modelli tridimensionali per definire il percorso dell'utente con associate le specifiche informazioni. L'interfaccia così realizzata consente all'utente di muoversi liberamente dalla scala territoriale della mappa alla scala di dettaglio del singolo manufatto.

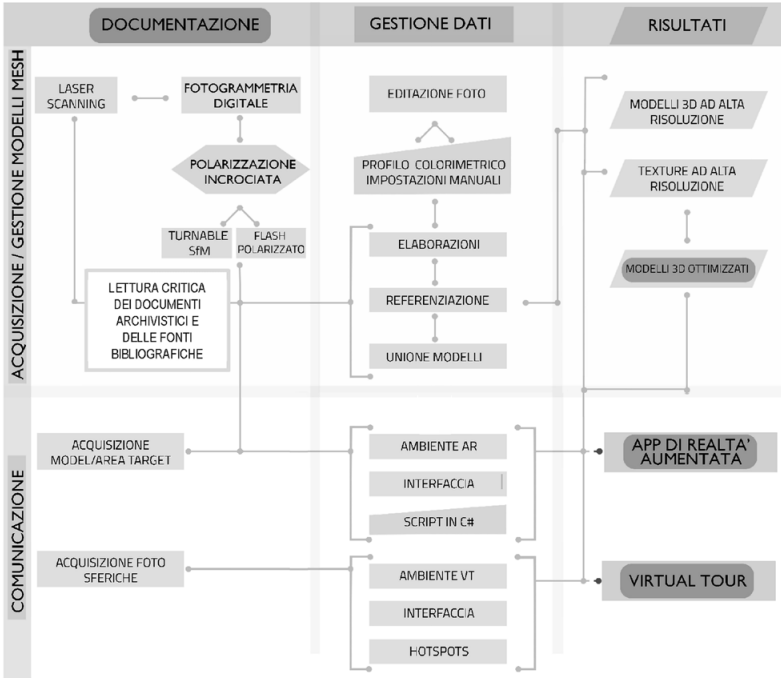


Figura 4. Diagramma di flusso metodologico: dalle fasi di documentazione e acquisizione alla gestione e ottimizzazione dei modelli mesh, fino alle strategie di comunicazione digitale tramite app in realtà aumentata e virtual tour [Fonte: elaborazione degli autori].

Se il *virtual tour* mira alla divulgazione remota, l'applicazione mobile *CARthusian* risponde all'esigenza di una mediazione culturale contestuale e situata per la valorizzazione *in situ*. Sfruttando la realtà aumentata, l'applicazione sovrappone informazioni digitali e modelli tridimensionali allo spazio fisico reale senza risultare invasiva, rispettando in questo modo la natura e le esigenze estetico-liturgiche degli attuali luoghi di conservazione dei manufatti, attualmente privi di apparati museali convenzionali.

Per evitare l'impiego di *marker* visivi, è stata scelta la tecnologia di *Vuforia Area Target*, che consente il riconoscimento spaziale confrontando lo spazio inquadrato dalla fotocamera del dispositivo con una nuvola di punti tridimensionale di riferimento (Azuma, 1997; Bekele et al., 2018).

Tali nuvole sono state acquisite mediante l'uso di uno *scanner laser Leica BLK360* ed esportate verso il *Vuforia Area Target Generator*, al fine di creare un *target* spaziale calibrato e ottimizzato.

L'allestimento della scena digitale e l'integrazione dei contenuti digitali sono stati implementati all'interno del motore grafico *Unity 3D*, allineando spazialmente i modelli alle loro corrispondenti posizioni fisiche. Il sistema di interazione è interamente gestito da *script* personalizzati in linguaggio C#, i quali comandano un sistema di *hotspot* interattivi attivabili mediante il tocco sullo schermo.



Figura 5. Schermate dell'applicazione di esplorazione virtuale *SerraVT*. A sinistra: visualizzazione del modello tridimensionale della facciata della chiesa Matrice, esplorabile dall'utente, con evidenza dei punti informativi (*hotspot*) interattivi. A destra: vista dell'interno dell'edificio religioso [Fonte: elaborazione degli autori].

La narrazione è stata segmentata in tre poli principali, alternando moduli intensivi a pause di transizione per gestire in modo ottimale il carico cognitivo. L'esperienza di visita si apre con una prima tappa di circa 20 minuti all'interno della Chiesa dell'Addolorata arricchito da nove pannelli informativi digitali e modelli tridimensionali. A questo segue un breve tragitto di transizione verso Piazza Amato, che funge da intermezzo narrativo per

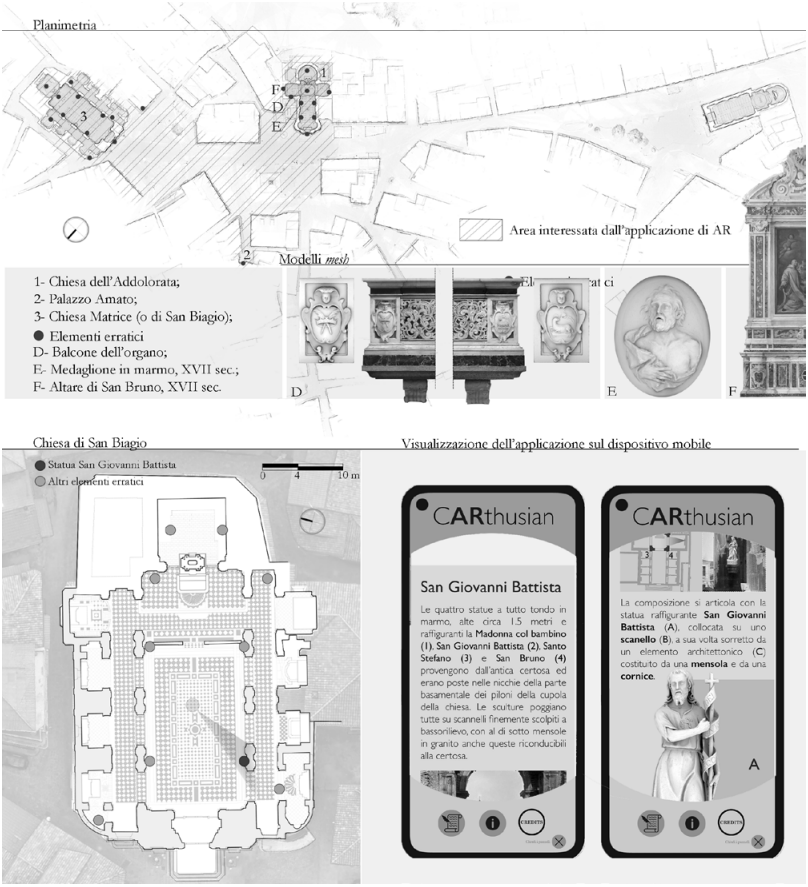


Figura 6. L'applicazione di realtà aumentata *CARthusian*. In alto: inquadramento urbano con la dislocazione degli elementi erratici presso la Chiesa dell'Addolorata (1), palazzo Amato (2) e la Chiesa Matrice (3), affiancata dai modelli mesh 3D di alcuni manufatti significativi (D, E, F). In basso a sinistra: pianta della Chiesa Matrice con la mappatura delle opere. In basso a destra: interfaccia utente dell'applicazione mobile, che mostra i contenuti storico-descrittivi e la fruizione della statua di San Giovanni Battista [Fonte: elaborazione degli autori].

alleggerire la densità informativa ed evitare la cosiddetta *museum fatigue* (Bitgood, 2009; Cheng et al., 2025; Li et al., 2025). Il percorso si conclude nel terzo polo, la Chiesa Matrice, con una permanenza stimata di 15 minuti

dedicata all'esplorazione di ulteriori elementi architettonici e decorativi. Ciò assicura una durata complessiva stimata tra i 40 e i 50 minuti, in linea con i parametri di sostenibilità percettiva evidenziati dalla letteratura di settore.

5. Conclusioni

Le indagini evidenziano come il sisma del 1783 e il conseguente riciclo dei materiali asportati abbiano frammentato la memoria materiale della Certosa; la ricomposizione virtuale tramite rilievo 3D e archivi digitali restituisce coerenza storica, supporta la tutela e la fruizione pubblica e costituisce un modello metodologico replicabile per la conservazione integrata del patrimonio materiale e immateriale.

Riferimenti bibliografici

Azuma, R.T. (1997). A survey of augmented reality, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6*(4), pp. 355-385. https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355

Bekele, M.K., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E.S., & Gain, J. (2018). A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage, 11*, 7:1-7:36. https://doi.org/10.1145/3145534

Bitgood, S. (2009). Museum fatigue: A critical review. *Visitor Studies, 12*(2), 93-111. https://doi.org/10.1080/10645570903203406

Cheng, L., Zhang, Y., Feng, W., Wu, X. e Li, H. (2025). Exploring psychological dimensions of AR in museum education: Motivation and achievement in Wuhan Natural History Museum. *Frontiers in Psychology, 16*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1514117

dos Anjos, R. K., Roberts, B., Allen, J., & Anjyo, K. (2023). Saliency detection for large-scale mesh decimation. *Computers & Graphics, 114*, 63–76. https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.01.012

Gritella, G. (1991). *La Certosa di S. Stefano del Bosco a Serra San Bruno. Documenti per la storia di un eremo di origine normanna*. Savigliano (Cuneo): L'artistica Savigliano.

Karami, A., Mahdavifar, A., & Ramezani, S. (2023). Challenges of NeRF-based reconstruction for cultural heritage objects. *Journal of Imaging, 9*(3), 115.

Kim, H., Jang, M., & Lee, D. (2024). Structured light scanning for reflective surfaces using polarization and phase-shifting. *Sensors, 24*(2), 321.

Li, Q., Chen, Z., Wu, T., Shen, C., Yang, Y. e Zhao, X. (2025). Exploring the effects of narrative augmented reality in cultural heritage: A study on emotional arousal, intrinsic motivation, cognitive load, and learning. *International Journal of Human–Computer Interaction*, *42*(1), 16-26. https://doi.org/10.1080/10447318.2025.2504185

Panarello, M. (2010). *La scultura della tarda maniera nella Certosa di Serra San Bruno. In Artisti della tarda maniera nel viceregno di Napoli. Mastri scultori, marmorari e architetti*. Soveria Mannelli: Rubettino.

Pisani, D. (2021). Elementi scultorei e architettonici provenienti dall'antica certosa di Santo Stefano del Bosco custoditi a Serra San Bruno. In *Esperide*, 27/28.

Facciate prefabbricate in pannelli di calcestruzzo. Strategie di riqualificazione

Prefabricated concrete panel façades. Renovation strategies

Francesco Spada*

Assegnista di ricerca, Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Italy.
francesco.spada@unical.it

Laura Greco

Professoressa associata, Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Italy.
laura.greco@unical.it

Abstract: the built heritage of the second half of the twentieth century characterized by prefabricated components or systems – often combined with parts made on site – requires retrofitting measures to upgrade its original technological features to contemporary standards. In such cases, renovation methods raise new questions about the destiny of the original prefabricated components. Indeed, it is necessary to investigate procedures for disassembly, recycling and/or reuse, and replacement. These conditions cannot be framed within a single, universal approach: they are closely influenced by the specific characteristics of individual buildings, which often reflect an experimental approach to design, thus they differ case by case. The research presented in this paper refers to studies on Italian construction techniques in the second half of the twentieth century, aimed at defining recovery and upgrading strategies for the built heritage grounded in in-depth knowledge, thereby ensuring greater compatibility of the proposed solutions. Specifically, this study highlights two approaches for upgrading façades made with prefabricated cement-based panels, considering their application to two schools built by Borini Costruzioni in the 1970s. The company occupies a prominent position in the Italian construction history of the second half of the twentieth century, due to its extensive use of reinforced concrete techniques combined with industrialized processes, which today constitute an architectural and technological legacy requiring systematic upgrading.

Keywords: prefabrication, school buildings, retrofitting, Italy, Borini costruzioni.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introduzione

La questione della reinterpretazione dell'ambiente costruito si declina attraverso diversi punti di vista, a partire dalla sfera sociologica fino alla scala minuta del componente edilizio. Si tratta di un ampio dominio, che comprende diversi settori tipologici, tra cui quello delle costruzioni prefabbricate, che sono oggi custodi di memoria e significati collettivi, indipendentemente dagli esiti architettonici. Questo studio si concentra sugli involucri a matrice cementizia, che necessitano di una reinterpretazione strettamente connessa alle esigenze contemporanee di risparmio energetico, seppur ponendo un problema di bilancio tra necessità di adeguamento e mantenimento della traccia storica. Infatti, se da un lato sono oramai consolidate le tecniche per l'aggiornamento degli involucri tradizionali di matrice laterizia (valga per tutti il caso del cappotto termico), diversa è la questione degli involucri realizzati con componenti prodotti industrialmente. Rientrano in questo secondo macrogruppo almeno due categorie: quella riferita alle tecniche costruttive leggere e quella – meno indagata, approfondita in questo paper – connessa agli schemi cementizi, in cui l'applicabilità dei principi di smontabilità e riciclo/riuso dei componenti presenta maggiori incognite.

2. Stato dell'arte

L'attenzione sul tema della reinterpretazione dell'involucro prefabbricato deriva dalla condizione per cui l'utilizzo di componenti industriali per le pareti di tamponamento è stata una delle forme più diffuse di industrializzazione in Italia, anche grazie alla possibilità di impiego in edifici con elementi portanti in calcestruzzo armato realizzati in opera, configurando una sorta di "tradizionale evoluto" (Mornati, 2025, p.212).

L'operazione di sostituzione si è dimostrata di certo compatibile con i procedimenti leggeri. In alternativa, esperienze e ricerche recenti hanno testato:

- soluzioni di *retrofitting* del tipo *custom made*, ovvero azioni di restauro del *curtain wall* con contestuale aggiornamento e implementazione prestazionale dell'elemento tecnico: si veda il caso (2023) degli uffici UNESCO a Parigi (1969) (Patriarche, 2023);

- soluzioni che prevedono lo smontaggio dei componenti leggeri dell'edificio, tra cui il *curtain wall*, e relative strategie di *upcycling*, che propongono un nuovo utilizzo degli elementi disassemblati per scopi diversi da quelli originali: una ricerca recente (2024) ipotizza l'applicazione su un edificio scolastico di Tivoli (1964) (Bologna et al., 2024).

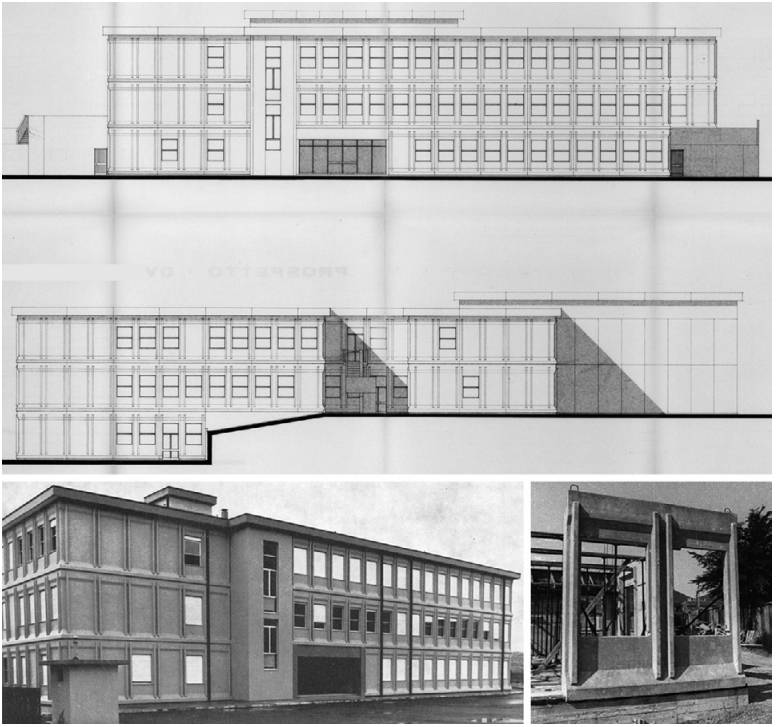


Figura 1. Scuola media a Fabriano: prospetti Nord e Ovest; foto del 1973. [Fonte: ASTO-Borini, f. 3479; f. 1764/7, f. 913].

Il repertorio realizzato negli anni Settanta-Ottanta del Novecento con l'uso parziale/totale di componenti prefabbricati di calcestruzzo, di peso e dimensioni contenuti, stimola la riflessione in merito alle strategie di

intervento sugli involucri realizzati in pannelli sandwich, declinabili in almeno due versioni:

- soluzioni che prevedono il mantenimento degli elementi originali e la contestuale implementazione del sistema parete attraverso l'adduzione di strati;
- soluzioni che prevedono il ripensamento totale dell'involucro, con contestuale sostituzione dei componenti e conseguenti valutazioni sulle modalità di reimpiego o dismissione degli elementi.

Soffermandosi su questi ultimi due approcci, lo studio ne valuta l'applicazione su due edifici realizzati da Borini Costruzioni, desunti dal nutrito portfolio di realizzazioni industrializzate curate dall'impresa.

3. Metodologia

Gli autori hanno in corso uno studio finalizzato a ricostruire parte dell'operato di Borini Costruzioni, utilizzando come fonte il vasto archivio dell'impresa. I primi esiti della ricerca hanno messo in evidenza che Borini ricorre diffusamente a involucri a pannelli prefabbricati nella produzione di edifici scolastici: non si tratta di soluzioni autoriali, bensì identici componenti utilizzati per realizzazioni differenti, offrendo oggi spunti di riflessione in merito ad una reinterpretazione dell'elemento tecnico, contenendo il rischio della perdita del valore storico della costruzione. Ciò pone le premesse per assumere il caso Borini come esperienza campione attraverso la quale indagare il tema della riqualificazione sostenibile degli involucri in questione. Le prime attività svolte in questo ambito, e presentate in questo paper, hanno mirato a sviluppare l'esame delle possibili alternative di intervento e/o smaltimento degli elementi.

Le categorie individuate allo stato sono due, ovvero facciate composte di pannelli aventi funzione: a) portante; b) tamponamento. Gli obiettivi di riqualificazione considerati riguardano l'upgrade energetico, rispetto al quale si stanno valutando le possibili azioni e i conseguenti effetti in termini di riuso/riciclo dei componenti prefabbricati.



Figura 2. Scuola media a Fabriano: montaggio dei pannelli di facciata, 1973 [Fonte: ASTO-Borini, f. 913].

4. Note sui sistemi costruttivi di Borini

L'impresa Borini adotta per la prima volta la prefabbricazione nel 1963, acquisendo la licenza d'uso del brevetto francese *Barets* (Mele, 2025). Nel 1966 mette a punto un proprio sistema, il Borini 1 (MLLPP, 1966), che anticipa l'ulteriore Borini 2. Il primo è un sistema a pareti portanti prefabbricate in calcestruzzo armato; il secondo adotta un telaio in calcestruzzo armato, gettato in opera o a pilastri e travi prefabbricati. Entrambi i sistemi si combinano con facciate in pannelli, nelle varianti "portati, portanti, autoportanti" (Greco e Spada, 2025, p. 40). Il sistema Borini 2 nasce per l'edilizia scolastica (UBologna, 1977, pp. 354-356), proponendo una combinazione tra prefabbricazione e industrializzazione dei getti di calcestruzzo armato (Greco e Spada, 2025, pp. 43-47). In virtù della serialità che contraddistingue il Borini 2, le due scuole oggetto di approfondimento in questo studio rappresentano un campione significativo di un più ampio numero di edifici prodotti.

Nel 1973 Borini, in risposta ad un appalto concorso, progetta e realizza una scuola media di 15 aule a Fabriano, Ancona (Figura 1). Si tratta di un edificio di circa 4000 m², realizzato col sistema Borini 2 (Figura 2): al telaio strutturale sono abbinati pannelli di facciata prefabbricati in versione portante (Figura 3), prodotti all'interno del cantiere mediante le attrezzature di cui Borini è dotato.[1]

Nel 1979 Borini, ancora in risposta ad un appalto concorso al quale partecipano anche CO.IM.PRE e FEAL, progetta e realizza (1980-81) una scuola media di 24 aule a Rivoli, Torino (Figura 4). È composta da 4 corpi di fabbrica, anche in questo caso risolta col sistema Borini 2, adottando pilastri e travi prefabbricati in calcestruzzo armato abbinati a pannelli di facciata, anch'essi prefabbricati, del tipo non portante (Figura 5).[2]

Entrambi gli edifici sono in uso (2026) e mantengono la funzione scolastica.

[1] Archivio di Stato di Torino, Fondo Borini Costruzioni S.p.A. (d'ora in poi ASTO-Borini), serie "Pratiche cemento armato 1956-1983", faldone 913; serie "Contratti", faldone 3479.

[2] ASTO-Borini, s. "Pratiche cemento armato 1956-1983", f. 971-973; s. "Contratti", f. 3528; s. "Cantieri", f. 2927-2932.

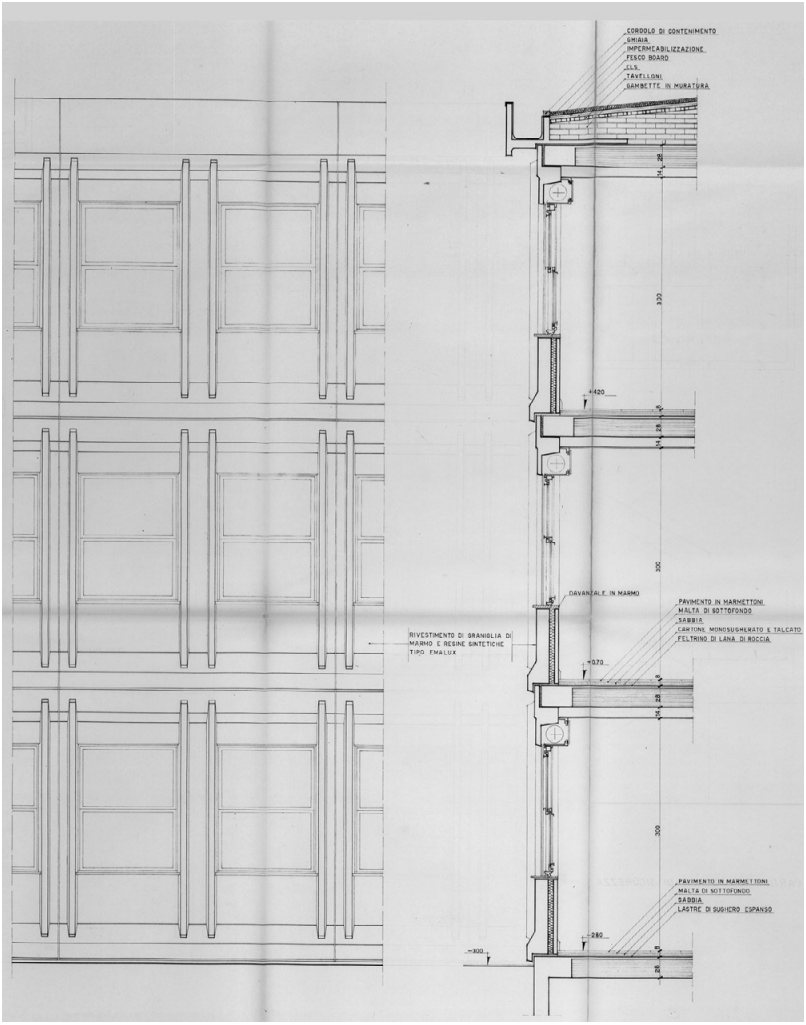


Figura 3. Scuola media a Fabriano: particolare costruttivo dei pannelli di facciata. [Fonte: ASTO-Borini, f. 3479].

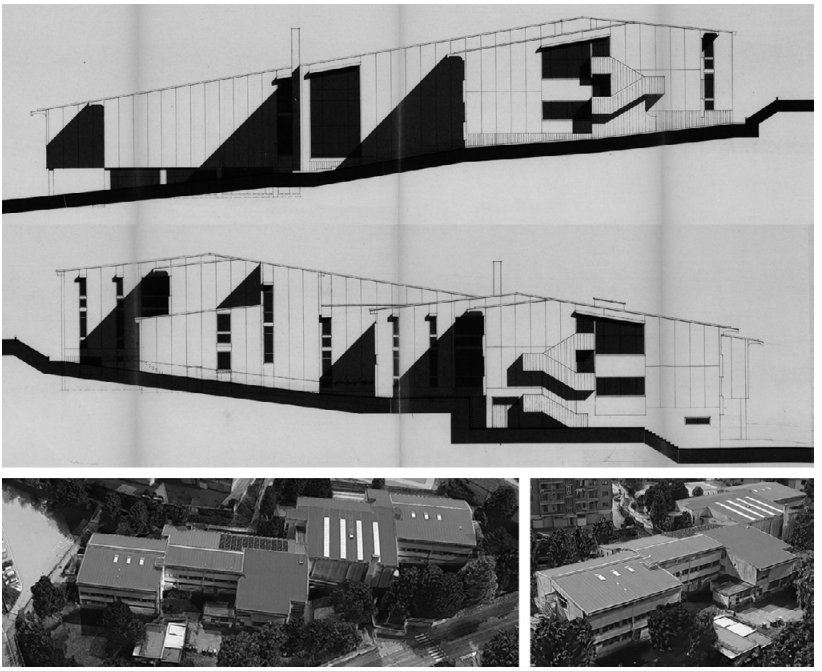


Figura 4. Scuola media a Rivoli: prospetti Ovest ed Est; foto satellitari Google, 2026. [Fonte: ASTO-Borini, f. 971].

5. Proposte di adeguamento e sostituzione dell'involucro

La natura seriale della produzione di Borini per la scuola consente di delineare, oggi, strategie di ripensamento dell'involucro applicabili a gruppi di realizzazioni accomunate dalla medesima soluzione costruttiva per la facciata.

Nel caso di pannelli portanti, l'ipotesi di uno smontaggio comporterebbe difficoltà statiche in fase provvisionale e necessità di una nuova concezione strutturale dell'edificio. A supporto della documentazione tecnica, le fotografie del cantiere della scuola di Fabriano mostrano che il montaggio dei pannelli di facciata è funzionale alla realizzazione dell'impalcato superiore (Figura 2; Figura 3), attestando la difficoltà – oggi – di un eventuale smontaggio. In riferimento alla necessità di efficientamento energetico,

studi condotti dagli autori sull'edilizia prefabbricata propongono un approccio volto ad evitare l'applicazione del cappotto termico esterno, sfruttando la presenza di una intercapedine (Spada et al., 2025): ciò tollera le difficoltà di risoluzione dei ponti termici che notoriamente caratterizzano le soluzioni di isolamento attraverso le intercapedini, ma che d'altro lato supera le complicazioni di applicazione del cappotto termico in casi di particolare articolazione geometrica dei pannelli, come quelli della scuola di Fabriano, dotati di costole di irrigidimento (Figura 1).

