

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

Just Accepted: May 26, 2025 Published: November 06, 2025

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Rosa Romano, <https://orcid.org/0000-0001-5134-4637>

Elisa Mazzoni, <https://orcid.org/0009-0003-0679-4972>

Dipartimento di Architettura, Università di Firenze, Italia

rosa.romano@unifi.it

elisa.mazzoni@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 scolastici, 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 trasferimento tecnologico *market oriented* nell'ambito delle filiere di stampa 3D, contribuendo in modo attivo alla creazione di nuove soluzioni di involucro 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; Innovazione tecnologica.

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 Europe*¹ e *New European Bauhaus* (NEB)² supportano il trasferimento di conoscenze e lo sviluppo di tecnologie avanzate *market oriented* 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 portfolio 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 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 (3DP) e del *cloud computing*, ritenuti 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: 1) la riduzione dell'impatto ambientale di processi e prodotti; 2) 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); 3) il passaggio dalla *linear economy* alla *circular economy*, con un focus sugli investimenti in materiali avanzati (*bio-based*, riciclati e riciclabili), tecnologie digitali, 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.

Additive manufacturing processes for low-environmental-impact façade systems

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 school buildings, inspired by the principles of biophilic design and implemented with low environmental impact materials through additive manufacturing processes. The intent is to demonstrate the possibility of setting up positive market-oriented technology transfer models within the 3D printing supply chain, actively contributing to developing new envelope solutions that meet the ever-changing needs and challenges in the construction sector.

Keywords: Additive Manufacturing; Advanced Materials; 3D Printing; Industry 5.0; Technological innovation.

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 market-oriented advanced technologies aimed at sustainability, social inclusion, and the value enhancement 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 port-

folios 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 (3DP) and cloud computing, considered essential for 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 Strat-

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 3DP 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 (AM) e sottrattiva.

In particolare, oltre a una breve descrizione della ricerca ed alla presentazione dei risultati della fase operativa che ha riguardato lo sviluppo di prototipi di facciata realizzati con processi di stampa additiva, saranno illustrati alcuni dei risultati inerenti l'analisi dello stato dell'arte con l'obiettivo di definire i rapporti di collaborazione attivati nei territori e nei settori di impiego coinvolti e nelle rispettive catene di produzione di valore, attraverso l'analisi delle dinamiche di trasferimento di conoscenza e delle ricadute innovative, socioeconomiche e culturali, caratterizzanti l'evoluzione di queste nuove tecnologie di produzione.

Il progetto REVERSING

La ricerca REVERSING è stata finanziata dalla Regione Toscana nell'ambito del bando 2 "Progetti di ricerca e svilup-

po 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 di Architettura dell'Università di Firenze e 4 SME toscane (Polistamp, Kentstrapper, Santelli Vetri e Zeta Lab), mira a sviluppare un kit di componenti di involucro innovativi assemblabili in un sistema di facciata a celle, con l'intento di:

- aumentare la competitività delle aziende coinvolte, attraverso l'innovazione di prodotto e processo, grazie all'uso di nuovi materiali e tecnologie digitali, ispirate dal modello Impresa Intelligente e sostenibile della Regione Toscana;
- facilitare il trasferimento di conoscenza tra l'accademia e l'industria, aprendo a nuovi orizzonti di ricerca *market oriented*;
- promuovere la produzione di prodotti edilizi innovativi utilizzabili per creare ambienti di vita sostenibili e resilienti.

In coerenza con la Strategia di specializzazione intelligente S3 della Regione Toscana³, REVERSING risponde agli ambiti applicativi "Ambiente ed Energia e Impresa Intelligente e Sostenibile" ed alle sfide inerenti le transizioni:

- digitale, mediante lo sviluppo di un sistema di soluzioni tecnologiche 3DP che permettano alle imprese coinvolte di innovare i processi di progettazione, produzione e gestione sostenibile dei manufatti prodotti;
- ecologica, attraverso la realizzazione di sistemi e componenti, sviluppati con materiali ecocompatibili secondo i principi del *Circular Design* e dell'Industria 5.0 e pensati

egy to maximise the impact of research and innovation on the territory.

