

Additive manufacturing processes for low-environmental-impact façade systems.

Rosa Romano¹, Elisa Mazzoni¹

¹Department of Architecture, University of Florence, Italy

Primary Contact: Rosa Romano, rosa.romano@unifi.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-17409

Abstract

The paper presents some of the results of the REVERSING project financed by the PR-FESR of the Tuscany Region 2021-2027 and aimed at developing a prefabricated modular and dry-assembled façade system to be implemented for the retrofitting of existing buildings, inspired by the principles of biophilic design and realised with low environmental impact materials through additive manufacturing processes. The objective is to demonstrate the possibility of setting up positive cooperation and innovation models between universities and companies in 3D printing, actively contributing to developing new technological systems that meet the ever-changing needs and challenges in the construction sector.

Keywords: Additive Manufacturing; Advanced Materials; 3D Printing; Industry 5.0; Adaptive Design

Please cite this article as: Romano R., Mazzoni E. (2025) Additive manufacturing processes for low-environmental-impact façade systems. / Processi di manifattura additiva per sistemi di facciata a basso impatto ambientale. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

Introduction

At the international level, the Green Deal (European Commission, 2019) and Next Generation Europe (European Commission, 2020) constitute the main regulatory framework for financing

sustainable research and innovation. According to these legislative instruments, the Horizon Europe¹ and New European Bauhaus (NEB)² programmes support knowledge exchange and the development of advanced technologies aimed at sustainability, social inclusion, and the valorisation of cultural and territorial specificities while fostering competitiveness and the European Union's (EU) strategic autonomy in compliance with the United Nations 2030 Agenda.

To create a synergy between such important frameworks and to support the development of innovation portfolios and active societal change, the European Innovation Council (EIC) in 2023 identified emerging technologies with high 'disruptive' value, i.e. capable of supporting visionary and groundbreaking change in traditional living environments. The intention is to stimulate the dissemination of the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), advanced robotics, augmented reality (AR), virtual reality (VR), 3D printing and cloud computing, considered fundamental to the pursuit of Industry 5.0 targets (EIC, 2024).

To promote this change, in addition to direct funding, the EU allocated national and regional co-financing funds to implement innovation and local development strategies. These include the European Regional Development Fund (FESR), which is key in promoting the Intelligent Specialisation Strategy to maximise the impact of research and innovation on the territory.

The national declension of the financial tools mentioned above is expressed in the implementation of Regional Programmes (PR-FESR), which provide dedicated funding for the growth of industrial supply chains, implementable with the support of Research Organisations (ORs) to promote the reduction of processes and products' environmental impact; resource optimisation and the shift towards low-carbon production models (e.g. Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) and 2025 Construction Products Regulation (CPR) update); the transition from linear to a circular economy, with a focus on investments in advanced materials (bio-based, recycled and recyclable), digital technologies, the creation of safer and inclusive workplaces promoting the protection of workers' fundamental rights and attracting high-qualified young talent.

In this context, projects that support the adoption of Building Information Modelling (BIM) and Robot Operating Systems (ROS) technologies - applicable to off-site prefabrication, modular housing manufacture and the development of short supply chain 3D printing processes - have been identified as key drivers to create new cooperation experiences to address the systemic challenges of our century, leading towards a sustainable and competitive future, aligned with the EU's long-term strategic vision.

Based on this reflection, the article presents selected findings from the research project Regenerative EnVelopE foR deep regeneration of School and office buildINGS (REVERSING), which aims to develop a prefabricated modular and dry-assembled façade system based on restorative design principles and manufactured with low environmental impact materials through additive and subtractive manufacturing processes.

Specifically, after a brief presentation of the research, the paper shows some results concerning analysing the state of the art to define the knowledge transfer related to the evolution of additive manufacturing in the construction sector. Moreover, it will explain the collaborative relationships activated within the research project to develop 3D-printed cladding modules.

¹https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

² https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en

The REVERSING project

The REVERSING research project has been funded by the Tuscany Region under Call 2 'Research and Development Projects for MPIMs and Midcaps' as part of the PR-FESR 2021-2027, Action 1.1.4 'Research and Development for Enterprises, including in collaboration with Research Organizations.' In line with the funding program's objectives, the project, conducted in collaboration with the XX Department of XX at the University of XX and four Tuscan SMEs (Polistamp, Kentstrapper, Santelli Vetri, and Zela Lab), aims to develop a kit of innovative envelope components that can be assembled into a cellular façade system, with the goal of: a) Enhancing the competitiveness of the involved companies through product and process innovation, leveraging new materials and digital techniques inspired by the Smart and Sustainable Enterprise model of the Tuscany Region; b) Facilitating knowledge transfer between academia and industry, paving the way for new research opportunities; c) Promoting the production of "smart" building components, enabling the creation of sustainable and resilient living environments.

By the Smart Specialisation Strategy S3 of the Tuscany Region³, REVERSING meets the 'Environment and Energy' and 'Intelligent and Sustainable Enterprise' application fields and challenges: 1) the digital transition, through the development of a technological solution system which can be realised with 3D printing to enable the involved companies to innovate the design, production and sustainable management processes of the manufactured products; 2) the ecological transition, through the realisation of systems and components, developed according to the principles of Circular Design and Industry 5.0, and realised with environmentally friendly materials and designed to be completely reversible, which can be integrated with renewable energy production systems to contribute to the energy efficiency of existing buildings.

Moreover, in line with the strategic missions of the '2030 Agenda: towards a sustainable Tuscany'⁴, all the technological systems included in the REVERSING module (Fig.1) are designed to promote:

- Wellness and indoor health, by adopting technological and compositional solutions (elements' shape, plugging packages' stratigraphy, adoption of adaptive coatings) developed to guarantee the thermal and acoustic comfort of the enclosed space (with particular attention to controlling and reducing *the reverberation phenomena due to the realisation of acoustic panels produced with 3D printing processes*).
- Wellness and outdoor health will be achieved by integrating hollow additive-printed components with low thermal emissivity into the opaque module's external surface. Moreover, it will be integrated with vegetation and coated with photocatalytic surfaces, designed to mitigate the heat island effect, increase environmental biodiversity, and improve outdoor spaces' comfort.
- Renewable energy production. This will be achieved by installing Dye-Sensitised Solar Cells (DSCC) in the horizontal shading system integrated on the exterior of the transparent component conceived as a smart window.

Based on this operational structure, which allows starting from a TRL 4-5 and arriving at TRL 7 after 18 months of work, the project has been organised into 5 Operational Objectives (O.O.), structured according to a simple tree diagram (Fig. 2). After an analysis and in-depth study of the concept of the REVERSING façade system (O.O.1) (Fig. 3), three work phases (O.O.2, O.O.3, O.O.4) are

³ <https://www.regione.toscana.it/verso-la-strategia-di-specializzazione-intelligente-2021-2027>

⁴ <https://www.regione.toscana.it/agenda-2030-verso-una-toscana-sostenibile>

developed, each running in parallel and aimed at the creation of 4 new products (1 opaque envelope system, 1 smart window, 2 finishing systems made of 3D printed components) that can be integrated into the REVERSING façade mockup realised in O.O.5.

Additive manufacturing and market-oriented technology transfer

The research carried out as part of the state-of-the-art analysis phase of the REVERSING project showed that Additive Manufacturing (AM) can be considered as an advanced design-driven technology (Liu & Wen, 2022), which can combine human intelligence and creativity with the receptivity and efficiency of automated systems (Rijwani et al., 2024).

The survey shows that the adoption of AM processes in the construction sector can be attributed to accelerating knowledge transfer from the entrepreneurial world to the scientific research field, not vice versa (Fig. 3).

Indeed, in 1939, it was the entrepreneur W. E. Urschel who invented the 'Wall Building Machine', which can be considered the first robotic arm used in architectural history and which would inspire, a few decades later, the Large-Scale 3D printer Crane, again patented by a company (the Italy-based WASP). The construction method adopted by Urschel, described as 'layered, horizontal slip forming,' set a turning point in the automated prefabrication of vertical concrete structures, introducing the geometry control without using formwork (Curth, 2022).

From the late 1980s and throughout the 1990s, several 3D printing methodologies were patented and developed primarily for industrial and rapid prototyping applications due to the alternating contributions from both academic and industrial sectors. Among the main protagonists of this evolutionary period were the experiments of C. Hull, co-founder of the 3D Systems company, who is considered the pioneer of 3D printing. In 1984, he developed stereolithography (SLA) technology (Hull, 1984), creating (in 1988) the first SLA printer and launching its commercialisation four years later.

In 1986, C. Deckard, a University of Texas at Austin student, invented the Selective Laser Sintering (SLS) technology (Deckard, 1997). In 1989, S. Crump, co-founder of Stratasys Inc., invented the Fused Deposition Modeling (FDM) process based on thermoplastic polymer heat extrusion (Wu et al., 2016).

It is interesting to note that the common objective of all these innovations was to reduce industrial production times, fostering the development of faster and more flexible manufacturing processes, such as Rapid Tooling (RT), Rapid Casting (RC), and Rapid Manufacturing (RM).

At the end of the twentieth century, thanks to contributions from the academic sector, additive manufacturing rapidly evolved from the production of small-scale products to architecture and construction applications, driven by advancements in design and computational control technologies.