Nel caso di facciata a pannelli non portanti, la sostituzione è un'opzione attraverso la quale è possibile pervenire a profonde trasformazioni dell'edificio, incidendo anche sulla percezione sociale del patrimonio. La scuola di Rivoli attesta, infatti, l'immagine – non positiva – della costruzione prefabbricata nello scenario collettivo che, in questo come in molti altri casi italiani, è adottata per la realizzazione di un edificio nella periferia della città (Figura 4). Ancor più, l'ipotesi della sostituzione consentirebbe di elevare sensibilmente le prestazioni dell'involucro, senza i condizionamenti derivanti dal mantenimento di componenti preesistenti: potrebbero facilmente risolversi i ponti termici in corrispondenza dei serramenti, operando un completo ripensamento dei vani per le finestre, ovvero andando oltre la mera sostituzione condizionata dall'impossibilità di modifica dei controtelai che – come noto – nelle soluzioni prefabbricate sono legati alla produzione dei pannelli, con conseguente difficoltà di aggiornamento. Lo smontaggio dell'involucro faciliterebbe anche eventuali azioni di adeguamento sismico dell'edificio. Ancora, l'eventuale adozione di un nuovo involucro leggero, in luogo di quello pesante in calcestruzzo, potrebbe costituire una scelta potenzialmente vantaggiosa in termini di risposta sismica e – se montato a secco – faciliterebbe la dismissione/smontaggio dei *layer* a fine vita. Un approccio di questo tipo sarebbe perseguibile sull'edificio di Rivoli, la cui natura seriale consentirebbe di mantenere la memoria storica della costruzione: interventi volti a preservare i pannelli di facciata si riserverebbero infatti su edifici che nel tempo hanno mutato la destinazione d'uso, ovvero sui quali può venir meno la necessità di implementazione, non derogabile per quegli edifici che ancora mantengono la funzione scolastica.

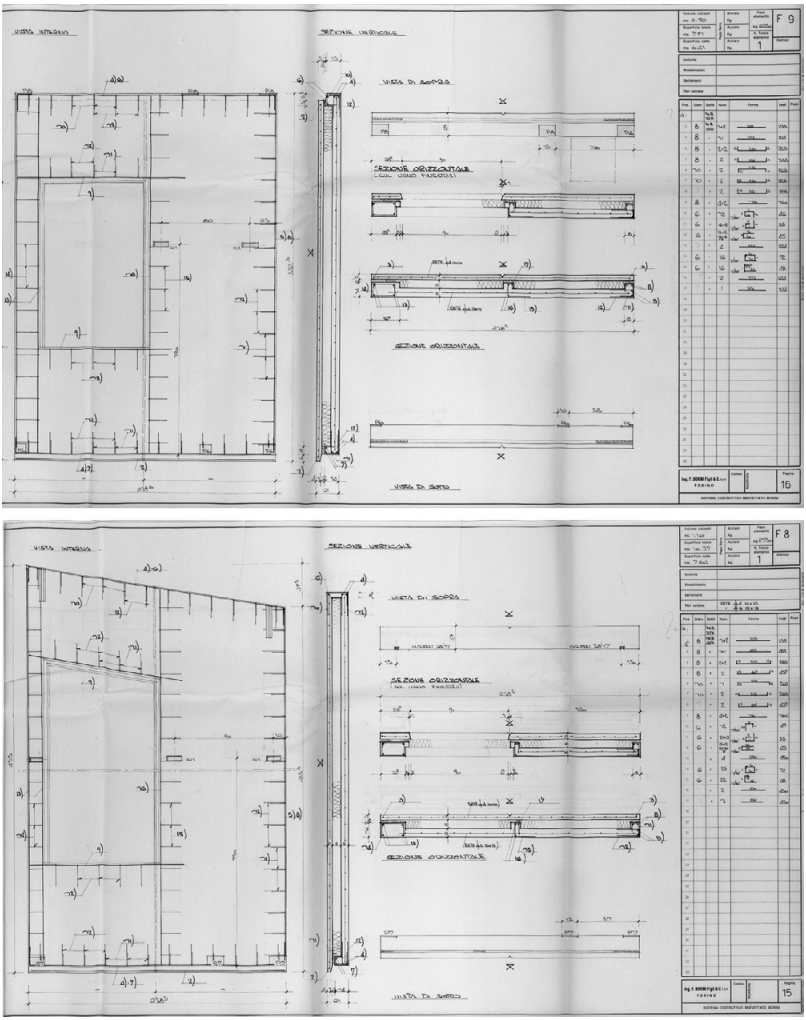


Figura 5. Scuola media a Rivoli: estratto abaco pannelli di facciata [Fonte: ASTO-Borini, f. 973].

6. Risultati e conclusioni

Questo studio, a partire dal caso dell'impresa Borini, propone un indirizzo metodologico che distingue due soluzioni per adeguare/ripensare porzioni di patrimonio industrializzato. Assumendo due realizzazioni, si ragiona sulla condizione per cui – a dispetto della natura seriale della costruzione – non è perseguibile una strategia univoca di riqualificazione, ma va ricercata un'opzione da calibrare in funzione delle specifiche declinazioni del sistema costruttivo.

Altre ricerche affrontano il tema del riuso dei componenti prefabbricati in calcestruzzo armato: un caso studio di decostruzione applicata ad un edificio degli anni Sessanta, finalizzata al riutilizzo dei moduli abitativi ovvero ad evitare la frantumazione del materiale (*down-cycling*), ha messo in luce le elevate risorse necessarie – in termini economici ed energetici – che rendono poco conveniente il processo (Zatta, 2021, pp. 189-191). Preso atto della letteratura disponibile e delle ricerche già condotte dagli autori sul tema (Spada et al., 2025), gli studi in corso sul caso Borini – per le realizzazioni che evidenziano la natura portante dei pannelli di facciata – suggeriscono quindi una strategia di aggiornamento dell'involucro attraverso implementazione degli strati dell'elemento parete, soluzione in ogni caso vantaggiosa in termini di mancata produzione di rifiuti.

L'opzione di sostituzione dei pannelli – riferibile alle realizzazioni di Borini che evidenziano la natura non portante della facciata – offre risultati più performanti, ma merita una riflessione sul destino dei componenti rimossi. La letteratura evidenzia casi di successo di *upcycling* per grandi componenti in calcestruzzo armato prefabbricato, quale la trasformazione in passerella pedonale di una grande trave recuperata da un edificio industriale (Zatta, 2021, p. 251). Tuttavia, l'eterogeneità materica dei pannelli di facciata – data la natura "a sandwich" – suggerisce un'operazione distruttiva finalizzata alla separazione della materia pesante (calcestruzzo) da quella leggera (isolante); si ritiene infatti non applicabile l'opzione del *reuse*, trattandosi di componenti in grado di combinarsi solo con un sistema di tipo "proprietario". Si configura quindi un doppio binario: il *recycling*, adatto nell'ipotesi in cui voglia riutilizzarsi il calcestruzzo per la creazione di nuovi componenti, tenendo conto che la produzione di nuovi elementi prefabbricati in calcestruzzo impone una percentuale di materia recuperata

[Zatta, 2021, p. 131]; il *down-cycling*, che rende il materiale idoneo per nuovi e diversi utilizzi da quello originale, per esempio per la realizzazione di sottofondi stradali dopo aver provveduto alla frantumazione, sfruttandone quindi la natura inerte.

Acknowledgments

Il paper presenta alcuni esiti della ricerca che gli autori stanno conducendo sull'impresa Borini Costruzioni S.p.A., nell'ambito di una convenzione di collaborazione tecnico-scientifica stipulata tra l'Archivio di Stato di Torino (sede di conservazione della documentazione dell'impresa) e il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università della Calabria.

Le immagini sono pubblicate "Su concessione del Ministero della Cultura", come da dichiarazioni di utilizzo inviata all'Archivio di Stato di Torino (Com. N. 2048/2026).

Riferimenti bibliografici

Bologna, A., Garcia-Fuentes, J.M., Giannetti, I., Neri, G. (a cura di) (2024). *Upcycling Architecture in Italy*. Politecnico di Torino. LINK

Bologna, G. (a cura di) (1977). *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*. Roma: AITEC.

Borini, M. (1966). Prefabbricazione e industrializzazione dell'edilizia in Italia. *Cronache Economiche*, 278-279, 51-62.

Greco, L., Spada, F. (2025). *Dalla prefabbricazione d'importazione all'industrializzazione* made in Italy. *Alcune esperienze dell'impresa Borini costruzioni*. Firenze University Press. https://doi.org/10.36253/979-12-215-0737-9

Mele, C. (2025). Prefabrication between tradition and innovation: the first nucleus of Mirafiori Sud in Turin. *TEMA*, *11*(1), 77-86. https://doi.org/10.30682/tema110006

Mornati, S. (a cura di) (2025). *La prefabbricazione leggera nel Lazio. Riflessioni e casi di studio.* Milano: Franco Angeli. LINK

MLLPP, Ministero dei Lavori Pubblici (1966). *Certificato di idoneità delle strutture a pannelli-parete realizzate secondo il Sistema "Borini"*. Roma: MLLPP.

Patriarche (2023). UNESCO. Renovation of an occupied heritage office building. Disponibile da: https://www.patriarche.fr/en/projets/unesco/ (consultato il: 25.01.2026).

Spada, F., Greco, L., Arcuri, N. (2025). Renovation of prefabricated buildings: historical analysis, digital model, energy retrofit. A case study in Calabria, Southern Italy. *VITRUVIO, 10*(1), e23119. https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2025.23119

Zatta, E. (2021). *Reuse design project. Strategie e strumenti per il riuso di elementi edilizi in architettura come preservazione delle risorse materiali*. Dottorato in Architettura Città e Design, Università Iuav di Venezia.

El Análisis de Ciclo de Vida como herramienta estratégica en la rehabilitación del patrimonio edificado

Life Cycle Assessment as a strategic tool in the rehabilitation of built heritage

Pablo Ariel Escudero*

Dr. Arquitecto, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universitat Politècnica de València. Spain. *pabes@upv.es*

Isabela Cristina de Assis Berg

Dra. Arquitecta, Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil. *isabelaberg@ufmg.br*

Abstract: the building sector accounts for a significant proportion of energy consumption and greenhouse gas emissions, placing it at the heart of decarbonisation strategies promoted by the European Union. In this context, Life Cycle Assessment (LCA) has become established as a key methodology for evaluating the environmental impacts of buildings throughout all stages of their life cycle. However, its application has been developed primarily for new buildings, whereas built heritage, and historic buildings in particular, has received less attention from this perspective.

Historic buildings present specific characteristics, such as a long service life, traditional construction systems, and constraints arising from heritage protection, which condition the application of conventional LCA methodologies. At the same time, their conservation allows for the utilisation of the embodied carbon already present in the materials, thereby avoiding emissions associated with demolition and new construction.

This study therefore analyses the potential and limitations of LCA applied to historic buildings, identifying the main methodological challenges and evaluating different intervention scenarios, such as demolition, comprehensive refurbishment, and conservation. The results demonstrate that the rehabilitation of built heritage can represent an important strategy for sustainability and emissions reduction, provided that it is assessed from a full life cycle perspective.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), historic buildings, built heritage, building rehabilitation.

* Autor/a de correspondencia

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introducción

El sector de la construcción es responsable de más del 36% de las emisiones de la Unión Europea (UE). Tiene un papel clave en la crisis climática por su elevado consumo de recursos y la significativa contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, los edificios representan más del 40% del consumo energético de la UE y, a nivel mundial, también contribuyen sustancialmente a la energía consumida y al carbono emitido, tanto en su uso como en la extracción de materias primas, fabricación de materiales y construcción (UNEP, 2025).

En la UE, la descarbonización se articula mediante un conjunto de políticas y normativas. Destacan el Pacto Verde Europeo, presentado en 2019, cuyo objetivo es convertir a la UE en una economía climáticamente neutra para 2050, y la Ley Europea del Clima, que convierte los objetivos climáticos en obligaciones legales y establece como meta la reducción de al menos un 55% de las emisiones para 2030 respecto a los niveles de 1990. Esta normativa fue complementada por el paquete legislativo *Fit for 55*, que adapta y refuerza las políticas climáticas de los Estados miembros y revisa instrumentos existentes como el *EU Emissions Trading System*, un sistema de comercio de emisiones de tipo *cap-and-trade* que establece un precio para el CO_2. En el ámbito específico de la edificación, destaca la *Energy Performance of Buildings Directive*, cuyo objetivo es lograr un parque edificado descarbonizado mediante la renovación del parque existente hasta 2050 y la construcción de edificios nuevos de cero emisiones hasta 2030. (GBCE, 2025).

En este contexto, la evaluación ambiental del entorno construido se ha convertido en una prioridad estratégica, impulsando metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que permite cuantificar impactos y orientar la toma de decisiones sobre materiales, productos y edificaciones. Sin embargo, la transición hacia un modelo constructivo más sostenible no solo depende de la mejora de obra nueva: gran parte del parque edificado actual seguirá en uso, situando a los edificios existentes en el centro del debate ambiental.

Dentro de ese parque edificado, la edificación histórica presenta características singulares: valores arquitectónicos, culturales y sociales, así como una durabilidad frecuentemente excepcional. Desde una perspectiva

ambiental, su conservación es una estrategia de sostenibilidad, al optimizar el uso de recursos ya invertidos y reducir la generación de residuos. No obstante, las intervenciones en estos edificios deben equilibrar criterios energéticos, técnicos y patrimoniales, lo que añade complejidad a su evaluación ambiental.

A pesar del creciente interés por el ACV en edificación, su integración sistemática en patrimonio sigue limitada. Las metodologías tradicionales se desarrollaron para obra nueva y usan bases de datos de materiales contemporáneos, dificultando su adaptación a sistemas tradicionales como fábricas de piedra, morteros de cal o antiguas estructuras de madera. Asimismo, la modelización de intervención, mantenimiento y fin de vida en edificios históricos presenta incertidumbres que no siempre se contemplan en los enfoques convencionales.

En vista de ello, este estudio analiza el potencial y las limitaciones del ACV aplicado a la edificación histórica. Revisa su marco metodológico, examina sus particularidades patrimoniales e identifica desafíos, oportunidades y posibles mejoras, con el objetivo de favorecer la integración de criterios ambientales en la conservación y rehabilitación del patrimonio construido, en línea con los actuales objetivos de sostenibilidad y transición ecológica.

2. El ACV y la edificación histórica

El ACV tiene su marco conceptual y procedimental definido en las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044. En el ámbito de la edificación, permite cuantificar impactos de consumo de recursos, emisiones, generación de residuos y otros indicadores desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida del edificio. La metodología se estructura en cuatro fases principales (Figura 1).

En el sector de la construcción, estas fases suelen organizarse en módulos que incluyen la producción de materiales, el transporte, la construcción, la fase de uso y mantenimiento, y el fin de vida, considerando tanto el impacto operativo como el carbono incorporado.

En la rehabilitación, la aplicación del ACV implica un cambio sustancial de enfoque, dado que el edificio existente constituye el punto de partida y es necesario decidir si se incluyen los impactos ya amortizados. Además,

comparar escenarios de rehabilitación frente a demolición y obra nueva requiere definir con precisión los límites temporales y funcionales, lo que aumenta la complejidad metodológica.

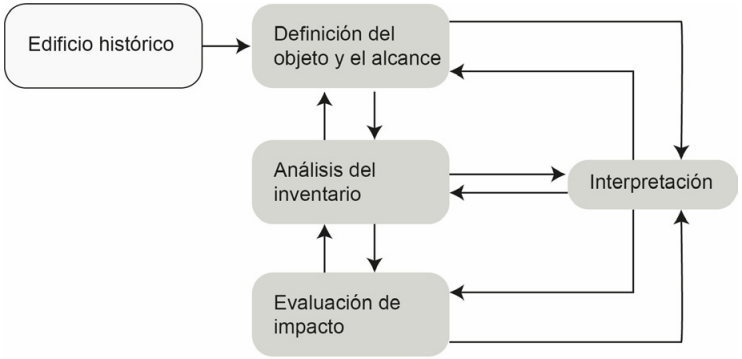


Figura 1. Etapas de un ACV [Fuente: UNE-EN ISO 14040:2006].

Entre las características de la edificación histórica que condicionan significativamente la aplicación del ACV, una de las más relevantes es su prolongada vida útil. Muchos edificios antiguos han superado el siglo de existencia y continúan en uso, lo que cuestiona los horizontes temporales habituales de las evaluaciones ambientales, generalmente entre 50 y 100 años. Esta longevidad distribuye los impactos iniciales de la construcción en períodos más extensos, reduciendo su peso relativo en el cómputo anualizado de emisiones. Además, el carbono incorporado en los materiales ya ha generado impacto ambiental, y la conservación y reutilización del edificio evita emisiones derivadas de la demolición y sustitución, reforzando la argumentación a favor de la rehabilitación frente a la obra nueva.

No obstante, la protección legal de los edificios históricos condiciona las intervenciones posibles. Esta puede impedir modificaciones sustanciales en envolventes, sistemas constructivos o configuraciones espaciales, lo que dificulta la implementación de estrategias de mejora energética habituales en edificios contemporáneos. Así, la optimización ambiental debe equilibrarse con la preservación de los valores patrimoniales.

La presencia de materiales y técnicas constructivas tradicionales introduce desafíos adicionales en la elaboración del inventario de ciclo de vida. Muchos de estos sistemas carecen de bases de datos ambientales específicas o presentan variabilidad significativa según su procedencia y método de ejecución. Su caracterización requiere, en ocasiones, aproximaciones indirectas o hipótesis simplificadoras, lo que puede afectar la precisión de los resultados.

3. Comparación de escenarios de intervención

La aplicación del ACV a las edificaciones históricas no se plantea únicamente como una herramienta de optimización proyectual, sino también como un instrumento de apoyo a la toma de decisiones estratégicas: conservar, intervenir parcialmente o sustituir.

Desde una perspectiva de ciclo de vida, se identifica que la principal ventaja de la conservación radica en el aprovechamiento del carbono incorporado invertido en la construcción original. La permanencia de la estructura portante, los cerramientos y una parte sustancial de los materiales evita la generación de nuevas emisiones asociadas a la producción y transporte de productos constructivos. Asimismo, la rehabilitación suele implicar una menor generación de residuos en comparación con la demolición completa.

Cuando el horizonte temporal del análisis se amplía, la prolongación de la vida útil adquiere un peso determinante. Si un edificio histórico continúa en uso durante varias décadas tras su rehabilitación, el impacto ambiental anualizado puede resultar inferior al de una edificación de nueva planta, incluso si esta última presenta mejores prestaciones energéticas en fase de uso. Por tanto, la evaluación no debe centrarse exclusivamente en la eficiencia operativa, sino en el balance global de emisiones a lo largo del ciclo completo.

No obstante, la aplicación del ACV al patrimonio plantea interrogantes metodológicos relevantes. En cuanto a la consideración de los impactos históricos ya generados –si deben incluirse íntegramente en el análisis o asumirse como cargas ambientales amortizadas–, la respuesta depende del objetivo del estudio. En comparaciones entre escenarios futuros (rehabilitación frente a demolición), suele considerarse únicamente el impacto

asociado a las nuevas intervenciones, manteniendo constante la "herencia ambiental" del edificio existente.

Otro punto crítico es la definición de la unidad funcional. En edificios históricos, cuya configuración espacial y prestaciones pueden diferir de estándares actuales, la comparación con obra nueva requiere establecer criterios equivalentes de uso, superficie útil o nivel de confort. Asimismo, la modelización de la fase de uso presenta incertidumbres, especialmente cuando las restricciones patrimoniales restringen la incorporación de soluciones de alta eficiencia energética.

Para evaluar la idoneidad ambiental de distintas estrategias, el ACV puede estructurarse en escenarios comparativos. De forma general, pueden definirse las siguientes acciones:

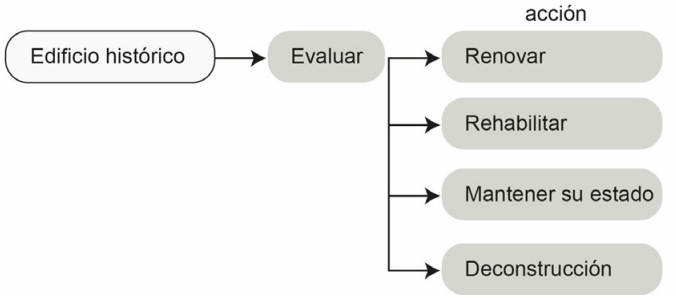


Figura 2. Metodología de decisión para la rehabilitación sostenible en edificaciones históricas [Fuente: UNE-EN 17680:2024].

El análisis comparado de estos escenarios permite identificar el punto de equilibrio entre la reducción de la demanda energética y el aumento de emisiones asociadas a nuevos materiales. En muchos casos, la rehabilitación integral presenta un impacto total inferior al de la demolición y nueva construcción, aunque los resultados dependen de variables como el grado de intervención, la intensidad energética del edificio original y la duración prevista de su uso futuro.

Con ello, se evidencia que la sostenibilidad del patrimonio construido no puede evaluarse únicamente a partir de parámetros energéticos instantáneos, sino que requiere una visión sistémica y temporalmente ampliada. Aplicado con criterios ajustados a la singularidad del edificio histórico, el

ACV se configura como una herramienta capaz de aportar rigor cuantitativo a decisiones tradicionalmente dominadas por consideraciones normativas o culturales.

4. Discusión

La aplicación del ACV a la edificación histórica revela una tensión entre modelos de evaluación ambiental desarrollados para la construcción contemporánea y la realidad material y cultural del patrimonio edificado. Mientras marcos normativos y certificaciones priorizan eficiencia energética en fase de uso, el enfoque de ciclo completo muestra que conservar edificios existentes puede ser una estrategia de mitigación climática de alto valor, especialmente considerando el carbono incorporado.

En este sentido, los resultados derivados de los escenarios comparativos cuestionan la idea de que sustituir un edificio antiguo por obra nueva eficiente sea siempre la opción ambientalmente óptima. Si bien la obra nueva pueda alcanzar menores consumos operativos, la carga inicial asociada a la fabricación de materiales, transporte y ejecución puede superar los beneficios obtenidos durante décadas. Este fenómeno es especialmente relevante en edificios históricos de gran masa constructiva (fábricas de piedra o ladrillo macizo), cuya inercia material implica una elevada energía incorporada que, desde una perspectiva de sostenibilidad, resulta ambientalmente estratégico conservar.

No obstante, tampoco puede afirmarse que toda rehabilitación sea automáticamente más sostenible: las intervenciones con sustituciones estructurales extensivas o la incorporación masiva de materiales de alta intensidad energética pueden reducir significativamente la ventaja ambiental inicial. Además, las restricciones patrimoniales pueden limitar la eficiencia en fase de uso, afectando al balance global. Por ello, cada caso requiere una evaluación individualizada.

Otro aspecto crítico es la adecuación metodológica del ACV al patrimonio edificado. Las herramientas actuales no siempre contemplan de forma precisa la durabilidad de los edificios históricos ni la complejidad de sus sistemas constructivos. Asimismo, la ausencia de bases de datos específicas para materiales históricos introduce incertidumbres que deben ser explícitamente reconocidas en la interpretación de resultados.

5. Conclusiones

Se identifica que el ACV aplicado a la edificación histórica constituye una herramienta pertinente para integrar criterios ambientales en la toma de decisiones sobre posibilidades de intervención. Frente a enfoques centrados solo en eficiencia energética en fase de uso, aporta una visión sistémica que considera la prolongación de la vida útil, el carbono incorporado y la reducción de residuos de demolición.

Los resultados conceptuales derivados del estudio sugieren que la conservación y rehabilitación pueden ser estrategias eficaces de mitigación climática, especialmente cuando se preservan estructura y materiales originales. No obstante, la sostenibilidad depende del alcance y la naturaleza de las intervenciones. Asimismo, las metodologías actuales presentan limitaciones cuando se aplican al patrimonio, evidenciando la necesidad de desarrollar bases de datos específicas y marcos metodológicos adaptados.

Por fin, se entiende que la integración crítica del ACV al ámbito del patrimonio edificado aporta rigor cuantitativo a las decisiones de intervención y ayuda a redefinir la conservación como estrategia alineada con la sostenibilidad y la descarbonización. Futuras investigaciones deberían aplicar estudios de caso comparativos para consolidar criterios de evaluación más precisos y operativos.

