

RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Digital Strategies for Sustainable Production in the Timber Construction Sector: Informative Models for Resource Optimization

Roberto Cognoli¹, Michele Calvano²

¹ School of Architecture and Design Eduardo Vittoria, University of Camerino

² Department of History, Design, and Restoration of Architecture, Sapienza University of Rome

Primary Contact: Roberto Cognoli, roberto.cognoli@unicam.it

This article has been accepted for publication and undergone full peer review but has not been through the copyediting, typesetting, pagination and proofreading process, which may lead to differences between this version and the Version of Record.

Published: May 26, 2025
DOI: 10.36253/techne-17425

Abstract

This paper describes the technology transfer process involving expertise developed by the University of Camerino and Sapienza University of Rome in the field of timber digitalization and parametric informative models. The research was applied in collaboration with an Interior Contract company in the Lazio region for the design of a complex wooden architectural element. The adoption of a methodology based on informed digital models, spanning from design to fabrication, enabled a reduction in production waste (-30%) and an optimization of design and production time (-20%). The case study demonstrates how the synergy between multidisciplinary research expertise and the industrial sector can generate efficient and replicable solutions. From an academic perspective, the experimentation has strengthened the collaboration between universities and industry, fostering the development of transferable know-how for future applications.

Parole chiave: Technology Transfer; Timber Digitalization; Informative Models; Parametric Design; Visual Programming Language

Please cite this article as: Cognoli R., Calvano M. (2025) Digital Strategies for Sustainable Production in the Timber Construction Sector: Informative Models for Resource Optimization / Strategie digitali per la produzione sostenibile nella filiera delle costruzioni in legno: modelli informativi per l'ottimizzazione delle risorse. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

Introduction

Over the past decade, European regulatory frameworks, such as the European Green Deal and the Circular Economy Action Plan, have placed sustainability, resource efficiency, and digital innovation at the core of political and industrial agendas. In the construction sector, reducing embodied carbon, minimizing waste, and improving processes across the life cycle have become strategic priorities. Timber, in both its natural and engineered forms, is gaining increasing interest due to its sustainability, low environmental impact, and renewability (Ramage et al., 2017; Tupenaite et al., 2023). In particular, advancements in engineered wood products have enhanced the material's performance, expanding its applicability and enabling its use in large-scale architectural projects (Kuzman & Sandberg, 2023). Although the increased use of timber can significantly contribute to the decarbonization of various sectors, unregulated and indiscriminate consumption may exert excessive pressure on forest resources (Ramage et al., 2017). Therefore, a responsible and integrated management of the timber supply chain is essential to balance the opportunities for carbon emission reduction with the need to preserve forest ecosystems (Nepal, Johnston, & Ganguly, 2021). An effective approach to optimizing material use involves conceiving buildings as layered systems with distinct life cycles (Brand, 1994), allowing for planned reuse based on the durability and replaceability of individual components. This principle aligns with the cascading use of wood (Hudert & Pfeiffer, 2019), which promotes a sequential utilization of timber across various sectors to maximize its value and extend its service life before transitioning into secondary applications or biomass production (Szichta et al., 2022). To support these processes, digital technologies for project representation and production play a crucial role. Advanced tools such as parametric modeling, Building Information Modeling (BIM), and digital fabrication enable the monitoring of the entire life cycle of timber, from raw material selection to transformation, installation, maintenance, and subsequent reuse. These technologies optimize resource utilization (time, material, energy) and enhance the adaptability and resilience of construction systems (Menges, Schwinn, & Krieg, 2016; Svilans et al., 2019; Wagner et al., 2020). This study investigates the role of academic research in actively transferring knowledge beyond the university context – including collaborations with industry, professional practice, and stakeholder communities – to promote sustainable timber use practices. Focusing on the Italian context, it explores existing gaps in resource management that hinder the achievement of broader environmental goals while defining constraints and opportunities for a more responsible use of materials. Specifically, the paper presents:

1. The role of timber in construction and the risk of overexploitation – Analyzes the significance of timber in the construction, furniture, and energy sectors, highlighting the risks of overexploitation and the need for integrated management strategies, such as cascading use, to maximize material efficiency.
2. Digitalization of the timber life cycle – Explores digital technologies, including parametric modeling, computational workflows, and material tracking, which optimize supply chain management, reduce waste, and facilitate stakeholder collaboration for a more circular industry.
3. Technology transfer: the collaboration between Unicam and Sapienza – Presents a case study on the integration of advanced digital methodologies for the design and fabrication of a complex timber architectural element, demonstrating the effectiveness of knowledge transfer between research and industry.

4. Scalability of technology transfer for industrial adoption – Discusses strategies to expand the adoption of digital methodologies in the sector, highlighting opportunities to improve the efficiency and sustainability of the timber supply chain on a larger scale.

The Role of Timber in Construction and the Risk of Overexploitation

Timber is a strategic material for global decarbonization due to its low embodied carbon (290 kg CO₂/m³) and its capacity to sequester up to 1.2 tC/m³ over a 60-year period (Gu et al., 2021; Hawkins et al., 2021). However, the increasing demand in the construction, furniture, and bioenergy sectors raises concerns regarding the sustainability of forest resources. European policies promote timber utilization to reduce emissions from the construction sector, which accounts for 37% of the EU's CO₂ emissions. In the Netherlands, the Timber Construction Covenant aims to achieve 20% timber-based construction by 2025, leveraging cross-laminated timber (CLT) to accelerate construction times by up to 40% (Bucci Ancapi et al., 2025). Similarly, in Italy, where timber constitutes 8% of the building stock (FederlegnoArredo), the sector's growth necessitates management strategies to prevent excessive extraction. In the furniture and interior design sector, the short average lifespan of furnishings (6–12 years) generates a significant volume of waste, 17% of which originates from construction debris and 38% from timber manufacturing (Pazzaglia & Castellani, 2023). Furthermore, woody biomass, which constitutes the EU's primary renewable energy source (59%), requires sustainable management to avoid environmental imbalances (Jonsson & Sotirov, 2025). Although 50% of EU forests are certified by FSC or PEFC (Corticeiro, Tomé, & Vieira, 2023), this is insufficient to ensure sustainable management. A cascading use model for timber is essential, extending its useful life through successive reuse cycles – construction, furniture, engineered wood panels, paper and finally biomass (Hudert & Pfeiffer, 2019; Szichta et al., 2022). This approach minimizes the consumption of virgin resources and delays carbon release. However, its implementation requires traceability systems and deconstruction technologies to enable effective and sustainable material recovery.

Digitalization of the Timber Supply Chain and Informed Modeling

The integration of digital technologies in the management of the timber supply chain represents a fundamental strategy for promoting circular models by enhancing traceability, efficiency, and sustainability in production processes (Fig. 1). In alignment with European policies for ecological and digital transitions (Muench et al., 2022), the adoption of advanced tools, such as Material Passports and interoperable databases, facilitates comprehensive tracking of the entire material lifecycle, thereby enhancing reuse potential and minimizing waste by ensuring continuous availability of critical information (Honic et al., 2021; Munaro & Tavares, 2023; Kunic, Cognoli, & Naboni, 2024). The De.Da. project, developed at Unicam, has demonstrated how digitalization of information can facilitate the recovery and reintegration of demolition timber into production processes for architectural components made from secondary raw materials (Ruggiero, Cognoli, & Cocco, 2024). At the same time, digital manufacturing and remanufacturing of timber benefit from the use of CNC machining, Collaborative Robots, and AI-based automated sorting systems, optimize available materials, reduce defects, and improve production efficiency (Garcia et al., 2021; Kunic, Kramberger, & Naboni, 2021; Luo, Gattas, & Tan, 2021). Computational design supports this process through parametric models and generative design, allowing for waste minimization and adaptation of designs to the characteristics of reclaimed materials (Yu & Fingrut, 2022). Additionally, integration with Digital Twins enables continuous performance monitoring, improving long-term resource management (Zhang et al., 2021). A key role in this transformation is played by Visual Programming Language

(VPL), which simplifies the management of information flows between design and production. VPL facilitates the integration of geometric, performance, and environmental data within a unified environment, enhancing process automation and reducing design errors (Garagnani, 2013; Caetano & Leitão, 2019; Caetano, Santos, & Leitão, 2020; Calvano et al., 2022). Furthermore, interoperability with Building Information Modeling (BIM) enhances resource optimization throughout the building lifecycle, facilitating the planning of disassembly and reuse strategies through the efficient management of multiple information layers (ISO 19650-1:2018). The digital solutions developed in academia have reached a level of maturity that makes them implementable in the industrial sector, providing a particular advantage to SMEs by reducing the costs of accessing advanced technologies, optimizing production processes, and enhancing market competitiveness. The adoption of digital workflows and parametric modeling, driven by European policies for Industry 4.0, enables companies to improve resource management, reduce operational costs, and increase competitiveness. The technology transfer of these methodologies, fostered through collaborations between universities and industry, can accelerate the adoption of more sustainable production models.