A pivotal milestone in this evolution was Autodesk's 1994 release of the first 3D modeling-compatible version of AutoCAD, which revolutionised the field of digital design. Just a year earlier (nel 1993), the Massachusetts Institute of Technology (MIT) patented its Computer-Aided Design (CAD)-aided 3D printing system, which, by 2006, led the development of multi-axis robotic arms capable of handling a wide range of materials.

However, it was not until 1996 that B. Khoshnevis, professor of civil engineering and director of the Center for Rapid Automated Fabrication Technologies (CRAFT) at the University of Southern

California, patented the Additive Fabrication Apparatus and Methods (AFAM)⁵, paving the way for the application of 3D printing in the construction sector (Alzarrad & Elhouar, 2019). His Contour Crafting method (Khoshnevis, 2004) can be considered the first example of cold extrusion applied to construction printing, a technology that today extends beyond cementitious materials to include experimentation with clay-based composites and bio-based materials.

However, it is interesting to note that the emergence of new manufacturing enterprises began only with the expiration of the patents related to SLS and FDM printing processes in 2006 and 2009. These ventures developed 3D printers, including large-scale systems, and fabricated complex construction systems using additive manufacturing (AM) processes.

It is no coincidence that Kentstrapper, a partner in the REVERSING research project, was founded in 2011 by brothers Lorenzo and Luciano Cantini, drawing inspiration from the visionary RepRap (Replicating Rapid Prototyper)⁶ project led by A. Bowyer, a Senior Lecturer in Mechanical Engineering at the University of Bath. The project aims to develop a self-replicating device, enabling individuals to assemble a small desk 3D printer and independently manufacture objects for everyday use. Conceived as a comprehensive robotic system, RepRap incorporated a Computer-aided design (CAD) software in the form of a 3D modelling system, a Computer-aided manufacturing (CAM) software, and drivers capable of converting user-generated designs into a series of instructions for RepRap hardware, which then translated them into physical objects. All the project outputs and results were published under open-source licenses to maximise their dissemination regarding knowledge sharing, access democratisation, and innovation acceleration. The project's utopian ambition was to promote a paradigm shift in product design and manufacturing, moving from centralised patented goods to personalised, patent-free production, where open-access specifications replaced proprietary restrictions (Kantaros, 2024).

The state-of-the-art analysis has highlighted how the ability to develop new 3D printers, including self-built systems, and to integrate additive manufacturing (AM) processes with computational design has led to a groundbreaking paradigm shift in the construction sector over the past decade. This transformation has driven companies and research centres to experiment with and develop bio-inspired compositional, material, energy, and structural solutions, fostering new living environments that enhance human-nature interaction through a continuous exchange of material and immaterial resources.

This wave of experimentation has notably fueled an intense technological race aimed at achieving global milestones in large-scale additive manufacturing (LSAM) (e.g. the first 3D-printed steel bridge, the first multi-story 3D-printed residential building, and the first eco-sustainable 3D-printed housing model) (Alzarrad & Elhouar, 2019). These innovations (Tab. 1) have been primarily driven by large corporations (e.g., WINSUN, ICON) and renowned international architecture and engineering firms (e.g., BIG, Zaha Hadid Architects), which have invested heavily in the development of large-scale robotic and printing systems, laying the groundwork for an unprecedented cultural and technological shift (Jassmi et al., 2018).

At the same time, the 21st century has witnessed significant growth in small-scale additive manufacturing (SSAM), with applications in advanced manufacturing and prototyping (Tab. 2). In

⁵ <https://patents.google.com/patent/US5529471A/en>

⁶ <https://reprap.org/wiki/RepRap>

this field, university research centres (e.g., TU Delft, ETH Zurich, MIT) have played a central role in driving interdisciplinary and transdisciplinary innovation, working in synergy with industrial partners and public administrations. These initiatives have fostered the development of innovative adaptive design methodologies, leveraging advanced materials (e.g., bio-based materials, organic compounds, graphene, fibre-composite matrices) and shape-control technologies (e.g., responsive shading systems, complex geometry optimisation).

At the same time, these technological advances have expanded the range of 3D printing applications, reinforcing its strategic role in knowledge transfer between the construction sector and research fields such as architecture, computer science, and applied sciences.

REVERSING components made by Additive Manufacturing processes

The research conducted under O.O.4 of the REVERSING project, aligned with the findings from the state-of-the-art analysis, aimed to contribute to the dissemination of 3D printing processes in the construction sector. It demonstrates how this technology can positively impact the environmental footprint of the entire construction process by enabling better control over production times and costs, optimising material usage, and promoting the use of non-specialized labour.

In addition, a key ambition of the project is to promote the use of 3D printing to explore the potential for expanding the customisation of technological envelope systems. This customisation will be tailored to meet customer requirements and achieve specific acoustic and thermal performance closely linked to the climatic conditions of the construction site. The project will also support decentralisation of production processes to promote new smart factory models.

Following this ambition, the design and prototyping of modular systems (with a maximum size of 30 cm x 30 cm) have been initiated. These systems are realised using FDM printing processes and innovative materials (filaments derived from biopolymers, recyclable plastics, etc.), which can be integrated into vertical envelope surfaces through dry assembly systems.

This creative design phase was managed in direct collaboration with the companies Kentstrapper, Polistamp and ZetaLAB, who were willing to support the researchers' team through meetings held to validate the meta-design choices and to control the digital modelling process aimed at the creation of a customised abacus of elements designed to have intrinsic and extrinsic form and functions to guarantee adaptive processes concerning the building's internal and external microclimate, through the possibility of:

- purify the air of pollutants (use of photocatalytic coatings, antibacterial paints and integration with vegetation consortia);
- reduce the heat island effect (use of rough surfaces and materials with a Solar Reflection Index factor above 0.28);
- decrease the building's overall energy consumption for heating and cooling (element shape, use of materials with low thermal conductivity and suitable specific weight and proper attenuation values);
- Increasing the soundproofing facade performance, improving acoustic insulation characteristics, and reducing reverberation phenomena (shape, specific element weight, and material characteristics).

Since the envelope system was developed for school building renovations, bio-inspired colours and shapes have been adopted and defined following restorative design principles. These elements have

been designed to enhance the aesthetic perception of the entire building and have a positive effect on the psycho-perceptual well-being of its users.

Through energy simulations conducted in a semi-stationary regime, the O.R. team provided the necessary support during the design and execution phases, collaborating with the involved companies to select the most effective materials and geometric solutions for defining the module characteristics. To this end, a series of meetings were organised, during which:

- KENTSTRAPPER, in collaboration with POLISTAMP and the O.R. team, drafted the executive project and collaborated in the production of the prototypes (Fig. 6) for the internal and external closure systems of the REVERSING opaque module, enhancing the production process of the system's subcomponents through the use of additive manufacturing processes and dedicated parametric modelling tools;
- ZLAB supported the design phase by developing acoustic simulations using advanced software. This enabled the O.R. team to model and test the sound-absorbing properties of the Kentstrapper-printed tiles, evaluating the modules' effect on the building's overall acoustic insulation and reverberation phenomena.

The exchange of information and continuous interaction led to the growth of knowledge among all the parties involved, fostering technological innovation processes aimed at prototyping and patenting, as outlined by the Knowledge Transfer Metrics strategy adopted by the EU (2022).

Conclusions

In the coming decades, the construction sector will face a perfect storm: meeting the growing demand for new buildings and infrastructure, particularly in developing countries; managing a wave of renovations; transitioning to carbon neutrality; adopting circular practices; increasing productivity; addressing labour shortages; and controlling rising costs.

At the same time, the spread of Additive Manufacturing (AM) processes and integrated approaches driven by computational intelligence techniques is expected to lead to substantial advancements in the construction sector. From a technological standpoint, their adoption could result in standardising AM processes. Environmentally, the precision and efficiency of these new construction processes will reduce material waste and CO2 emissions, contributing to global sustainability goals. From a social perspective, replicating machines may help address labour shortages and improve construction site safety. However, they could also bring about significant changes that will be challenging to address without adequate involvement from all stakeholders within the construction process. These actors must manage innovation by developing technical and regulatory protocols to ensure human labour's safety, data protection, and integration, guaranteeing a fair and responsible spread of autonomous robotics in the built environment.

The REVERSING research project aims to tackle these challenges by promoting the creation and commercialisation of innovative building envelope systems locally. These systems are produced using additive manufacturing processes and mass customisation, inspired by blue economy principles, to positively impact the business models and organisational structures of the involved industrial partners and the related production sectors they engage with.

The results presented in this article will lead, in the coming months, to the realisation of the entire façade system, involving additional SMEs that will benefit from the knowledge processes activated in this initial phase of the investigation. The scientific project, which has already sparked interest

from external stakeholders (with the activation of a co-funded doctoral research project by the City of Florence and the drafting of a Public Engagement project involving the direct participation of school students where the "additive" component will be integrated), promises to evolve towards the so-called 'quintuple helix' models. This will support the dissemination of new knowledge and responsible practices capable of addressing socio-ecological transitions in the medium and long term, as well as the challenges of open science, with the hope of effectively combating inequalities and educational poverty in contemporary society (Iannantuoni, 2024).