Referencias bibliográficas

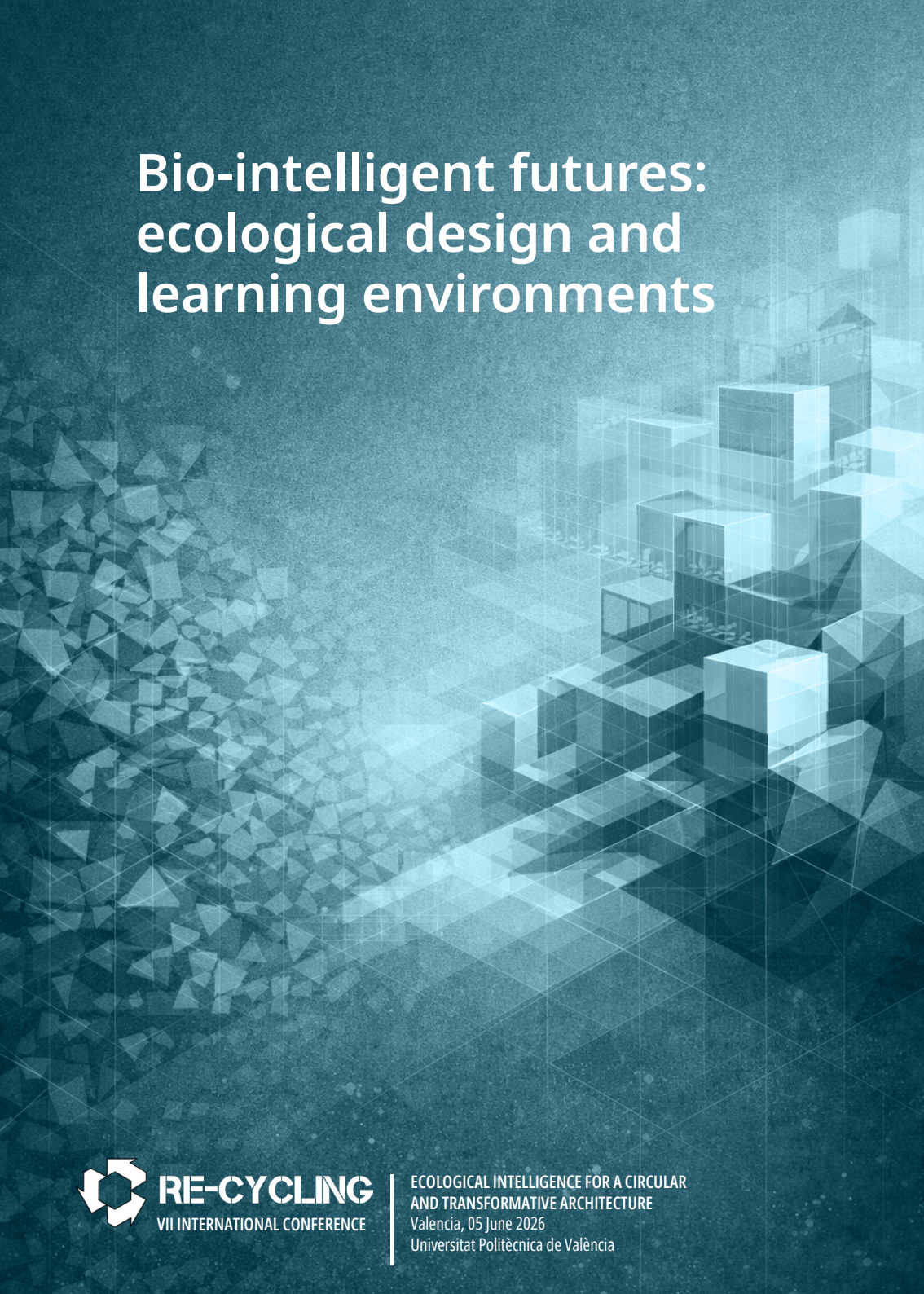
Green Building Council España (GBCE) (2025). *VERDE Edificios 2030. Guía de evaluación.* Publicación (versión 01): diciembre 2025. Madrid: Green Building Council España.

UNE (2006). UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Madrid: Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE (2024). UNE-EN 17680:2024. Conservación del patrimonio cultural. Gestión del conocimiento en la conservación del patrimonio cultural. Madrid: Asociación Española de Normalización (UNE).

United Nations Environment Programme (UNEP) & Global Alliance for Buildings and Construction (2025). *Global status report for buildings and construction 2024–2025: Not just another brick in the wall.* Disponible en: https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction

Bio-intelligent futures: ecological design and learning environments



RE-CYCLING
VII INTERNATIONAL CONFERENCE

ECOLOGICAL INTELLIGENCE FOR A CIRCULAR AND TRANSFORMATIVE ARCHITECTURE
Valencia, 05 June 2026
Universitat Politècnica de València

Inteligencia ecológica y Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la gestión de riesgos hidrometeorológicos para la regeneración del territorio en el Puerto de Veracruz

Ecological intelligence and Geographic Information Systems (GIS) in the management of hydrometeorological risks for the regeneration of the territory in the Port of Veracruz

María del Carmen Ixtepan Turrent

Doctorado en Proyectos, Universidad Americana de Europa, UNADE.
mcixtepanturrent@hotmail.com

Fabiola Colmenero Fonseca *

Dra. Arquitecta, Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM).
Universitat Politècnica de València. España. *fcolfon@upvnet.upv.es*

Juan Francisco Palomino Bernal

Mtro. Arq., Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán.
Departamento de Ciencias de la Tierra, área Arquitectura. *juan.pb@cdguzman.tecnm.mx*

Ángela Sánchez Aldana

Mra. Arquitecta, Instituto Universitario de Tecnología de Materiales.
Universitat Politècnica de València. *asanald@doctor.upv.es*

Ramiro Rodríguez Pérez

Mtro. Arq., Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán.
Departamento de Ciencias de la Tierra, área Arquitectura. *ramiro.rp@cdguzman.tecnm.mx*

Abstract: urban pressure on interdune lagoon ecosystems in Veracruz, Mexico, has increased hydrometeorological vulnerability due to ecological fragmentation and the loss of natural water regulation functions. This study implements an integrated framework based on ecological intelligence, Geographic Information Systems (GIS), artificial intelligence (AI), and participatory governance for risk management and territorial regeneration in coastal lagoon systems.

Ecological intelligence is operationalized through the integration of ecological indicators, including biodiversity, water quality, hydrological regulation capacity, and ecosystem services within a GIS environment, embedded into spatial analysis and machine learning-based predictive modeling. Using climatic, hydrological, urban,

* Autor/a de correspondencia

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

and environmental open data, risk maps and vulnerability indices were developed to identify critical intervention areas.
The results show that the explicit integration of ecological indicators into GIS and AI models improves risk identification accuracy, supports nature-based solutions prioritization, and enhances participatory decision-making processes. This approach demonstrates the practical implementation of ecological intelligence in territorial planning, contributing to replicable resilient regeneration models for vulnerable coastal ecosystems.

Keywords: ecological intelligence, GIS, hydrometeorological risk, interdune lagoons, coastal ecosystems, territorial regeneration.

1. Introducción

En el estado de Veracruz (México), la rápida urbanización ha transformado el paisaje natural e incrementado la vulnerabilidad a inundaciones debido a la pérdida de ecosistemas reguladores del agua (Zúñiga *et al.*, 2020). Los sistemas lagunares interdunarios desempeñan un papel clave en la regulación hidrológica, la biodiversidad y la mitigación de riesgos, pero han sido fragmentados por la expansión urbana, reduciendo su capacidad de drenaje natural y resiliencia territorial (Moreno-Casasola *et al.*, 2024; Ixtepan Turrent *et al.*, 2025). En este contexto, la vulnerabilidad hidrometeorológica resulta de la interacción entre urbanización, degradación ecológica y debilidad en la gobernanza territorial, lo que evidencia la necesidad de enfoques integrales de planificación ambiental.

En respuesta a este problema, el presente estudio implementa un enfoque integrado que articula inteligencia ecológica, Sistemas de Información Geográfica (SIG), modelación predictiva e instrumentos de gobernanza participativa. La inteligencia ecológica se incorpora de manera operativa mediante indicadores ecológicos integrados en análisis espacial y modelos de aprendizaje automático, permitiendo evaluar, mapear y priorizar riesgos hidrometeorológicos en las lagunas interdunarias de Veracruz. A partir de esta integración, se desarrollan estrategias de planificación resiliente orientadas tanto a la restauración de ecosistemas costeros como a la reducción de la vulnerabilidad frente a eventos extremos.

2. Marco teórico / Antecedentes

2.1 Inteligencia ecológica y arquitectura del territorio

La inteligencia ecológica en arquitectura y urbanismo se aborda como un enfoque aplicado para integrar criterios ambientales en la planificación territorial. En este estudio, se operacionaliza mediante indicadores ecológicos biodiversidad, calidad del agua, capacidad de regulación hidrológica y servicios ecosistémicos incorporados en Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis espacial con inteligencia artificial (IA) y procesos de gobernanza participativa. Esta integración permite evaluar y orientar la regeneración de las lagunas interdunarias de Veracruz y fortalecer la gestión de riesgos hidrometeorológicos desde una perspectiva territorial.

2.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos abiertos

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten integrar datos hidrológicos, urbanos y ambientales para mapear zonas vulnerables y apoyar la gestión de riesgos hidrometeorológicos. El SIG participativo (PGIS) incorpora el conocimiento local en la planificación territorial, mientras que la integración de datos abiertos, sensores remotos e inteligencia artificial (IA) facilita el desarrollo de modelos predictivos y el análisis espacial de eventos extremos, fortaleciendo la toma de decisiones (Nwogu *et al.*, 2025; Peters *et al.*, 2009; Sharma *et al.*, 2023; Liu & Mostafavi, 2025).

2.3 Gestión de riesgos hidrometeorológicos y gobernanza colaborativa

La gestión de riesgos hidrometeorológicos requiere enfoques de gobernanza colaborativa que integren instituciones, comunidades y plataformas participativas para fortalecer la resiliencia territorial en ecosistemas costeros vulnerables (Ro & Garfin, 2024; Mahardhika & Pamungkas, 2024). En este estudio, este enfoque se integra dentro de un modelo que articula inteligencia ecológica, SIG e inteligencia artificial, permitiendo vincular el análisis de vulnerabilidad, la cartografía de riesgo y la participación ciudadana en la definición de estrategias de regeneración territorial.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El estudio se centra en el Sistema de Lagunas Interdunarias de Veracruz, México, compuesto por 18 lagunas someras entre dunas costeras (140,6 ha) con alto valor ecológico y funciones de regulación hídrica y biodiversidad. El análisis integra datos climáticos, hidrológicos, urbanos y satelitales, incluyendo registros meteorológicos, uso de suelo de INEGI, imágenes Sentinel y estudios de calidad del agua y biodiversidad (RSIS-RAMSAR, 2005; Álvarez *et al.*, 2022; Lithgow *et al.*, 2023).

3.1.1 Operacionalización de la inteligencia ecológica

La inteligencia ecológica se operacionalizó mediante la integración de indicadores ecológicos dentro del SIG y el análisis espacial basado en IA. Los indicadores clave incluían biodiversidad, calidad del agua, capacidad de regulación hidrológica y servicios ecosistémicos, que se incorporaron en los procesos de evaluación de riesgos y modelado predictivo para apoyar la toma de decisiones espaciales y la gestión ambiental.

3.2 Marco metodológico

La metodología integra SIG, inteligencia artificial y gobernanza participativa para la gestión de riesgos hidrometeorológicos en las lagunas interdunarias de Veracruz, mediante mapas de riesgo, modelos predictivos, índices de vulnerabilidad y una plataforma colaborativa que apoya la planificación regenerativa y la toma de decisiones (ver Figura 1).

La Figura 1 ilustra la integración operativa de la inteligencia ecológica dentro del marco basado en SIG e IA, mostrando cómo los indicadores ecológicos, el análisis espacial y la gobernanza participativa interactúan para producir estrategias de regeneración territorial y soluciones de gestión de riesgos hidrometeorológicos.

4. Resultados

Los resultados corresponden a la implementación aplicada del modelo integrador de inteligencia ecológica, SIG e inteligencia artificial en el sistema de lagunas interdunarias de Veracruz, a partir del procesamiento de datos climáticos, hidrológicos, urbanos y ecológicos.

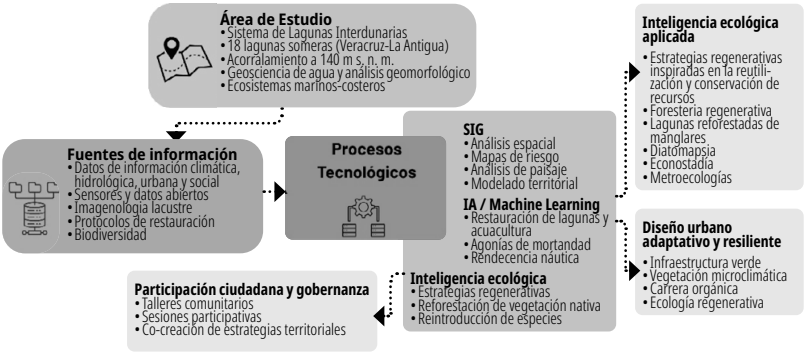


Figura 1. Marco metodológico integrado basado en SIG, Inteligencia Artificial e inteligencia ecológica aplicada para el análisis y la gestión sostenible de sistemas de lagunas interdunarias con participación ciudadana. [Fuente: elaboración propia].

La aplicación del modelo generó mapas de riesgo hidrometeorológico de alta resolución, en los que se integran variables hidrológicas, urbanas, ecológicas y socioambientales, permitiendo la identificación precisa de zonas vulnerables. La combinación de SIG, datos abiertos, inteligencia artificial y aprendizaje automático mejoró la precisión del análisis espacial, mientras que la incorporación de PGIS incrementó la legitimidad social y la aplicabilidad de los resultados en la planificación territorial y la gestión del riesgo (Liu & Mostafavi, 2025; Sharma *et al.*, 2023; Auma Odero *et al.*, 2022; Peters *et al.*, 2009).

El análisis de vulnerabilidad identificó áreas críticas de intervención y regeneración, priorizando zonas con alta exposición a inundaciones y deterioro ecosistémico mediante índices compuestos que integran variables ecológicas, sociales y físicas (ver Figura 3) (Álvarez et al., 2022; Lithgow *et al.*, 2023).

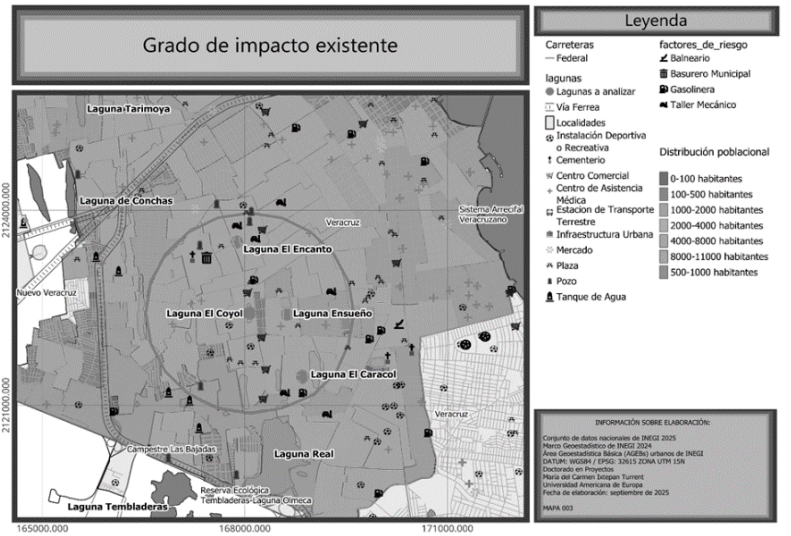


Figura 2. Grado de impacto existente en las lagunas encontradas en el mapeo. [Fuente: elaboración propia].

A partir de los resultados obtenidos, se definieron estrategias de diseño y gestión territorial regenerativa basadas en infraestructura verde, restauración de humedales y soluciones hidráulicas híbridas, orientadas a la reducción del riesgo hidrometeorológico y al fortalecimiento de los servicios ecosistémicos y la resiliencia urbana (ver Figura 4).

Asimismo, la integración de actores institucionales, organizaciones sociales y comunidades locales se implementó mediante procesos participativos, incluyendo plataformas colaborativas y talleres, lo que permitió el codiseño de estrategias de gestión del riesgo y fortaleció la gobernanza territorial inclusiva (ver Figura 5) (Lin, 2025; Mahardhika & Pamungkas, 2024; Ro & Garfin, 2024).

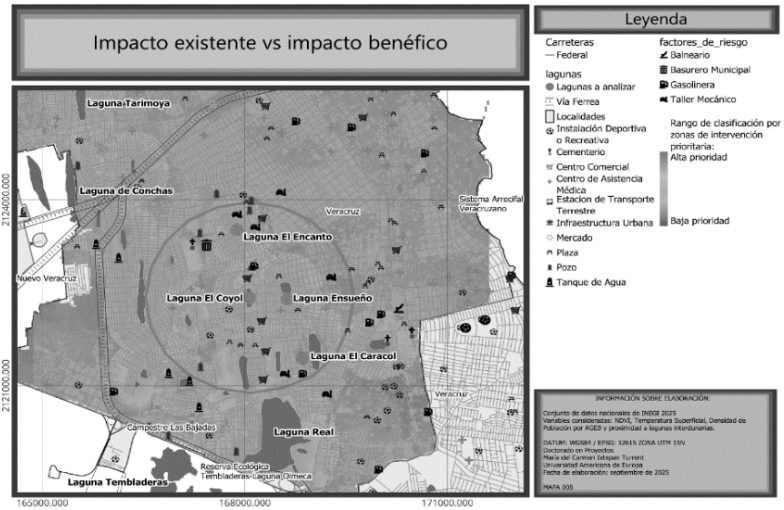


Figura 3. Análisis del Mapeo: Grado de Impacto Existente vs Impacto Benéfico encontrado para áreas críticas de intervención. [Fuente: elaboración propia].

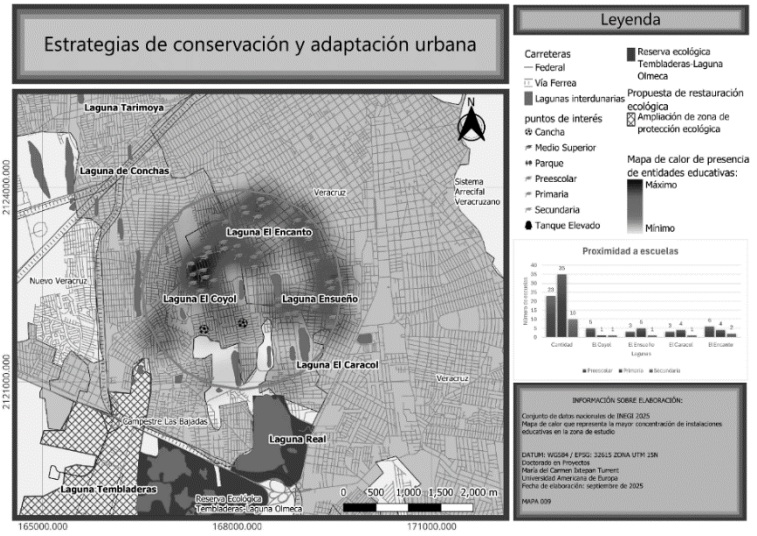


Figura 4. Estrategias de conservación y adaptación urbana creadas para la intervención basada en datos. [Fuente: elaboración propia].

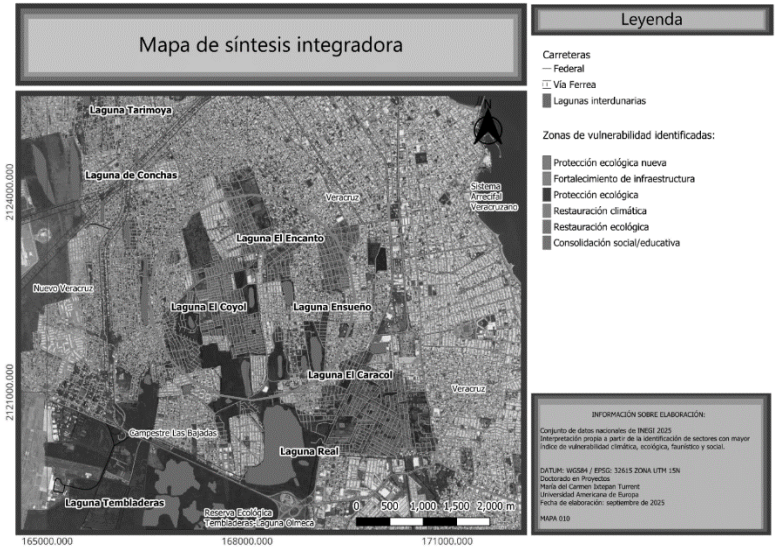


Figura 5. Mapa de áreas a contemplar e intervenir en función de actores sociales. [Fuente: elaboración propia].

Estos resultados demuestran la aplicación operativa del modelo propuesto, integrando tecnología, inteligencia ecológica y participación ciudadana para fortalecer la conservación de ecosistemas, la seguridad hídrica y la sostenibilidad urbana frente a la vulnerabilidad climática.

5.Discusión

El marco de inteligencia ecológica integrado con SIG, inteligencia artificial y gobernanza participativa demuestra su aplicabilidad para la gestión de riesgos hidrometeorológicos y la regeneración territorial en las lagunas interdunarias de Veracruz. El modelo generó mapas de riesgo, evaluó vulnerabilidades e identificó áreas críticas mediante la integración de variables hidrológicas, urbanas y ecológicas, incorporando estrategias como restauración de humedales e infraestructura verde y fortaleciendo la participación comunitaria. No obstante, su implementación depende de la disponibilidad de datos, la validación empírica y mecanismos efectivos de comunicación social, consolidándose como

un marco replicable alineado con soluciones basadas en la naturaleza y enfoques de planificación adaptativa.

6. Conclusiones

El enfoque integrador que combina inteligencia ecológica, Sistemas de Información Geográfica (SIG), inteligencia artificial y gobernanza participativa demostró su aplicabilidad como marco metodológico para la gestión de riesgos hidrometeorológicos y la regeneración de territorios urbanos vulnerables, como las lagunas interdunarias de Veracruz.

Su implementación permitió identificar zonas críticas de riesgo, definir estrategias de intervención basadas en infraestructura verde y restauración ecológica, y fortalecer la resiliencia urbana mediante la integración de análisis espacial, modelación predictiva y participación ciudadana. La incorporación operativa de indicadores ecológicos dentro del sistema SIG evidenció mejoras en la toma de decisiones territoriales y en la priorización de soluciones basadas en la naturaleza.

Estos resultados confirman la viabilidad y replicabilidad del modelo para la planificación territorial resiliente en contextos costeros vulnerables. Como línea futura, se plantea la validación ampliada del modelo en distintos contextos y la profundización en la evaluación de la participación comunitaria y la integración de soluciones basadas en la naturaleza.

Agradecimientos

Esta publicación fue financiada por la Convocatoria Postdoctoral Becas en el extranjero 2025, conforme a la Resolución del 17 de diciembre de 2025, en el marco del proyecto nº 15057008, titulado "Integración de energías renovables y tecnologías avanzadas para la reducción de la pobreza energética en comunidades rurales de México"." Los autores reconocen el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México.

Referencias

Álvarez, M. V., Muñiz, J. L. M., & Hernández, D. (2022). Indicador de la calidad del agua, caso de estudio: Laguna Olmeca, Veracruz, México. *Emerging Trends in Education*, 122–132. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9493686

Auma Odero, N., Mahiri, I., & Obiero, K. (2022). Participatory Geographic Information System (PGIS) Mapping; an Integrated Flood Management Tool in the Flood-Prone Areas of Lower Kano Plains, Kisumu County, Kenya. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 25–38. https://doi.org/10.9734/jgeesi/2022/v26i230336

Dede, M., Widiawaty, M. A., Pramulatsih, G. P., Ismail, A., Ati, A., & Murtianto, H. (2019). Integration of participatory mapping, crowdsourcing, and geographic information systems in flood disaster management (case study CILEDUG LOR, CIREBON). *Journal of Information Technology and Its Utilization*, *2*(2), 44. https://doi.org/10.30818/jitu.2.2.2555

Ixtepan Turrent, M. del C., Colmenero Fonseca, F., Gómez Ponce, C. A., Cárcel-Carrasco, J., & Rodríguez Pérez, R. (2025). *Conservation of Fragmented Ecosystems in Urban Environments: Sustainability Indicators and Strategies to Mitigate Biodiversity Loss*. https://doi.org/10.20944/preprints202501.1871.v1

Lin, C. A. (2025). Participatory Flood Risk Management and Environmental Sustainability: The Role of Communication Engagement, Severity Beliefs, Mitigation Barriers, and Social Efficacy. *Sustainability*, *17*(7), 2844. https://doi.org/10.3390/su17072844

Liu, C., & Mostafavi, A. (2025). FloodGenome: interpretable machine learning for decoding features shaping property flood risk predisposition in cities. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, *5*(1), 015018. https://doi.org/10.1088/2634-4505/adb800

Mahardhika, G. R., & Pamungkas, A. (2024). A Systematic Review of Participatory Approaches in Flood Risk Management: Methods and Applications. *Jurnal Penataan Ruang*, *19*, 37–46. https://journal.its.ac.id/index.php/jpr/article/view/4137

Moreno-Casasola, P., López Rosas, H., Alberto Peralta, L., Vázquez-González, C., & Monroy, R. (2024). Socio-environmental Value of Coastal Urban Wetlands in Veracruz, Mexico. *Wetland Science and Practice*, *42*(1). https://doi.org/10.1672/UCRT083-611

Nwogu, N., Victoria, M. F., Salman, H., & Oyetunji, A. K. (2025). Integrating GIS into Flood Risk Management: A Global South Perspective on Resilience, Planning, and Policy. *Water*, *17*(21), 3149. https://doi.org/10.3390/w17213149

Peters, G., Cees Van Westen, & McCall, M. (2009, February 7). Coping Strategies and Manageability: How Participatory GIS with People can transform Local Knowledge into better Policies for Disaster Risk Management. *World Conference of Humanitarian Studies, Groningen*. https://ftp.itc.nl/pub/westen/PDF_files/2009_G%20Peters%20PGIS_Coping%20Strategies%20and%20Manageability_panel40_%202009.pdf

PlanVeracruzanodeDesarrollo-2030,Pub.L.No.folio0791,PlanVeracruzano de Desarrollo 2025-2030 (2025). https://invivienda.gob.mx/Portals/0/2025/FRACCI%C3%93N%20I/Hiperv%C3%ADnculos%202do%20trimestre/PLAN%20VERACRUZANO%20DE%20DESARROLLO%202025-2030.pdf

Ro, B., & Garfin, G. (2024). Participatory Risk Governance for Seoul, South Korea's Flood Risk Management. *International Journal of Disaster Risk Science*, *15*(3), 317–331. https://doi.org/10.1007/s13753-024-00552-y

RSIS-RAMSAR. (2005). *Servicio de Información sobre Sitios Ramsar*. Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz. https://rsis.ramsar.org/es/ris/1450?__goaway_challenge=meta-refresh&__goaway_id=a10eafee1b7f500a398d7d2203120698&__goaway_referer=https%3A%2F%2Fwww.inecol.mx%2F

Sharma, S., Raj Ghimire, G., & Siddique, R. (2023). Machine learning for postprocessing ensemble streamflow forecasts. *Journal of Hydroinformatics*, *25*(1), 126–139. https://doi.org/10.2166/hydro.2022.114

Syeed, M. M. A., Farzana, M., Namir, I., Ishrar, I., Nushra, M. H., & Rahman, T. (2022). Flood Prediction Using Machine Learning Models. *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/HORA55278.2022.9800023

Zúñiga, E., Magaña, V., & Piña, V. (2020). Effect of Urban Development in Risk of Floods in Veracruz, Mexico. *Geosciences*, *10*(10), 402. https://doi.org/10.3390/geosciences10100402

Decoding Venice: An Erasmus laboratory for ecological intelligence in architecture

Maria Antonia Barucco*

Prof.ssa associate CEAR-08/C progettazione tecnologica e ambientale dell'architettura, Università Iuav di Venezia, Dipartimento di culture del progetto, Italy. *barucco@iuav.it*

Bensu Berk

PhD student, Università Iuav di Venezia, Italy. *bberk@iuav.it*

Abstract: this paper examines the 'Decoding Venice. Learning through Intelligences', Erasmus+ Intensive Program, organized by IUAV University of Venice & Technical University of Cluj in September 2025, as a laboratory for ecological intelligence principles in the context of the call for circular and transformative architecture. Responding to a worldview that redefines the built environment as a living resource, requiring intentional, regenerative approaches above linear deconstruction and demolition, the program used Venice as a major case study. The intervention positioned the historic city and the 2025 Architecture Biennale as active sites for transnational knowledge exchange between Italian and Romanian academic institutions. Through a structured three-day exploration of the Arsenale and Giardini, participants engaged in interdisciplinary synthesis, bridging perspectives from architectural history, environmental monitoring, material science, and socio-cultural analysis. The core assignment, a poster or digital presentation addressing the prompt, "What intelligences do we propose for the Venice of tomorrow?" framed participants as authors of future layers of the city's built intelligence. Analysis reveals a concrete translation of theoretical circularity into educational practice. Key findings demonstrate how immersion facilitated contextual reading, exploring the relationship between locals and tourists; international knowledge sharing, bridging environmental, historical, and socio-cultural data; and a proactive stance, fostering speculation on predictive maintenance, adaptive reuse, and regenerative design. The program concluded that such an immersive, site-specific laboratory is essential for instilling the deep literacy required for ecological intelligence, moving beyond technical instruction towards cultivating a mindset that views existing structures as repositories of embodied knowledge and cultural memory.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Corresponding author

Keywords: ecological intelligence, circular architecture, transnational dialogue, immersive learning, Erasmus+ program.