Technology Transfer: The Collaboration Between Unicam and Sapienza in the Case Study Application

The experimental research conducted by the School of Architecture and Design at the University of Camerino and the Faculty of Architecture at Sapienza University of Rome integrates expertise from two disciplinary fields – Architectural Technology and Representation – to develop methodologies for informed modeling. These methodologies aim to support design and production processes based on resource optimization criteria and sustainability throughout the material life cycle.

Input – Development and Integration of Academic Research

The research carried out at the University of Camerino, funded through the POR Marche FSE 2014-2020 program, has focused on the digitalization of the timber supply chain, with particular attention to automation techniques applied to design and production management. The primary objective has been to reduce raw material consumption and develop reuse strategies for timber through methodologies based on parametric modeling and digital workflows (Cognoli, Cocco, & Ruggiero, 2024). Simultaneously, research at Sapienza University of Rome has concentrated on parametric modeling methodologies and VPL, developing tools capable of integrating geometric and construction data to optimize automated fabrication processes and improve communication between design and production (Calvano & Mancini, 2021). The integration of these competencies facilitated a technology transfer process, applying advanced methodologies in a consultancy for Devoto Design, an SME specializing in Interior Contract. The company focuses on engineering, manufacturing, and installing bespoke furniture with complex and organic geometries. Despite having an in-house technical office dedicated to managing standard projects, the company relies on external expertise for the development of highly specialized solutions.

Output – Application of Digital Models in the Case Study

The project involved the development of an integrated digital workflow for the design and fabrication of the cladding of a helical wooden staircase, characterized by high geometric complexity and significant material waste during processing. Characterized by a freeform geometry, the staircase unfolds over two consecutive flights, seamlessly integrating the underside, balustrade, and steps into a fluid configuration. The design ensures formal continuity and aesthetic coherence. To optimize fabrication and assembly processes, the cladding was discretized into 22 sectors, each consisting of three main elements: underside shell, balustrade, and steps (Fig. 2). Each of these elements was further subdivided into distinct components based on material type, production technology, and

performance requirements. Overall, the structure comprises approximately 1000 coded components, fabricated from five different materials – MDF, poplar blockboard, birch plywood, solid ash, and Tabu veneer – selected according to functional, mechanical, and aesthetic criteria (Fig. 3). The adopted methodology was based on an integrated system of digital models, interconnected through VPL thought Grasshopper plugin, ensuring seamless information and metadata flow across the entire design and production process. This approach optimizes the transition from formal validation to physical realization, enhancing interoperability between parametric modeling and digital fabrication. The workflow begins with the study model, which is developed to digitally validate the project, test materials, and simulate assembly constraints. The generated geometries include metadata related to physical-mechanical properties, tolerances, and connection details. Subsequently, the continuous model undergoes reverse modeling to correct topological inconsistencies and ensure geometric coherence, providing an optimized base for subsequent parametric processing. The procedural model is implemented in VPL to automate the management of geometric and construction parameters, establish dynamic relationships between project variables, and enable real-time updates based on structural and production constraints. The associated metadata define fabrication rules, assembly tolerances, and component connections, facilitating the transition to the executive phase. The fabrication model translates these data into operational instructions for CNC machines and robotic systems, optimizing nesting to reduce material waste. Each element is digitally identified to track its position, dimensional properties, and machining specifications, ensuring quality control throughout the entire production chain. The physical model represents the final outcome of the process, fabricated through CNC machining and subsequent assembly where the manufacturing model serves as a reference to define the assembly sequence, minimizing errors and optimizing execution time. Finally, the management and documentation phase collect and archives generated data, producing a digital as-built model with technical drawings, component lists, and a structured database. This system enables traceability of all necessary information for maintenance, updates, and potential disassembly, reducing errors and optimizing efficiency and sustainability throughout the entire life cycle of the architectural element (Fig. 4), (Fig. 5), (Fig. 6).

Outcome – Results and Impacts

The joint research effort between Unicam and Sapienza on this case study has yielded measurable results in terms of production and environmental metrics. Optimization through nesting models enabled a 30% reduction in material waste compared to a standard process (Fig. 7), while simultaneously enhancing production efficiency, leading to a 20% decrease in overall design and manufacturing time. The digitalization of material-related data facilitates sustainability assessments, simplifying potential Life Cycle Assessments (LCA) and the compilation of Environmental Product Declarations (EPD). From a technological perspective, the collaboration between Unicam and Sapienza demonstrated how the integration of digitalization and parametric modeling can provide scalable solutions for the fabrication of complex artifacts. Moreover, this experience highlighted the potential for knowledge transfer between academia and industry, laying the groundwork for the development of targeted corporate training programs aimed at the adoption of advanced digital workflows.

Scalability of Technology Transfer for Industrial Adoption

Technology transfer serves as a strategic mechanism for bridging the gap between academic research and industrial application, facilitating the adoption and dissemination of innovative methodologies within manufacturing processes. This process relies on a structured collaboration among multiple stakeholders, each playing a distinct role: academic institutions develop advanced

knowledge and tools, industrial enterprises assess their feasibility and guide their practical implementation, while regulatory bodies and funding institutions create the conditions for their widespread adoption. Small and medium-sized enterprises (SMEs), in particular, derive significant benefits from technology transfer, as it allows them to access cutting-edge innovations without bearing the high costs of in-house research and development, thereby enhancing their competitiveness and growth potential. The absence of a cooperative ecosystem among these stakeholders would hinder the transition from theoretical innovation to practical industrial application. The case study presented highlights how the convergence of multidisciplinary research and specific industrial needs can generate highly effective and replicable solutions. The integration of expertise in parametric information modeling and digitalization of the timber supply chain has enabled the resolution of complex design and manufacturing challenges, transforming academic innovation into a structured system implementable at an industrial scale. The synergy between academia and industry extended beyond the mere application of advanced tools; it also redefined production practices, demonstrating how computational methodologies and digital strategies can reshape the relationship between efficiency, sustainability, and product quality. The industrial-scale adoption of the methodologies tested in the timber supply chain requires shared protocols that ensure interoperability between digital tools and manufacturing processes, promoting standardization and adaptability across different production contexts. This transition must be supported by continuous skill development, training professionals capable of working at the intersection of parametric design, automation, and industrial production. The integration of advanced digital technologies can optimize process efficiency, ensuring greater sustainability and competitiveness in the sector.

References

- Brand, S. (1994) *How Buildings Learn: What Happens After They're Built*. Viking.
- Bucci Ancapi, F. et al. (2025) 'How ex ante policy evaluation supports circular city development: Amsterdam's mass timber construction policy', *Journal of Environmental Management*, 376, p. 124516. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124516>.
- Caetano, I. and Leitão, A. (2019) 'Integration of an algorithmic BIM approach in a traditional architecture studio', *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), pp. 327–336. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.11.004>.
- Caetano, I., Santos, L. and Leitão, A. (2020) 'Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design', *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), pp. 287–300. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>.
- Calvano, M. et al. (2022) 'Parametric Processes for the Implementation of HBIM—Visual Programming Language for the Digitisation of the Index of Masonry Quality', *International Journal of Geo-Information*, 11, p. 1. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijgi11020093>.
- Calvano, M. and Mancini, M.F. (2021) 'Testing and Defining a Complex Design Through Digital and Physical Models', *Nexus Network Journal*, 23(4), pp. 995–1016. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00004-021-00569-6>.
- Cognoli, R., Cocco, P.L. and Ruggiero, R. (2024) 'Innovative Timber Upcycling: Digital Strategies for Prolonging Timber Lifespan and Promoting Reuse.', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1402(1), p. 012036. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1402/1/012036>.
- Corticeiro, S., Tomé, M. and Vieira, H. (2023) *Can Forest Certification Schemes Really Drive Economic Value to European Forest Owners?* Available at: <https://doi.org/10.20944/preprints202311.1966.v1>.