References

- Alzarrad, M. A., & Elhouar, S. (2019), "3D Printing Applications in Construction from the Past and into the Future", in *Proceedings of the Creative Construction Conference 2019*.
- Curth, A. (2022), "Slip Forming to Construction 3D Printing: The early history of Large-Scale Additive Manufacturing", *ICI Journal*, 23, 16–20.
- Deckard, C. R. (1997), *Apparatus for producing parts by selective sintering* (U.S. Patent No. 5,597,589), U.S. Patent and Trademark Office, Available at: <https://patents.google.com/patent/US5597589A/en> (Accessed on 2 March 2025)
- EIC - European Innovation Council (2024), *EIC Tech Report. BACKING VISIONARY ENTREPRENEURS*, Available at: chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://eic.ec.europa.eu/document/download/6db51313-d1d5-4866-be94-ac7cee6dfb77_en?filename=EIC-tech-report-2024.pdf Accessed on 2 March 2025)
- EC - European Commission (2019), *The European Green Deal* (COM/2019/640 final). European Commission, Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (Accessed on 2 March 2025)
- EC - European Commission (2020), *NextGenerationEU*. European Commission, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/nextgenerationeu_en (Accessed on 2 March 2025)
- European Parliament And The Council Of The European Union (2024), "REGULATION (EU) 2024/1781 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of eco-design requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC", *Official Journal of the European Union*, Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1781&qid=1719580391746> (Accessed 2 March 2025)
- European Parliament And The Council Of The European Union (2024), "Regulation (EU) 2024/3110 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 laying down harmonised rules for the marketing of construction products and repealing Regulation (EU) No 305/2011 (Text with EEA relevance)", *Official Journal of the European Union*, Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/3110/oj/eng> (Accessed 2 March 2025)
- European Union (2020), *Knowledge Transfer Metrics. Towards a European-wide set of harmonised indicators*, Available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC120716> (Accessed 2 March 2025)
- Hull, C. W. (1984). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, United States Patent, Appl., No. 638905, Filed.
- Iannantuoni, G. (2024), "L'università si apra a Terzo settore e sociale", *Formazione*, 19 gennaio 2024. Available at: <https://www.vita.it/giovanna-iannantuoni-presidente-crui-luniversita-si-apra-a-terzosettore-e-sociale/> (Accessed 2 March 2025)

- Jassmi, H. A., Najjar, F. A., & Mourad, A. I. (2018), "Large-Scale 3D printing: the way forward", in *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 324, 012088.
- Kantaros, A. (2024), "Intellectual Property challenges in the age of 3D Printing: Navigating the digital copycat dilemma", *Applied Sciences*, 14(23), 11448.
- Khoshnevis, B. (2004), "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies", *Automation in Construction*, 13(1), 5–19.
- Liu, J., & Wen, P. (2022), "Metal vaporization and its influence during laser powder bed fusion process", *Materials and Design*, 215
- Rijwani, T., Kumari, S., Srinivas, R., Abhishek, K., Iyer, G., Vara, H., Dubey, S., Revathi, V., & Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016), "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry", *Automation in Construction*, 68, 21–31.

Figures and tables

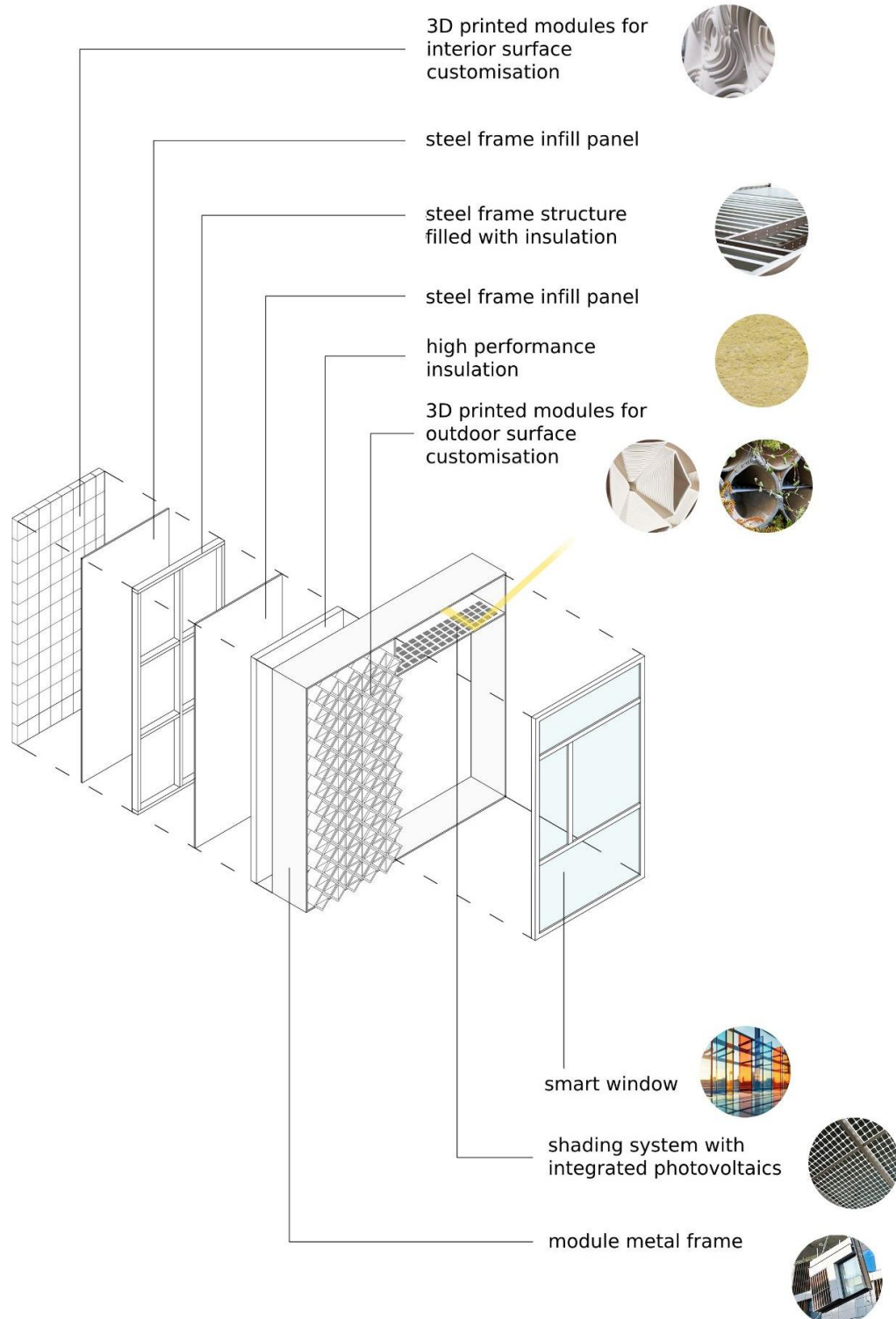


Fig. 1 - Axonometric view of the REVERSING façade module (Elaboration by the authors).

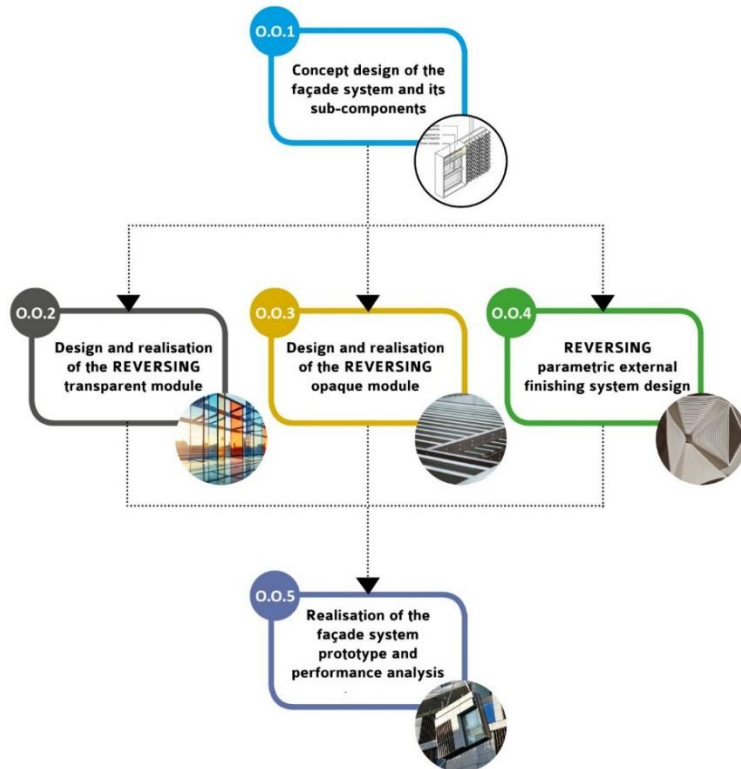


Fig. 2 - Diagram of the REVERSING research structure organised into 5 Operational Objectives (O.O.) (Elaboration by the authors).