1. Introduction

Architecture has long operated as a mediator between environmental constraint and human aspiration. Yet the accelerating climate crisis has fundamentally altered this mediation. As articulated in the 2025 Architecture Biennale, the discipline can no longer rely solely on mitigation strategies focused on energy reduction and technical optimization. Instead, adaptation emerges as a central paradigm, demanding that architecture rethink its relationship with a world already transformed.

The Biennale's curatorial framework, '*Intelligens.Natural.Artificial.Collective*', expands the notion of intelligence beyond digital systems, framing it as a distributed capacity embedded in ecological systems, technological tools, and collective social processes. Within this expanded framework, Venice itself becomes more than a historical setting. It operates as a living organism shaped by centuries of negotiation between water, material, culture, and maintenance practices.

The European Green Deal, introduced in 2019, frames climate neutrality by 2050 not only as a regulatory objective but as a structural transformation of how Europe understands production, construction, and resource cycles. Despite global crises and geopolitical instability, commitment to circularity and decarbonization has remained central, indicating that sustainability has evolved from a political agenda into a shared cultural imperative. Deadlines may shift, yet the need to rethink extraction, waste, and material life cycles persists.

In this context, the notion of antifragility provides a valuable lens. Rather than merely resisting shocks, antifragile systems adapt and grow through disturbance. Applied to architecture, this perspective reframes crisis as a driver of innovation, encouraging adaptive reuse, maintenance, and regenerative strategies. Education must therefore cultivate this adaptive capacity, preparing future architects to operate within uncertainty and to interpret existing built environments as resources for circular transformation

rather than as objects of replacement. '*Decoding Venice. Learning through intelligences.*' can be understood as a pedagogical translation of these theoretical premises. The city and the Biennale are positioned not as passive objects of study, but as active systems to decode, interpret, and extend. This paper situates the program within the broader discourse of ecological intelligence and adaptive architectural culture, arguing that immersive educational laboratories are essential for cultivating circular and regenerative thinking in future practitioners.

2. Tracing Ecological Intelligence and Architectural Adaptation in Venice

Today, the discipline of architecture needs a radical paradigm shift, moving beyond simply designing energy-efficient buildings amidst the global ecological crisis; it must view the built environment not as a problem, but as a living resource to be reinterpreted. In this context, the concept of recycling emerges as a form of ecological intelligence that transcends a linear production-consumption logic, recognizing the value of what already exists and seeing it as a carrier of collective memory.

Carlo Ratti, who outlined the curatorial framework of the Biennale, emphasizes that architecture's response to this crisis cannot be limited to mitigation alone, but must involve a radical adaptation process. This adaptation process is shaped around the concept of '*Intelli/Gens*', offering a vision that listens to the intelligence of the Earth, using silicon circuits as tools to return to nature and origins with a new awareness. The future will not emerge from the hands of a single genius architect, but from an interdisciplinary and participatory network where natural, artificial, and collective intelligences come together. The city of Venice is positioned at the center of this quest as a living lab, a perfect model of complexity and an example of layered intelligence, where each construction technique and maintenance practice reflects the balance between environment, material, and culture. The proposed diagrammatic approach offers a way of reading the city that goes beyond computational efficiency, emphasizing a qualitative understanding of its complex and dynamic nature. In this perspective, the city of the future is not simply "smart," but truly intelligent, capable of managing resources responsibly, organizing mobility effectively, and adapting

services to citizens' needs, while placing people at the center through a strong focus on inclusion, rights, and social justice.

3. Decoding Venice. Learning through intelligences

Decoding Venice is an international mobility program, a collaboration between IUAV Venice University and Cluj Technical University (UTCN), running from September 20-25, 2025. This program aims to critically examine the 2025 Venice Architecture Biennale, defining the city as a space of intelligence in action. Arguing that architecture must move beyond a mere mitigation strategy focused on reducing carbon emissions in the face of the climate crisis, this initiative rediscovers its historical capacity for adaptation.

Building on Vittoria's thought, architecture can treat air, water, light, and sound as active materials, expanding construction to the scale of the environment. In doing so, it unites traditional know-how with future-oriented buildability, grounding innovation in ecological and temporal continuity.

The program invites students to read Venice as a 'Living Lab.' The program's central focus is to build a bridge between Venice's past construction intelligence and its future layers. As noted in the sources, Venice is an example of layered intelligence, in which every construction technique and maintenance practice reflects a delicate balance among the environment, materials, and culture. The primary task required of students is to 'decode' this historical and spatial heritage through digital and sensor-based data, socio-urban data, time-dependent deterioration and maintenance data, and environmental and water-related data, etc., and to transform this data into new strategies for the Venice of tomorrow.

The learning process consists of a three-stage journey that combines theoretical discussions with practical field experiences. In the first stage, students examine contemporary architectural experiments in the biennale's main exhibition at the Arsenale; then they observe countries' international visions for the future at the Giardini; and finally, they focus on Venice itself (the IUAV Pavilion) as a case study. In this process, students are expected to recognize, interpret, and activate the material, environmental, social, and construction-oriented *intelligences* that emerge in architectural design in their own projects. (Figure 1).

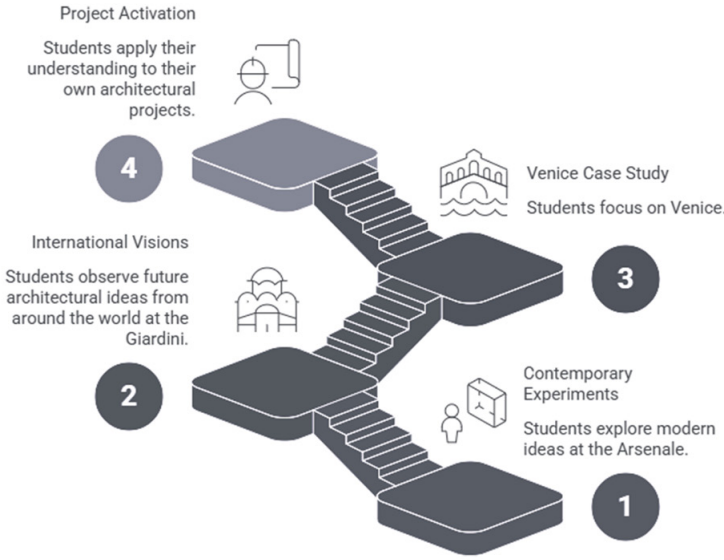


Figure 1. Schematic representation of the program stages. [Source: authors].

The tangible outcome of the program is a 9-slide presentation (Figures 2-3), prepared individually or in groups, that starts from a problem observed in the city and presents a solution strategy. This work is a holistic approach that explains which types of intelligence (natural, artificial, or collective) design activates. The program concludes with a final online critique session where all participants come together; this session functions as a platform for sharing knowledge and constructing a social reflection, aligning with the concept of "Agora."

As Elena Granata emphasizes, there is a quality that is increasingly being neglected in today's education system: an architect is also someone who knows how to explore, look in different directions, change courses when necessary, and keep curiosity alive throughout the process. However, only those who adopt this perspective in the early stages of their architectural journey can truly reach the capacity to transform the cities of the future. This program has enabled students to take a step in this direction.

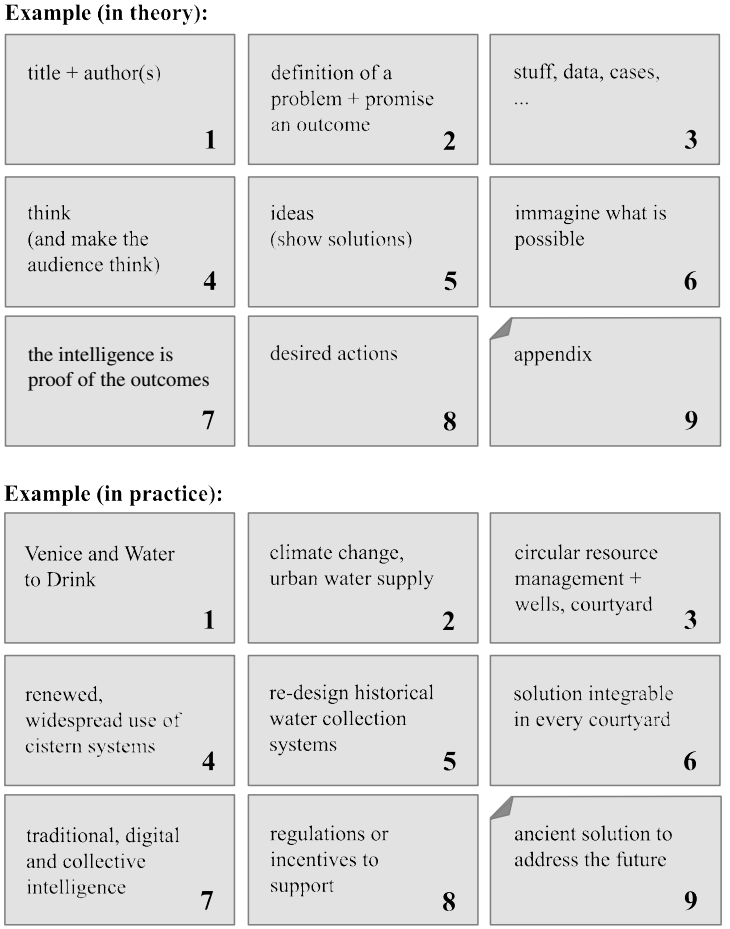


Figure 2-3. Showing the expected information and format in the final presentation. [Source: authors].

4. Results

A total of 30 students (20 from UTCN and 10 from IUAV), organized into 11 groups, produced 11 projects (Table 1), providing a comparable base for analyzing different approaches to ecological intelligence. The analysis

of the projects reveals a clear differentiation in approach: approximately 65–70% of the projects, mainly developed by UTCN students, addressed macro-scale urban issues such as tourism pressure, urban experience, and city-wide dynamics, while around 30–35%, primarily IUAV students, focused on micro-scale and site-specific interventions related to material systems, water interaction, and the application of ecological intelligence within the Biennale context. This difference can be interpreted as a result of varying levels of familiarity with the city, where local knowledge enabled more precise, small-scale interventions, while first-time exposure encouraged broader, systemic readings. The UTCN students, experiencing Venice as first-time visitors, demonstrated a wider observational range, identifying large-scale dynamics and urban imbalances that may become less visible through familiarity. In approximately half of the projects developed by UTCN students, over-tourism and population pressure were identified as primary risks, positioning social and spatial saturation as key challenges for the city's future. In contrast, IUAV students tended to operate at a finer resolution, focusing on maintenance, material adaptation, and environmental interfaces, suggesting a more embedded and continuous relationship with the urban context. (Table 2) To address these differences in projects, encouraging visiting and host students to work in mixed groups could be an option in future implementations.

The results suggest that ecological intelligence is best cultivated through immersive, site-specific experiences that merge analytical observation with speculative projection. (Figures 4-5-6).

5. Conclusion and future possibilities

The Decoding Venice program demonstrates an experiment of how architectural education can embody the principles of ecological intelligence and circular transformation. By situating learning within a historically layered and environmentally vulnerable city, and by aligning pedagogical structure with the adaptive ethos of the 2025 Architecture Biennale, the initiative moves sustainability discourse from abstraction to practice. In this context, Biennale is not just a single focus; it's an opportunity to meet people from all over the world, grow together, and enhance our design capabilities. In preparing the architects of the future, it provides them with an international

knowledge-sharing environment and equips them with an advanced thinking system that enables them to bring together different disciplines. It is a context in which creativity, knowledge, and diverse cultures converge to shape a sustainable development strategy rooted in a deep awareness of the value of reconnecting with the origins of the communities we belong to. It is precisely through this awareness that we are able today to conceive and develop projects of such breadth and complexity.

For the implementation of this project in the coming years, IUAV and the city of Venice are always open to new collaborations and interactions with universities around the world: becoming a campus-city is a process strongly linked to the opportunity and the capacity to dialogue and embrace different sensibilities and points of view.

Table 1. Number of participants. [source: authors].

University	Number of participating students	Number of participating docents
IUAV	4	1 professor and 2 assistants
UTCN	7	1 professor and 1 assistant

Table 2. Names and focus topics of students' final projects. [Source: authors].

Group number and university	Title of final project	Focus thema
1 - IUAV	Future 'Barena'	Ecology & Materials
2 - UTCN	Venice as a tourist attraction city	City & Tourism
3 - IUAV	Building with seashells	Ecology & Materials
4 - UTCN	Floating Gardens	Landscape & Environment
5 - IUAV	Pollution in Venice	Landscape & Environment
6 - UTCN	Calle'	City & Tourism
7 - UTCN	A green oasis	Landscape & Environment
8 - UTCN	Deconstruction Venice	City & Tourism
9 - IUAV	The unseen resources	Ecology & Materials
10 - UTCN	Venice and over-tourism	City & Tourism
11 - UTCN	A new guide to Venice	City & Tourism



Figure 4. Student's final work [Source: authors].

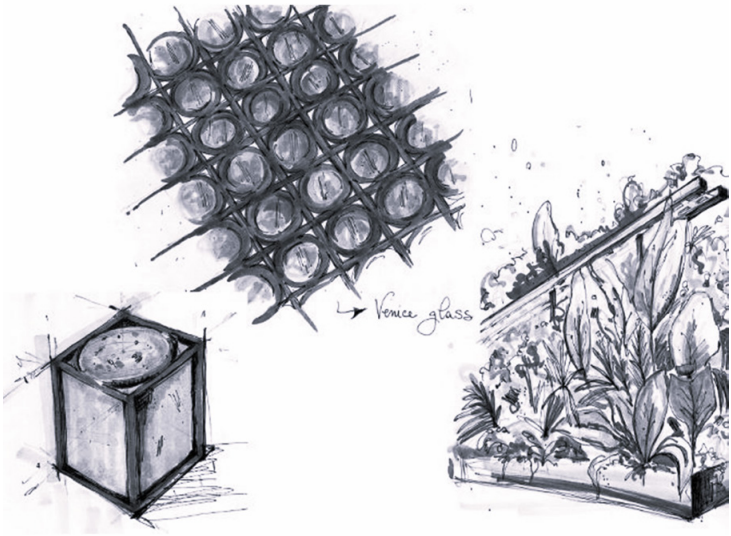


Figure 5. Student's final work [Source: authors].



Figure 6. Student's final work [Source: authors].

Bibliographic references

Barucco, M. A. (2025). Cultures of Glass. Heritage-Based Innovation and Sustainability in Education, in Ciplak L. E., Ozkan Ozturk H. N., Yesilbag D., Tunger C. (eds.), Beyond all Limits 2025. 3rd International Conference on Sustainability in Architecture, Planning, and Design, pp. 870–878.

Barucco, M. A., Cinquepalmi, F. (2025). *Futura Venezia. Un digital twin per tornare alle origini*. Quaderni Iuav Ricerche.ISBN 979-12-5953-150-6

Granata, E. (2021). Placemaker: Gli inventori dei luoghi che abiteremo. Torino: Einaudi.

Magarò, A., Marchi, M. (2025). The Intelligences of the Architect. *OFFICINA* Journal, 49, *Intelligens*.

Ratti, C. (ed.) (2025). Biennale Architettura 2025: Intelligens. Natural. Artificial. Collective. *Catalogo della 19. Mostra Internazionale di Architettura*. Milano: Silvana Editoriale.

Ratti, C., Claudel, M. (2016). *The city of tomorrow*. London: Yale University Press.

Taleb, N. N. (2012). *Antifragile: Things that Gain from Disorder*. Regno Unito: Penguin Books Limited.

Vittoria, E. (1988). Le tecnologie devianti dell'architettura, in Fabbri M. e Pastore D. (a cura di), *Architetture per il terzo millennio. Una seconda rivoluzione urbana?*, Roma: Fondazione Adriano Olivetti.

Metodología e inteligencia ecológica aplicada a la vivienda de interés social en Guanajuato con GIS, BIM y ACV

Methodology and ecological intelligence applied to social housing in Guanajuato with GIS, BIM, and LCA

Fabiola Colmenero Fonseca *

Dra. Arquitecta, Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València. España. fcolfon@upvnet.upv.es

Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas. Unidad Norte. Universidad Autónoma de Coahuila. Nueva Rosita, Coahuila, México. *fcolmenero@uadec.edu.mx*

Ángela Sánchez Aldana

Mtra. Arquitecta, Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politècnica de València. España. *asanald@doctor.upv.es*

Juan Francisco Palomino Bernal

Mtro. Arquitecto. Instituto Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán. Departamento de Arquitectura de Ciencias de la Tierra. Zapotlán el Grande, Jalisco, México. *juan.pb@cdguzman.tecnm.mx*

Ramiro Rodríguez Pérez

Mtro. Arquitecto. Instituto Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán. Departamento de Arquitectura de Ciencias de la Tierra. Zapotlán el Grande, Jalisco, México. *ramiro.rp@cdguzman.tecnm.mx*

Javier Cárcel-Carrasco

Dr. Catedrático. Instituto Universitario de Tecnología de Materiales. Universitat Politécnica de València, Valencia, España. *fracarc1@csa.upv.es*

Abstract: in the context of the ecological crisis and the exhaustion of the linear model of extraction, construction, and demolition, architecture faces the challenge of recognizing the built environment, existing materials, and local knowledge as active resources. Despite advances in circular economy regulations, there remains a lack of methodologies that systematically integrate territorial, material, and energy oriented toward reuse. This study proposes a data-driven ecological intelligence methodology applied to sustainable social housing in Guanajuato, Mexico. The research was developed through comprehensive mapping using Geographic Information Systems (GIS), integrating thematic layers of official data and original

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

geospatial analyses within GIS environments and spatial databases such as PostGIS. Climatic, socio-environmental, energy, and material variables were incorporated, together with a Life Cycle Assessment (LCA) applied to local, ancestral, and recycled materials under traceability criteria. The results are synthesized into a cartographic framework that visualizes material traceability, solar potential, and energy priority, identifying areas with high reuse potential. The LCA shows that embodied carbon accounts for 68.96 % of total emissions, compared to 31.04 % from operational carbon, highlighting the importance of material selection in reducing environmental impact. Thermal analysis reveals a higher cooling demand compared to heating, indicating overheating risks associated with building orientation and envelope performance. The integration of GIS and LCA enables the revaluation of the built environment as a circular architectural ecosystem, where sustainable housing articulates climate resilience and ecological intelligence.
This approach contributes to the debate on regenerative architecture by linking territorial, material, and energy data with sustainable design strategies based on local knowledge.

Keywords: reuse of the built environment; geospatial mapping (GIS); material circularity; sustainable housing; local materials.

1. Introducción

1.1 Herramientas digitales para la vivienda social sostenible

La crisis ecológica ha impulsado una transformación de la arquitectura hacia la reutilización, la circularidad y la regeneración del entorno construido, concibiendo edificios y materiales como reservas de recursos con valor energético y cultural (Duran-Navarrete *et al.*, 2024). En este contexto, la inteligencia ecológica plantea una visión sistémica del hábitat construido, integrando decisiones sensibles a factores materiales, energéticos y socioambientales para promover sostenibilidad y circularidad (Fernández Catalina, 2024). Herramientas digitales como GIS, BIM y ACV permiten operacionalizar este enfoque mediante el mapeo territorial, la evaluación de impactos ambientales y la trazabilidad de materiales, optimizando el diseño y reduciendo emisiones, con especial relevancia en vivienda social y contextos vulnerables (González-Vallejo *et al.*, 2025; Zubair *et al.*, 2024).

En México, la ausencia de análisis integrales en vivienda de interés social es atendida por una metodología que combina estas herramientas para optimizar recursos locales, mejorar el confort térmico y reducir carbono, demostrando en Guanajuato un modelo replicable que fortalece la identidad cultural y la calidad de vida (Duran-Navarrete *et al.*, 2024; Fernández Catalina, 2024). Asimismo, la integración de saberes ancestrales y materiales tradicionales, como adobe, piedra volcánica y fibras vegetales, con tecnologías digitales y economía circular promueve la preservación del patrimonio, la resiliencia climática y la dinamización de la economía local, evidenciando la convergencia entre innovación tecnológica y tradición para un desarrollo socioambientalmente significativo.

Este artículo se basa en la investigación doctoral de Colmenero Fonseca (2026). Sin embargo, no constituye una simple síntesis de la tesis, sino que presenta una aplicación y reinterpretación específica del marco metodológico centrado en la vivienda social en Guanajuato. Los resultados aquí mostrados corresponden a un estudio de caso particular y a análisis actualizados desarrollados para esta publicación, con el objetivo de demostrar la replicabilidad y aplicabilidad de la metodología propuesta de inteligencia ecológica en contextos territoriales reales.

En Guanajuato, la vivienda social se caracteriza por sistemas de construcción estandarizados, una alta dependencia de materiales industriales como el hormigón y el ladrillo, y una consideración limitada de las condiciones climáticas locales. Además, la rápida expansión urbana y las limitaciones económicas han provocado una reducción del tamaño de las viviendas y un bajo rendimiento medioambiental, lo que la convierte en un caso de estudio relevante para evaluar estrategias de vivienda sostenible y circular. Este estudio contribuye al campo proponiendo un marco integrado SIG–BIM–LCA.

2. Objetivos del estudio

El estudio propone una metodología que integra GIS, BIM y ACV para planificar y gestionar vivienda social en Guanajuato, México, con beneficios ambientales, económicos y socioculturales. Su objetivo es mostrar cómo la inteligencia ecológica aplicada mejora la sostenibilidad integral, guiando decisiones sobre materiales, ubicación, riesgos climáticos y eficiencia

energética. Los objetivos específicos incluyen mapear recursos y riesgos climáticos, cuantificar la huella de carbono y el desempeño energético de los materiales, y diseñar estrategias de circularidad y resiliencia que incorporen materiales locales y saberes ancestrales, fortaleciendo la identidad cultural y la economía local. La metodología ofrece un modelo replicable para otras regiones con desafíos similares. (Ver Fig. 1).



Figura 1. Integración de herramientas digitales (GIS, BIM y ACV) para la sostenibilidad de la vivienda social en México. [Fuente: Colmenero Fonseca, F. 2026].

3. Materiales y métodos

El análisis SIG se realizó utilizando QGIS y PostGIS, integrando conjuntos de datos geoespaciales de fuentes oficiales como INEGI, CONAGUA y los datos climáticos NASA POWER. El modelado y simulaciones BIM se desarrollaron utilizando Autodesk Revit y DesignBuilder para el análisis de rendimiento energético. La Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) se realizó utilizando la base de datos Ecoinvent y se procesó mediante el software OpenLCA, siguiendo las normas ISO 14040/44. El límite del sistema consideró un enfoque de cuna a tumba, incluyendo las etapas A1–C.

Este estudio emplea un enfoque de inteligencia ecológica basada en datos, integrando GIS, BIM y Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para planificar, diseñar y gestionar vivienda de interés social en Guanajuato, México (ver Fig. 2). La combinación de estas herramientas permite mapear variables territoriales, climáticas, materiales, socioeconómicas y energéticas, cuantificando impactos ambientales y apoyando decisiones de diseño, sostenibilidad y política pública (Berges-Alvarez *et al.*, 2024; Zubair *et al.*, 2024).

3.1 Mapeos

Estos mapeos (de izquierda a derecha, ver Fig. 3) articulan información territorial, climática, material, socioeconómica y energética para apoyar decisiones integrales de diseño y planificación de la vivienda social, optimizando confort, resiliencia, eficiencia energética y circularidad de recursos (Berges-Alvarez *et al.*, 2024; Zubair *et al.*, 2024).

Los cuales incluyen análisis geoespaciales y climáticos (radiación solar, ventilación, microclima, temperatura y humedad) para estrategias pasivas; mapas de riesgo y resiliencia (sismicidad, inundaciones e inestabilidad de suelos) para seguridad y adaptación climática; mapas de recursos y materiales que incorporan materiales reciclados y ancestrales con pasaportes de trazabilidad bajo criterios de economía circular (ISO 14040/44); mapas socioeconómicos y culturales para integrar la dimensión social; mapas de energía y eficiencia para evaluar potencial fotovoltaico y consumo; y mapas digitales de gestión mediante BIM paramétrico con IA y ACV georreferenciado (ver Fig. 4), que mejoran la

precisión y automatización en la gestión de la vivienda (Berges-Alvarez *et al.*, 2024; Zubair *et al.*, 2024).

3.2 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Se aplicó el ACV según las normas ISO 14040/44, evaluando los impactos ambientales desde la extracción de materiales hasta el fin de vida del edificio (TÜV SÜD, 2025). Las fases consideradas fueron:

- Producción de materiales (A1–A3): emisiones de extracción y manufactura.
- Transporte y construcción (A4–A5): impactos del traslado y montaje.
- Uso y mantenimiento (B): emisiones por consumo energético y reparaciones.
- Fin de vida (C): demolición, reciclaje y disposición final.