- FederlegnoArredo | Federazione imprese settore mobile e arredamento (no date). Available at: <https://www.federlegnoarredo.it/> (Accessed: 10 March 2024).
- Garagnani, S. (2013) Building Information Modeling and real world knowledge. A methodological approach to accurate semantic documentation for the built environment. Available at: <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743788>.
- Garcia, A.B. et al. (2021) 'MATERIAL (DATA) INTELLIGENCE', Proceedings of the 26th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2021, Volume 1, pp. 361–370.
- Gu, H. et al. (2021) 'Carbon Impacts of Engineered Wood Products in Construction', in. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99193>.
- Hawkins, W. et al. (2021) 'Embodied carbon assessment using a dynamic climate model: Case-study comparison of a concrete, steel and timber building structure', Structures, 33, pp. 90–98. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.013>.
- Honic, M. et al. (2021) 'Material Passports for the end-of-life stage of buildings: Challenges and potentials', Journal of Cleaner Production, 319, p. 128702. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128702>.
- Hudert, M. and Pfeiffer, S. (2019) Rethinking Wood: Future Dimensions of Timber Assembly. Birkhauser.
- ISO 19650-1:2018 (no date) ISO. Available at: <https://www.iso.org/standard/68078.html> (Accessed: 3 March 2025).
- Jonsson, R. and Sotirov, M. (2025) 'Future Wood Availability in Europe in Light of Climate and Energy Policy and Geopolitical Developments—A Wood Resource Balance-Based Assessment', Sustainability, 17(3), p. 1291. Available at: <https://doi.org/10.3390/su17031291>.
- Kunic, A., Cognoli, R. and Naboni, R. (2024) 'RE:Thinking Timber Architecture. Enhancing Design and Construction Circularity Through Material Digital Twin', in M.R. Thomsen, C. Ratti, and M. Tamke (eds) Design for Rethinking Resources. Cham: Springer International Publishing, pp. 409–422. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36554-6_26.
- Kunic, A., Kramberger, A. and Naboni, R. (2021) 'Cyber-Physical Robotic Process for Re-Configurable Wood Architecture Closing the circular loop in wood architecture', in. Available at: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.2.181>.
- Kuzman, M.K. and Sandberg, D. (2023) 'Engineered wood products in contemporary architectural use – a concise overview', Wood Material Science & Engineering, 18(6), pp. 2112–2115. Available at: <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2264258>.
- Luo, D., Gattas, J.M. and Tan, P.S.S. (2021) 'Real-Time Defect Recognition and Optimized Decision Making for Structural Timber Jointing', in P.F. Yuan et al. (eds) Proceedings of the 2020 DigitalFUTURES. Singapore: Springer, pp. 36–45. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4400-6_4.
- Menges, A., Schwinn, T. and Krieg, O.D. (2016) 'Advancing Wood Architecture', in Menges, A., Schwinn, T., and Krieg, O. D., Advancing Wood Architecture. 1st edn. Edited by A. Menges, T. Schwinn, and O. D. Krieg. New York: Routledge, 2016.: Routledge, pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.4324/9781315678825-1>.
- Muench, S. et al. (2022) Towards a green & digital future, JRC Publications Repository. Available at: <https://doi.org/10.2760/977331>.
- Munaro, M.R. and Tavares, S.F. (2023) 'A review on barriers, drivers, and stakeholders towards the circular economy: The construction sector perspective', Cleaner and Responsible Consumption, 8, p. 100107. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100107>.

- Nepal, P., Johnston, C.M.T. and Ganguly, I. (2021) 'Effects on Global Forests and Wood Product Markets of Increased Demand for Mass Timber', *Sustainability*, 13(24), p. 13943. Available at: <https://doi.org/10.3390/su132413943>.
- Pazzaglia, A. and Castellani, B. (2023) 'WOOD WASTE VALORIZATION IN EUROPE: POLICY FRAMEWORK, CHALLENGES, AND DECISIONAL TOOLS'.
- Ramage, M.H. et al. (2017) 'The wood from the trees: The use of timber in construction', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, pp. 333–359. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>.
- Ruggiero, R., Cognoli, R. and Cocco, P.L. (2024) 'From Debris to the Data Set (DEDA) a Digital Application for the Upcycling of Waste Wood Material in Post Disaster Areas', in M. Barberio et al. (eds) *Architecture and Design for Industry 4.0: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, pp. 807–835. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36922-3_41.
- Svilans, T. et al. (2019) 'New Workflows for Digital Timber', in, pp. 93–134. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_3.
- Szichta, P. et al. (2022) 'Potentials for wood cascading: A model for the prediction of the recovery of timber in Germany', *Resources, Conservation and Recycling*, 178, p. 106101. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106101>.
- Tupenaite, L. et al. (2023) 'Timber Construction as a Solution to Climate Change: A Systematic Literature Review', *Buildings*, 13(4), p. 976. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings13040976>.
- Wagner, H.J. et al. (2020) 'Towards digital automation flexibility in large-scale timber construction: integrative robotic prefabrication and co-design of the BUGA Wood Pavilion', *Construction Robotics*, 4(3–4), pp. 187–204. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41693-020-00038-5>.
- Yu, B. and Fingrut, A. (2022) 'Sustainable building design (SBD) with reclaimed wood library constructed in collaboration with 3D scanning technology in the UK', *Resources, Conservation and Recycling*, 186, p. 106566. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106566>.
- Zhang, Y. et al. (2021) 'Digital Twin in Computational Design and Robotic Construction of Wooden Architecture', *Advances in Civil Engineering*. Edited by J. Zhang, 2021, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/8898997>.