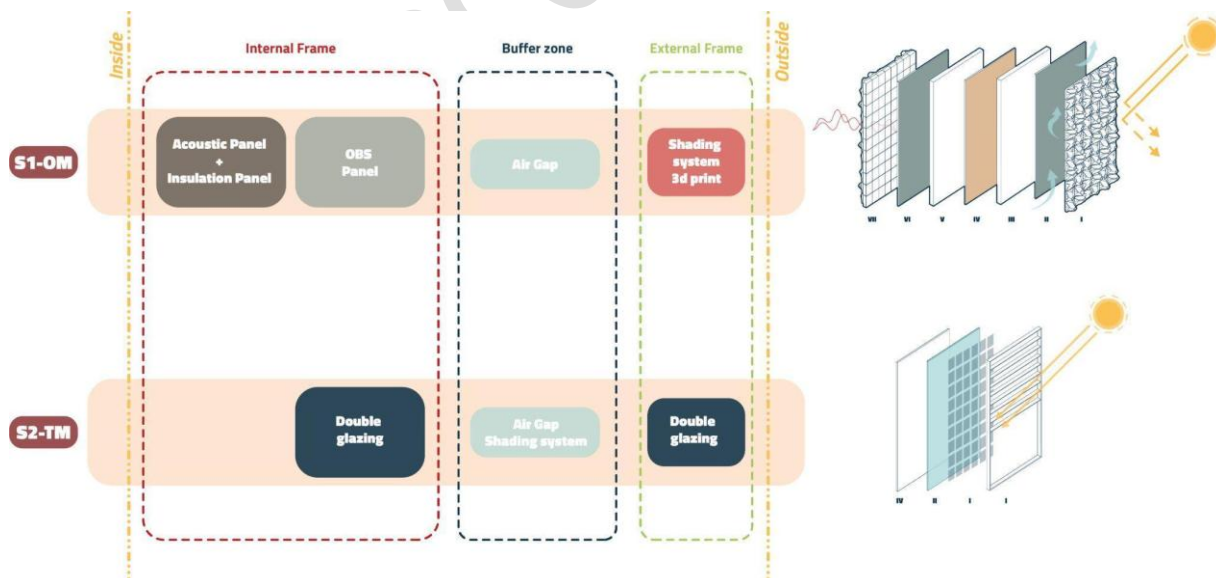


Fig. 3 - Scheme of the layers constituting the two components of the REVERSING façade (Elaboration by the authors).

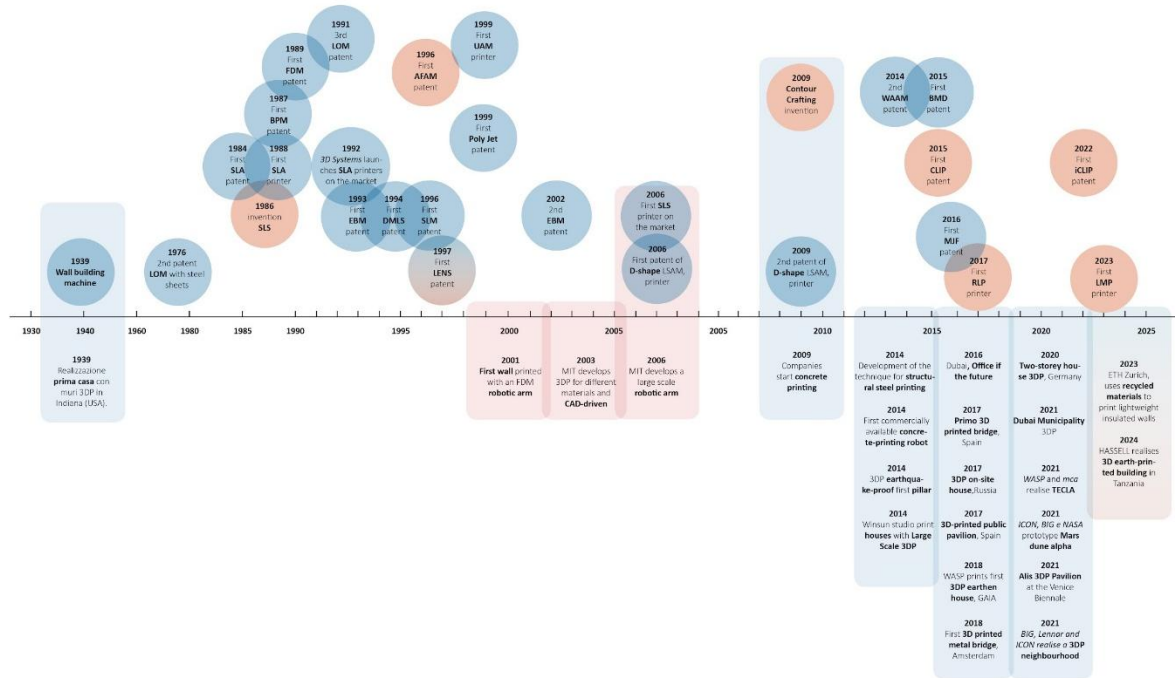


Fig 4 - Technological innovation timeline: new patents and milestones in the application of 3D printing in the construction sector (in blue, innovations related to the industrial sector; in red, those attributable to the academic sector) (Elaboration by the authors).

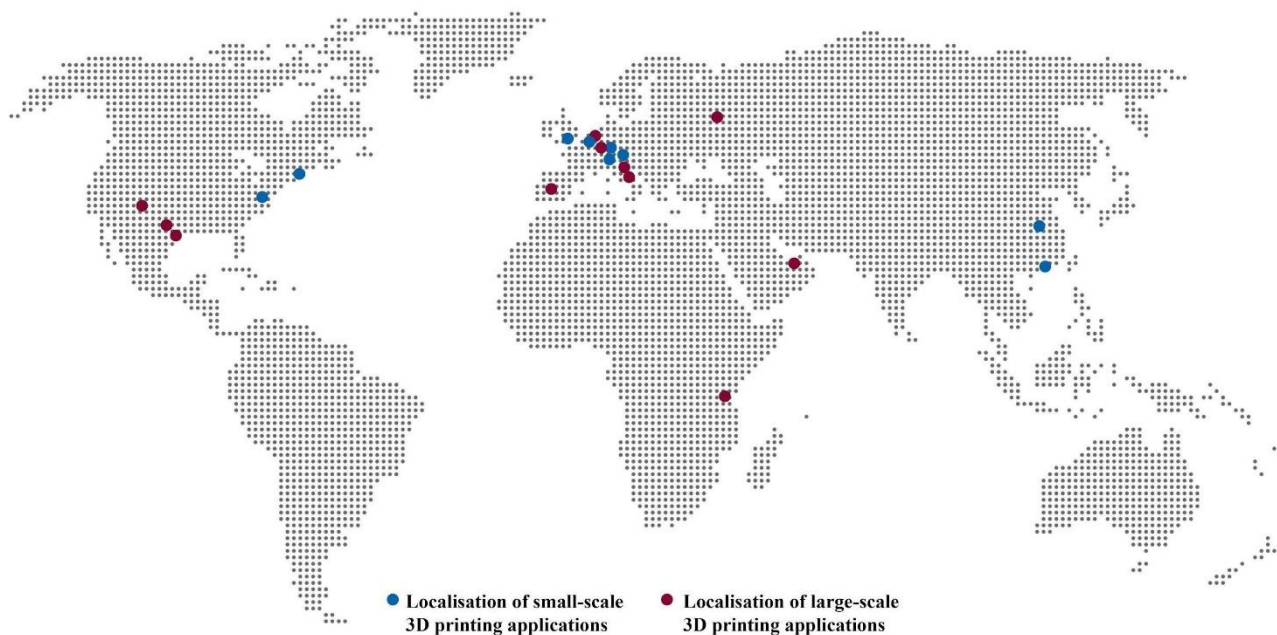


Fig. 5 - Geographical location of the selected case studies related to Large-scale 3D printing and Small-scale 3D printing, as presented in Tables 1 and 2, respectively (Elaboration by the authors).

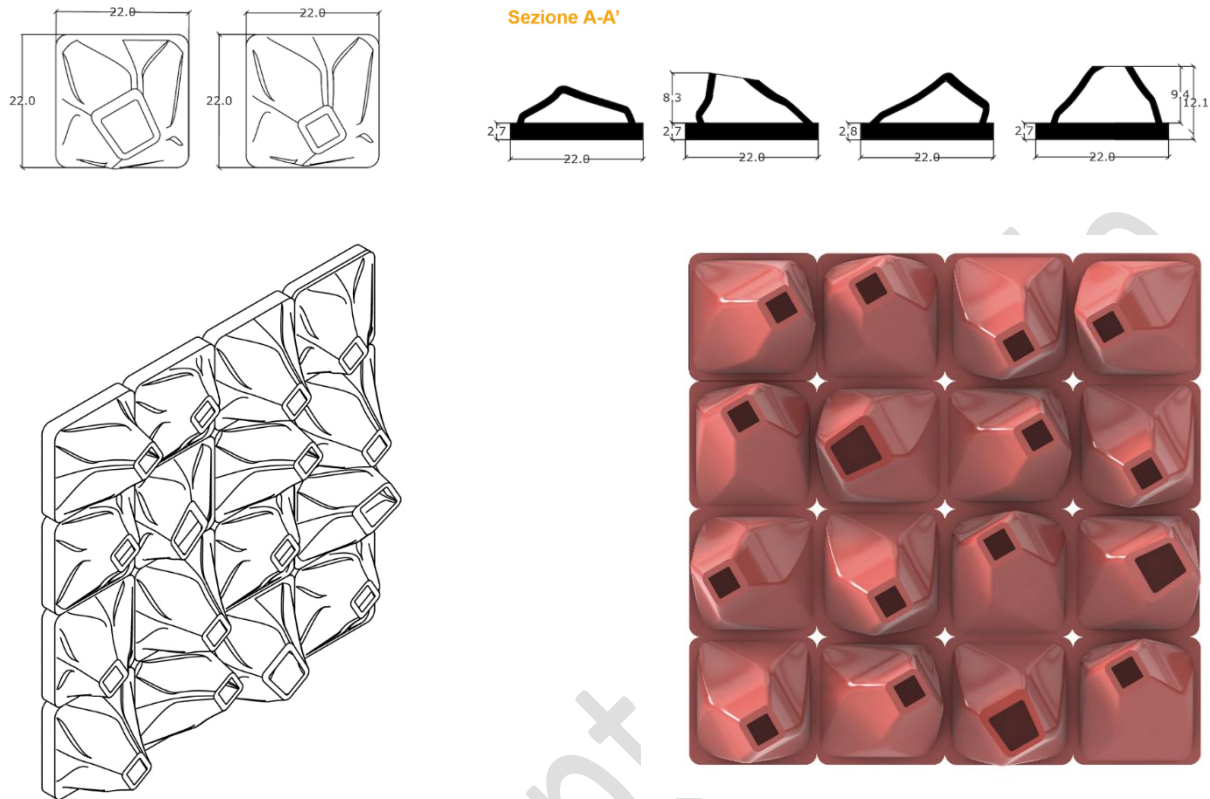


Fig. 6 - 3D modelling of one of the REVERSING prototypes created using additive manufacturing processes (Elaboration by the authors).