La integración de ACV con BIM permite automatizar la recolección de datos y mejorar la precisión del cálculo de la huella de carbono, diferenciando el carbono incorporado y el operacional. Los resultados se presentan en Tablas y figuras que destacan la contribución de cada material y fase al impacto ambiental, así como indicadores de intensidad energética y desempeño térmico de la envolvente.

4. Resultados

Los resultados presentan una evaluación integrada de la vivienda social en Guanajuato, considerando la distribución de materiales, el rendimiento energético y la huella de carbono a través de la metodología propuesta de inteligencia ecológica. Se destacan los impactos ambientales y térmicos, así como la eficacia de las estrategias de circularidad y sostenibilidad.

4.1 Distribución espacial de materiales y potencial solar

Los mapas generados mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Modelado de Información de Edificios (BIM) revelan la disponibilidad, trazabilidad y potencial de reutilización de materiales en una vivienda social de 100 m^2 en Guanajuato. La madera actúa como sumidero de carbono,

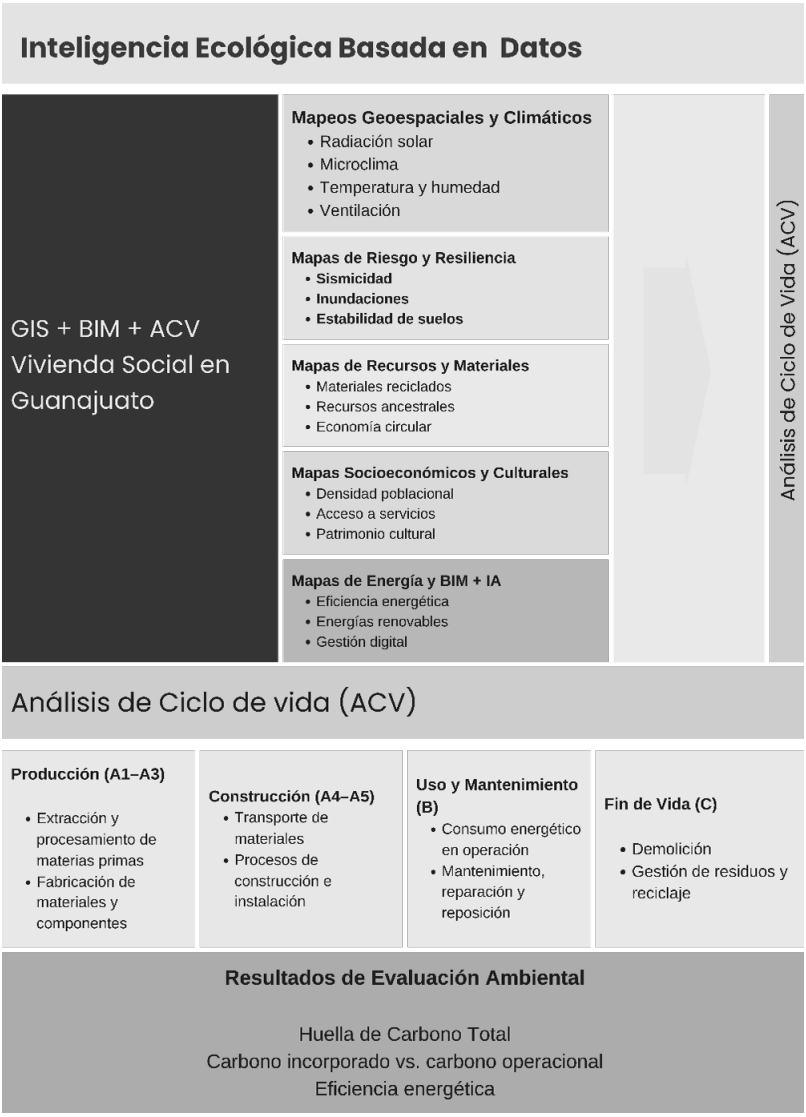


Figura 2. Metodología Integral para la Sostenibilidad de Vivienda Social. GIS, BIM y Análisis de Ciclo de Vida (ACV). [Fuente: Colmenero Fonseca, F. 2026].

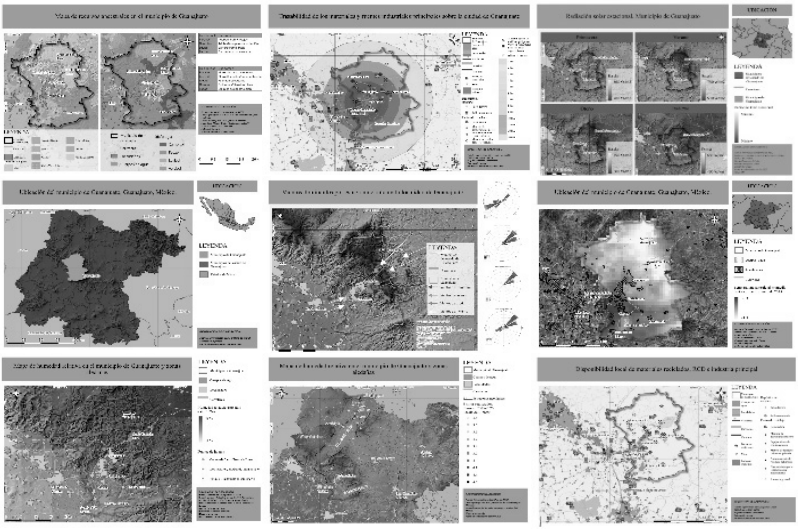


Figura 3. Mapas de Eficiencia Energética, Energías Renovables y Gestión Digital de Vivienda. [Fuente: Colmenero Fonseca, F. 2026].

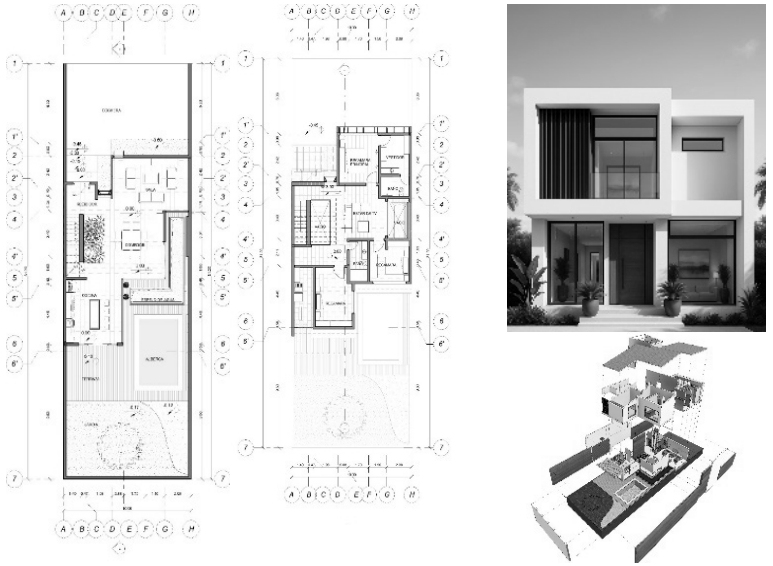


Figura 4. Proyecto arquitectónico de la vivienda social guanajuatense. [Fuente: Colmenero Fonseca, F. 2026].

mientras que el hormigón, el ladrillo y el acero representan la mayoría de las emisiones incorporadas.

El análisis del potencial solar identifica áreas óptimas para sistemas fotovoltaicos y estrategias pasivas de confort térmico, apoyando decisiones de diseño adaptadas al clima.

4.2 Evaluación energética y térmica

Se calculó la intensidad de uso energético (EUI) y la intensidad de carbono usando las fórmulas:

$$\text{EUI} = \frac{\text{Consumo total de energía (kWh)}}{\text{Área útil (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Intensidad de carbono} = \frac{\text{Carbono total (kg } CO_2\text{-eq)}}{\text{Área útil (m}^2\text{)}}$$

- Área del edificio: 107.54 m^2
- EUI: 341.68 kWh/m^2·año
- Intensidad de carbono: 108.56 kg CO_2-eq/m^2

La evaluación térmica muestra mayor demanda de refrigeración (≈2315 W) frente a la calefacción (≈1469 W), destacando la importancia de la orientación, la envolvente y la ventilación pasiva en el diseño.

Resultados

1. Superficie de construcción: 107.54 m^2
2. EUI: 341.68 kWh/m^2·año
3. Intensidad de carbono: 108.56 kg CO_2-eq/m^2

El análisis térmico indica una mayor demanda de refrigeración (≈2315 W) en comparación con la demanda de calefacción (≈1469 W), subrayando la importancia de la orientación, el rendimiento de la envolvente y las estrategias de ventilación pasiva para reducir los riesgos de sobrecalentamiento.

4.3 Impacto medioambiental por escenario: evaluación de la huella de carbono

La huella de carbono total se calculó siguiendo un enfoque de Evaluación del Ciclo de Vida (ACL):

$$E_{total}=E_{A1–A3}+E_{A4–A5}+E_B+E_C$$

donde:

$E_{A1–A3}$: Producción de materiales (extracción y fabricación)
$E_{A4–A5}$: Transporte y construcción
E_B: Uso y mantenimiento
E_C: Etapa final de vida útil

Resultados por etapa del ciclo de vida

Tabla 1. Impacto ambiental de la vivienda social: análisis por escenario de ciclo de vida (ACV). [Fuente: Colmenero Fonseca, F., 2026].

Etapa	Emisiones (kg CO_2-eq)	Proporción (%)
Producción (A1–A3)	4800	81
Transporte/Construcción (A4–A5)	347.5	7
Uso/Mantenimiento (B)	655	11
Fin de Vida (C)	240	4
Total	5942.5	100

Cálculos relevantes

Producción de materiales (A1–A3):

$$E_{A1–A3} = 1.950+1.250+1.850–250=4.800 \text{ kg } CO_2\text{-eq}$$

(La madera reduce las emisiones debido a su capacidad de almacenamiento de carbono.)

Transporte (A4):

$$E_{transport} = \Sigma M \cdot d/100 \cdot FE_{transport}$$

Construcción (A5):

$$E_{construction} = 0.05 \cdot E_{A1–A3} = 240 \text{ kg } CO_2\text{-eq}$$

Mantenimiento (B):

$$E_{maintenance} = 0.10 \cdot E_{A1–A3} = 480$$

$$E_{windows} = 50 \cdot 3.5 = 175$$

$$E_B = 480 + 175 = 655 \text{ kg } CO_2\text{-eq}$$

Carbono incorporado frente a operativo

Fin de vida (C): 240 kg CO_2-eq (considerando bajo reciclaje, Tabla 2).

Tabla 2. Resumen de carbono incorporado vs. operacional. [Fuente: Colmenero Fonseca, F., 2026].

Categoría	Emisiones (kg CO_2-eq)	Proporción (%)
Carbono incorporado (A1–A3)	8,050.29	68.96
Carbono operacional (B6)	3,622.78	31.04
Total	11,673.07	100

Estos resultados indican que la selección de materiales y el diseño del envolvente tienen un mayor impacto en las emisiones totales que el consumo energético operativo.

4.4 Hallazgos y recomendaciones clave

Los resultados destacan lo siguiente:

1. Materiales críticos: el hormigón y el ladrillo dominan las emisiones, mientras que la madera y los materiales reciclados contribuyen a la mitigación.
2. Envolvente y orientación: las estrategias pasivas como la ventilación cruzada y el sombreado reducen significativamente la demanda de refrigeración.

Mejoras propuestas

1. Sustitución parcial del cemento por materiales cementicios suplementarios
2. Mayor uso de acero reciclado y materiales locales de baja energía corporal
3. Optimización logística para reducir las emisiones del transporte
4. Integración de sistemas de energía renovable y estrategias de diseño pasivo
5. Implementación de protocolos de demolición selectiva y bancos de materiales

La metodología propuesta permite la comparación de alternativas de diseño, la optimización del uso de materiales y apoya la toma de decisiones para políticas de vivienda sostenibles.

5. Discusión

El ACV muestra que los materiales constructivos, en particular el hormigón y el ladrillo, concentran la mayor parte de las emisiones de la vivienda social en Guanajuato (≈68.96 %), confirmando que la selección y gestión del ciclo productivo de los materiales es determinante en la huella ambiental, más allá del consumo energético en uso. La incorporación de madera y materiales reciclados evidencia su potencial mitigador, en concordancia con enfoques de economía circular (Colmenero Fonseca, 2026; González-Vallejo *et al.*, 2025).

La integración de GIS y BIM permite una planificación integral al articular variables territoriales, climáticas y materiales con gestión digital y evaluación ambiental, facilitando decisiones orientadas a resiliencia, eficiencia energética y circularidad (Berges-Alvarez *et al.*, 2024; Zubair *et al.*, 2024). En línea con la literatura latinoamericana, los resultados subrayan la necesidad de metodologías integradas y replicables para la vivienda social, así como oportunidades de mejora mediante sustitución de materiales de alta huella, optimización pasiva de la envolvente y programas de reciclaje (Colmenero Fonseca, 2026; Duran-Navarrete *et al.*, 2024; Luque Castillo & Yepes, 2025).

Los hallazgos de este estudio son coherentes con investigaciones previas sobre viviendas sostenibles y estrategias de construcción circular, que destacan el impacto dominante del carbono incorporado en los materiales de construcción (González-Vallejo *et al.*, 2025; Luque Castillo & Yepes, 2025). Marcos similares de integración BIM–LCA han demostrado el potencial para optimizar la selección de materiales y reducir los impactos medioambientales durante las primeras etapas de diseño (Berges-Alvarez *et al.*, 2024; Zubair *et al.*, 2024). Sin embargo, este estudio contribuye incorporando una dimensión geoespacial mediante SIG, permitiendo la identificación de patrones territoriales, disponibilidad de recursos y riesgos climáticos, que a menudo están ausentes en los enfoques convencionales BIM–LCA.

6. Conclusiones

El estudio confirma que la integración de GIS, BIM y Análisis de Ciclo de Vida (ACV) constituye una metodología eficaz para el diseño de vivienda

social sostenible, al permitir la gestión integrada de variables territoriales, climáticas, materiales, energéticas y socioculturales, optimizando la toma de decisiones y reduciendo la huella ambiental. En Guanajuato, esta aproximación promueve nuevas formas de habitar que fortalecen la identidad cultural, priorizan materiales locales y reciclados e incorporan resiliencia climática y economía circular, evidenciando que los materiales constructivos concentran la mayor proporción de emisiones. La metodología es replicable en otras regiones de México y Latinoamérica y ofrece lineamientos para políticas de vivienda sostenible; no obstante, requiere bases de datos locales verificables y futuras investigaciones que integren mediciones de campo, estrategias pasivas avanzadas y deconstrucción selectiva para reforzar su aplicabilidad (Colmenero Fonseca, 2026).

Concerniente al Presupuesto de Edificación del "Proyecto Guanajuato" que se muestra en la Tabla 3 asciende a un total estimado de $555 754.00 MXN, e integra seis partidas principales como se muestra a continuación:

Tabla 3. Presupuesto total. [Fuente: Colmenero Fonseca, F., 2026].

Partida	Concepto	Importe (MXN)	Porcentaje del total (%)
1	Estructura y cimentación	$97,829.00	17.6 %
2	Muros y cerramientos	$139,929.00	25.2 %
3	Estructura y cubierta	$103,535.00	18.6 %
4	Carpinterías, puertas y ventanas	$46,202.00	8.3 %
5	Instalaciones	$89,828.00	16.2 %
6	Acabados y terminaciones	$78,431.00	14.1 %
	Total, estimado de obra	$555,754.00	100 %

Nota: El presupuesto total equivale a aproximadamente USD 30 540, considerando un tipo de cambio promedio.

Agradecimientos

Esta publicación fue financiada por la Convocatoria Postdoctoral Becas en el extranjero 2025, conforme a la Resolución del 17 de diciembre de 2025, en el marco del proyecto nº 15057008, titulado "Integración de energías

renovables y tecnologías avanzadas para la reducción de la pobreza energética en comunidades rurales de México." Los autores reconocen el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México.

Referencias bibliográficas

Ayres, R. U. (1995). Life cycle analysis: A critique. *Resources, Conservation and Recycling, 14*(3–4), 199–223. https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00017-D

Berges-Alvarez, I., Martínez-Rocamora, A., & Marrero, M. (2024). A Systematic Review of BIM-Based Life Cycle Sustainability Assessment for Buildings. *Sustainability, 16*(24), 11070. https://doi.org/10.3390/su162411070

Colmenero Fonseca, F. (2026). *Metodología de inteligencia ecológica aplicada a vivienda social con GIS, BIM y ACV: caso Guanajuato* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].

Duran-Navarrete, V., García-Alvarado, R., & Vega-Coloma, M. (2024). Integración de estrategias de circularidad al diseño arquitectonico mediante BIM. *Revista Hábitat Sustentable*, 118–131. https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.01.09

Fernández Catalina, M. (2024). Estrategias contemporáneas de proyecto en la reutilización de arquitecturas abandonadas. Procesos de reúso arquitectónico [Universidad de Valladolid]. https://doi.org/10.35376/10324/75167

González-Vallejo, P., Yajnes, M. E., Caruso, S. I., & Muñoz-Sanguinetti, C. M. (2025). Circularidad como alternativa sostenible en la autoconstrucción de viviendas en zonas vulnerables de Latinoamérica. *Revista de Arquitectura (Bogotá), 27*(2), 149–174. https://doi.org/10.14718/RevArq.2025.27.5704

Luque Castillo, X., & Yepes, V. (2025). Life cycle assessment of social housing construction: A multicriteria approach. *Building and Environment, 282*, 113294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113294

Poljanšek, M. (2017). Building Information Modelling (BIM) standardization. *European Commission*. https://doi.org/10.2760/36471

Salazar Altamirano, P. A. (2024). Optimización de tecnologías de construcción sostenible para mejorar tiempos y costos en la construcción ejemplos de comunidades rurales en América Latina. *Revista Ingenio Global, 3*(2), 119–137. https://doi.org/10.62943/rig.v3n2.2024.114

Zubair, M. U., Ali, M., Khan, M. A., Khan, A., Hassan, M. U., & Tanoli, W. A. (2024). BIM- and GIS-Based Life-Cycle-Assessment Framework for Enhancing Eco Efficiency and Sustainability in the Construction Sector. *Buildings, 14*(2), 360. https://doi.org/10.3390/buildings14020360

La stampa 3D/4D per materiali bio-eco ispirati in architettura

3D/4D printing for bio-eco materials inspired by architecture

Alessandra Cernaro*

PhD (CEAR-08/A), Dipartimento di Ingegneria – Università degli Studi di Messina, Italy. *alessandra.cernaro@unime.it*

Ornella Fiandaca

Professore Ordinario (CEAR-08/A), Dipartimento di Ingegneria – Università degli Studi di Messina, Italy. *ornella.fiandaca@unime*

Abstract: the opportunities of 3D printing for the construction sector have been being a topic of research, first industrial and then academic, for over a century. Throughout the last few decades, there has been a technological advancement that has led to increasingly large and efficient printers, which have made it possible to experiment boldly with building units, both on-site and off-site. The current and ever more stringent demands for sustainable approaches are leading to the introduction of issues such as the use of natural resources, recycled materials, end-of-life recyclability, adaptation of shape and performance to respond to changing environmental conditions. The proposal to start an experimental research within the 3D printing laboratories of the Department of Engineering of the University of Messina to conceive prototypes for passive cooling for summer comfort that aspire to the evolution of 4D printing required a preliminary analysis of the state of the art in terms of materials, blends and geometric generation principle and a selection of pilot projects and experiments of components at international level. The lack of specific architectural languages, systematised engineering data, life cycle evaluations has inspired the conception of an experimental program that contemplates not only the design of the prototype, but also the evaluation of the contribution that parametric modelling tools can give in the process of conception, simulation and verification; these outcomes are supposed to be validated through laboratory tests to provide objective values on which to evaluate performance standards for mechanical and thermal aspects of the designed components and to envision specific architectural lexicon.

Keywords: passive cooling, 3D/4D printing, bio-eco-inspired materials, performance standards, architectural lexicon.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

1. Introduzione/Stato dell'arte. Verso un 'architettura che evolve

Se i primi brevetti di stampa 3D per l'architettura risalgono agli anni '30 del Novecento, le applicazioni concrete di sperimentazioni progettuali si registrano a partire dal Duemila con contestuali proposte di innovazione in termini strumentali. Un entusiasmo subito braccato da un rifiuto generale, da difficoltà operative, assenze normative, lacune strumentali, scarsa qualità espressiva.

Un primo progetto embrionale di stampa è stato effettuato dall'Università Tecnologica di Eindhoven (TU/e) con materiali cementizi e una stampante manuale nel 2005 e solo nel 2015 è giunto a maturazione un percorso prototipale mirato all'ottimizzazione di miscele e strumentazioni per il calcestruzzo, configurando una delle prime soluzioni adottate da cui scaturiranno le successive varianti (TU/e Eindhoven University of Technology, 2018; 3D Printedhouse, 2018). Per finanziare e realizzare il programma 3DCP (3D Concrete Printing), la TU/e ha costituito un gruppo di appaltatori, fornitori di materiali da costruzione e studi di ingegneria. La Saint-Gobain Weber Beamix ha messo a punto la 3D Mortar, un premiscelato ottimizzato per l'estrusione e la sedimentazione di strati continui tramite l'ugello di un braccio robotizzato di una stampante per calcestruzzo che nel 2019 era la più grande al mondo (Redazione Stampa3Dstore.com, 2018; Wolfs, 2015; Wolfs et al., 2024).

Occorrerà quindi giungere al lustro 2015-2020 per veder proliferare, insieme ad una consapevolezza sullo sviluppo sostenibile, prototipi e progetti pilota senza precedenti (Alzarrad & Elhouar, 2019; Bhandari et al., 2024; Tabassum & Mir, 2023). Si diversificano materiali e soluzioni costruttive, passando dalle realizzazioni in cantiere a quelle di componenti o moduli prefabbricati in laboratorio e poi assemblati in sito, tanto per l'edilizia quanto per le infrastrutture.

Le ragioni che hanno alimentato l'entusiasmo per la sperimentazione sono molteplici e riguardano:

- la sostenibilità ambientale ottenuta con riduzione di emissioni CO_2, nessuno spreco di materiali, biodegradabilità o riciclabilità dei composti, consumi energetici quasi nulli;

- la sostenibilità economica in virtù di realizzazioni senza o con poca manodopera ottenute da poche ore a pochi giorni;
- la sostenibilità sociale per fronteggiare la carenza abitativa a basso costo, come avvenuto in Belgio (Westerlo) nel Maine (USA), in Italia (Massa Lombarda), in Germania (Lünen/Beckum).

Dal punto di vista progettuale e costruttivo, è interessante rilevare quanto le sperimentazioni siano orientate verso la realizzazione di edifici con altezze sempre maggiori, una sfida che sta determinando anche un diverso modo di concepire il cantiere e che richiede contestualmente una valutazione dei rischi connessi all'uso dei macchinari e alle sostanze adoperate.

La consultazione di un contesto operativo in continua evoluzione evidenzia come il tema della stampa 3D sia sempre più focalizzato sull'intento di innovare e ottimizzare l'industria delle costruzioni ma anche su un'architettura circolare e trasformativa. Il riferimento è alle potenzialità della stampa 4D che consentirà di avere interi edifici o anche solo sue componenti capaci di cambiare forma e adeguarsi agli stimoli ambientali. Un esempio è fornito da un recente progetto di ricerca europeo ARCHIBIOFOAM promosso dalle Università di Aalto (Finlandia), Stuttgart (Germania) e Milano (Italia) e da Woamy, spinout dell'ateneo finlandese. L'obiettivo sarà concepire un materiale espanso derivato da cellulosa di legno estruso capace di modificare forma e prestazioni in relazione a variazioni di calore e umidità, fornendo soluzioni di controllo passivo della ventilazione a favore del comfort termico degli edifici (Nunzia, 2024).

Le miscele idonee per la stampa attualmente allo studio, insieme al procedimento costruttivo, interessano l'ambito accademico, il settore produttivo, le associazioni di impresa. Una sintesi di questa evoluzione consente a chi voglia intraprendere tale percorso di ricerca una valutazione delle potenzialità e dei limiti di ogni proposta (Figura 1). Secondo le analisi del Report di Polaris Market Research, il mercato della stampa 3D edilizia è destinato a crescere dell'88,4% entro il 2029 (Gajbhiye, 2024). La buona riuscita della diffusione non è solo dipendente dal progresso della tecnologia e del sapere tecnico ma anche dall'accettazione dell'innovazione da parte della committenza; in tal senso è esemplificativa l'iniziativa di divulgazione intrapresa nel corso della realizzazione della 3D Print Canal House ad Amsterdam nel 2014, rendendo accessibile il cantiere al pubblico per ammirare la stampante in azione (Stellacci, 2014). Lacunosità normative,

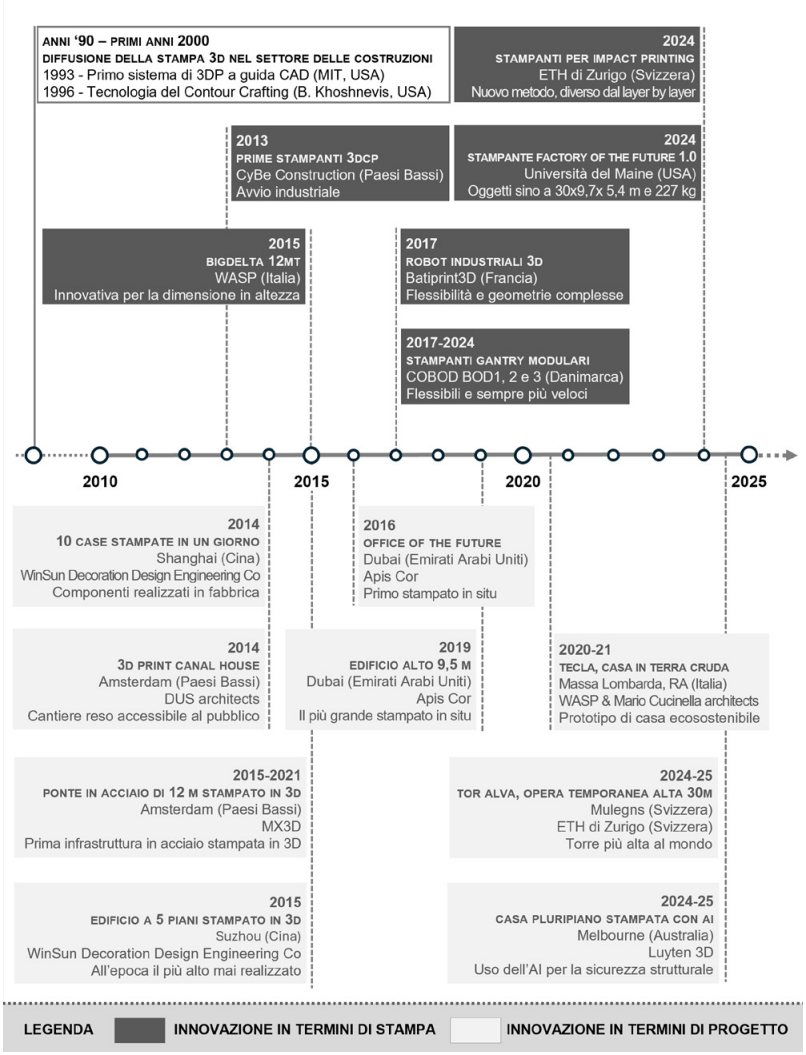


Figura 1. Stampa 3D per l'architettura: innovazione tecnologica e progettuale nel XXI secolo. [Fonte: elaborazione degli autori]. L'ultima sperimentazione di stampa 3D è il progetto ITACA della WASP 3D Build che sarà ultimata nella primavera del 2026 (Sommese & Gargiulo, 2025).

assenza di criteri standardizzati di ingegnerizzazione delle prestazioni, qualità espressiva stereotipata degli organismi architettonici sono problematiche da affrontare se si intende promuovere l'adozione di tali procedimenti costruttivi.