Images

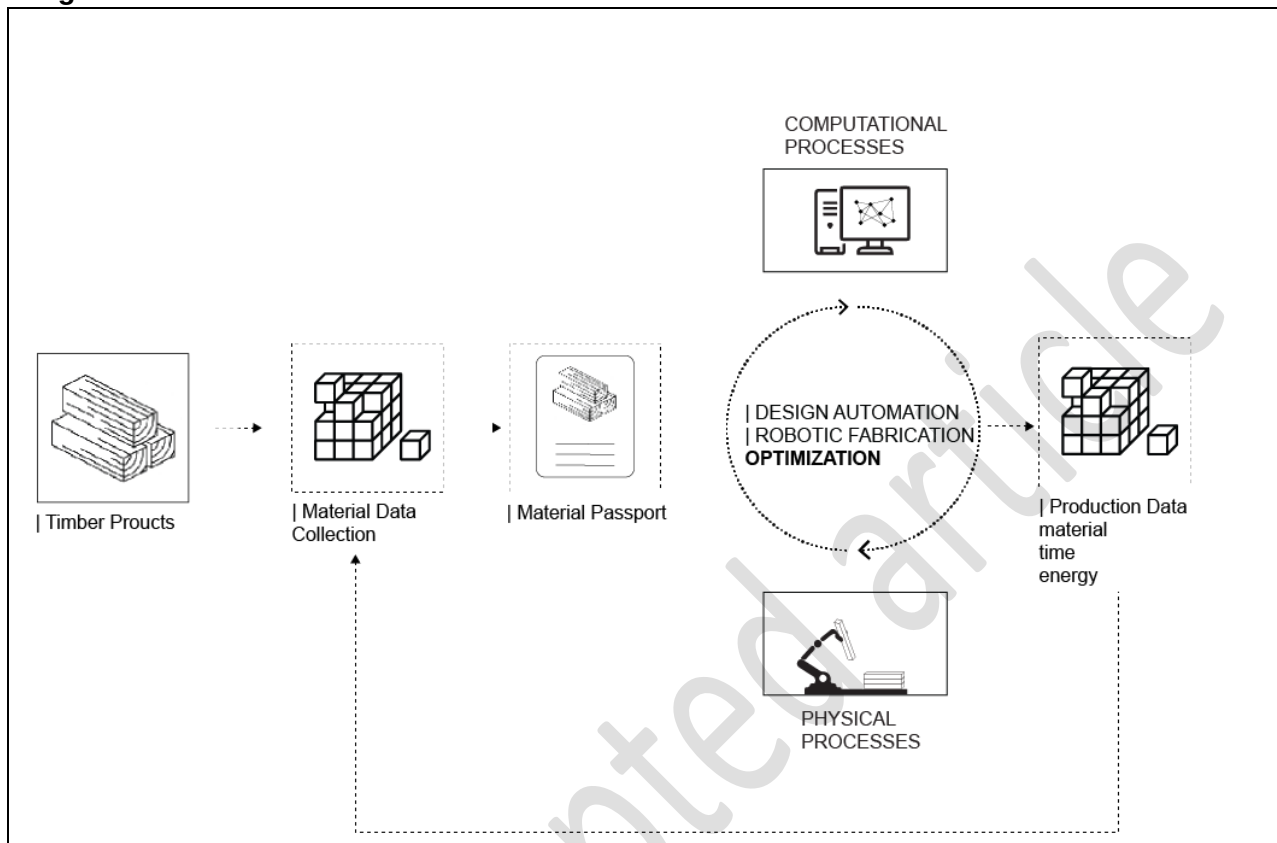


Fig. 01 – Digitization of Wooden Component Production

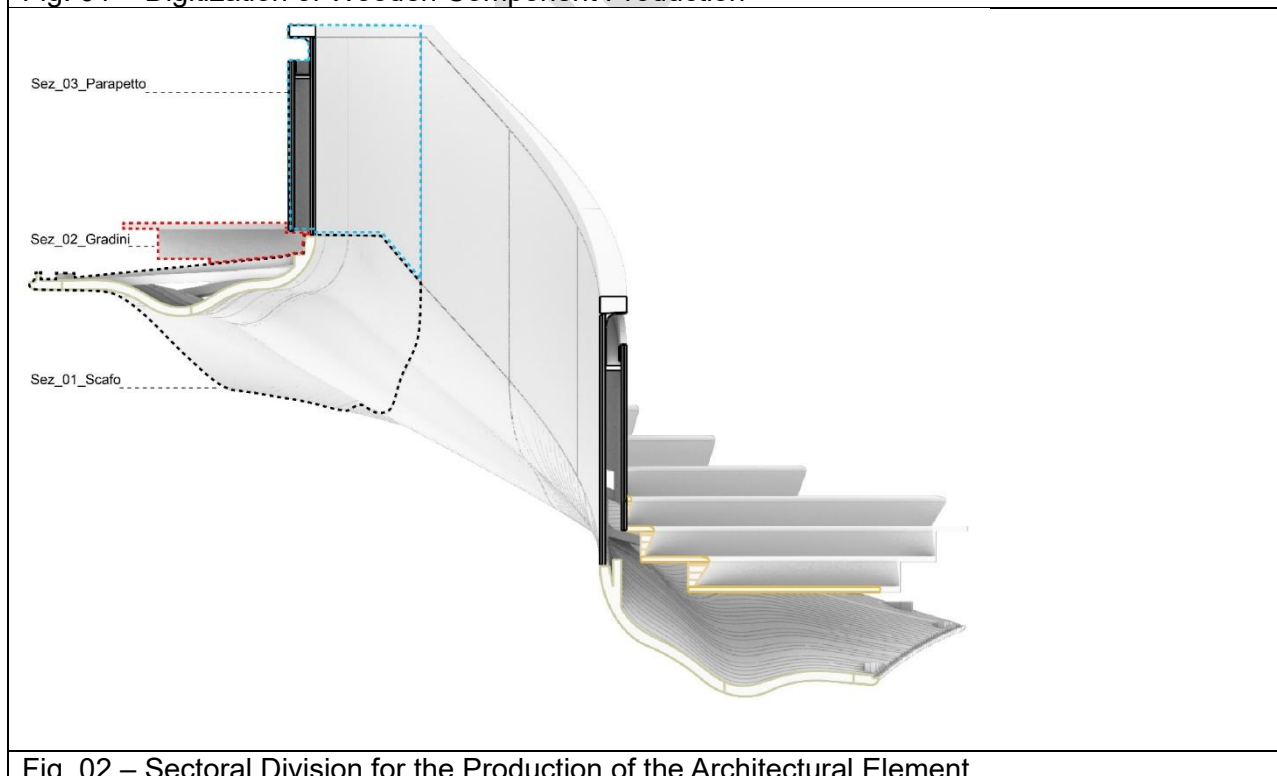


Fig. 02 – Sectoral Division for the Production of the Architectural Element

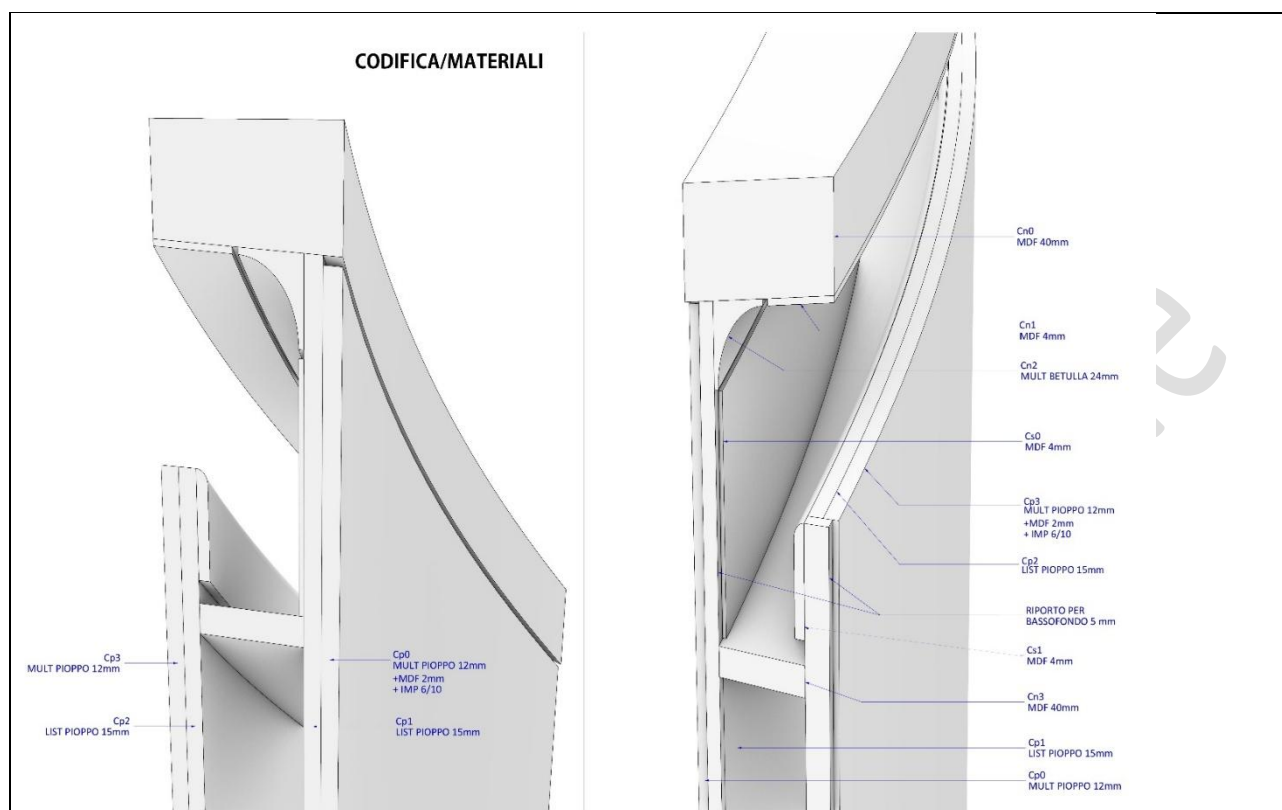


Fig. 03 – Encoding of Materials Transferred to Geometry Attributes via VPL

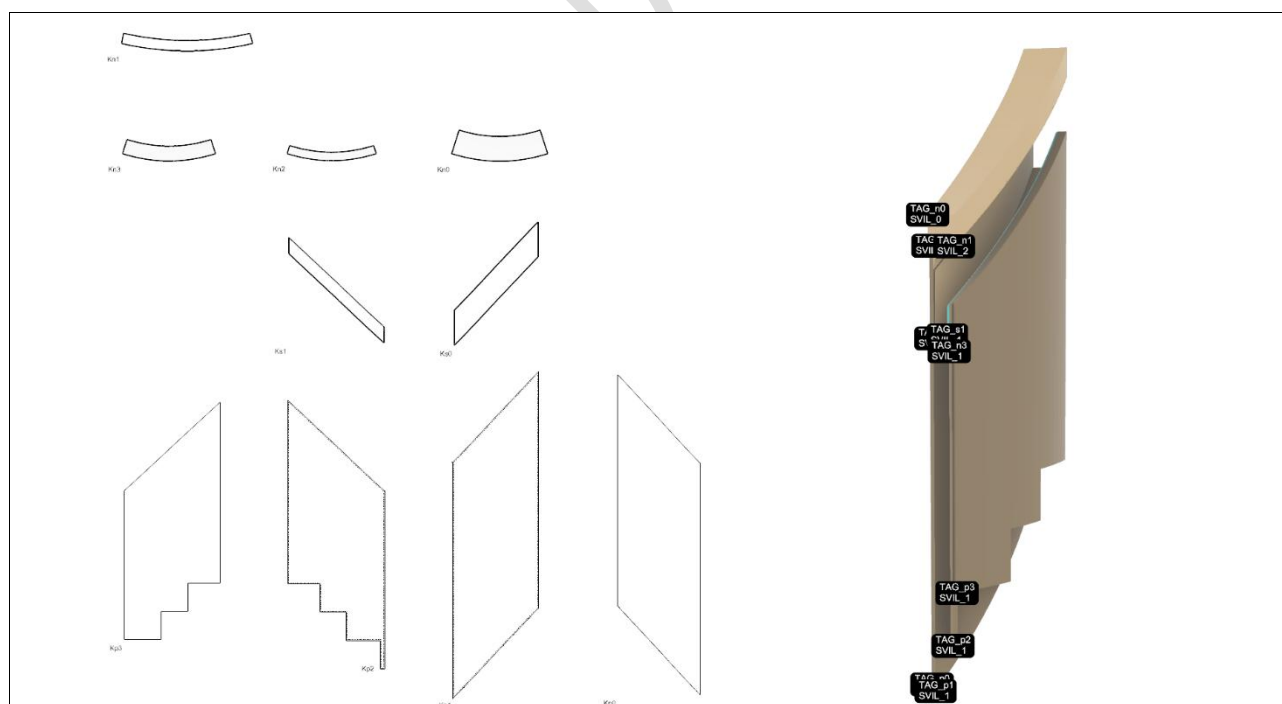
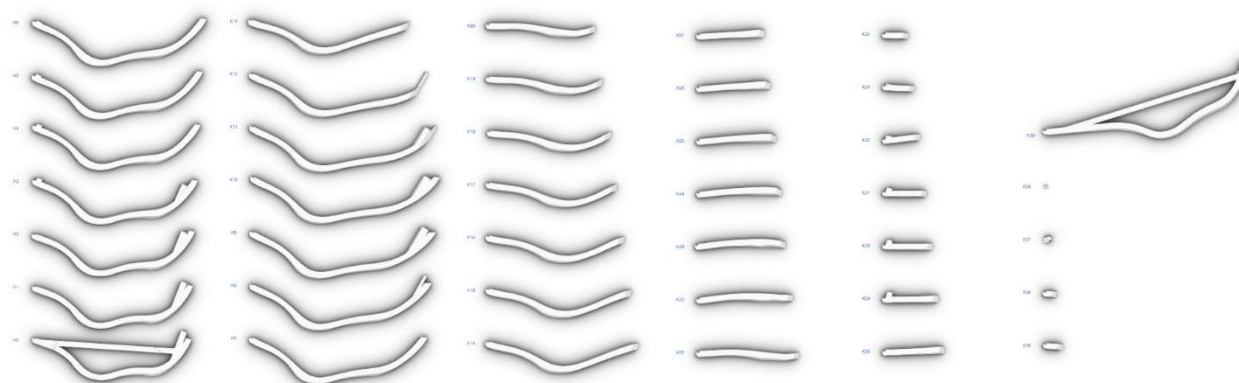