The national application 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. This is achieved with the support of Research Organisations (ORs) to promote: 1) the reduction of the environmental impact of processes and products; 2) 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); 3) 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 pro-

moting the protection of workers' fundamental rights, and attracting highly 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 3DP 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

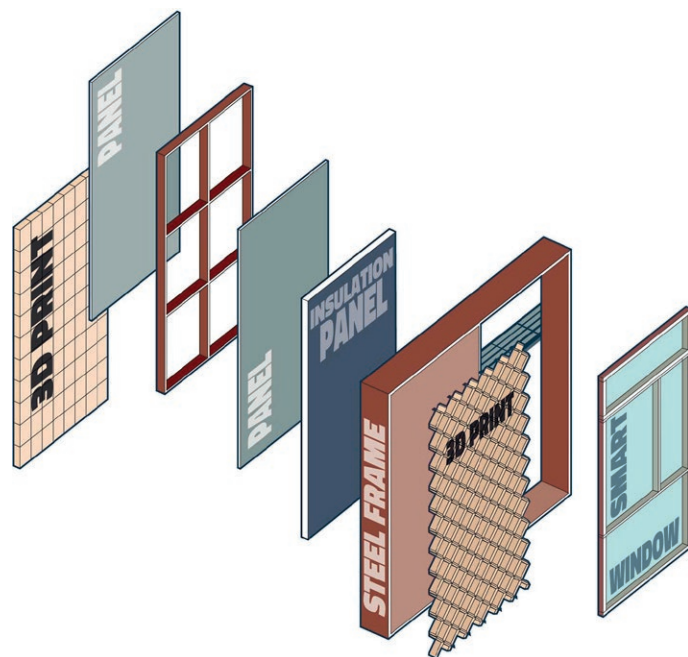
modular and dry-assembled façade system based on restorative design principles, and manufactured with low environmental impact materials through additive and subtractive manufacturing processes.

Specifically, after a brief research presentation, the analysis will focus on selected results concerning the development of building components produced through additive manufacturing (AM) processes. The discussion will begin with a reconstruction of the current state of the art in this production sector, aiming to define the collaborative relationships established across different regions and application fields and within their respective value production chains. The analysis examines the dynamics of knowledge transfer and the associated innovative, socio-economic, and cultural impacts that characterise the evolution of addi-

tive manufacturing in the construction sector.

The REVERSING project

The REVERSING research project has been funded by the Tuscany Region under Call 2 "Research and Development Projects for MPMI and Midcaps" as part of the PR-FESR 2021-2027, Action 1.1.4 'Research and Development for Enterprises, including in collaboration with Research Organisations'. In line with the funding programme's objectives, the project, conducted in partnership with the Architecture Department of the University of Florence and four Tuscan SMEs (Polistamp, Kentstrapper, Santelli Vetri, and ZetaLab), aims to develop a kit of innovative envelope components that can be assembled into a cellular façade system, with the goal of:



per essere completamente reversibili e integrabili con impianti per la produzione di energia rinnovabile. Inoltre, coerentemente con le missioni strategiche dell'“Agenda 2030: verso una Toscana sostenibile”³⁴ 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) ideate per garantire il comfort termico e acustico dello spazio confinato;
- *Wellness e health outdoor*, integrando nella superficie esterna del modulo opaco elementi prodotti con processi di stampa additiva che possono essere integrati con piante e trattati con superfici fotocatalitiche a bassa emissività termica, pensati per contribuire in modo efficace alla mitigazione dell'effetto isola di calore, aumentando il comfort e la biodiversità degli spazi esterni;
- la produzione di energia rinnovabile, mediante l'integrazione di *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) nel sistema di chiusura trasparente ideato come una *smart window*.

In linea con questa struttura operativa, che parte da un TRL 4-5 (Tecnologia convalidata in laboratorio e Tecnologia convalidata in ambiente industrialmente rilevante) e arriva ad un TRL 7 (Dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo), il progetto è stato organizzato in 5 Obiettivi Operativi (O.O.) che sono declinati nell'arco di 18 mesi di lavoro (da settembre 2024 a Febbraio 2026) rispetto ad una semplice struttura ad albero (Fig. 2) nella quale, dopo una fase di analisi e approfondimento del concept del sistema di facciata REVER-

SING, si passa allo sviluppo (nell'ambito degli O.O.2, O.O.3, O.O.4, dal mese 3 al mese 9) dei 4 prodotti (un sistema di involucro opaco, una *smart window*, due sistemi di finitura realizzati con moduli ottenuti attraverso processi di stampa additiva) integrabili nel *mockup* del sistema REVERSING, realizzato nell'O.O.5 (dal mese 10 al mese 18).