Partendo dall'analisi dello stato dell'arte questo studio ha inteso acquisire tutte le variabili attualmente in esame per avviare, all'interno del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Messina un progetto di ricerca multidisciplinare finalizzato allo sviluppo di sistemi per il raffrescamento passivo dell'edilizia esistente, considerando tanto il controllo dello scambio di calore tra ambiente esterno e interno (schermature solari) quanto il miglioramento delle condizioni di benessere termoigrometrico degli spazi interni (partizioni evaporative). La scelta, attualmente allo studio, riguarderà miscele che utilizzino materiali bio-based e morfologie bio-ispirate per processi produttivi di stampa 3D o 4D.

2. Materiali e metodi. La trasformazione additiva del mondo delle costruzioni

L'approccio metodologico ha innanzitutto richiesto una ricognizione delle più recenti novità in termini di tecnologie sostenibili, testate in laboratorio, prototipi e cantieri pilota, giungendo a questa prima proposta di classificazione su tre livelli gerarchici che contemplano l'origine dei materiali e il loro ruolo nella miscela (Tabella 1), il tipo di miscela e la funzione edilizia (Tabella 2), il principio morfologico e la generazione geometrica (Tabella 3), per interi sistemi costruttivi, componenti o sub-componenti.

Per una più completa analisi in termini di procedimento costruttivo, allo studio sui materiali è stato associato un approfondimento sui principi costruttivi impiegabili, notando che la stampa 3D è usata per ottenere configurazioni sia scatolari che globali; quindi, o delimitando lo spazio interno mediante combinazione di chiusure verticali e orizzontali o mediante forme che non prevedono soluzioni di continuità tra gli elementi di fabbrica che delimitano un edificio dall'ambiente esterno. Continuando l'analisi in termini di processo produttivo, la manifattura additiva consente la realizzazione dell'intera apparecchiatura costruttiva o di sue componenti in opera, a piè d'opera e in officina; pertanto, con un approccio che non differisce da quello del più tradizionale modo di concepire la costruzione.

Tabella 1. Materie prime e ruolo funzionale assolto in una miscela.
[Fonte: elaborazione degli autori].

Ruolo Funzionale	Risorsa Naturale	Origine Biologica Bio-Based	Materia Prima Seconda Upcycled/Waste Based
Legante/ Matrice	Argilla/terra cruda Gesso naturale Calce idraulica	Bioplastiche (PLA–PHA) Bio resine Biopolimeri da alghe Biopolimeri da amido Biocemento MICP	PLA riciclato rPET-bioPET Nylon da reti per la pesca ABS riciclato
Aggregati/ Filler	Sabbia silicea Legno micronizzato Bambù micronizzato Sughero granulare		Aggregati da demolizione Vetro frantumato micronizzato Polveri di marmo/pietra Ceneri volanti Loppa d'altoforno Segatura Scarti di sughero Gusci di noci, nocciole, mandorle Fibre agricole • canipulo • paglia di riso • bucce di cocco
Rinforzi/ Fibre	Fibre vegetali • lino • canapa • juta, • kenaf • cellulosa		Fibre sintetiche riciclate ABS riciclato Nylon da reti per la pesca
Additivi		Mycelium (Micelio) Batteri per biocemento Microcapsule autoriparanti	

Tabella 2. Alcune miscele sostenibili in uso o in avanzata fase di sperimentazione. [Fonte: elaborazione degli autori].

Tipo formulazione	**Composizione: [in uso /u – sperimentale /s]** **Legante/matrice [1] + aggregati/filler [2] + rinforzi [3] + additivi [4] + liquido** **Funzione edilizia: Strutturale [a] + isolante [b] +termodinamico [c] + autoriparante [d]**	
Naturale	Terra cruda [A + B] /U	Terra cruda - Argilla [1] + Sabbia [2] + Fibre vegetali (paglia, canapa) [3]
	Terra stabilizzata [A + B] /S	Terra - Calce NHL [1] + Sabbia [2] + Fibre vegetali (paglia, canapa) [3]
Cementizia avanzata	Geopolimeri 3D [A] /U	Loppa d'altoforno - Cenere volante - Metacaolino – Attivatori alcalini [1] + Sabbia fine - Polveri minerali [2] + Additivi minerali o biobased [4]
	LC3 stampabile [A] /S	Clinker Portland - Argilla calcinata - Calcare - Gesso [1] Grafene + Sabbia fine [2] Superfluidificante PCE – Cellulosa – Grafene [4]
	Biocemento MICP [A]	Calcite precipitata da batteri [1] + Sabbia fine [2] + HOMC-Nanoargilla [4]
Composita	Micelio	
	Biopolimero algale [B] /S	Biopolimero da alghe [1] + Sabbia [2] + Fibre di canapa [3]
	Biopolimeri sintetici	PLA vergine o riciclato [1] + Fibre vegetali [3] + gusci frutta secca (opz.) [2] Trucioli di legno (WoodPLA) Fibre di canapa Fibre di bambù
	Biopolimeri vegetali	Calce NHL [1] + Mais [4] + Residui lavorazione Mais [3] (Concretl)

Tabella 3. Relazione generazione geometrica e morfologia stampata. [Fonte: elaborazione degli autori].

Morfologia stampata	**Principio di generazione geometrica**		
	Bioispirato *Geometrie ispirate a strutture naturali*	**Parametrico – algoritmico** *Geometrie generate matematicamente*	**Note** *Varianti di ottimizzazione*
Traliccio reticolare	x	Griglie 3D Lattice parametrico - Mesh 3D	**Principio topologico** *ottimizzazione strutturale per distribuire i carichi*
Alveolare - Cellulare	Nido d'ape	Celle poligonali Pattern parametrici	**Principio topologico** *ottimizzazione strutturale per distribuire i carichi* **Principio performativo** *moduli variabili sotto stimoli ambientali*
Trabecolare spongiosa	Tessuto osseo	Rete irregolare Voronoi	**Principio topologico** *ottimizzazione strutturale per distribuire i carichi*
Elica stratificata	Tendini – Pareti legnose	Layering parametrico	
Superfici minime curve	Conchiglie	Spline parametriche - NURBS	**Principio performativo** *riduzione peso/materiale*
Frattale ricorsiva	Foglie - Coralli	Algoritmo ricorsivo	
Shape morphing	Fiori/frutti che si aprono	Parametri di deformazione	**Principio performativo** *moduli variabili sotto stimoli ambientali* *stampa 4D di superfici programmabili*

Dei progetti di unità edilizie stampate in 3D di cui esistono reali applicazioni ne sono stati selezionati tre, dedicando a ciascuno una scheda di approfondimento per evidenziarne l'innovazione:

- TECLA HOUSE, una casa in terra cruda a Massa Lombarda (RA) in Italia (Figura 2) (mca, 2021);
- PROJECT MILESTONE, case in calcestruzzo a Eindhoven nei Paesi Bassi (Figura 3) (Redazione Stampa3Dstore.com, 2018);

- BioHOME 3D, una casa in materiali lignei derivati dalla foresta nel campus dell'Università del Maine negli Stati Uniti (Figura 4) (Rinnovabili, 2023).

In sintesi, l'inclusione dei prototipi nello studio è avvenuta poiché si sono ritenuti esemplificativi per:

- il profilo sostenibile, in termini di materiali, emissioni e riciclabilità;
- il processo produttivo, con costruzione sia in situ sia off-site;
- la documentazione del profilo prestazionale con dati ingegneristici o con dichiarata conformità a standard di riferimento nel Paese in cui sono stati realizzati.

Le attuali esigenze di recupero del patrimonio esistente inducono a ritenere che i benefici della stampa 3D/4D e dell'adozione di materiali innovativi dovrebbero essere perlopiù orientati verso la realizzazione di componenti da impiegare per la riqualificazione degli edifici piuttosto che verso opere di nuova costruzione. Per tali ragioni si è provveduto alla ricognizione di progetti di ricerca di aziende, università, start-up, start-off aziende al fine di intercettare modelli rappresentativi per schermature solari e partizioni evaporative, le due categorie verso cui si intende indirizzare il percorso di ricerca multidisciplinare in fase di elaborazione concettuale.

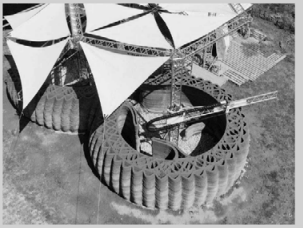
A titolo dimostrativo ne sono stati selezionati due che serviranno come riferimento per la sperimentazione: Solargate, pannelli per schermature solari stampati in 4D, ispirati al movimento igroscopico delle brattee delle pigne e capaci di cambiare forma in risposta a condizioni ambientali, e le colonne "Ancient Cooling Techniques" che sfruttano il concetto del raffrescamento evaporativo per migliorare il comfort termico e la cui forma è stata ottimizzata con software parametrici (Figura 5).

3. Risultati/Discussione. Programmare la materia per una stampa da 3D a 4D

All'interno di un gruppo di lavoro multidisciplinare, in formazione, si è indagata la possibilità di produrre con stampa 3D sia interi organismi architettonici sia componenti al fine di valutarne la fattibilità in un futuro concreto del mercato edile.

La stampa 3D di una costruzione, sperimentata per alcune tipologie, ha limiti legati alla produzione industriale – uso di materiali che non

TECLA HOUSE: dalla terra informe alla terra in formato casa




ANALISI MULTICRITERIO – PROTOTIPO MODULO ABITATIVO

Origine dell'ispirazione: risorse naturali.

Miscela: terra cruda locale (a base di argilla) setacciata + fibre naturali (paglia e lolla di riso) + piccole percentuali di calce naturale.

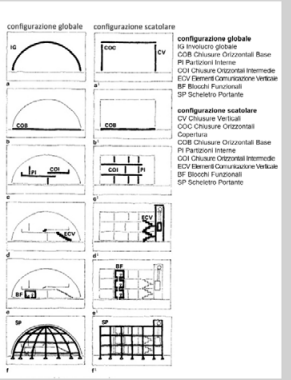
Processo produttivo: la costruzione (94 mq) è stata realizzata per deposizione di strati continui (12–25 mm) da più stampanti 3D Crane WASP operanti in cantiere con tecnologia ROBOTIC CLAY PRINTING.

Struttura e morfologia: la configurazione globale a doppia calotta ha generato contestualmente in cantiere tutti i componenti edilizi: involucro portante; chiusura di base, partizioni interne.

Prestazioni funzionali: resistenza meccanica a compressione 1,5–3 Mpa; capacità termica 1000 J/kgK; traspirabilità evaporativa.

Efficienza ambientale del processo/Impatto ambientale: modello circolare di abitazione creata con materiali biodegradabili, a zero emissioni, con essiccazione naturale (nessuna cottura) e adattabile a qualsiasi clima e contesto.

Applicazione: TECLA (Technology and Clay) è stata realizzata a Massa Lombarda (RA) su progetto di MCA–Mario Cucinella Architects.



SCIENTIFIC VALIDATION:
WASP (Italy), founded by Massimo Moretti

LINK: https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-homes//

Figura 2. TECLA HOUSE: materiale di origine naturale + costruzione on-site + tecnologia ROBOT CLAY PRINTING. [Fonte: elaborazione degli autori].



Figura 3. PROJECT MILESTONE: materiali con risorse riciclate + costruzione off-site + tecnologia 3D CONCRETE PRINTING. [Fonte: elaborazione degli autori].

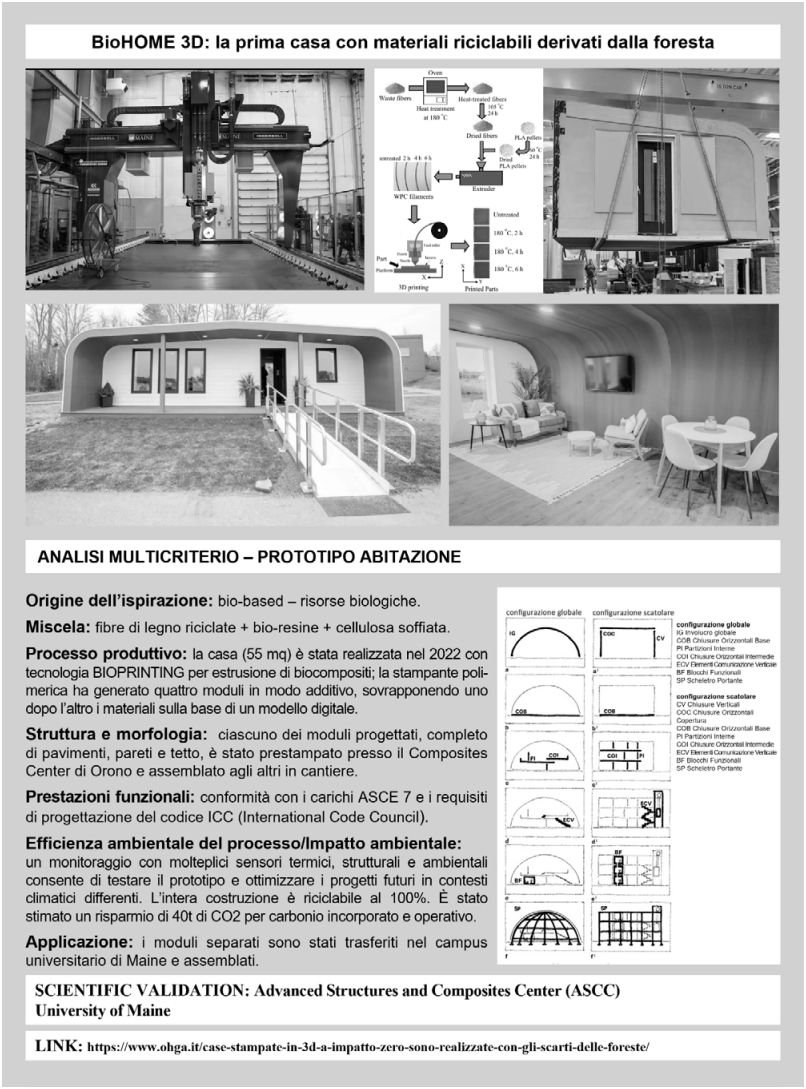
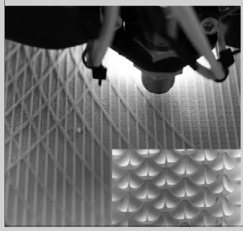


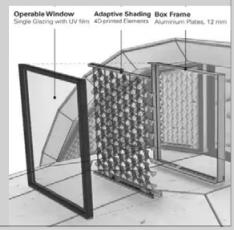
Figura 4. BioHOME 3D: materiali bio-based + costruzione off-site + tecnologia BIOPRINTING [Fonte: elaborazione degli autori].

SOLARGATE: SISTEMA DI FACCIATA ADATTIVA STAMPATA IN 4D
Institute for Computational Design and Construction (ICD) of Stuttgart University









Principio di generazione geometrica:
Shape morphing / Bioispirato: movimento igroscopico delle brattee delle pigne

Miscela:
Polvere di cellulosa, polichetone e materiale biocomposito

Processo produttivo
tecnologia BIOPRINTING

Struttura e morfologia:
Fibre di cellulosa stampate in una struttura in doppio strato ispirata alle brattee della pigna

Applicazione:
Schermatura solare

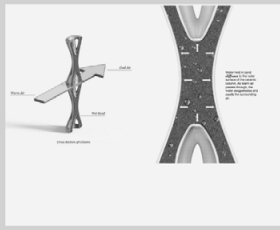
Prestazioni funzionali:
Elevata umidità: dilatamento ed apertura
Bassa umidità: contrazione e chiusura

Impatto ambientale:
Biodegradabile

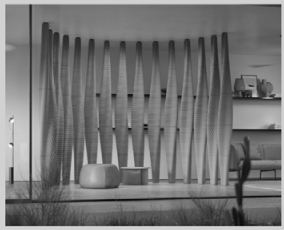
LINK: https://www.youtube.com/watch?v=2UKvhQVSHpk&t=64s&ab_channel=ICDStuttgart

3D PRINTED PARTITIONS TO REGULATE TEMPERATURE: ANCIENT COOLING TECHNIQUES
S. Al, B. Kennedy, G. Reichard. S. Sakhdari, I. Farahi e M. Ali - US university Virginia Tech









Principio di generazione geometrica:
Elica stratificata / Parametrico-algoritimico: forma ottimizzata con Rhino, Grasshopper

Miscela:
Argilla e procellana

Processo produttivo
Layer by layer

Struttura e morfologia:
Colonne cave in argilla riempite con sabbia e acqua

Prestazioni funzionali:
Raffrescamento evaporativo con diminuzione della temperature dell'aria interna sino a 5,56 °C

Impatto ambientale:
Riciclabile

Applicazione:
Partizione interna
Possibili applicazioni anche in facciata

LINK: https://www.dezeen.com/2025/06/24/3d-printed-partition-wall-brings-ancient-cooling-techniques/

Figura 5. Esempi di componenti per schermature solari e partizione evaporative stampate in 3D [fonte: Elaborazione degli autori].

necessitano di calore – alla progettazione architettonica – forme, dimensioni, espressione formale – alla esecuzione in cantiere – impiego in simultanea di strumentazioni robotizzate.

L'idea di immaginare componenti e sub-componenti edilizi sicuramente ha prospettive più concrete per le aziende oltre che consentire di rivolgersi non soltanto alle nuove realizzazioni ma anche a interventi sul costruito.

Dall'analisi svolta si è compreso che in questo campo sono stati utilizzati materiali diversi che richiedono tecniche differenti e strumentazioni specifiche; ma quel che emerge è prevalentemente la scarsa ingegnerizzazione dei dati. Si presta più attenzione a miscele o filamenti, a morfologie idonee alla stampa piuttosto che a prevedere la risposta prestazionale. In relazione all'impiego di materiali occorre un corredo di prove che dovrebbero trovare nella normativa un supporto, o simulazioni informatiche che possano rispondere in assenza di procedure.

Solo per alcuni prototipi/progetti pilota sono in fase di definizione procedure scientifiche o sono stati adottati criteri già in essere (Asprone et al., 2024; Romano & Mazzoni, 2025; UNI News, 2025; Redazione Stampa3Dstore.com, 2026).

Per la più recente BioHome del Maine (Figura 4) è stata valutata la quantità di CO_2 incorporato ed operativo nell'unità (46 ton), i moduli testati per temperature esterne da -17°C a +40°C, cicli di gelo disgelo, condizioni climatiche estreme, progettato per carichi strutturali da standard americano ASCE 7; purtuttavia non sono stati pubblicati valori di trasmittanza, di resistenza a compressione/flessione, spessori degli strati stampati.

Molti componenti in fase di prototipazione devono essere sottoposti a indagini diagnostiche per valutarne le prestazioni e la durabilità; le normative dovrebbero adeguare standard e procedure di prova a questo nuovo orientamento del settore edilizio e ottimizzare prove di resistenza al fuoco, stabilità e durabilità; inoltre, se pure si riconosce a questo ambito di ricerca l'attenzione ai principi di sostenibilità, ritenuti come intrinseci nelle modalità produttive, occorrerebbe effettuare valutazioni di LCA (Life Cycle Assessment) per comprendere a pieno l'impatto dei nuovi materiali stampati.

Il progetto di ricerca sul quale si è iniziato a fare qualche riflessione ha raggiunto questo livello di definizione:

- *Componente da stampare*
  - APPLICAZIONI: Schermature solari progettate per risposta biomimetica.
    Mattoni alveolari bio-ottimizzati per raffrescamento evaporativo.
  - MISCELA: Tipo di formulazione "bio-composita" (cfr. tab. 2)
  - LUOGO DI PRODUZIONE: laboratorio/off-site
  - TIPO DI STAMPA: 3D/4D
- *Flusso di lavoro da modellazione parametrica a stampa 3D/4D*
  - PROGETTAZIONE concezione dei prototipi mediante software di tipo BIM
  - RICERCA DEGLI STANDARD AI QUALI SOTTOPORRE IL PROTOTIPO AL VERO
  - SIMULAZIONI verifica di comportamenti strutturali e risposte termo-igrometriche
  - STAMPA DEI PROTOTIPI ricorso a strumentazioni del Dipartimento di Ingegneria-UniMe (Figure 6,7);
- VALIDAZIONE DELLE SIMULAZIONI prove di resistenza meccanica e durabilità, analisi termografiche da condurre con strumentazioni dei laboratori interni al Dipartimento di Ingegneria, agli Istituti del CNR di Messina e al Laboratorio DUEE SPS SIE del Centro di Ricerche Enea di Bologna.

4. Conclusioni. Costruire la quarta dimensione

Il percorso di ricerca intrapreso è stato caratterizzato, fino ai primi anni 2000, prevalentemente da dinamiche di trasferimento tecnologico dalle imprese verso le università. Negli anni successivi si è progressivamente delineata un'inversione di tendenza. Le proposte sono perlopiù provenute da atenei stranieri (TU/e, ASCC-Maine, ICD-Stuttgart, Bartlett School of Architecture UCL Londra, Iaac- Barcellona), sebbene diverse imprese italiane - WASP 3D Build (WASP, 2022) e Caracol-architettura (Caracol, 2025) - occupino posizioni di rilievo nel panorama internazionale.



Figura 6. Laboratori di stampa 3D del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Messina: LIVINGAM [Fonte: elaborazione degli autori].

LAB 6R – Sezioni coinvolte: Rilievo dell'Architettura (RA); Riqualificazione Tecnologica (RT)



MATERIALI ADOTTATI

Il laboratorio dispone attualmente di filamenti di polimeri standard PLA vergine.

STRUMENTAZIONI DISPONIBILI

Stampante 3d in PLA per la riproduzione dal vero di modelli in scala
Termocamera Flir E8-XT per la rilevazione delle temperature superficiali.

ATTIVITÀ DI RICERCA

Il laboratorio 6R (Lab6R) intende coniugare, in maniera sinergica, le competenze multidisciplinari presenti nel Dipartimento di Ingegneria negli ambiti ambientale, urbanistico, architettonico, tecnologico, del rilievo, della rappresentazione e della conservazione dell'architettura esistente, attraverso un approccio propositivo capace di mettere in relazione conoscenze teoriche, metodologie rigorose, indagini conoscitive e soluzioni metaprogettuali.
In particolare nell'ambito della stampa 3D si occupa di:
- realizzazione di plastici architettonici e di prototipi;
- modellazione parametrica BIM;
- costituzione di repertori di materiali secondo la logica prevalente del km zero e del low cost;
- valutazioni di soluzioni tecniche per l'efficientamento energetico dell'edilizia esistente;
- elaborazione di soluzioni costruttive nZEB - near zero energy building.

RESPONSABILI SCIENTIFICI: prof. Alessio Altadonna (RA); prof. Fabio Minutoli (RT)

Figura 7. Laboratori di stampa 3D del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Messina: LAB 6R [Fonte: elaborazione degli autori].

Lo scenario indagato ha evidenziato una prassi nella quale i principi della sostenibilità risultano implicitamente praticati piuttosto che esplicitamente formalizzati. Permangono significativi margini di approfondimento, in particolare per la carenza di dati prestazionali e valutazioni LCA. In questo quadro, assume rilevanza il tavolo tecnico UNI, avviato nel 2025, al fine di definire linee guida per la progettazione e i controlli di qualità delle tecnologie di stampa 3D che, se pure riferite al solo calcestruzzo, segnala una traiettoria delineata e possibili sviluppi (UNI News, 2025).

Un ulteriore punto di debolezza individuato riguarda il linguaggio architettonico associato a questa filiera produttiva. Aspetti quali colore, texture e finitura superficiale sono stati finora considerati in misura marginale, poiché l'attenzione si è prevalentemente concentrata sull'ottimizzazione delle proprietà reologiche delle miscele e dei parametri di processo — in particolare estrudibilità, coesione, buildability, ritenzione d'acqua — nonché sulla definizione dei principi generatori delle sezioni trasversali, finalizzati al conseguimento di adeguate prestazioni in termini di resistenza meccanica (anche in zona sismica), isolamento termico (in climi estremi), durabilità (monitoraggi nel tempo).

Solo nelle sperimentazioni più recenti (2025–2026), tra cui i progetti Itaca, Teixit (Sommese & Gargiulo, 2025; Redazione Stampa3Dstore.com, 2026), si osserva una crescente attenzione agli aspetti formali, attraverso l'introduzione di configurazioni caratterizzate da morfologie ondulate, pareti perforate e superfici intrecciate organizzate secondo ritmi ricorrenti. Nonostante tali primi sviluppi, manca ancora una sistematizzazione critica del rapporto tra logiche generative di stampa additiva, prestazioni tecniche e qualità espressiva. Questo scarto evidenzia un ambito di ricerca ancora largamente inesplorato, rispetto al quale il presente studio intende offrire un contributo esplorando le prospettive emergenti della stampa 3D e per la 4D la capacità di modificare nel tempo forma e comportamento in risposta a stimoli ambientali.