Fig. 04 – Extraction of Machining Paths Through Surface Development Algorithms



Codice Elemento	Materiale	Volume (m³)	Area (m²)	Tecnologia di produzione	Tempo di manifattura (min)	Diametro Fresa	Passate
K01	MDF 40	0.003345	0.309542	Fresatura CNC	5.452842	10	4
K02	MDF 40	0.003626	0.345764	Fresatura CNC	6.31047	10	4
K03	MDF 40	0.004274	0.391188	Fresatura CNC	6.744812	10	4
K04	MDF 40	0.004649	0.412063	Fresatura CNC	6.79737	10	4
K05	MDF 40	0.004632	0.410574	Fresatura CNC	6.25607	10	4
K06	MDF 40	0.004147	0.38306	Fresatura CNC	6.185734	10	4
K07	MDF 40	0.004064	0.367675	Fresatura CNC	2.087478	10	4
K08	MDF 40	0.001197	0.113525	Fresatura CNC	1.907129	10	4
K09	MDF 40	0.001082	0.107321	Fresatura CNC	1.868927	10	4
K10	MDF 40	0.001008	0.097234	Fresatura CNC	1.647882	10	4
K11	MDF 40	0.000862	0.084094	Fresatura CNC	1.428668	10	4
K12	MDF 40	0.000721	0.07135	Fresatura CNC	1.211393	10	4

Fig. 05 – Extraction of Attributes from Geometries in Tabular Format to Enhance Interoperability Across Different Software

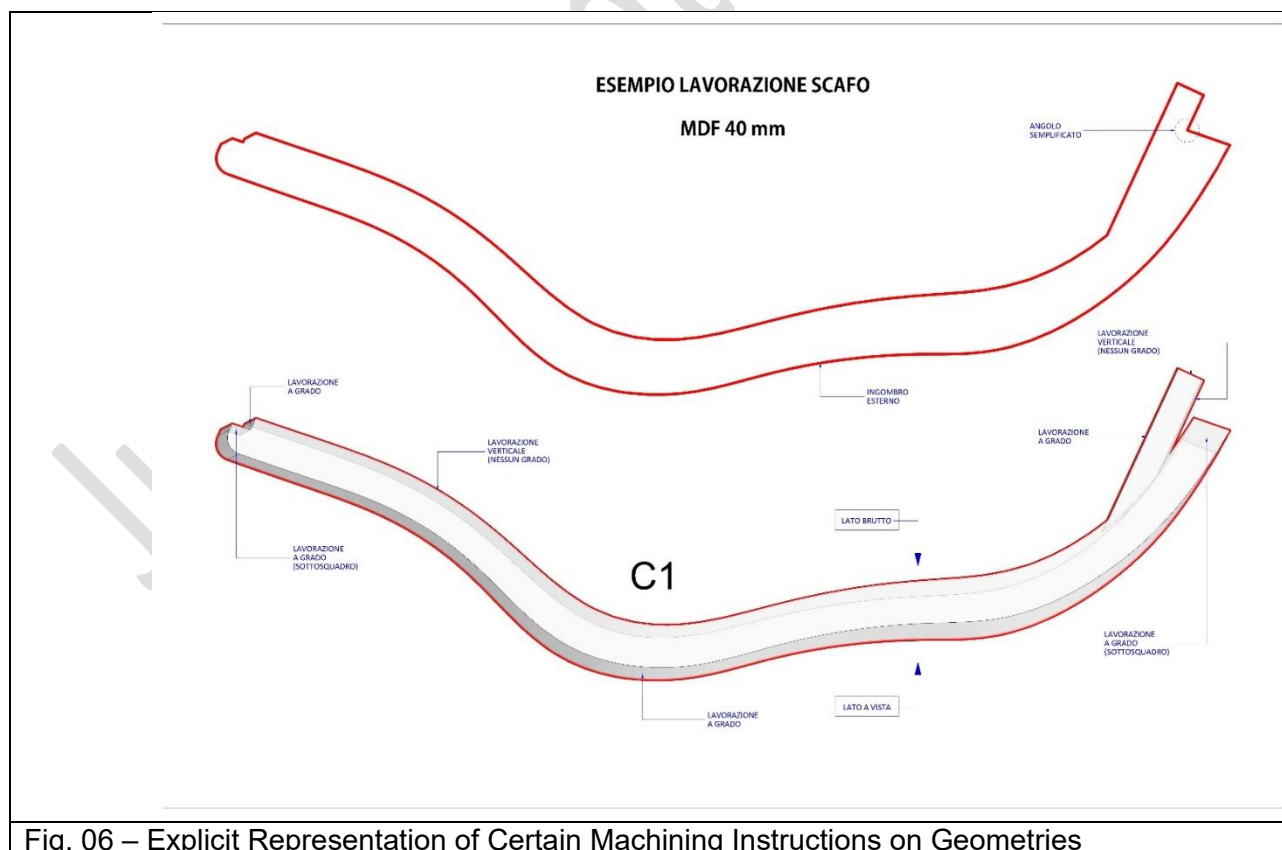


Fig. 06 – Explicit Representation of Certain Machining Instructions on Geometries

MDF SP 40 MM

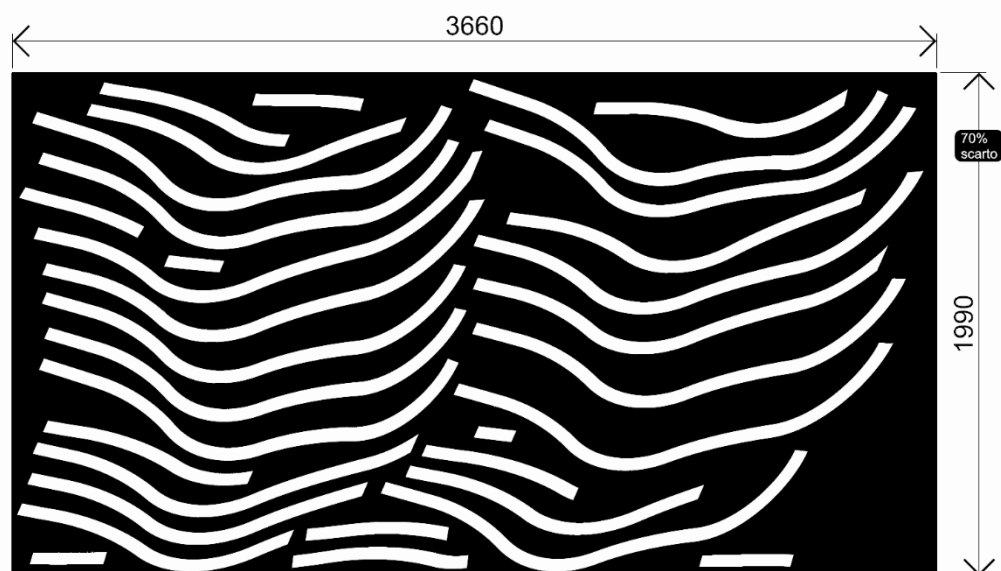


Fig. 07 – The waste generated by this type of geometry reaches 70%, an extremely high value that necessitates dedicated optimization processes, potentially reducing material consumption by up to an additional 30%

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE

Strategie digitali per la produzione sostenibile nella filiera delle costruzioni in legno: modelli informativi per l'ottimizzazione delle risorse

Roberto Cognoli¹, Michele Calvano²

¹ School of Architecture and Design Eduardo Vittoria, University of Camerino

² Department of History, Design, and Restoration of Architecture, Sapienza University of Rome

Primary Contact: Roberto Cognoli, roberto.cognoli@unicam.it

Abstract

Il contributo descrive il trasferimento tecnologico delle competenze sviluppate tra l'Università di Camerino e Sapienza Università di Roma in materia di digitalizzazione della filiera del legno e modelli informativi parametrici, applicato a un'azienda di Interior Contract nel Lazio per la progettazione di un elemento architettonico complesso in legno. L'adozione di una metodologia basata su modelli digitali informati, dalla progettazione alla fabbricazione, ha consentito di ridurre gli scarti di lavorazione (-30%) e ottimizzare i tempi di progettazione e produzione (-20%). Il caso studio dimostra come la sinergia tra competenze di ricerca multidisciplinari e settore industriale possa generare soluzioni efficienti e replicabili. A livello accademico, la sperimentazione ha consolidato la collaborazione tra università e industria, favorendo lo sviluppo di un know-how trasferibile per applicazioni future.