Manifattura Additiva e trasferimento tecnologico market oriented

Dallo studio condotto nella fase di analisi dello stato dell'arte (Fig. 3), finalizzato a ricostruire l'evoluzione della 3DP nel settore delle costruzioni, è emerso come l'adozione dei processi di AM sia sicuramente riconducibile ad un'accelerazione del passaggio di conoscenza dal mondo imprenditoriale a quello della ricerca scientifica e non viceversa, misurabile in modo tangibile

a) Enhancing the competitiveness of the involved companies through product and process innovation, leveraging new materials and digital technologies 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 market-oriented research opportunities;

c) Promoting the production of innovative building components, enabling the creation of sustainable and resilient living environments.

By the Smart Specialisation Strategy S3 of the Tuscany Region³⁵, 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 so-

lution system, which can be realised with 3DP to enable the involved companies to innovate the design, production and sustainable management processes of the manufactured products;

2. The ecological transition will be achieved by realising systems and components developed according to the principles of Circular Design and Industry 5.0, created with environmentally-friendly materials and designed to be completely reversible. These systems can be integrated with renewable energy production systems to contribute to the energy efficiency of existing buildings.

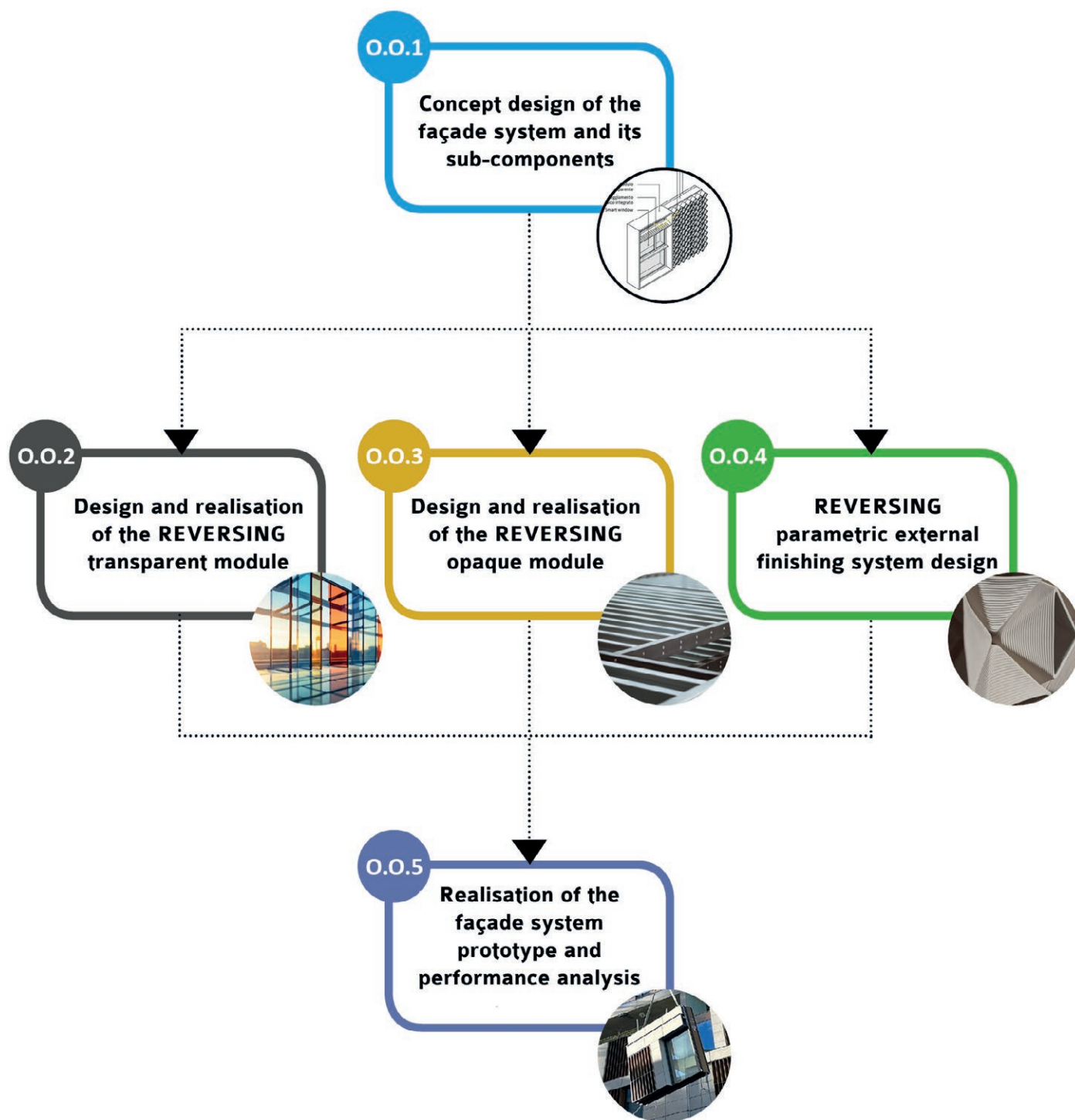
Moreover, in line with the strategic missions of the “2030 Agenda: towards a sustainable Tuscany”³⁶, all the technological systems included in the REVERSING module (Fig.1) are designed to promote the following:

– Indoor wellness and health are ensured through adopting technological and compositional solutions (such as the geometry of the elements, the stratigraphy of the envelope assemblies, and the use of adaptive coatings) specifically designed to guarantee thermal and acoustic comfort within enclosed spaces;

– Outdoor wellness and health are achieved by integrating elements produced through additive manufacturing processes into the external surface of the opaque module. These elements can be combined with vegetation and treated with photocatalytic surfaces exhibiting low thermal emissivity. They are designed to effectively mitigate the urban heat island effect, enhancing comfort and biodiversity in outdoor spaces;

– Renewable energy production through integrating Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) within the transparent closure system, conceived as a smart window.

The project adopts an operational framework that initiates at TRL 4-5 (technology validated in laboratory and a relevant industrial environment), and advances to TRL 7 (demonstration of a system prototype in an operational environment), structuring its activities into five Operational Objectives (O.O.). These are distributed over 18 months (from September 2024 to February 2026) according to a straightforward hierarchical structure (Fig. 2). Following an initial phase of analysis and in-depth exploration of the REVERSING façade system concept (O.O.1, from month 1 to month 18) (Fig. 3), the development phase takes place (within O.O.2,



O.O.3, O.O.4, from month 3 to month 9) of four products – one opaque envelope system, one smart window, and two finishing systems fabricated with modules produced via additive manufacturing processes. The process integrates these products into the REVERSING façade mockup developed during O.O.5 (from month 10 to month 18).

Additive manufacturing and market-oriented technology transfer
 The study conducted during the state-of-the-art analysis phase (Fig. 3), aimed at reconstructing the evolution of 3DP in the construction sector, highlights how the adoption of AM processes can be primarily attributed to an acceleration in the transfer of knowledge from the entrepreneurial

domain to the scientific research domain, rather than the reverse. This dynamic is tangibly measurable through the patents developed in this field by the companies and research centres involved (Romano and Mazzoni, 2025). 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,

Technological 3DP innovation timeline: in blue, innovations related to the industrial sector; in red, those attributable to the academic sector, author's elaboration

dai brevetti sviluppati in questo ambito dalle aziende e dai centri di ricerca coinvolti (Romano and Mazzoni, 2025).

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* dell'azienda italiana WASP. Il metodo di costruzione impiegato da Urschel, descritto come *layered, horizontal slip forming* segna 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).