Large-scale 3D printing applications					
n.	Name	Data	Project team	Location	References
1	Office of the Future	2016	Killa Design (Architecture firm), BASF (LE), ITSERVE (SME), Progress Profiles SpA (SME), WINSUN (LE)	Dubai, United Arab Emirates	(Tapia, 2024)
2	3D-Printed on-site house	2017	Apis Cor. (LE), .PIK (LE)	Stupino, Russia	(Sher, 2020)
3	3D-printed public pavilion	2017	HASELL (International architecture firm), Nagami (SME), YIP Engineering London (Engineering firm), Transsolar KlimaEngineering (Engineering firm)	Avila, Spain	(Zeitoun, 2023)

4	GAIA	2018	WASP (SME), RiceHouse (SME)	Massa Lombarda, Italy	(Chiusoli, 2024)
5	MX3D Bridge	2018	MX3D (SME), Joris Laarman Lab (Architecture firm), Arup (International engineering firm), ArcelorMittal (LE), Autodesk (LE), Heijmans (LE), Lenovo (LE), ABB (LE), Air Liquide (LE), Oerlikon (LE), Plymovent (LE), AMS (LE), TU Delft, The municipality of Amsterdam	Amsterdam, The Netherlands	(MX3D, 2023)
6	Single Family	2020	MENSE-KORTE ingenieure+architekten (Architecture firm), PERI GmbH (LE)	Beckum, Germany	(Yasemin, 2024)
7	The Dubai Municipality	2021	Fuseproject (International architecture firm), Apis Cor (LE)	Dubai, United Arab Emirates	(Harrouk, 2019; Emre, 2024)
8	TECLA	2021	Mario Cucinella architects (International architecture firm), WASP (SME)	Massa Lombarda, Italy	(Pintos, 2024)
9	Mars dune alpha	2021	ICON (LE), BIG (International architecture firm), NASA (Government agency)	Houston, Texas, USA	(Barandy, 2021)
10	Alis	2021	Zaha Hadid architects (International architecture firm), Tecno S.p.A. (SME)	Venice, Italy	(Juliana, 2021)
11	Dior pop-up store	2021	Dior (LE), WASP (SME)	Dubai, United Arab Emirates	(Moretti, 2024)
12	Wolf Ranch community	2021 - WIP	BIG (International architecture firm), Lennar (LE) AND ICON (LE)	Austin, Texas, USA	(Florian, 2023)
13	Project Milestone	2021 - 2025	Saint-Gobain (LE), Saint-Gobain Weber Beamix (SME), Witteveen+Bos (LE), Van Wijnen (LE), The city of Eindhoven (Public organisation), Eindhoven University of Technology	Eindhoven, The Netherlands	(Saint-Gobain Weber Beamix, 2024)
14	Skylos	2022	Wallace Design Collective (International firm and LE), RRAEL (Architecture firm)	San Luis Valley, Colorado, USA	(Rael, 2023)
15	3D earth-	2024	HASELL (International architecture	Hope Village,	(Zeitoun, 2024)

printed building		firm), Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), EOC (LE)	Tanzania	
------------------	--	--	----------	--

Tab. 1 - Applications in the construction sector and advanced prototyping of buildings created through Large-scale 3D printing.

Small-scale 3D printing envelope sub-component applications					
n.	Name	Data	Project team	Location	References
1	SPONG3D	2017	Delft University of Technology, Eindhoven University of Technology and KIWI Solutions (SME)	Delft, The Netherlands	(4TU.Bouw, 2021; Sarakinioti et. al., 2018; Turrin et. al., 2021)
2	Arachne: 3D Printed Facade	2017	Archi-Solution Workshop (Architecture firm and SME)	Foshan, China	(Archi Solutions, 2018; Parametric House 2024; Moreno, 2020)
3	PULSE	2017	Delft University of Technology, Yasar University, FMVG, Ector Hoogstad Architecten (Architecture firm)	Delft, The Netherlands	(Teeling et. al., 2017; Turrin, 2021; Turrin et. al., 2021)
4	New Delft Blue	2019	Studio RAP (Architecture firm and SME)	Delft, The Netherlands	(Ravenscroft, 2023)
5	AguaHoja I	2019	MIT Media Lab (Interdisciplinary Research Laboratory) e Mediated Matter Group (Academic Research Group)	Cambridge, Massachusetts (USA)	(Duro-Royo et. al., 2021; Lee et. al., 2019; Mogas-Soldevila et. al., 2015; Oxman, 2020)
6	ADAM	2020	Delft University of Technology, Peutz (SME), Materialise (LE- Large Enterprise) and NWO Open Technology (funding organisation).	Delft, The Netherlands	(Setaki et. al., 2023; Turrin, 2021; Turrin et. al., 2021)
7	Acoustic Diffuser Panels	2020-2021	Gramazio Kohler Research (gruppo di ricerca accademico), ETH Zurich	Zurich, Switzerland	(Gramazio Kohler Research, 2021a; Gramazio Kohler Research, 2021b)

8	Beyond the Geometry Plastic 3D Printed Pavilion	2021	Archi-Union Architects (Architecture firm), Fab-Union (SME affiliated with Archi-Union Architects)	Nanjing, China	(3Dnatives, 2021; ArchDaily, 2021; Yuan et. al., 2022)
9	Living soil walls	2022	University of Virginia	Charlottesville, Virginia (USA)	(Barnes et. al., 2022; DeZeen, 2022)
10	3D concrete printed facades	2022-2023	Neutelings Riedijk Architects (Architecture firm), Eindhoven University of Technology and Vertico (SME)	The Netherlands	(Archidust, 2023; Nan et. al., 2024; Neutelings Riedijk Architects, 2023; Vertico, 2023)
11	Ceramic house	2023	Studio RAP (Architecture firm and SME)	Amsterdam, The Netherlands	(Malagò, 2024; Studio RAP, 2022)
12	Multi-nozzle Additive Manufacturing	2023	Bartlett School of Architecture at UCL (University College London) and WASP (SME)	London, UK	(3D WASP, 2024; Severi, 2024)
13	Biomimic wall: a digitally fabricated greening facade	2023	University of Innsbruck in collaboration with ceraLAB (collective) and exparch.hochabu (Institute for Experimental Architecture and Building Construction at the University of Innsbruck)	Innsbruck, Austria	(JanContala, 2023)
14	Planter Tiles	2023-WIP	IOUS Studio (Architecture and Design firm and SME)	Rotterdam, The Netherlands	(IOUS Studio, 2023)
15	4D printed Solar Gate	2024	University of Stuttgart, University of Freiburg. Departments, institutes and research groups involved: Institute of Computational Design and Construction (ICD), Institute for Plastics Technology (IKT), Cluster of Excellence Integrative Computational Design and Construction for Architecture (IntCDC), Plant Biomechanics Group,	Freiburg, Germany	(Burgos, 2025; Cheng et al., 2024)

			Department for Microsystems Engineering (IMTEK), Cluster of Excellence Living, Adaptive and Energy-autonomous Materials Systems (livMatS)		
--	--	--	--	--	--

Tab. 2 - Applications in the manufacturing industry and advanced prototyping of envelope subcomponents created through Small-scale 3D printing.

Just accepted article

Processi di manifattura additiva per sistemi di facciata a basso impatto ambientale

Rosa Romano¹, Elisa Mazzoni¹

¹ Department of Architecture, University of Florence, Italy

Primary Contact: Rosa Romano, rosa.romano@unifi.it

Abstract

Il paper presenta alcuni dei risultati del progetto REVERSING finanziato dal bando PR-FESR della Regione Toscana 2021-2027 e finalizzato a sviluppare un sistema prefabbricato di facciata modulare e assemblato a secco da utilizzare per la riqualificazione energetica di edifici esistenti, ispirato dai dettami del design biofilico e realizzato con materiali a basso impatto ambientale attraverso processi di manifattura additiva. L'obiettivo è quello di dimostrare come sia possibile instaurare modelli positivi di cooperazione e innovazione tra università e imprese nell'ambito delle filiere di stampa 3D, contribuendo in modo attivo alla creazione di nuovi sistemi tecnologici capaci di rispondere alle mutevoli esigenze ed alle sfide in atto nel settore delle costruzioni.