Parole chiave: Trasferimento tecnologico; Digitalizzazione del legno; Modelli informativi; Progettazione parametrica, Visual Programming Language

Introduzione

Negli ultimi dieci anni, i quadri normativi europei, come il Green Deal Europeo e il Circular Economy Action Plan, hanno posto la sostenibilità, l'efficienza delle risorse e l'innovazione digitale al centro delle agende politiche e industriali. Nel settore delle costruzioni, la riduzione del cosiddetto *embodied carbon*, la minimizzazione degli sprechi e il miglioramento dei processi lungo il ciclo di vita sono diventati priorità strategiche. Il legno, nelle sue forme naturali e ingegnerizzate, sta guadagnando crescente interesse per la sua sostenibilità, ridotto impatto ambientale e rinnovabilità (Ramage et al., 2017; Tupenaite et al., 2023). Soprattutto l'evoluzione dei prodotti in legno ingegnerizzato ha permesso di incrementare le performance del materiale, aumentando le potenzialità applicative e consentendone l'utilizzo anche in progetti architettonici di grande scala (Kuzman and Sandberg, 2023). Sebbene l'incremento dell'uso del legno possa contribuire significativamente alla

decarbonizzazione di diversi settori, un consumo non regolamentato e indiscriminato potrebbe determinare un'eccessiva pressione sulle risorse forestali (Ramage et al., 2017). Pertanto, una gestione responsabile e integrata della filiera del legno risulta essenziale per bilanciare le opportunità di riduzione delle emissioni di carbonio con la necessità di preservare il patrimonio forestale (Nepal, Johnston and Ganguly, 2021). Un approccio efficace per ottimizzare l'uso dei materiali consiste nella concezione degli edifici come sistemi stratificati con cicli di vita distinti (Brand, 1994), consentendo di pianificare il riutilizzo in base alla durabilità e sostituibilità degli elementi. Questo principio si integra con il cascading use of wood (Hudert and Pfeiffer, 2019), favorendo un impiego sequenziale del legno nei diversi settori per massimizzarne il valore e prolungarne la vita utile prima del suo impiego in usi secondari o come biomassa (Szichta et al., 2022). A supporto di questi processi, le tecnologie digitali di rappresentazione e produzione del progetto giocano un ruolo chiave. Strumenti avanzati come la modellazione parametrica, il Building Information Modeling (BIM) e la fabbricazione digitale consentono di monitorare l'intero ciclo di vita del legno, dalla selezione della materia prima alla sua trasformazione, installazione, manutenzione e successivo riuso ottimizzando l'impiego delle risorse (tempo, materia, energia) e favorendo una maggiore adattabilità e resilienza dei sistemi costruttivi nel tempo (Menges, Schwinn and Krieg, 2016; Svilans et al., 2019; Wagner et al., 2020). Questo contributo indaga il ruolo della ricerca accademica, attraverso il trasferimento attivo delle conoscenze al di fuori dell'ambito universitario – incluse collaborazioni con l'industria, la pratica professionale e le comunità di stakeholder – nel promuovere pratiche sostenibili nell'uso del legno. Con un focus sul contesto italiano, vengono esplorate le lacune nella gestione delle risorse che ostacolano il raggiungimento di obiettivi di sostenibilità più ampi e vengono definiti vincoli e opportunità per un utilizzo più responsabile dei materiali. Nello specifico, il documento presenta:

1. Il ruolo del legno nelle costruzioni e il rischio di sovrautilizzo – Analizza l'importanza del legno nei settori edilizio, dell'arredo e dell'energia, evidenziando il rischio di sovrasfruttamento e la necessità di strategie di gestione integrate, come l'uso a cascata, per massimizzare l'efficienza del materiale.
2. Digitalizzazione del ciclo di vita del legno – Esplora le tecnologie digitali, tra cui modellazione parametrica, workflow computazionali e tracciamento dei materiali, che ottimizzano la gestione della filiera, riducendo sprechi e facilitando la collaborazione tra stakeholder per una filiera più circolare.
3. Trasferimento tecnologico: la collaborazione tra Unicam e Sapienza – Presenta un caso studio sull'integrazione di metodologie digitali avanzate per la progettazione e fabbricazione di un elemento architettonico complesso in legno, dimostrando l'efficacia del trasferimento di conoscenze tra ricerca e industria.
4. Scalabilità del trasferimento tecnologico per l'adozione su scala industriale – Discute strategie per ampliare l'adozione delle metodologie digitali nel settore, evidenziando le opportunità per migliorare l'efficienza e la sostenibilità della filiera del legno su scala più ampia.

Il ruolo del legno nelle costruzioni e il rischio di sovra utilizzo

Il legno è un materiale strategico per la decarbonizzazione globale, grazie al suo basso carbonio incorporato (290 kg CO₂/m³) e alla capacità di sequestrare fino a 1,2 tC/m³ in 60 anni ((Gu et al., 2021; Hawkins et al., 2021). Tuttavia, la crescente domanda nei settori edilizio, dell'arredo e della bioenergia solleva criticità sulla sostenibilità delle risorse forestali. Le politiche europee incentivano l'uso del legno per ridurre le emissioni del settore edilizio, responsabile del 37% della CO₂ UE. Nei

Paesi Bassi, il Timber Construction Covenant punta al 20% di edilizia in legno entro il 2025, sfruttando il CLT (*Cross Laminated Timber*) per accelerare i tempi di costruzione (-40%) (Bucci Ancapi et al., 2025). Anche in Italia, dove il legno rappresenta l'8% del patrimonio edilizio (FederlegnoArredo), la crescita del settore richiede strategie di gestione per evitare sovra estrazioni. Nel settore dell'arredo e interior design, la vita media ridotta degli arredi (6-12 anni) genera un alto volume di rifiuti, derivanti per il 17% da scarti edilizi e per il 38% dalla manifattura del legno (Pazzaglia and Castellani, 2023). Inoltre, la biomassa legnosa, principale fonte di energia rinnovabile in UE (59%), necessita di una gestione sostenibile per evitare squilibri ambientali (Jonsson and Sotirov, 2025). Nonostante il 50% delle foreste UE sia certificato FSC o PEFC (Corticeiro, Tomé and Vieira, 2023), ciò non basta a garantire una gestione sostenibile. Serve un modello basato sull'uso a cascata del legno, che ne prolunghi la vita utile attraverso ri-utilizzi successivi: edilizia, arredo, pannelli ingegnerizzati e infine, carta e biomassa (Hudert and Pfeiffer, 2019; Szichta et al., 2022). Questo approccio riduce il consumo di risorse vergini e ritarda il rilascio di carbonio, ma richiede sistemi di tracciabilità e tecnologie di decostruzione per un recupero efficace e sostenibile

Digitalizzazione della filiera del legno e modellazione informata

L'integrazione delle tecnologie digitali nella gestione della filiera del legno rappresenta una strategia fondamentale per promuovere modelli circolari, migliorando tracciabilità, efficienza e sostenibilità dei processi produttivi (Fig. 1). In linea con le politiche europee per la transizione ecologica e digitale (Muench et al., 2022), l'adozione di strumenti avanzati come i Material Passports e i database interoperabili consentono di monitorare l'intero ciclo di vita del materiale, ottimizzandone il riutilizzo e riducendo gli sprechi avendo le informazioni fondamentali sempre disponibili (Honic et al., 2021; Munaro and Tavares, 2023; Kunic, Cognoli and Naboni, 2024). Il progetto De.Da., sviluppato presso Unicam, ha dimostrato come la digitalizzazione delle informazioni possa facilitare il recupero e la reintroduzione di materiali lignei da demolizione (Ruggiero, Cognoli and Cocco, 2024), nei processi produttivi per la produzione di componenti architettonici con materia prima seconda. Parallelamente, la manifattura digitale e la ri-manifattura del legno beneficiano dell'uso di CNC, Robot Collaborativi e Sorting automatico basato su Intelligenza Artificiale, permettono di ottimizzare il materiale disponibile, ridurre i difetti e incrementare l'efficienza della produzione (Garcia et al., 2021; Kunic, Kramberger and Naboni, 2021; Luo, Gattas and Tan, 2021). La progettazione computazionale supporta questo processo attraverso modelli parametrici e generative design, consentendo di minimizzare gli scarti e adattare la progettazione alle caratteristiche del materiale recuperato (Yu and Fingrut, 2022). L'integrazione con *Digital Twins* permette inoltre un monitoraggio continuo delle prestazioni, migliorando la gestione delle risorse nel tempo (Zhang et al., 2021). Un ruolo chiave in questa trasformazione è svolto dal *Visual Programming Language* (VPL), che semplifica la gestione dei flussi informativi tra progettazione e produzione. Il VPL consente di integrare in un unico ambiente dati geometrici, prestazionali e ambientali, favorendo l'automazione dei processi e la riduzione degli errori di progettazione (Garagnani, 2013; Caetano and Leitão, 2019; Caetano, Santos and Leitão, 2020; Calvano et al., 2022). Inoltre l'interoperabilità con il BIM migliora l'ottimizzazione delle risorse lungo il ciclo di vita dell'edificio, facilitando la pianificazione di strategie di disassemblaggio e riuso attraverso la gestione efficiente di diversi layer informativi (ISO 19650-1:2018). Le soluzioni digitali sviluppate in ambito accademico hanno raggiunto un livello di maturità tale da renderle implementabili nel settore industriale, offrendo un particolare vantaggio alle PMI grazie alla riduzione dei costi di accesso alle tecnologie avanzate, all'ottimizzazione dei processi produttivi e alla maggiore competitività nel mercato. L'adozione di workflow digitali e modellazione parametrica, incentivata dalle politiche europee per l'Industria 4.0, permette alle aziende di