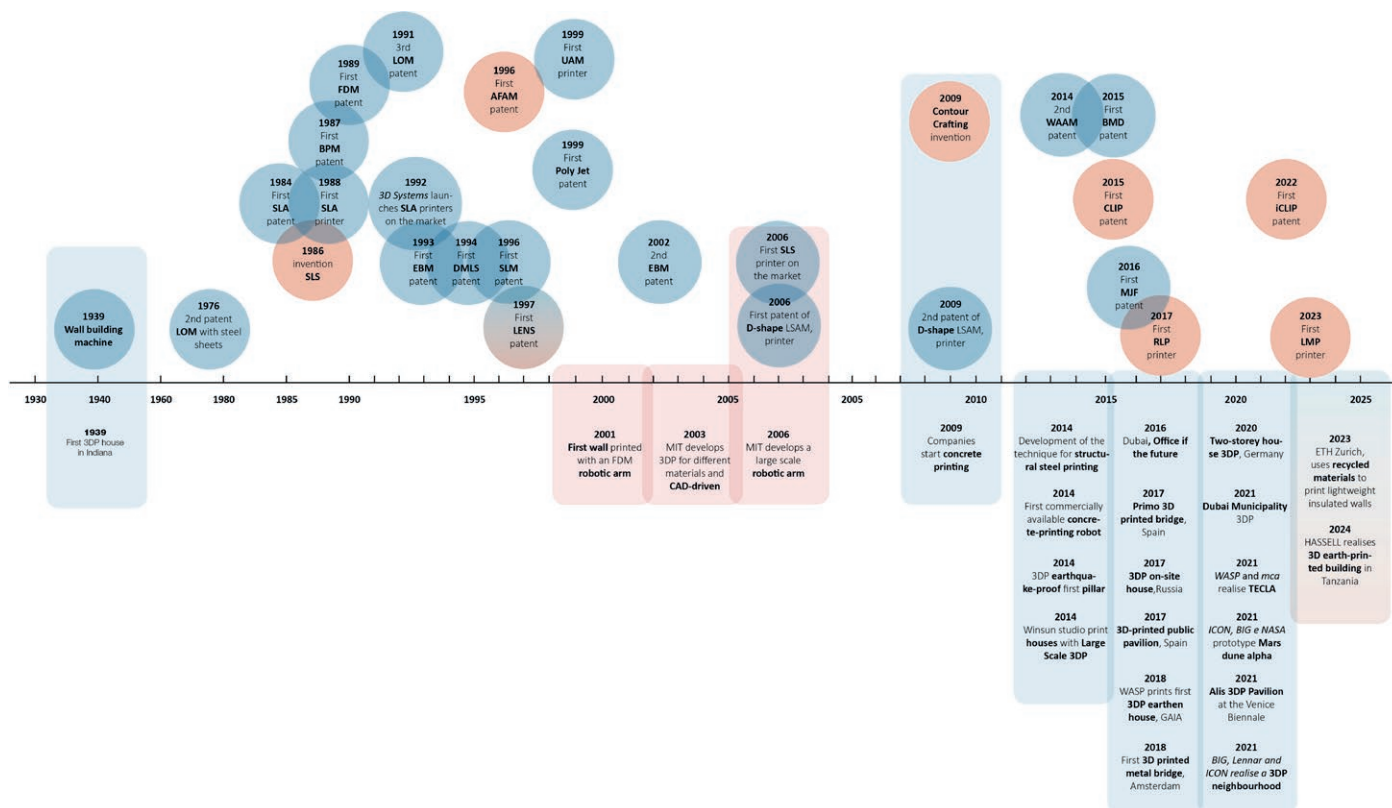
Ma è solo a partire dalla fine degli anni Ottanta e nel corso degli anni Novanta, che le nuove metodologie di 3DP (*Rapid Tooling*, *Rapid Casting* e *Rapid Manufacturing*) si diffondono nel settore industriale per supportare i processi di prototipazione rapida. Tra i principali protagonisti di questa fase evolutiva non si può fare a meno di citare C. Hull, co-fondatore dell'impresa *3D Systems*, che nel 1988 inventa la prima stampante stereolitografica (SLA) della storia utilizzabile per realizzare componenti in resina fotosensibile (Hull, 1984).

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

In linea con queste innovazioni, alla fine del ventesimo secolo, grazie alla diffusione di nuovi strumenti informatici di progettazione e controllo computazionale, l'AM si diffonde rapidamente nel settore delle costruzioni come processo tecnologico innovativo utilizzabile per realizzare singole parti o interi edifici.

Un contributo determinante in tal senso è rappresentato nel 1994 dalla commercializzazione da parte di *Autodesk*, della prima versione di *AutoCAD* compatibile con la modellazione 3D che rivoluziona il mondo della progettazione digitale e della realizzazione.

Quasi in contemporanea, nel 1993, il *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) costruisce il primo sistema di 3DP a guida *Computer-Aided Design* (CAD) che porterà, nel 2006, allo sviluppo dei bracci robotici multi-asse compatibili con diverse tipologie di materiali.



Partendo da queste importanti innovazioni, nel 1996, B. Khoshnevis, professore di ingegneria civile e direttore del *Center for Rapid Automated Fabrication Technologies* (CRAFT) della *University of Southern California*, brevettò *Additive Fabrication Apparatus and Methods* (AFAM)⁵, basato sul processo di *Contour Crafting* (Khoshnevis, 2004), una tecnologia che oggi si estende oltre la lavorazione degli impasti cementizi, includendo la sperimentazione con composti argillosi e di materiali *bio-based* (Alzarrad and Elhouar, 2019).