Parole chiave: Manifattura Additiva; Materiali avanzati; Stampa 3D; Industria 5.0; Design Adattivo

Introduzione

A livello internazionale, il Green Deal (European Commission, 2019) e il Next Generation Europe (European Commission, 2020) costituiscono il principale quadro di riferimento normativo per il finanziamento della ricerca e dell'innovazione sostenibile. In linea con questi strumenti legislativi, i programmi Horizon Europe⁷ e New European Bauhaus (NEB)⁸ supportano il trasferimento di conoscenze e lo sviluppo di tecnologie avanzate in un'ottica di sostenibilità, inclusione sociale e valorizzazione delle specificità culturali e territoriali, stimolando al contempo la competitività e l'autonomia strategica dell'Unione Europea (UE), in accordo con l'Agenda 2030 delle Nazioni Unite. Con l'obiettivo di creare una sinergia tra questi importanti *framework* e favorire la nascita di portfoli di innovazione e cambiamento attivo della società, l'*European Innovation Council* (EIC) nel 2023 ha identificato le tecnologie emergenti con alto valore "distruttivo", ovvero capaci di supportare un cambiamento visionario e dirompente degli ambienti di vita tradizionali. L'intento è quello di

⁷https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

⁸ https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en

incentivare la diffusione dell'Internet delle Cose (IoT), dell'intelligenza artificiale (IA), della robotica avanzata, della realtà aumentata (AR), della realtà virtuale (VR), della stampa 3D e del *cloud computing*, ritenute fondamentali per il perseguimento degli obiettivi del modello Industria 5.0 (EIC, 2024).

Per promuovere questo cambiamento, oltre ai finanziamenti diretti, l'UE ha stanziato i fondi di co-finanziamento nazionale e regionale, destinati all'attuazione di strategie di innovazione e sviluppo locale. Tra questi, il Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) gioca un ruolo chiave nella promozione della Strategia di Specializzazione Intelligente, orientata a massimizzare l'impatto della ricerca e dell'innovazione sul territorio.

La declinazione nazionale di tali strumenti si traduce nell'implementazione di Programmi Regionali (PR-FESR), che forniscono risorse dedicate alla crescita delle filiere industriali, attuabili con il supporto degli Organismi di Ricerca (OR) per promuovere: la riduzione dell'impatto ambientale di processi e prodotti; l'ottimizzazione dell'uso delle risorse e la transizione verso modelli di produzione a basse emissioni di carbonio (e.g. *Ecodesign for Sustainable Products Regulation* (ESPR) e *2025 Construction Products Regulation* (CPR) update); il passaggio dalla *linear economy* alla *circular economy*, con un focus sugli investimenti in materiali avanzati (*bio-based*, riciclati e riciclabili), tecnologie digital, creazione di ambienti di lavoro più sicuri e inclusivi che promuovano la tutela dei diritti fondamentali dei lavoratori e l'attrazione di giovani talenti altamente qualificati.

In questo contesto, i progetti che supportano l'adozione di tecnologie *Building Information Modelling* (BIM) e *Robot Operating Systems* (ROS) - applicabili alla prefabbricazione *off-site*, alla creazione di abitazioni modulari e allo sviluppo di processi di stampa 3D a filiera corta - sono stati individuati come *key driven* per creare nuove esperienze di collaborazione collettiva capaci di affrontare le sfide sistemiche del nostro secolo, aprendo la strada a un futuro sostenibile e competitivo, in linea con la visione strategica a lungo termine dell'UE.

Partendo da questa riflessione l'articolo presenta alcuni dei risultati della ricerca *Regenerative EnVelopE foR deep regeneration of School and office buildINGS* (REVERSING), finalizzata a sviluppare un sistema prefabbricato di facciata modulare e assemblato a secco, ispirato dai dettami del *restorative design* e realizzato con materiali a basso impatto ambientale, attraverso processi di manifattura additiva e sottrattiva.

In particolare, dopo una breve presentazione della ricerca, saranno analizzati alcuni dei suoi risultati relativi all'analisi dello stato dell'arte che hanno permesso di ricostruire le dinamiche di trasferimento di conoscenza, caratterizzanti l'evoluzione della stampa additiva nel settore delle costruzioni, per arrivare a definire i rapporti di collaborazione attivati nell'ambito del progetto di ricerca per sviluppare dei moduli di rivestimento realizzati con processi di stampa 3D.

Il progetto REVERSING

La ricerca REVERSING è stata finanziata dalla Regione Toscana nell'ambito del bando 2 "Progetti di ricerca e sviluppo per le MPMI e Midcap" del PR-FESR 2021-2027, Azione 1.1.4 "Ricerca e sviluppo per le imprese anche in raggruppamento con organismi di ricerca". In linea con gli obiettivi del programma di finanziamento il progetto, che coinvolge il Dipartimento XX - XX dell'Università XX e 4 SME toscane (Polistamp, Kentstrapper, Santelli Vetri e Zela Lab), mira a sviluppare un kit di componenti di involucro innovativi assemblabili in un sistema di facciata a celle, con l'intento di: a) aumentare la competitività delle aziende coinvolte, attraverso l'innovazione di prodotto e processo,

grazie all'uso di nuovi materiali e tecniche digitali, ispirate dal modello Impresa Intelligente e sostenibile della Regione Toscana; b) facilitare il trasferimento di conoscenza tra l'accademia e l'industria, aprendo a nuovi orizzonti di ricerca; c) promuovere la produzione di prodotti edilizi "intelligenti" utilizzabili per creare ambienti di vita sostenibili e resilienti.

In coerenza con la Strategia di specializzazione intelligente S3 della Regione Toscana⁹, REVERSING risponde agli ambiti applicativi "Ambiente ed Energia e Impresa Intelligente e Sostenibile" ed alle sfide inerenti: 1) la transizione digitale, attraverso lo sviluppo di un sistema di soluzioni tecnologiche realizzabili mediante stampa 3D che permettano alle imprese coinvolte di innovare i processi di progettazione, produzione e gestione sostenibile dei manufatti prodotti; 2) la transizione ecologica, attraverso la realizzazione di sistemi e componenti, sviluppati secondo i principi del *Circular Design* e dell'Industria 5.0, e realizzati con materiali ecocompatibili e pensati per essere completamente reversibili, integrabili con impianti per la produzione di energia rinnovabile con l'obiettivo di contribuire alla riduzione dei consumi energetici degli edifici esistenti.

Inoltre, coerentemente con le missioni strategiche dell' "Agenda 2030: verso una Toscana sostenibile"¹⁰ tutti i sistemi tecnologici compresi nel modulo REVERSING (Fig.1) sono stati progettati per promuovere:

- *Wellness e health indoor*, grazie all'adozione di soluzioni tecnologiche e compositive (forma degli elementi, stratigrafia dei pacchetti di tamponamento, adozione di *coating* adattivi) sviluppate per garantire il comfort termico e acustico dello spazio confinato (con particolare attenzione al controllo ed alla riduzione dei fenomeni di riverbero grazie alla realizzazione di pannelli acustici realizzati con processi di stampa 3D).
- *Wellness e health outdoor*, integrando nella superficie esterna del modulo opaco elementi prodotti con processi di stampa additiva cavi ed a bassa emissività termica che possono essere integrati con piante e trattati con superfici fotocatalitiche, pensati per incidere positivamente nella mitigazione dell'effetto isola di calore e aumentare la biodiversità dell'ambiente, contribuendo al miglioramento del comfort degli spazi esterni.
- la produzione di energia rinnovabile, mediante l'integrazione di *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSCC) nel sistema di ombreggiamento orizzontale integrato all'esterno del componente trasparente ideato come una *smart window*.

In linea con questa struttura operativa, che permette di partire da un TRL 4-5 e di arrivare alla fine dei 18 mesi di lavoro ad un TRL 7, il progetto è stato organizzato in 5 Obiettivi Operativi (O.O.), declinati rispetto ad una semplice struttura ad albero (Fig. 2) nella quale, dopo una fase di analisi e approfondimento del concept del sistema di facciata REVERSING (O.O.1) (Fig.3), si sviluppano tre fasi di lavoro (O.O.2, O.O.3, O.O.4) che corrono parallele e sono finalizzate alla creazione di 4 prodotti (1 sistemi di involucro opaco, 1 smart window, 2 sistemi di finitura realizzati con moduli ottenuti attraverso processi di stampa additiva) integrabili nel *mockup* della facciata REVERSING realizzato nell'O.O.5.

⁹ <https://www.regione.toscana.it/verso-la-strategia-di-specializzazione-intelligente-2021-2027>

¹⁰ <https://www.regione.toscana.it/agenda-2030-verso-una-toscana-sostenibile>

Manifattura Additiva e trasferimento tecnologico market oriented

La ricerca condotta nell'ambito della fase di analisi dello stato dell'arte del progetto REVERSING ha evidenziato come la Manifattura Additiva (AM) possa essere considerata una tecnologia avanzata *design driven* (Liu & Wen, 2022), in grado di combinare l'intelligenza e la creatività umane con la ricettività e l'efficienza dei sistemi automatizzati (Rijwani et al., 2024).