migliorare la gestione delle risorse, ridurre i costi operativi e aumentare la competitività. Il trasferimento tecnologico di queste metodologie, attraverso collaborazioni tra università e industria, può accelerare l'adozione di modelli produttivi più sostenibili.

Trasferimento tecnologico: la collaborazione tra Unicam e Sapienza nel caso applicativo

Le sperimentazioni condotte dalla Scuola di Architettura e Design dell'Università di Camerino e dalla Facoltà di Architettura della Sapienza Università di Roma, attraverso l'integrazione delle competenze provenienti da due ambiti disciplinari – la Tecnologia dell'Architettura e la Rappresentazione – sono finalizzate allo sviluppo di metodologie per una modellazione informata che possa supportare processi di progettazione e produzione basati su criteri di ottimizzazione delle risorse e sostenibilità del ciclo di vita dei materiali.

Input – Sviluppo e integrazione delle ricerche accademiche

La ricerca condotta presso l'Università di Camerino, finanziata attraverso il programma POR Marche FSE 2014-2020, si è focalizzata sulla digitalizzazione della filiera del legno, con particolare attenzione alle tecniche di automazione applicate alla progettazione e alla gestione della produzione. L'obiettivo principale è stato ridurre il consumo di materia prima e sviluppare strategie di riuso del legno, attraverso metodologie basate su modellazione parametrica e workflow digitali (Cognoli, Cocco and Ruggiero, 2024). Parallelamente, presso La Sapienza – Università di Roma, la ricerca si è concentrata su metodologie di modellazione parametrica e VPL, sviluppando strumenti capaci di integrare informazioni geometriche e costruttive, ottimizzando i processi di fabbricazione automatizzata e il dialogo tra progettazione e produzione (Calvano and Mancini, 2021). L'integrazione di queste competenze ha favorito un processo di trasferimento tecnologico, applicando metodologie avanzate in una consulenza per Devoto Design, una PMI specializzata in *Interior Contract*, che si occupa dell'ingegnerizzazione, produzione e installazione di arredi su misura con geometrie complesse e organiche. Pur disponendo di un ufficio tecnico dedicato alla gestione dei progetti standard, l'azienda si avvale di consulenze esterne per lo sviluppo di soluzioni altamente specializzate.

Output – Applicazione dei modelli digitali nel caso studio

L'esperienza ha riguardato lo sviluppo di un workflow digitale integrato per la progettazione e la realizzazione del rivestimento di una scala elicoidale in legno caratterizzata da un'elevata complessità geometrica e da un elevato scarto di lavorazione. La scala, caratterizzata da una geometria *freeform*, si articola in due rampe consecutive, integrando in un'unica configurazione fluida il sottoscala, il parapetto e i gradini. Il design è stato concepito per garantire continuità formale e coerenza estetica. Per ottimizzare i processi di fabbricazione e assemblaggio, il rivestimento è stato discretizzato in 22 settori, ciascuno composto da tre elementi principali: scafo sottoscala, parapetto e gradini (Fig. 2). Ogni elemento è stato ulteriormente suddiviso in componenti distinti in base alla tipologia di materiale, alla tecnologia di produzione e ai requisiti prestazionali. Complessivamente, la struttura è composta da circa 1000 componenti codificati, realizzati in cinque materiali differenti - MDF, listellare in pino, multistrato di betulla, legno massello di frassino e tabù - selezionati in funzione di criteri funzionali, meccanici ed estetici (Fig. 3). La metodologia adottata si è basata su un sistema integrato di modelli digitali, interconnessi attraverso l'uso del VPL tramite il plug in Grasshopper, per garantire continuità nel flusso di informazioni e metadati lungo l'intero processo progettuale e produttivo. Questo approccio consente di ottimizzare la transizione dalla validazione formale alla realizzazione fisica, migliorando l'interoperabilità tra modellazione

parametrica e fabbricazione digitale. Il workflow prevede in una fase iniziale lo sviluppo di un modello di studio, sviluppato per verificare digitalmente il progetto, testare i materiali e simulare i vincoli di assemblaggio. Le geometrie prodotte includono metadati relativi alle proprietà fisico-meccaniche, alle tolleranze e alle connessioni previste. Successivamente, viene elaborato un modello continuo attraverso *reverse modeling* per correggere incongruenze topologiche e garantire la coerenza geometrica, fornendo una base ottimizzata per le successive elaborazioni parametriche. Successivamente viene implementato il modello procedurale in VPL per automatizzare la gestione dei parametri geometrici e costruttivi, stabilire relazioni dinamiche tra le variabili del progetto e consentire aggiornamenti in tempo reale sulla base dei vincoli strutturali e produttivi. I metadati associati servono per definire le regole di fabbricazione, le tolleranze di montaggio e le connessioni tra i componenti, facilitando la transizione alla fase esecutiva. Il modello di fabbricazione viene utilizzato per tradurre questi dati in istruzioni operative per macchine CNC e sistemi robotici, ottimizzare il nesting e ridurre gli scarti di lavorazione. Ogni elemento viene identificato digitalmente per tracciarne la posizione, le proprietà dimensionali e le specifiche di lavorazione, garantendo il controllo qualità lungo l'intera catena produttiva. Il modello reale rappresenta il risultato finale del processo, realizzato mediante lavorazioni CNC e successivo assemblaggio dove il modello di fabbricazione funge da riferimento per definire l'ordine di montaggio, riducendo il margine di errore e ottimizzando i tempi di esecuzione. Infine, la fase di gestione e documentazione serve per raccogliere e archiviare i dati generati, producendo un modello *as-built* digitale con disegni tecnici, elenchi componenti e un database strutturato. Questo sistema consente di tracciare le informazioni necessarie per la manutenzione, l'aggiornamento e l'eventuale disassemblaggio, riducendo errori e ottimizzando l'efficienza e la sostenibilità lungo l'intero ciclo di vita del manufatto. (Fig. 4), (Fig. 5), (Fig. 6).

Outcome – Risultati e impatti

L'applicazione congiunta della ricerca di Unicam e Sapienza su questo caso studio ha fornito risultati misurabili in termini di metriche produttive e ambientali. L'ottimizzazione tramite modelli di nesting ha consentito una riduzione di circa il 30% degli scarti di materiale rispetto a un processo standard (Fig. 7), migliorando al contempo l'efficienza produttiva con un risparmio del 20% sui tempi complessivi di progettazione e produzione. La digitalizzazione dei dati relativi ai materiali facilita le valutazioni di sostenibilità, semplificando eventuali *Life Cycle Assessment* (LCA) o la compilazione delle *Environmental Product Declarations* (EPD). Dal punto di vista tecnologico, la collaborazione tra Unicam e Sapienza ha dimostrato come l'integrazione tra digitalizzazione e modellazione parametrica possa fornire soluzioni scalabili per la produzione di manufatti complessi. L'esperienza ha inoltre evidenziato il potenziale del trasferimento di conoscenze tra accademia e industria, ponendo le basi per lo sviluppo di un programmi di formazione aziendale mirato all'adozione di workflow digitali avanzati.