Ringraziamenti

Si ringraziano i responsabili scientifici dei laboratori del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Messina: G. Di Bella per Living LAB Additive Manufacturing (LIVINGAM) e A. Altadonna e F. Minutoli rispettivamente per le sezioni Rilievo dell'Architettura e Riqualificazione Tecnologica per il Laboratorio 6R.

Referenze bibliografiche

Alzarrad, M.A., Elhouar, S. (2019) 3D Printing Applications in Construction from The Past and into The Future, in Miroslaw J. Skibniewski e Miklos Hajdu (a cura di), *Proceedings of the Creative Construction Conference*, Budapest University of Technology and Economics and Diamond Congress Ltd, Budapest. pp. 754-760. https://doi.org/10.3311/CCC2019-103

Asprone, D., Capozzi, V., Menna, C., Micchia, A. (2024). Innovazione e Sostenibilità a Montalto di Castro: il Futuro delle Costruzioni attraverso la stampa 3D del calcestruzzo. Disponibile da: www.ingenio-web.it/articoli/innovazione-e-sostenibilita-a-montalto-di-castro-il-futuro-delle-costruzioni-attraverso-la-stampa-3d-del-calcestruzzo/ (consultato il: 02.03.2026)

Bhandari, S., Singh, A., Taufik, M, (2024). 3D printing methods and materials for sensor fabrication. *Materials Today: Proceedings 4th Innovative Product Design and Intelligent Manufacturing Systems, 115*, pp. 8-16. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.146

Brandon, E.M. (2025) Ancient Cooling Techniques, Allow 3D-Printed Partitions to Regulate Temperature. Disponibile da: www.dezeen.com/2025/06/24/3d-printed-partition-wall-brings-ancient-cooling-techniques/ (consultato il: 19.11.2025).

Caracol (2025). Elementi architettonici stampati in 3D. Disponibile da: www.caracol-am.com/it/risorse/knowledge-hub/tech-learnings/3d-printing-architectural-elements-for-building (consultato il: 25.01.2026).

Gajbhiye, L. (2024). Global 3D Printing Construction Market 2025–2034, Polaris Market Research.

mca - mario cucinella architects (2021). TECLA – Technology and Clay. Il primo prototipo di abitazione ecosostenibile stampato in 3D in terra cruda. Disponibile da: www.mcarchitects.it/progetti/tecla-technology-and-clay (consultato il: 28.02.2026),

Nunzia, A. (2024) ARCHIBIOFOAM: il progetto da 3,5 milioni di euro per la stampa 4D di edifici che si adattano all'ambiente. Disponibile da: www.3dnatives.com/it/archibiofoam-stampa-4d-bioschiuma-edilizia-sostenibile-071020249/ (consultato il: 28.02.2026).

Redazione Stampa3Dstore.com (2018). Project Milestone – le prime 5 case abitabili in Olanda stampate in 3D in calcestruzzo. Disponibile da: www.stampa3dstore.com/project-milestone-le-prime-5-case-abitabili-in-olanda-stampate-in-3d-in-calcestruzzo/ (consultato il: 10.02.2026).

Redazione Stampa3Dstore.com (2026). WASP ha completato la Stampa di Itaca, la prima Fattoria Autosufficiente Stampata in 3D. Disponibile da: http://www.stampa3dstore.com/wasp-ha-completato-la-stampa-di-itacala-prima-fattoria-autosufficiente-stampata-in-3d/ (consultato il: 10.02.2026).

Rinnovabili (2023). La casa in legno stampata in 3D: arriva dal Maine ed è completamente riciclabile. Disponibile da: www.rinnovabili.it/green-building/la-casa-in-legno-stampata-in-3d-arriva-dal-maine-ed-e-completamente-riciclabile/ (consultato il: 26.02.2026).

Romano, R., Mazzoni, E. (2025). Processi di manifattura additiva per sistemi di facciata a basso impatto ambientale. *TECHNE* – Ricerca e sperimentazione, 30, pp. 309-320.

Sommese, F., Gargiulo, A.M. (2025). 3D Printed Earth Forest Campus per le sfide di cambiamento climatico e carenza abitativa. Disponibile da: https://www.youbuildweb.it/3d-printed-earth-forest-campus-per-le-sfide-di-cambiamento-climatico-e-carenza-abitativa/ (consultato il: 03.03.2026).

Stellacci, E. (2014). Il primo palazzo stampato in 3D è in costruzione ad Amsterdam. Disponibile da: www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/palazzo-stampato-3d-amsterdam-872 (consultato il: 10.02.2026).

Tabassum, T., Mir, A.A. (2023). A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction. *Materials Today: Proceedings,* 93 part 3, pp. 408-414. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.013

TU/e (Eindhoven University of Technology) (2018). News overview. Eindhoven gets the first 3D-concrete printing housing project. Disponibile da: https://www.tue.nl/en/news/news-overview/eindhoven-gets-the-first-3d-concrete-printing-housing-project (consultato il: 03.03.2026)

3D Printedhouse (2018). Project Milestone. Disponibile da: www.3dprintedhouse.nl/en/ (consultato il: 04.03.2026).

UNI News (2025). Calcestruzzo e Concrete 3D Printing: al via i lavori per una prassi di riferimento. Disponibile da: www.uni.com/calcestruzzo-e-concrete-3d-printing-una-nuova-prassi-in-lavorazione/?utm (consultato il: 02.03.2026).

WASP (2022). Case stampate in 3D, le stampanti 3D per l'edilizia. Disponibile da: www.3dwasp.com/case-costruite-con-stampante-3d/ (consultato il: 25.01.2026).

Wolfs, R.J.M. (2015) 3D Printing of concrete structures. Department of the Built Environment Graduation Thesis, Master Architecture, Building and Planning Specialization Structural Design, Eindhoven University of Technology.

Wolfs, R., Bos, D., Salet, T. (2024). Lessons learned of project Milestone: The first 3D printed concrete house in the Netherlands, in *Materials Today: Proceedings 2nd International Conference on Management and Recycling of Mettallurgical Wastes*, 112, (in corso di stampa).

Bio-based materials for the energy-efficient retrofitting of buildings

Agostino Catalano

Associate Professor, eCampus Telematic University, Department of Humanities and Social Sciences, Italy. *agostino.catalano@uniecampus.it*

Abstract: historic buildings are a fundamental part of the cultural, social and architectural identity of Italy and Europe. They include structures built in different eras, often predating the introduction of modern energy and seismic regulations, characterised by traditional construction techniques and the use of locally sourced natural materials. From an energy perspective, these buildings generally perform below current standards, with high heating and cooling requirements and limited capacity to control thermal and humidity flows. In recent decades, growing attention to environmental sustainability has led to a rethinking of strategies for intervening in existing buildings. This poses a complex problem: on the one hand, the need to improve the energy performance of buildings; on the other, the obligation to preserve their historical, artistic and material values.

In this context, the traditional approach based on the use of industrial materials and standardised solutions is often inadequate or incompatible. Invasive or irreversible interventions can, in fact, alter the physical and hygrometric balance of historic structures, leading to degradation such as interstitial condensation, mould and deterioration of the original materials. Interest in the use of bio-based materials and natural techniques is therefore part of a broader theoretical debate concerning the relationship between conservation, sustainability and technological innovation. Thanks to their natural origin, their compatibility with traditional building techniques and their strong environmental performance, these materials represent a potential synthesis between conservation requirements and energy efficiency objectives.

Keywords: renewable biological resources, sustainability, energy, performance, durability.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Corresponding author

1. Introduction

In the context of sustainable construction and the regeneration of existing buildings, the term 'bio-based material' refers to a category of materials derived, either entirely or to a significant extent, from renewable biological resources of plant or animal origin. These materials differ from conventional materials of fossil or mineral origin in that they have a reduced environmental impact throughout their life cycle and can contribute to construction strategies geared towards sustainability. From a conceptual point of view, a bio-based material is not defined solely by its natural origin, but also by the way in which it is produced, processed and used. In the field of engineering, the definition of a bio-based material is closely linked to the principles of environmental sustainability, the circular economy and the reduction of greenhouse gas emissions. It is important to distinguish the concept of 'bio-based' from that of 'biodegradable' or 'natural'. A bio-based material may be of biological origin but is not necessarily biodegradable in the short term, particularly if it has undergone specific treatments to improve its mechanical performance or durability. Similarly, not all natural materials can be considered bio-based in the strict sense if their origin cannot be traced back to renewable biological processes. In the construction sector, bio-based materials encompass a wide range of products, including materials based on wood, plant fibres, hemp, straw, cork, animal wool and lime derivatives combined with plant aggregates. These materials can be used both as structural elements and, more frequently, as components of the building envelope and as insulation materials. From an environmental perspective, one of the most significant aspects of bio-based materials is their ability to contribute to the reduction of carbon dioxide emissions. During the growth phase of plant resources, atmospheric carbon is absorbed and stored in the biomass. This phenomenon, known as carbon storage, allows for the partial offsetting of emissions associated with the production and transport phases of the material. From a life-cycle analysis perspective, many bio-based materials have a more favourable emissions balance than traditional materials. From an engineering perspective, interest in bio-based materials stems not only from environmental considerations but also from their physical and hygrometric properties. Many of these materials are characterised by a porous structure and good

moisture-regulating properties, making them particularly suitable for projects involving historic buildings. Compatibility with traditional materials and the ability to maintain the breathability of the building envelope are, in fact, fundamental requirements in energy retrofitting projects for historic buildings. A further distinctive feature of bio-based materials is their versatility of application. They can be used in the form of insulation panels, lightweight aggregates, natural plasters, thermo-hygrometric balancing layers and composite systems. This flexibility allows design solutions to be adapted to the specific needs of the building, avoiding invasive works and favouring compatible and reversible energy improvement strategies. In the context of energy retrofitting, bio-based materials offer an alternative to conventional insulation materials of synthetic or mineral origin. Although, in some cases, they exhibit lower thermal performance when assessed solely in terms of thermal conductivity, they offer significant advantages in terms of dynamic behaviour, hygrometric storage capacity and the reduction of condensation risks. These characteristics are particularly relevant in historic buildings, where the primary objective is not to achieve maximum performance, but rather a balanced and sustainable improvement in energy and environmental conditions. In conclusion, bio-based materials can be defined as building materials derived from renewable biological resources, characterised by a reduced environmental impact and physical and hygrometric properties compatible with historic buildings.

2. General properties of bio-based materials

Bio-based materials possess a range of physical, thermal, hygrometric and environmental properties that distinguish them significantly from conventional building materials. These properties are particularly relevant in the context of the energy retrofitting of historic buildings, where the performance of materials must be assessed not only in static terms, but also in relation to the dynamic behaviour of the building envelope and their compatibility with existing traditional materials. From a physical perspective, bio-based materials are generally characterised by a porous and fibrous structure, stemming from their biological origin. This microstructure has a decisive influence on the material's thermo-hygrometric performance, facilitating the absorption, accumulation and release of moisture. The porosity,

distributed across different scales (macro, meso and micro-pores), allows the material to interact actively with the surrounding environment, contributing to the regulation of the indoor microclimate. A particularly significant aspect is the specific heat capacity of bio-based materials, which enables them to accumulate and release heat gradually. This behaviour helps to improve the dynamic performance of the building envelope, increasing the phase shift and attenuation of the thermal wave. In particular, these characteristics are advantageous during the summer months, as they help to limit internal overheating and improve comfort without the need for active cooling systems. In bio-based materials, thermal behaviour is often closely linked to moisture content. The presence of water in the pores affects insulating performance, but at the same time allows for more effective regulation of indoor conditions, making the material less sensitive to external climatic variations. Many bio-based materials also exhibit a marked hygroscopic capacity, i.e. the ability to absorb and release moisture depending on environmental conditions. This regulatory mechanism helps to stabilise the relative humidity of indoor environments, improving living comfort and reducing the risk of surface condensation. In the context of historic buildings, the breathability of bio-based materials is particularly important, as it helps preserve the original hygrometric behaviour of traditional masonry. The introduction of impermeable or low-permeability materials can in fact alter this balance, promoting deterioration. From a mechanical point of view, bio-based materials generally have lower strength than traditional structural materials, which is why their use is mainly limited to non-structural functions, such as thermal insulation or the creation of levelling layers. However, their flexibility and adaptability make them compatible with existing structures, reducing the risk of cracking and detachment. From an environmental perspective, bio-based materials offer numerous advantages linked to the renewable origin of their raw materials and their reduced environmental impact throughout their life cycle. The embodied energy required for the production of these materials is generally lower than that required for conventional industrial materials, resulting in a reduction in climate-changing gas emissions. A particularly significant aspect is the ability of bio-based materials to store carbon during the growth phase of plant resources. This contributes to a favourable environmental balance, especially if the material is used in long-term applications, such as in historic

buildings. From a circular economy perspective, many bio-based materials are also reusable, recyclable or disposable with a reduced environmental impact, promoting more sustainable resource management.

3. Main bio-based materials

The main bio-based materials that can be used include hemp, cork, plant fibres and other materials of natural or animal origin.

3.1. Hemp and lime-hemp-based materials

Hemp is one of the most promising bio-based materials for sustainable construction. It is a fast-growing plant that requires little water and has a high capacity to absorb carbon dioxide throughout its life cycle. In construction, hemp is mainly used as a plant aggregate combined with lime-based binders, resulting in materials known as lime-hemp. A further advantage of lime-hemp materials is their chemical and mechanical compatibility with historic masonry. The presence of lime as a binder ensures good adhesion to traditional substrates and reduces the risk of cracking and deterioration over time. Furthermore, these materials can be applied in a relatively simple and reversible manner, in line with conservation principles.

3.2. Cork

Cork is a bio-based material of natural origin, obtained from the bark of the cork oak. It is a renewable resource, as the bark can be harvested periodically without damaging the tree. From an environmental perspective, cork has a particularly favourable carbon footprint, thanks to the ability of cork oak forests to absorb carbon dioxide.

3.3. Plant fibres

Plant fibres encompass a wide range of materials, including straw, flax, cotton and other fibres of agricultural origin. These materials are characterised by a light, porous structure, which gives them good insulating properties and a remarkable ability to regulate humidity.

4. Advantages and limitations of bio-based materials

The use of bio-based materials in the construction sector, and in particular in energy-efficiency refurbishment projects for historic buildings, offers numerous advantages but also has certain limitations that must be carefully assessed during the design phase. A balanced analysis of these aspects is essential to avoid ideological approaches or oversimplifications, and instead to facilitate an informed and technically sound choice of solutions. One of the main advantages of bio-based materials is their reduced environmental impact throughout their life cycle. As they are derived from renewable biological resources, they help to limit the use of non-renewable raw materials and reduce the embodied energy required for production. In many cases, the growth phase of plant resources involves the absorption of carbon dioxide from the atmosphere, resulting in a carbon sequestration effect that improves the material's overall environmental balance. From a circular economy perspective, many bio-based materials offer good potential for reuse, recycling or low-environmental-impact disposal at the end of their useful life. Alongside their many advantages, bio-based materials also have certain performance limitations that must be carefully considered. In particular, their thermal performance in terms of thermal conductivity may be lower than that of high-performance synthetic insulation materials. This implies that, to achieve the same level of insulation, greater thicknesses may be required, which are not always compatible with the dimensional constraints of historic buildings. From a mechanical point of view, many bio-based materials have lower strength than traditional materials, limiting their use to non-structural applications. This is not necessarily a disadvantage in energy-efficient refurbishment projects, but it does require careful design of the layers and fixing systems. Another limitation concerns the long-term durability of bio-based materials, which can be affected by environmental factors such as humidity, biological attack and climatic variations.

5. Conclusions

From an environmental perspective, a comparison between bio-based materials and traditional materials reveals significant differences throughout their entire life cycle. Conventional industrial materials generally require

large amounts of energy to produce and are associated with significant emissions of greenhouse gases. Furthermore, their disposal at the end of their life can lead to problems with waste management and recycling. Bio-based materials, derived from renewable resources, have lower embodied energy and contribute to reducing carbon dioxide emissions, partly due to the phenomenon of carbon sequestration. From the perspective of sustainability and reducing the environmental impact of the construction sector, these materials make a significant contribution, particularly when used in long-term projects such as those involving historic buildings.

One frequently debated issue concerns the durability of bio-based materials compared to traditional ones. Industrial materials are generally designed to ensure consistent performance over time, but they may be less resilient to changing environmental conditions or installation errors. Bio-based materials, if properly designed and protected, can offer good durability, especially when used in combination with compatible materials. However, they require greater attention during the design and maintenance phases, particularly regarding protection against moisture and biological agents. This aspect should not be considered an absolute limitation, but rather a condition to be managed with care. In summary, a comparison between bio-based and traditional materials highlights how each category has specific strengths and weaknesses. In new-build contexts, high-performance industrial materials may be better suited to achieving high energy standards. Conversely, in historic buildings, bio-based materials offer significant advantages in terms of compatibility, hygrometric behaviour and environmental sustainability.

The choice of material should therefore not be based on rigid or prescriptive criteria, but on a comprehensive assessment that takes into account the building's characteristics, the objectives of the project and conservation requirements. In this context, bio-based materials represent a coherent and strategic technical solution for the energy-efficient refurbishment of historic buildings.

Table 1. Qualitative comparison of bio-based materials for historic buildings .

Material	Thermal Performance	Breathability	Compatibility with historic buildings	Comments
Lime-Hemp	Good	High	Very high	Excellent humidity control
Wood fibre	Good	High	High	Stay cool this summer
Natural plasters	Limited	Very high	Very high	Improve health
Synthetic insulators	Very high	Low	Limited	Risk of condensation

Bibliographic references

Bakhoum, E. S., Garas, G. L., & Allam, M. E. (2015). Sustainability analysis of conventional and eco-friendly materials: A step towards green building. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *10*(2), 788-796.

Barbier, E. B., & Burgess, J. C. (2017). The Sustainable Development Goals and the systems approach to sustainability. *Economics*, *11*(1), 20170028. https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2017-28

Blasizza, E. (2024). Ambiente 2024. Wolters Kluwer Italia, Roma.

Canavese, P., Mondini, N., Zambito, P., Bianco, A., Simonelli, A., & Pavan, S. (2018). Gli aggregati riciclati nelle opere edili pubbliche e private: Le opportunità *ambientali ed economiche.* Valle D'Aosta.

Cárcel-Carrasco, J., Peñalvo-López, E., Pascual-Guillamón, M., & Salas-Vicente, F. (2021). An overview about the current situation on C&D waste management in Italy: Achievements and challenges. *Buildings, 11*(7). https://doi.org/10.3390/buildings11070284

European Commission. (2016). *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*, European Commission: Brussels, Belgium.

Ferrara, P. L., La Noce, M., & Sciuto, G. (2023). Sustainability of Green Building Materials: A Scientometric Review of Geopolymers from a Circular Economy Perspective. *Sustainability, 15*(22), 16047. https://doi.org/10.3390/su152216047

Ginga, C.P., Ongpeng, J.M.C., & Daly, M.K.M. (2020). Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. *Materials*, *13*, 2970. https://doi.org/10.3390/ma13132970

Iqbal, A., & Swapnil, F. J. (2017). Sustainable green materials for building construction. *International conference on mechanical, industrial and materials engineering (ICMIME2017),* 28-30.

Maglia, S. (2024). *Codice dell'ambiente*. Milano, Casa Editrice La Tribuna.

Tazmeen, T., Qayoom Mir, F. (2024). Sustainability through materials: A review of green options in construction. *Results in Surfaces and Interfaces,* 100206. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100206

Townsend, T.G., Anshassi, M. (2023). *Construction and demolition debris*. Springer International Publishing, New York.

Learning from Bee's Ecological Intelligence: Biomaterials and honeycomb architecture

Stefania De Gregorio

Researcher, Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura, Italy. *stefania.degregorio@unich.it*

Abstract: bees represent one of the most sophisticated examples of ecological intelligence: the management of the hive is governed by principles of circularity, material efficiency and autopoiesis that foreshadow many of the paradigms now at the heart of sustainability research in architecture. The world of bees intersects with that of architecture both through bio-based materials made from beeswax and/or propolis, and through the design inspiration provided by the hexagonal geometry of the honeycomb. A review of recent scientific literature (2018–2025) documents the use of beeswax as a PCM for thermal energy storage in building envelopes, as a binder in thermo-acoustic biocomposites, and propolis as a natural wood preservative with antimicrobial, hydrophobic and antifungal properties. Honeycomb architectures represent a design approach inspired by the geometry of the bee's honeycomb, characterised by hexagonal cells capable of optimising the ratio between structural strength and the quantity of material used. These configurations are used in architecture as sandwich panels, façades, roofing and temporary structures, thanks to their ability to distribute loads evenly. Furthermore, the hexagonal modularity promotes spatial flexibility, adaptability and sustainability. The synergy between beekeeping materials and hexagonal structures opens up a new, unexplored field of inquiry, which must be capable of translating nature's lessons into practical building solutions.

Keywords: beeswax phase change material, propolis wood preservative, hexagon, biomimetic design.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Corresponding author

1. Bee's ecological intelligence

Bees are eusocial organisms whose management of the hive serves as a prime example of collective intelligence applied to the circular use of resources. Within the colony, the production, use and reuse of materials are governed by principles of energy efficiency and optimisation that foreshadow many of the principles now associated with the circular economy and systemic sustainability (Seeley, 2010). At the heart of this ecological intelligence lies beeswax, secreted by the wax glands of worker bees. It is excreted in the form of fine abdominal flakes, which are then chewed, enriched with enzymes and mixed with lipid and pollen components, until they are transformed into the highly regular hexagonal structures of the honeycomb (Hepburn, 2012). The energy cost of this process is particularly high: bees consume around 6.7–8.8 kg of honey to produce 1 kg of wax, with an estimated conversion efficiency of around 8% (Hepburn & Kurstjens, 1988). This makes wax one of the most energy-intensive biological materials found in nature. Precisely because of this cost, colonies have developed sophisticated strategies for reusing the waxy material. Deteriorated or obsolete honeycombs are dismantled, the wax recovered and reused for the construction or repair of new cells, creating a closed-loop system in which the material is continuously reshaped 'cradle to cradle' without any significant loss of its properties. This internal cycle also helps maintain the chemical quality of the hive environment, limiting the accumulation of contaminants, a phenomenon that is, however, found in industrially produced wax sheets. (Wachkoo et al., 2024).

Propolis plays a fundamental role; it is a plant resin collected and processed by bees, whose name derives from the Greek pro (before) and polis (city), indicating its protective function for the hive. Propolis is used to seal cracks, regulate air flow, stabilise internal temperature and humidity conditions, and neutralise potentially harmful biological agents. In particular, bees use it to coat and insulate foreign bodies inside the hive, preventing decomposition. Numerous studies have highlighted its antimicrobial, antifungal and antiviral properties, attributed to the presence of flavonoids, phenolic acids and terpenes (Bankova et al., 2014).

The link between beekeeping products and the built environment has deep historical roots. Archaeological evidence suggests that wax was

already in use in Neolithic contexts, such as at the Çayönü site in Anatolia, where it was employed as a waterproofing agent, fuel and ritual material. In ancient Egypt, beeswax was used to protect painted surfaces, papyri and wooden artefacts, as well as a sealant in shipbuilding. In Roman times, Pliny the Elder documented its use as an insulating material against damp. Traces of wax have also been found in the Lascaux cave paintings, where it was used as a binder for natural pigments (Regert et al., 2001). Propolis has also found historical applications in construction and craftsmanship, particularly as a wood preservative and varnish. It has traditionally been used to protect wooden surfaces, musical instruments and window frames, thanks to its hydrophobic and biocidal properties.

2. Beekeeping materials and components for construction

A review of recent scientific literature (2018–2025) highlights the growing interest in materials derived from beekeeping as bio-based alternatives to traditional petrochemical products in the construction industry. Recent studies demonstrate that incorporating beeswax into phase change materials (PCMs) can significantly improve their performance. Beeswax stabilised with bentonite clay and graphite (Shape Stabilised Composite PCM) exhibits a melting enthalpy of between 96.5 and 105 J/g and a reduction in supercooling of up to 84.13% with the addition of graphite (Rathore et al., 2023). Beeswax has been tested in solar air heating systems, demonstrating a significant increase in thermal storage capacity and an improvement in overall energy efficiency (Abdulmunem et al., 2024). At the building scale, this research finds application in the development of advanced building components. The integration of beeswax into gypsum and paraffin based composites improves the thermal performance of walls, reducing thermal conductivity and increasing energy storage capacity (Medjahed et al., 2024). Furthermore, the use of PCMs in honeycomb structures demonstrates how the combination of beeswax and hexagonal geometry can improve thermal efficiency and the stability of indoor environments (Akeiber, 2024). At the same time, beeswax has also been explored as a binding matrix in thermoacoustic biocomposites: in mixtures based on recycled cellulose, natural resins and plant-based fillers, the wax contributes both to the material's cohesion and its thermal stability (Pop et al., 2024). The

performance achieved in terms of sound insulation and thermal resistance is competitive with that of synthetic materials, confirming the potential of wax as a multifunctional component in sustainable building systems.

Propolis, on the other hand, emerges as a strategic material for the protection and durability of wooden components. Hybrid propolis–silane formulations can also significantly improve the mechanical properties of wood, particularly in conditions of high humidity, thanks to the formation of stable chemical bonds between the phenolic compounds and the lignocellulosic structure (Woźniak et al., 2024). This line of research extends further to the development of wood-polymer composites, in which propolis acts as a functional modifier, increasing biological resistance and positively influencing the thermal and structural properties of the material (Odalanowska et al., 2021).

In addition to wood treatments, the literature documents a growing interest in the use of propolis as a component of multifunctional coatings applicable to metal surfaces and interior plasters (Peres et al., 2018).

3. Honeycomb architectures

The structure of the honeycomb is one of the finest examples of natural optimisation, in which form, material and function are perfectly integrated. The bees' choice of a hexagonal geometry is the result of an evolutionary process that simultaneously maximises material efficiency, storage capacity and structural strength. From a structural point of view, this isoperimetric property translates into an extraordinarily efficient use of material: for the same covered area, the hexagon has a shorter perimeter (and therefore requires less material) than any other regular geometric shape. Furthermore, the cellular structure allows for an even distribution of stresses across the shared walls of adjacent cells, ensuring high specific strength, i.e. an optimal ratio between dead weight and load-bearing capacity. The transition from the beehive to architecture is not only a geometric transposition, it is also a transfer of systemic logic. In contemporary construction, the hexagonal configuration is used in sandwich panels, façades, roofing and temporary structures.