Dallo studio condotto emerge come l'adozione dei processi di AM nel settore delle costruzioni sia sicuramente riconducibile ad un'accelerazione del passaggio di conoscenza dal mondo imprenditoriale a quello della ricerca scientifica e non viceversa (Fig. 3).

Infatti, nel 1939, fu l'imprenditore W. E. Urschel ad inventare la "*Wall Building Machine*" che può essere considerata il primo braccio robotico utilizzato nella storia dell'architettura e che ispirerà, qualche decennio più tardi, le *Large-Scale 3D printers Crane*, brevettate ancora una volta da un'azienda (l'italiana WASP). Il metodo di costruzione impiegato da Urschel, descritto come *layered, horizontal slip forming* segnò un punto di svolta nella prefabbricazione automatizzata di chiusure verticali in cemento, introducendo per la prima volta il controllo della geometria senza l'utilizzo di casseforme (Curth, 2022).

A partire dalla fine degli anni Ottanta e nel corso degli anni Novanta, numerose metodologie di stampa 3D vengono brevettate e sviluppate prevalentemente per applicazioni industriali e di prototipazione rapida, grazie all'alternanza di contributi provenienti sia dal settore accademico che da quello industriale. Tra i principali protagonisti di questa fase evolutiva emergono le sperimentazioni di C. Hull, co-fondatore dell'impresa *3D Systems*, considerato il pioniere della stampa 3D che, nel 1984, sviluppa la tecnologia di stereolitografia (SLA) (Hull, 1984), realizzando (nel 1988) la prima stampante SLA e avviando la sua commercializzazione 4 anni dopo.

Nel 1986 C. Deckard, allora studente della *University of Texas di Austin*, inventa la tecnologia di *Selective Laser Sintering* (SLS) (Deckard, 1997) e nel 1989 S. Crump, co-fondatore della *Stratasys Inc.*, idea il processo di *Fused Deposition Modeling* (FDM), basato sull'estrusione a caldo di polimeri termoplastici (Wu et al., 2016).

E' interessante notare come l'obiettivo comune di tutte queste innovazioni fosse quello di ridurre i tempi di realizzazione dei prodotti industriali, favorendo lo sviluppo di processi produttivi più rapidi e flessibili, quali il *Rapid Tooling* (RT), il *Rapid Casting* (RC) e il *Rapid Manufacturing* (RM).

Alla fine del ventesimo secolo, grazie al contributo del settore accademico, la manifattura additiva evolve rapidamente dalla realizzazione di prodotti di "piccola taglia" a quello dell'architettura e delle costruzioni, spinta dal progresso delle tecnologie di progettazione e controllo computazionale.

Un contributo determinante in tal senso è rappresentato dal rilascio, nel 1994, da parte di Autodesk, della prima versione di AutoCAD compatibile con la modellazione 3D che rivoluziona il mondo della progettazione digitale. Solo un anno prima (nel 1993) il *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) brevettava il suo sistema di stampa 3D a guida *Computer-Aided Design* (CAD) che portava, nel 2006, allo sviluppo dei bracci robotici multi-asse compatibili con diverse tipologie di materiali.

Ma è solo nel 1996 che B. Khoshnevis, professore di ingegneria civile e direttore del *Center for Rapid Automated Fabrication Technologies* (CRAFT) della *University of Southern California*, brevetta il metodo *Additive Fabrication Apparatus and Methods* (AFAM)¹¹, aprendo la strada all'applicazione della stampa 3D nel settore delle costruzioni (Alzarrad & Elhouar, 2019). Il suo metodo *Contour*

¹¹ <https://patents.google.com/patent/US5529471A/en>

Crafting (Khoshnevis, 2004), può essere considerato il primo esempio di estrusione a freddo applicata alla stampa edilizia, una tecnologia che oggi si estende oltre la lavorazione degli impasti cementizi, includendo la sperimentazione con composti argillosi e materiali *bio-based*.

Tuttavia, è interessante notare come è solo con lo scadere dei brevetti relativi ai processi di stampa SLS e FDM, rispettivamente nel 2006 e nel 2009, che si assiste alla nascita di nuove realtà produttive che si cimentano sia nella costruzione di stampanti, anche di grande scala, che nella realizzazione di sistemi edilizi più o meno complessi realizzati mediante processi di AM.

Non è un caso che anche l'azienda Kentstrapper partner della ricerca REVERSING, venga fondata dai fratelli Lorenzo e Luciano Cantini nel 2011, ispirandosi al progetto visionario RepRap (*Replicating Rapid Prototyper*)¹² promosso dal A. Bowyer (un *Senior Lecturer* in ingegneria meccanica dell'Università di Bath) e finalizzato a produrre un dispositivo autoreplicante che desse la possibilità a chiunque di assemblare una piccola stampante 3D con la quale realizzare in autonomia oggetti per la vita di tutti i giorni. RepRap, concepito come un sistema robotico completo includeva: un software di *computer-aided design* (CAD), nella forma di un sistema di modellazione 3D; un software di *computer-aided manufacturing* (CAM); dei driver in grado di convertire i progetti degli utenti in una serie di istruzioni per l'hardware RepRap, che li trasformava a sua volta in oggetti fisici. Tutti i lavori creati nell'ambito di questo progetto sono stati pubblicati con licenze *open source*, con l'obiettivo di massimizzare la loro diffusione, in termini di distribuzione della conoscenza, democratizzazione dell'accesso, e rapidità di innovazione, con l'utopico intento di promuovere un cambiamento di paradigma nella progettazione e produzione di prodotti di consumo, rispetto al quale si passava da un'unica fabbrica di produzione di prodotti brevettati a una produzione personale di prodotti senza brevetto e con specifiche "aperte" di libero accesso (Kantaros, 2024).

L'analisi dello stato dell'arte ha, infine, evidenziato come la possibilità di realizzare nuove stampanti, anche in autocostruzione, e di abbinare i processi di AM con quelli di *computational design*, abbia determinato nell'ultimo decennio un cambiamento di paradigma epocale nel settore delle costruzioni, portando aziende e centri di ricerca a sperimentare e sviluppare soluzioni compositive, materiche, energetiche e strutturali *bio-inspired* che aprono alla creazione di nuovi ambienti di vita pensati per favorire l'interazione uomo-natura in uno scambio continuo di risorse materiali e immateriali.

E' emblematico come questa sperimentazione abbia determinato un'intensa competizione tecnologica finalizzata al raggiungimento di primati globali (e.g. il primo ponte in acciaio stampato in 3D; la prima abitazione residenziale su più piani stampata in 3D; il primo modello abitativo ecosostenibile stampato in 3D) nel settore della manifattura additiva su larga scala (*Large-Scale Additive Manufacturing*, LSAM) (Alzarrad & Elhouar, 2019). Tali innovazioni (Tab.1) sono state trainate principalmente da grandi aziende (e.g., WINSUN, ICON) e da studi internazionali di architettura e ingegneria (e.g., BIG, Zaha Hadid architects), che hanno investito nello sviluppo di robot e macchinari di stampa di grandi dimensioni, ponendo le basi per un'evoluzione culturale e tecnologica senza precedenti (Jassmi et al., 2018).

Parallelamente, il XXI secolo ha visto una significativa crescita nel settore dell'AM su piccola scala (*Small-Scale Additive Manufacturing*, SSAM), con applicazioni nell'industria manifatturiera e nella prototipazione avanzata (Tab.2). In questo ambito, un ruolo centrale è stato svolto dai centri di

¹² <https://reprap.org/wiki/RepRap>

ricerca universitari (e.g., TU Delft, ETH Zurich, MIT), che hanno guidato l'innovazione inter e transdisciplinare, lavorando in sinergia con partner industriali e Pubbliche Amministrazioni. Queste iniziative hanno favorito lo sviluppo di metodologie innovative di *adaptive design* basate sull'utilizzo di materiali avanzati (e.g. *bio-based materials*, materiali organici, grafene, matrici fibro-composite, etc.) e a controllo di forma (e.g. *responsive shade*, *complex geometry optimization*, etc.), ampliando ulteriormente il ventaglio delle applicazioni della stampa 3D e consolidandone il ruolo strategico nell'ambito del trasferimento della conoscenza tra il settore edilizio e quello della ricerca in architettura, informatica, delle scienze applicate, ecc..

Componenti REVERSING realizzati con processi di Additive Manufacturing

L'attività di ricerca sviluppata nel contesto dell'O.O.4 della progetto REVERSING è stata condotta, in linea con quanto emerso dall'analisi dello stato dell'arte, con l'obiettivo di contribuire alla diffusione dei processi di stampa 3D anche nel settore delle costruzioni, dimostrando come questa tecnologia sia capace di incidere positivamente sull'impatto ambientale dell'intero processo realizzativo grazie alla possibilità di controllare tempi e costi di produzione, ottimizzando la quantità di materiale utilizzabile e favorendo il ricorso a manodopera non specializzata.

Inoltre, il progetto ha avuto come ambizione caratterizzante quella di promuovere l'uso della stampa 3D per valutare come sia possibile ampliare la possibilità di customizzare i sistemi tecnologici di involucro, in relazione alle richieste della committenza ed al raggiungimento di prestazioni acustiche e termiche specifiche fortemente connesse alle condizioni climatiche del luogo di costruzione, favorendo la delocalizzazione dei processi di produzione nell'ottica di promuovere nuovi modelli di *smart factory*.