Scalabilità del trasferimento tecnologico per l'adozione su scala industriale

Il trasferimento tecnologico costituisce un meccanismo strategico per colmare il divario tra ricerca accademica e applicazione industriale, consentendo l'adozione e la diffusione di metodologie innovative nei processi produttivi. Questo processo si fonda su una collaborazione strutturata tra diversi attori, ciascuno con un ruolo specifico: le istituzioni accademiche sviluppano conoscenze e strumenti avanzati, le imprese industriali ne valutano la fattibilità e ne guidano l'implementazione pratica, mentre gli enti regolatori e finanziatori creano le condizioni per la loro diffusione su scala più ampia. Le piccole e medie imprese (PMI), in particolare, traggono un significativo beneficio dal

trasferimento tecnologico, poiché consente loro di accedere a innovazioni avanzate senza dover sostenere i costi elevati della ricerca e sviluppo interna, aumentando così la loro competitività e capacità di crescita. L'assenza di un ecosistema di cooperazione tra questi attori ostacolerebbe la transizione dall'innovazione teorica alla sua effettiva applicazione produttiva. Il caso studio presentato evidenzia come la convergenza tra ricerca multidisciplinare e necessità produttive specifiche possa generare soluzioni altamente efficaci e replicabili. L'integrazione di competenze nel campo della modellazione informativa parametrica e della digitalizzazione della filiera del legno ha consentito di affrontare le complessità progettuali e produttive, traducendo l'innovazione accademica in un sistema strutturato e implementabile su scala industriale. La sinergia tra università e industria non si è limitata alla mera applicazione di strumenti avanzati, ma ha favorito un ripensamento delle pratiche produttive, dimostrando come l'adozione di metodologie computazionali e strategie digitali possa ridefinire il rapporto tra efficienza, sostenibilità e qualità del prodotto. L'adozione su scala industriale delle metodologie sperimentate nella filiera del legno richiede protocolli condivisi che garantiscano interoperabilità tra strumenti digitali e processi produttivi, favorendo la standardizzazione e l'adattabilità a contesti produttivi differenti. Questa evoluzione deve essere accompagnata da un costante aggiornamento delle competenze, formando professionisti capaci di operare nell'intersezione tra progettazione parametrica, automazione e produzione industriale. L'integrazione di tecnologie digitali avanzate può consentire di ottimizzare l'efficienza dei processi, garantendo maggiore sostenibilità e competitività nel settore.

Bibliografia

- Brand, S. (1994) *How Buildings Learn: What Happens After They're Built*. Viking.
- Bucci Ancapi, F. et al. (2025) 'How ex ante policy evaluation supports circular city development: Amsterdam's mass timber construction policy', *Journal of Environmental Management*, 376, p. 124516. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124516>.
- Caetano, I. and Leitão, A. (2019) 'Integration of an algorithmic BIM approach in a traditional architecture studio', *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), pp. 327–336. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.11.004>.
- Caetano, I., Santos, L. and Leitão, A. (2020) 'Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design', *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), pp. 287–300. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>.
- Calvano, M. et al. (2022) 'Parametric Processes for the Implementation of HBIM—Visual Programming Language for the Digitisation of the Index of Masonry Quality', *International Journal of Geo-Information*, 11, p. 1. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijgi11020093>.
- Calvano, M. and Mancini, M.F. (2021) 'Testing and Defining a Complex Design Through Digital and Physical Models', *Nexus Network Journal*, 23(4), pp. 995–1016. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00004-021-00569-6>.
- Cognoli, R., Cocco, P.L. and Ruggiero, R. (2024) 'Innovative Timber Upcycling: Digital Strategies for Prolonging Timber Lifespan and Promoting Reuse.', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1402(1), p. 012036. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1402/1/012036>.
- Corticeiro, S., Tomé, M. and Vieira, H. (2023) Can Forest Certification Schemes Really Drive Economic Value to European Forest Owners? Available at: <https://doi.org/10.20944/preprints202311.1966.v1>.
- FederlegnoArredo | Federazione imprese settore mobile e arredamento (no date). Available at: <https://www.federlegnoarredo.it/> (Accessed: 10 March 2024).

- Garagnani, S. (2013) Building Information Modeling and real world knowledge. A methodological approach to accurate semantic documentation for the built environment. Available at: <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743788>.
- Garcia, A.B. et al. (2021) 'MATERIAL (DATA) INTELLIGENCE', Proceedings of the 26th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2021, Volume 1, pp. 361–370.
- Gu, H. et al. (2021) 'Carbon Impacts of Engineered Wood Products in Construction', in. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99193>.
- Hawkins, W. et al. (2021) 'Embodied carbon assessment using a dynamic climate model: Case-study comparison of a concrete, steel and timber building structure', Structures, 33, pp. 90–98. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.013>.
- Honic, M. et al. (2021) 'Material Passports for the end-of-life stage of buildings: Challenges and potentials', Journal of Cleaner Production, 319, p. 128702. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128702>.
- Hudert, M. and Pfeiffer, S. (2019) Rethinking Wood: Future Dimensions of Timber Assembly. Birkhauser.
- ISO 19650-1:2018 (no date) ISO. Available at: <https://www.iso.org/standard/68078.html> (Accessed: 3 March 2025).
- Jonsson, R. and Sotirov, M. (2025) 'Future Wood Availability in Europe in Light of Climate and Energy Policy and Geopolitical Developments—A Wood Resource Balance-Based Assessment', Sustainability, 17(3), p. 1291. Available at: <https://doi.org/10.3390/su17031291>.
- Kunic, A., Cognoli, R. and Naboni, R. (2024) 'RE:Thinking Timber Architecture. Enhancing Design and Construction Circularity Through Material Digital Twin', in M.R. Thomsen, C. Ratti, and M. Tamke (eds) Design for Rethinking Resources. Cham: Springer International Publishing, pp. 409–422. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36554-6_26.
- Kunic, A., Kramberger, A. and Naboni, R. (2021) 'Cyber-Physical Robotic Process for Re-Configurable Wood Architecture Closing the circular loop in wood architecture', in. Available at: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.2.181>.
- Kuzman, M.K. and Sandberg, D. (2023) 'Engineered wood products in contemporary architectural use – a concise overview', Wood Material Science & Engineering, 18(6), pp. 2112–2115. Available at: <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2264258>.
- Luo, D., Gattas, J.M. and Tan, P.S.S. (2021) 'Real-Time Defect Recognition and Optimized Decision Making for Structural Timber Jointing', in P.F. Yuan et al. (eds) Proceedings of the 2020 DigitalFUTURES. Singapore: Springer, pp. 36–45. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4400-6_4.
- Menges, A., Schwinn, T. and Krieg, O.D. (2016) 'Advancing Wood Architecture', in Menges, A., Schwinn, T., and Krieg, O. D., Advancing Wood Architecture. 1st edn. Edited by A. Menges, T. Schwinn, and O. D. Krieg. New York: Routledge, 2016.: Routledge, pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.4324/9781315678825-1>.
- Muench, S. et al. (2022) Towards a green & digital future, JRC Publications Repository. Available at: <https://doi.org/10.2760/977331>.
- Munaro, M.R. and Tavares, S.F. (2023) 'A review on barriers, drivers, and stakeholders towards the circular economy: The construction sector perspective', Cleaner and Responsible Consumption, 8, p. 100107. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100107>.

- Nepal, P., Johnston, C.M.T. and Ganguly, I. (2021) 'Effects on Global Forests and Wood Product Markets of Increased Demand for Mass Timber', *Sustainability*, 13(24), p. 13943. Available at: <https://doi.org/10.3390/su132413943>.
- Pazzaglia, A. and Castellani, B. (2023) 'WOOD WASTE VALORIZATION IN EUROPE: POLICY FRAMEWORK, CHALLENGES, AND DECISIONAL TOOLS'.
- Ramage, M.H. et al. (2017) 'The wood from the trees: The use of timber in construction', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, pp. 333–359. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>.
- Ruggiero, R., Cognoli, R. and Cocco, P.L. (2024) 'From Debris to the Data Set (DEDA) a Digital Application for the Upcycling of Waste Wood Material in Post Disaster Areas', in M. Barberio et al. (eds) *Architecture and Design for Industry 4.0: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, pp. 807–835. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36922-3_41.
- Svilans, T. et al. (2019) 'New Workflows for Digital Timber', in, pp. 93–134. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_3.
- Szichta, P. et al. (2022) 'Potentials for wood cascading: A model for the prediction of the recovery of timber in Germany', *Resources, Conservation and Recycling*, 178, p. 106101. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106101>.
- Tupenaite, L. et al. (2023) 'Timber Construction as a Solution to Climate Change: A Systematic Literature Review', *Buildings*, 13(4), p. 976. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings13040976>.
- Wagner, H.J. et al. (2020) 'Towards digital automation flexibility in large-scale timber construction: integrative robotic prefabrication and co-design of the BUGA Wood Pavilion', *Construction Robotics*, 4(3–4), pp. 187–204. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41693-020-00038-5>.
- Yu, B. and Fingrut, A. (2022) 'Sustainable building design (SBD) with reclaimed wood library constructed in collaboration with 3D scanning technology in the UK', *Resources, Conservation and Recycling*, 186, p. 106566. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106566>.
- Zhang, Y. et al. (2021) 'Digital Twin in Computational Design and Robotic Construction of Wooden Architecture', *Advances in Civil Engineering*. Edited by J. Zhang, 2021, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/8898997>.