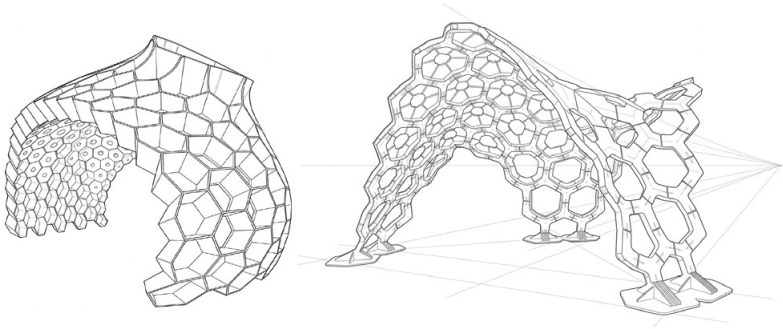


Figure 1. Constructive Geometry Pavilion, Gonçalo Castro Henriques e X-REF, Porto, 2012 (left) and – Carapacks Pavilion, Biberach University, Faculty of Architecture, 2023 (right). [Source: author's elaboration].

One of the most notable examples is the Constructive Geometry Pavilion (University of Porto, 2012), designed by Gonçalo Castro Henriques and X-REF: a structure comprising 185 hexagonal panels made of honeycomb corrugated cardboard that operate on the sandwich panel principle, with two thin outer layers reinforced by a hollow cellular core. Each module is self-supporting and distributes loads across the entire surface without the need for additional supports. Constructed entirely by hand using recyclable materials and interlocking joints, the system demonstrates how lightness can be combined with structural stability (Evolo, n.a.). Another example of a temporary structure is the Carapacks Pavilion, the result of a design-build project completed in 2023 at Biberach University, Faculty of Architecture (Parametric Architecture, n.a.). The system derives its structural integrity from the geometric principle of a double-shell interlocking hexagonal form: all components are free of curvature and torsion and feature perpendicular edges, allowing for cost-effective production using 2.5-axis CNC machines (laser or waterjet). The 1:1 scale prototype, milled from poplar wood and comprising 592 elements, was assembled in approximately 18 hours. The project was developed using parametric design and digital fabrication tools, whilst the assembly process required a collaborative approach that echoes, not least symbolically, the collective and self-organising nature of a beehive.

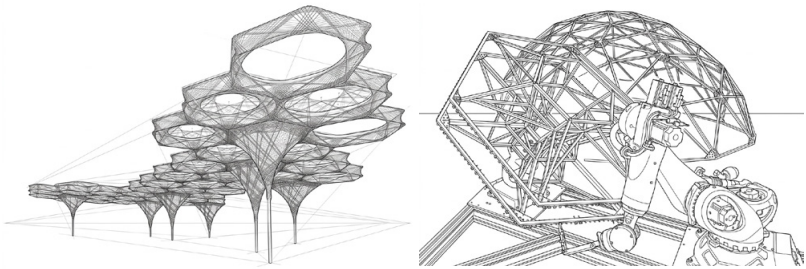


Figure 2. Elytra Filament Pavilion, ICD/ITKE , Londra, 2016-2018.
[Source: author's elaboration].

A more technologically advanced example is the Elytra Filament Pavilion, designed by ICD/ITKE and installed in the courtyard of the Victoria and Albert Museum (London, 2016–2018) (ITKE, n.d.). The system features a tree-like structure supporting hexagonal cellular modules made from glass fibre and carbon filaments, designed to be assembled progressively and reconfigured over time. The structure combines honeycomb principles with robotic production technologies, resulting in a lightweight, expandable and fully dismantlable system. The ability to add or remove modules allows the spatial configuration to be adapted to functional requirements, perfectly embodying the principles of flexibility and incremental growth characteristic of the beehive.

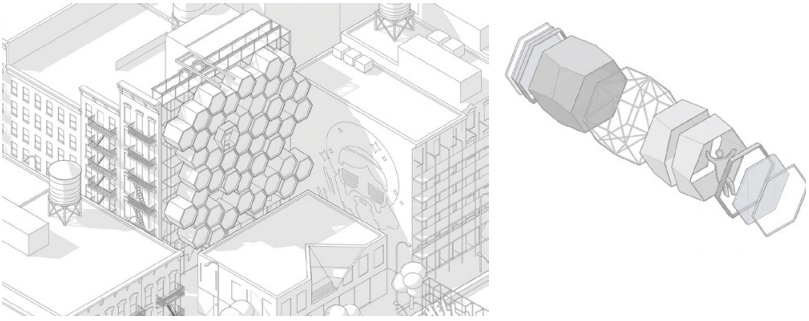


Figure 3. Homed, Shelter with Dignity, Framlab, New York, 2018.
[Source: author's elaboration].

The Homed, Shelter with Dignity project is a social initiative aimed at optimising the built environment, created in 2018 in New York by design studio Framlab (FRAMLAB, n.a.), features hexagonal modules 3D-printed from recyclable bioplastics, which can be attached to a metal scaffolding structure on the blank walls of buildings, forming beehive-shaped 'suspended micro-neighbourhoods'. Each pod has an outer shell of anodised aluminium, an inner shell of 3D-printed polycarbonate clad in wood, and smart glass (PMMA smart glass) on the façade. The modules incorporate environmental comfort technologies, smart lighting and vital signs monitoring, and can be assembled and dismantled in a matter of days.

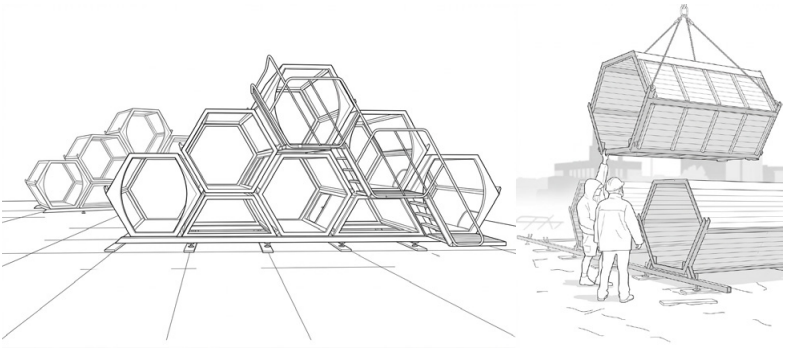


Figure 4. B-and-Bee, Compaan e Labeur, Gand, 2014 (right).
[Source: author's elaboration].

Finally, the B-and-Bee project, designed by the Belgian firm Compaan and Labeur, is a system of stackable hexagonal capsules conceived as an alternative to camping at music festivals. Each unit (1.7 m wide × 1.45 m high) is made of larch wood with a metal frame and contains a double bed, a wardrobe, lighting and an electrical socket; the units stack diagonally up to four levels, accommodating 50 people on just 100 m^2 of floor space. The first prototype of six stacked units was unveiled to the public at the Gentse Feesten (Ghent Festivities) in 2014. The system has since evolved into multiple versions: compact units for festivals, mobile units for campsites and permanent units for leisure accommodation facilities (BBee, n.a.).

The five projects illustrate how hexagonal geometry can be applied across radically different contexts (Table 1). The Constructive Geometry Pavilion and the Carapacks Pavilion operate within an academic framework, demonstrating, with recycled cardboard and CNC-milled wood respectively, that structural efficiency and production simplicity are fully compatible. The Elytra Filament Pavilion pushes the honeycomb paradigm to its technological frontier, combining robotic fabrication with the ability to expand over time. Homed transposes the modular logic into a social response, attaching habitable pods to existing urban structures without any foundation works. B-and-Bee explores the commercial dimension, optimising temporary housing density. Modularity, the reversibility of connections, incremental growth through the addition of cells, and the ability to adapt to the context without losing the properties of the whole are characteristics shared by both the honeycomb and the finest contemporary honeycomb architecture. The examples cited reveal how the geometry and logic of the honeycomb have evolved into a cross-disciplinary paradigm that brings together biology, engineering and architecture. From artisanal to digital applications, from academic experiments to social solutions, honeycomb architectures demonstrate the potential to combine structural efficiency, production modularity and environmental adaptability. As in the natural beehive, each module retains its autonomy and structural simplicity, yet contributes to a larger, dynamic and cooperative whole.

4. Conclusions

Bees offer an integrated model for managing matter and form, capable of inspiring new design strategies for the built environment. On the one hand, materials derived from beekeeping introduce bio-based solutions with advanced functional properties; on the other, the geometry of the honeycomb suggests efficient and adaptable structural systems.

The significance of this research lies in the possibility of moving beyond a purely formal approach to biomimicry, to instead develop a systemic understanding of natural processes. In this sense, the synergy between beekeeping biomaterials and hexagonal architecture represents an emerging field, as yet little explored but rich in potential. Future developments in this line of research require an integrated approach capable of linking

materials, processes and construction systems. Firstly, it will be essential to improve the mechanical performance of biomaterials derived from beekeeping, overcoming current limitations regarding strength and durability, so as to make them competitive with conventional materials. In parallel, it is necessary to further explore the integration between the material scale and the architectural scale, developing solutions in which the physical and biological properties of the materials directly influence the spatial and structural configuration.

Table 1. Comparison of Honeycomb Architectures' exemplary projects. [Source: author's elaboration].

	Constructive Geometry Pavilion	**Carapacks Pavilion**	**Elytra Filament Pavilion**	**Homed – Shelter with Dignity**	**B-and-Bee**
Typology	Temporary pavilion	Design-build prototype	Expandable installation	Social housing module	Modular hospitality capsule
Main Materials	Recyclable honeycomb corrugated cardboard, interlocking joints	CNC-milled poplar wood	Glass fibre and carbon filaments (robotic fabrication)	Recycled 3D-printed bioplastics, anodised aluminium, smart glass	Larch wood, metal frame
Production Technique	Manual assembly	2.5-axis CNC milling (laser or waterjet)	Robotic filament winding	3D printing + prefabricated components	Standard industrial production
Expandability	Limited	Limited	High – modules addable over time	High – pods attachable to existing walls	Medium – festival, camping, permanent versions
Key Innovation	Lightness and structural stability achieved with waste materials and manual assembly	Double-shell geometry eliminating curvature and torsion, reducing CNC production costs	First application of robotic filament fabrication for an expandable honeycomb structure	Habitable modules integrated into existing urban fabric with no foundation works	50 people on 100 m^2 through hexagonal stacking

Bibliographic references

Abdulmunem, A. R., Mazali, I. I., Samin, P. M., & Sopian, K. (2024). Beeswax as a sustainable thermal energy storage material: Experimental thermal assessment in solar air heater. *Journal of Energy Storage*, *103*, 114398. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114398

Akeiber, H. J. (2024). Numerical and Design Study of Beehive in Building for Thermal Storage During Hours of Absence of Solar Radiation. *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*, 458-470. https://doi.org/10.61268/jt9z6z62

Bankova, V., Popova, M., & Trusheva, B. (2019). Propolis volatile compounds: chemical diversity and biological activity: a review. *Chemistry Central Journal*, *8*(1), 28. https://doi.org/10.1186/1752-153X-8-28

Bbee. https://b-and-bee.com/en/ (accessed: 18.12.2025).

Evolo. https://www.evolo.us/constructive-geometry-pavilion-investigates-dome-structures-through-mass-customization/ (accessed: 15.11.2025).

FRAMLAB. https://www.framlab.com/ (accessed: 21.12.2025).

Hepburn, H. R. (2012). *Honeybees and wax: an experimental natural history*. Springer Science & Business Media.

Hepburn, H. R., & Kurstjens, S. P. (1988). The combs of honeybees as composite materials. *Apidologie*, *19*(1), 25-36. https://doi.org/10.1051/apido:19880102

ITKE. https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/ (accessed: 10.01.2026).

Medjahed, B., Dardouri, S., Hammou, H., Fellouh, F. Z., & Arıcı, M. (2024). Paraffin/beeswax/plaster as thermal energy storage composite: Characterization and application in buildings. *Journal of Energy Storage*, *88*, 111344. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111344

Odalanowska, M., Woźniak, M., Ratajczak, I., Zielińska, D., Cofta, G., & Borysiak, S. (2021). Propolis and organosilanes as innovative hybrid modifiers in wood-based polymer composites. *Materials*, *14*(2), 464. https://doi.org/10.3390/ma14020464

Peres, R. S., Zmozinski, A. V., Brust, F. R., Macedo, A. J., Armelin, E., Aleman, C., & Ferreira, C. A. (2018). Multifunctional coatings based on silicone matrix and propolis extract. *Progress in Organic Coatings*, *123*, 223-231. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.07.015

Parametric Architecture https://parametric-architecture.com/carapacks-pavilion-uses-double-shell-interlocking-structures-for-easy-assembly-of-curved-surfaces/ (accessed: 12.01.2026).

Rathore, P. K. S., Gupta, K. K., Patel, B., Sharma, R. K., & Gupta, N. K. (2023). Beeswax as a potential replacement of paraffin wax as shape stabilized solar thermal energy storage material: An experimental study. *Journal of Energy Storage*, *68*, 107714. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107714

Regert, M., Colinart, S., Degrand, L., & Decavallas, O. (2001). Chemical alteration and use of beeswax through time: accelerated ageing tests and analysis of archaeological samples from various environmental contexts. *Archaeometry*, *43*(4), 549-569. https://doi.org/10.1111/1475-4754.00036

Wachkoo, A. A., Nayik, G. A., Uddin, J., & Ansari, M. J. (Eds.). (2024). *Honey bees, beekeeping and bee products*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003354116

Woźniak, M., Mania, P., Roszyk, E., & Ratajczak, I. (2021). Bending strength of wood treated with propolis extract and silicon compounds. *Materials*, *14*(4), 819. https://doi.org/10.3390/ma14040819

Recycling as a pedagogical strategy: the educational building as a sustainability laboratory. Architecture that teaches sustainability: the building as a learning tool

Pilar Rodrigo-Catalán*

Lecturer, Universitat Politècnica de València, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Spain. *pirodca@csa.upv.es*

Carla De-Juan-Ripoll

PhD Lecturer, Universitat Politècnica de València, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Spain. *cardejua@csa.upv.es*

Abstract: recycling architecture provides an opportunity to reimagine the relationship between technology, materiality, and learning. This paper proposes pedagogical tectonics that makes the invisible processes of sustainability visible, transforming infrastructure and construction into educational tools. First, making recycled water visible becomes a strategy to reveal natural cycles and reconnect users with the vital flow of this resource. Second, exposing reused materials acts as a gesture of transparency that teaches the principles of the circular economy while reducing environmental impact. Third, incorporating demountable structures introduces the idea of reversibility, demonstrating that architecture can adapt, disassemble, and reemerge in new contexts without loss of value. Finally, displaying construction processes turns the building site into an open classroom, fostering responsibility toward the environment and appreciation for labor and craft. Through these four principles, the paper argues that tectonics can transcend its material dimension to become curricular content—a language that teaches sustainability through form, matter, and process. Within this framework, buildings—particularly schools—can be understood as environments where sustainability is not only performed but also made legible and experientially accessible. Advancing construction practices in this direction may contribute to a more transparent and educationally engaged approach to sustainable design.

Keywords: recycling, sustainability, educational buildings, reversible construction, reused materials.

© BY-NC-SA Luis Palmero Iglesias, Graziella Bernardo, Stefania De Gregorio | Universitat Politècnica de València

* Corresponding author

1. Introduction

1.1. The environmental crisis and the role of the educacional architecture

The accelerating climate crisis and the progressive depletion of natural resources have placed sustainability at the center of contemporary architectural discourse (IPCC, 2023; UNEP, 2024). Beyond regulatory compliance and technological optimization, the challenge today is cultural: societies must internalize new environmental values and behaviors if long-term transformation is to occur. In this context, education plays a decisive role. Environmental awareness cannot be postponed to higher education or professional training; it must be cultivated from early stages, when cognitive frameworks and ethical sensibilities are still being formed (Ardoin and Bowers, 2020). Schools, therefore, are not merely neutral containers of instruction but strategic environments where ecological literacy can be embodied, experienced, and normalized in everyday life (Havin, 2023). However, much of contemporary "sustainable" architecture remains focused on performance metrics—energy efficiency, water savings, carbon reduction—often communicated through technical reports rather than lived experience. While these achievements are essential, they do not automatically translate into understanding. This reveals a crucial distinction between a building that is efficient and a building that teaches efficiency. The former optimizes resource use; the latter makes processes legible, tangible, and cognitively accessible. If sustainability is to become a shared cultural practice rather than an abstract objective, educational buildings must move beyond hidden technological solutions and become active pedagogical agents, transforming environmental systems into experiential learning tools (Schwartz, 2013).

1.2. Building as a Learning Tool

As mentioned above, buildings can operate not only as shelters or functional containers but also as learning tools that actively communicate knowledge to their users. In educational environments, this perspective has led to design strategies where the architecture itself becomes a didactic

interface, turning spatial, structural, and technical elements into tangible curricular content. Within this framework, the building conveys concepts such as measurement, geometry, physics, or social interaction through its materiality, form, and details, allowing students to learn by direct observation and embodied experience rather than exclusively through abstract instruction. Examples include hinged or pivoting doors that project angle marks onto the floor, transforming everyday use into a practical exercise in mathematics, or circulation spaces that explicate scales, distances, and proportions to support numeracy and spatial reasoning. Similarly, exposing the structural system or mechanical and electrical services in schools helps children understand how buildings stand, breathe, and function, demystifying construction and encouraging curiosity about technology and making.

This conception of "building as a learning tool" (Chupin et al., 2021) has been explored in various educational projects around the world, where school facilities deliberately externalize their systems and performance to support student-centered, experiential learning. Studies on Australian "green" academic buildings, such as the Swanston Academic Building at RMIT University, underline how architectural and environmental features can be used to teach students about building performance, comfort, and resource use through everyday interaction. Other initiatives align architectural design with curriculum objectives, using façade elements, ventilation devices, or daylight control systems as live demonstrations of physics, climate, and technology. While many of these experiments focus on environmental performance, the same logic can be extended explicitly to sustainability education: infrastructures for water, energy, materials, and construction processes can be made visible and legible so that users learn how cycles, efficiencies, and responsibilities are materially enacted in space. In this sense, sustainable school architecture does not merely reduce impact; it also becomes an active pedagogical medium that teaches sustainability through its own tectonic expression and operational transparency.

2. Objectives

The general objective of this paper is to propose the concept of pedagogical tectonics of recycling as a design framework for educational architecture.

The study seeks to reposition recycling not only as a technical strategy aimed at environmental optimization, but as a didactic language capable of conveying principles of sustainability through architectural form, material articulation, and constructive expression.

To achieve this aim, the paper develops the following specific objectives:

- To conceptualize recycling as a pedagogical resource embedded in the tectonic configuration of the building, moving beyond its conventional understanding as a performance-driven solution.
- To define how architectural elements—materials, structures, infrastructures, and construction processes—can operate as carriers of environmental knowledge.
- To identify and articulate four operative principles through which recycling can become spatially and constructively legible.

3. Pedagogical Tectonics of Recycling

The following outlines possible strategies for the pedagogical tectonics of recycling, proposing how sustainability principles can be integrated into the design and use of educational buildings.

3.1 Making recycled water visible

Making recycled water visible transforms a traditionally hidden technical system into an everyday pedagogical experience. By incorporating open gutters that reveal the collection of rainwater, transparent or partially exposed storage tanks, and clearly marked permeable pavements, the project allows users to follow the path of water through the building and landscape. Integrated phyto-purification systems in courtyards turn treatment processes into living laboratories, where vegetation makes purification cycles tangible and observable over time. Complementing these spatial devices, real-time displays of consumption and reuse frame water as a finite resource, linking use, saving, and regeneration. In a similar way, the informational signs in the restrooms of the Glyn Davis Building at Melbourne School of Design demonstrate how such visual and explanatory strategies can make recycled water systems legible and pedagogically meaningful for everyday users. Through this set of strategies, recycled water ceases to

be an invisible infrastructure and becomes a didactic medium that teaches natural cycles, interdependence, and environmental responsibility.



Figure 1. Image of the informational sign in the restrooms of the Glyn Davis Building at Melbourne School of Design. [Source: www.youtube.com/@UniversityofMelbourne].

3.2 Exposing reused materials

Exposing reused materials shifts the focus from a purely economic understanding of recycling to one centered on memory, traceability, and circularity. Walls built with recovered pieces, explicitly labeled, transform each element into a fragment of narrative that connects the school to other buildings, industries, and previous lives of the material. A visible catalogue of material provenance, whether integrated into the circulation spaces or directly on the surfaces, allows students to read where components come from, how they have been transformed, and why they have been conserved. Facades assembled from industrial offcuts and floors made of carefully documented reclaimed timber make imperfections, patinas, and heterogeneity part of the aesthetic and pedagogical language. Similarly, the heritage-listed Joseph Reed façade, originally fronting the Bank of New South Wales at Melbourne School of Design, illustrates how documenting

and exposing material history can make architectural memory legible and educational for students. In this way, reused material becomes a didactic resource that makes the principles of the circular economy tangible, while simultaneously preserving the memory of the environmental and social histories embedded in the architecture.



Figure 2. Image of heritage-listed Joseph Reed façade, originally fronting the Bank of New South Wales, at Melbourne School of Design. [Source: Google maps by Elliot Bledsoe, 2018].

3.3 Incorporating demountable structures

Incorporating demountable structures turns the structural system into a lesson on reversibility and future-oriented thinking. Instead of being conceived as a fixed and irreversible framework, the building is assembled through modular, bolted systems, prefabricated timber elements, and façades designed to be dismantled, repaired, or reconfigured over time. Classrooms that can be expanded or reduced, and components dimensioned and detailed for future reuse, demonstrate that construction is not a one-way process but a sequence of reversible operations. In a similar way, The Garden Building at RMIT in Melbourne, constructed with bolted

metal profiles and timber beams, exemplifies how exposing and designing for disassembly can teach students about structural reversibility and the potential for a second life of materials. In this approach, recycling is anticipated from the moment of design: every joint, module, and panel makes explicit the possibility of disassembly and a second life, ensuring that materials can be separated and recycled individually at the end of their service life. The structure thus becomes a tangible syllabus on temporality, adaptability, and the ethical imperative to think about what will happen to architecture when it is no longer needed in its current form.



Figure 3. Image of The Garden Building in RMTI in Melbourne.
[Source: WikiCommons by Rob Deutscher, 2019. Creative Commons Attribution 2.0 Generic license].

3.4 Displaying construction processes

Making construction processes visible reframes building not as a finished object, but as an ongoing, shared responsibility. Exposed services, structure, and joints reveal how the building stands, breathes, and is assembled, turning ceilings, walls, and corridors into continuous cross-sections that

can be read and discussed. Didactic panels that explain how the building was designed, built, and maintained translate technical decisions into accessible narratives about resources, labor, and environmental impact. Similarly, in Building 106, students participated directly in the project and can observe displayed construction processes in interior spaces, showing how hands-on involvement makes the building's assembly and maintenance legible and pedagogically meaningful. Open workshops and maker spaces linked to the upkeep of the school invite students to participate in repair, adaptation, and small-scale construction, blurring the boundary between user and builder. In this way, tectonics becomes explicit curricular content: the articulation of parts, materials, and connections teaches care, precision, and accountability, positioning construction as a collective ethical practice rather than a remote, invisible operation.



Figure 4. Image of displayed construction processes in an interior space of Building 106 – OurPlace at RMIT University in Melbourne. [Source: YouTube - Australasian Campuses Towards Sustainability].

4. Conclusions and discussion

Educational architecture is increasingly expected to respond to environmental challenges; however, its transformative potential remains limited when sustainability is treated primarily as a technical performance issue rather than as an intelligible spatial experience. The shift proposed is therefore not from inefficiency to efficiency, but from opacity to legibility.

Educational buildings should not only operate sustainably; they should make sustainability understandable. When water cycles are spatially visible, when reused materials retain traces of their previous lives, when structural systems are reversible and demountable, and when constructive layers are exposed rather than hidden, recycling transcends its technical dimension and becomes a cultural and pedagogical practice. In this sense, sustainability moves from being a background operational parameter to becoming an explicit, everyday experience. Under this perspective, the building itself ceases to be a neutral container of learning and becomes an active component of the educational process, embedding ecological values directly into spatial and constructive decisions.

Conceiving recycling as a pedagogical strategy implies that educational sustainability must be incorporated from the earliest stages of the design process, rather than appended as a technical layer once formal decisions have already been fixed. If the goal is to make ecological processes legible and meaningful, this intention must inform spatial organization, material selection, structural logic, and detailing from the outset. At the infrastructural scale, systems such as rainwater harvesting or greywater treatment should be spatially integrated and narratively legible, allowing users to follow the transformation of resources. At the material and structural scale, reused components, modular assemblies, and demountable systems should be conceived not only for performance and adaptability, but also for their communicative capacity. Furthermore, this approach requires alignment with regulatory frameworks and maintenance strategies, ensuring that visibility, accessibility, and long-term care are supported rather than hindered by normative constraints. Sustainability, understood as educational practice, therefore extends beyond design intent to encompass construction, regulation, use, and upkeep over time.

Ultimately, this perspective expands the role of the architect beyond technical problem-solving toward that of a cultural mediator. Designing for pedagogical tectonics requires deliberate choices about what to reveal, how to sequence perception, and how to support cognitive accessibility across different ages and backgrounds. Recycling, when expressed tectonically, can therefore move beyond compliance with environmental standards and become a shared language through which architecture actively participates in shaping ecological awareness. In educational settings, this

transformation is particularly significant, as the building does not merely house learning—it becomes one of its most persistent and influential teachers.

Bibliographic references

Ardoin, N. M., & Bowers, A. W. (2020). "Early childhood environmental education: A systematic review of the research literature", *Educational research review, 31*, 100353. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100353

Chupin, J. P., Hazbei, M., & Pelchat, K. A. (2021). "Three types of architectural educational strategies (AES) in sustainable buildings for learning environments in Canada", *Sustainability*, *13*(15), 8166. https://doi.org/10.3390/su13158166

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/ (accessed: 01.03.2026).

Schwartz, E. E. (2013). *Architecture as Pedagogy: Designing Sustainable Schools as Three-Dimensional Textbooks*. University of Tennessee, Knoxville.

UNEP – United Nations Environment Programme (2024). *Emissions Gap Report 2024*. Nairobi: UNEP. Disponible en: https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024 (accessed: 01.03.2026).