In linea con questa aspirazione, è stata avviata la progettazione e la prototipazione di sistemi modulari di dimensioni massime 30 cm x 30 cm, realizzabili con processi di stampa FDM e materiali innovativi (filamenti derivati da bio-polimeri, plastiche riciclabili, ecc..), integrabili, attraverso sistemi di assemblaggio a secco, in superfici di chiusura verticale.

La fase creativa è stata gestita in stretta sinergia con le aziende Kentstrapper, Polistamp e ZetaLab, che si sono rese disponibili a supportare il team di ricercatori attraverso incontri finalizzati a validare le scelte metaprogettuali e a controllare il processo di modellazione digitale finalizzato alla creazione di un abaco customizzato di elementi pensati per avere forma e funzioni intrinseche ed estrinseche capaci di garantire processi di adattività rispetto al microclima interno ed esterno all'edificio, attraverso la possibilità di:

- depurare l'aria da sostanze inquinanti (utilizzo di coating fotocatalitici, vernici antibatteriche e integrazione con consorzi vegetali);
- ridurre l'effetto isola di calore (utilizzo di forme rugose e materiali con fattore di Indice di Riflessione Solare maggiori di 0,28);
- diminuire i consumi energetici globali dell'edificio per riscaldamento e raffrescamento (forma dell'elemento, utilizzo di materiali con bassa conducibilità termica e adeguato peso specifico e buoni valori di attenuazione);
- incrementare le prestazioni fono-isolanti di facciata, migliorando le caratteristiche di isolamento acustico e riduzione dei fenomeni di riverbero (forma e peso specifico dell'elemento e caratteristiche del materiale).

Trattandosi di un sistema di involucro utilizzabile per la riqualificazione di edifici scolastici sono stati adottati colori e forme bio-ispirati, definiti rispetto ai dettami del *restorative design* e capaci di migliorare anche la percezione estetica dell'intero edificio, con ricadute positive sulla salute psico-percettiva degli utenti.

Attraverso simulazioni energetiche condotte in regime semi-stazionario, l'O.R. ha fornito il necessario supporto nella fase progettuale ed esecutiva, collaborando con le imprese coinvolte per scegliere i materiali ed le soluzioni geometriche più performanti per la definizione delle caratteristiche dei moduli. Con questo intento sono stati organizzati una serie di incontri, durante i quali:

- KENTSTRAPPER, in collaborazione con POLISTAMP e l'O.R, hanno redatto il progetto esecutivo e collaborato nella realizzazione dei prototipi (Fig. 6) dei sistemi di chiusura interni ed esterni del modulo opaco REVERSING, implementando il processo produttivo delle sottoparti del sistema attraverso l'utilizzo di processi di stampa additiva e di strumenti di modellazione parametrica dedicati;
- ZLAB, si è occupata di accompagnare la fase di progettazione sviluppando delle simulazioni acustiche con software avanzati, che hanno permesso all'O.R. di modellare e testare le proprietà fono assorbenti delle *tiles* stampate da Kentstrapper, valutando l'effetto dei moduli sull'isolamento acustico globale dell'edificio e sui fenomeni di riverbero.

Lo scambio di informazioni e l'interazione continua hanno portato alla crescita di conoscenza di tutti i soggetti coinvolti, promuovendo processi di innovazione tecnologica finalizzati alla prototipazione e brevettazione, come indicato dalla strategia *Knowledge transfer metric* adottata dell'UE (2022).

Conclusioni

Nei prossimi decenni, il settore delle costruzioni dovrà affrontare una tempesta perfetta: soddisfare la crescente domanda di nuovi edifici e infrastrutture soprattutto nei paesi in via di sviluppo; gestire un'ondata di ristrutturazioni; passare alla neutralità delle emissioni di carbonio; adottare pratiche circolari; aumentare la produttività; affrontare la carenza di manodopera e controllare l'aumento dei costi.

Parallelamente, si prevede che la diffusione di processi di AM e di approcci integrati guidati da tecniche di *computational intelligence* determineranno progressi sostanziali nel settore edilizio. Dal punto di vista tecnologico, la loro adozione potrebbe portare alla standardizzazione dei processi di AMi. Dal punto di vista ambientale, la precisione e l'efficienza di questi nuovi processi costruttivi permetterà di ridurre gli sprechi di materiale ed emissioni di CO₂, contribuendo agli obiettivi di sostenibilità globale. Dal punto di vista sociale, le macchine replicanti potranno aiutare a risolvere la carenza di manodopera e migliorare la sicurezza dei cantieri, ma potrebbero anche creare grandi cambiamenti che non sarà facile affrontare senza un adeguato coinvolgimento di tutti gli attori che gravitano intorno al processo edilizio, chiamati a gestire l'innovazione sviluppando protocolli tecnico-normativi che permettano di regolamentare la sicurezza, la protezione dei dati e l'integrazione della manodopera umana, garantendo una diffusione equa e responsabile della robotica autonoma nell'ambiente costruito.

La ricerca REVERSING cerca di affrontare queste sfide, promuovendo a scala locale la realizzazione e commercializzazione di sistemi di involucro innovativi, realizzati adottando processi produttivi di stampa additiva e *mass customization* e ispirati ai temi della *blue economy* per incidere

positivamente sui modelli aziendali e organizzativi dei partner industriali coinvolti e sugli indotti produttivi a cui essi fanno riferimento.

I risultati presentati in questo articolo porteranno nei prossimi mesi alla realizzazione dell'intero sistema di facciata attraverso il coinvolgimento di altre SMEs che potranno beneficiare a cascata dei processi conoscitivi attivati in questa prima fase di indagine.

Il progetto scientifico, che ha già suscitato l'interesse di attori esterni al partenariato (con l'attivazione di una ricerca di dottorato co-finanziata dal Comune di Firenze e la stesura di un progetto di *Public Engagement* che prevede il coinvolgimento diretto degli studenti delle scuole in cui il componente "additivo" sarà integrato) promette di evolvere verso i cosiddetti modelli della "quintupla elica", supportando la diffusione di nuove conoscenze e pratiche responsabili capaci di affrontare le transizioni socio-ecologiche nel medio e lungo periodo e le sfide della scienza aperta con la speranza di combattere in modo efficace le disuguaglianze e povertà educative della società contemporanea (Iannantuoni, 2024).

References

- Alzarrad, M. A., & Elhouar, S. (2019), "3D Printing Applications in Construction from the Past and into the Future", in *Proceedings of the Creative Construction Conference 2019*.
- Curth, A. (2022), "Slip Forming to Construction 3D Printing: The early history of Large-Scale Additive Manufacturing", *ICI Journal*, 23, 16–20.
- Deckard, C. R. (1997), *Apparatus for producing parts by selective sintering* (U.S. Patent No. 5,597,589), U.S. Patent and Trademark Office, Available at: <https://patents.google.com/patent/US5597589A/en> (Accessed on 2 March 2025)
- EIC - European Innovation Council (2024), *EIC Tech Report. BACKING VISIONARY ENTREPRENEURS*, Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eic.ec.europa.eu/document/download/6db51313-d1d5-4866-be94-ac7cee6dfb77_en?filename=EIC-tech-report-2024.pdf Accessed on 2 March 2025)
- EC - European Commission (2019), *The European Green Deal (COM/2019/640 final)*. European Commission, Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (Accessed on 2 March 2025)
- EC - European Commission (2020), *NextGenerationEU*. European Commission, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/nextgenerationeu_en (Accessed on 2 March 2025)
- European Parliament And The Council Of The European Union (2024), "REGULATION (EU) 2024/1781 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of eco-design requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC", *Official Journal of the European Union*, Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1781&qid=1719580391746> (Accessed 2 March 2025)
- European Parliament And The Council Of The European Union (2024), "Regulation (EU) 2024/3110 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 laying down harmonised rules for the marketing of construction products and repealing Regulation (EU) No 305/2011 (Text with EEA relevance)", *Official Journal of the European Union*, Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/3110/oj/eng> (Accessed 2 March 2025)
- European Union (2020), *Knowledge Transfer Metrics. Towards a European-wide set of harmonised indicators*, Available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC120716> (Accessed 2 March 2025)

Hull, C. W. (1984). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, United States Patent, Appl., No. 638905, Filed.

Iannantuoni, G. (2024), "L'università si apra a Terzo settore e sociale", *Formazione*, 19 gennaio 2024. Available at: <https://www.vita.it/giovanna-iannantuoni-presidente-cruil-universita-si-apra-a-terzosettore-e-sociale/> (Accessed 2 March 2025)

Jassmi, H. A., Najjar, F. A., & Mourad, A. I. (2018), "Large-Scale 3D printing: the way forward", in *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 324, 012088.

Kantaros, A. (2024), "Intellectual Property challenges in the age of 3D Printing: Navigating the digital copycat dilemma", *Applied Sciences*, 14(23), 11448.

Khoshnevis, B. (2004), "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies", *Automation in Construction*, 13(1), 5–19.

Liu, J., & Wen, P. (2022), "Metal vaporization and its influence during laser powder bed fusion process", *Materials and Design*, 215

Rijwani, T., Kumari, S., Srinivas, R., Abhishek, K., Iyer, G., Vara, H., Dubey, S., Revathi, V., & Gupta, M. (2024), "Industry 5.0: a review of emerging trends and transformative technologies in the next industrial revolution", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*.

Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016), "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry", *Automation in Construction*, 68, 21–31.