Nel primo decennio dell'XI secolo, allo scadere dei brevetti relativi ai processi di stampa SLS e FDM (rispettivamente nel 2006 e nel 2009) si assiste alla nascita di realtà produttive caratterizzate dalla volontà di realizzare nuove stampanti, anche di grande scala, utilizzabili per realizzare mediante processi di AM utensili di piccola taglia e sistemi edilizi più o meno complessi.

Tra queste imprese c'è Kentstrapper (partner della ricerca REVERSING per lo sviluppo di componenti di involucro realizzati con processi di AM), fondata nel 2010 dai fratelli Lorenzo e Luciano Cantini che, ispirandosi al progetto visionario *RepRap*⁶ promosso da A. Bowyer (un ricercatore in ingegneria meccanica dell'Università di Bath), cominciano ad assemblare dispositivi autoreplicanti per creare in autonomia oggetti utilizzabili nella vita di tutti i giorni.

È interessante notare come nell'ultimo decennio la sperimentazione dei processi di AM su larga scala abbia determinato un'intensa competizione tecnologica finalizzata al raggiungimento di primati globali (e.g. il primo ponte in acciaio 3DP ad Amsterdam; il primo modello abitativo ecosostenibile 3DP a Massa Lombarda, Italia) (Alzarrad and Elhouar, 2019). Si tratta di innovazioni che hanno riguardato principalmente il settore

delle costruzioni (Tab. 1) e che sono state sviluppate grazie alla collaborazione tra grandi imprese edili (e.g., WINSUN, ICON) e studi internazionali di architettura e ingegneria (e.g., BIG, Zaha Hadid architects), che hanno investito nella creazione 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, con applicazioni nell'industria manifatturiera e nella prototipazione avanzata (Tab. 2) con un grande potenziale di trasferimento sul mercato. In questo ambito, un ruolo centrale è stato svolto dai centri di ricerca universitari, 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*, matrici fibrocomposate, etc.) e a controllo di forma (e.g. *responsive shade*, *complex geometry optimization*, etc.), ampliando ulteriormente il ventaglio delle applicazioni della 3DP e consolidando il ruolo strategico nell'ambito del trasferimento della conoscenza tra il settore edilizio e quello della ricerca, per muoversi verso gli ambiti di indagine propri dell'architettura, dell'informatica e delle scienze applicate.

Componenti REVERSING realizzati con processi di Manifattura Additiva

L'attività di ricerca sviluppata nel contesto dell'O.O.4 del progetto REVERSING (finalizzata a realizzare componenti di finitura interna ed esterna con processi di AM commercializzabili

introducing geometry control without using formwork' (Curth, 2022).

Only from the late 1980s and throughout the 1990s did new 3DP methodologies, such as Rapid Tooling, Rapid Casting, and Rapid Manufacturing, begin to be patented and gradually disseminated across the industrial sector to support rapid prototyping processes. Among the key figures in this evolutionary phase, it is essential to mention C. Hull, co-founder of 3D Systems, who in 1988 developed the first Stereolithographic (SLA) printer in history, capable of producing components in polymer resin (Hull, 1984). During the same period, in 1986, C. Deckard, then a student at the University of Texas at Austin, patented Selective Laser Sintering (SLS) technology (Deckard, 1997), while in 1989, S. Crump, co-founder of Stratasys Inc., refined the Fused Deposition Model-

ling (FDM) process, based on the hot extrusion of thermoplastic polymers (Wu *et al.*, 2016).

In line with these innovations, by the end of the twentieth century, AM had rapidly expanded into the construction sector as an innovative technological process capable of producing individual components or entire buildings. This diffusion was significantly driven by contributions from the academic sector and the widespread adoption of new digital design tools and computational control systems. A pivotal milestone in this evolution was the 1994 release by Autodesk of the first version of AutoCAD compatible with 3D modelling, which revolutionised the fields of digital design and fabrication. Almost simultaneously, in 1993, the Massachusetts Institute of Technology (MIT) developed the first CAD-guided 3DP system, which later led, in

2006, to the advancement of multi-axis robotic arms compatible with various material types.

Building on these significant innovations, in 1996, B. Khoshnevis, Professor of Civil Engineering and Director of the Centre for Rapid Automated Fabrication Technologies (CRAFT) at the University of Southern California, patented the Additive Fabrication Apparatus and Methods (AFAM)⁵, based on the Contour Crafting process (Khoshnevis, 2004). Initially developed for cement-based mixtures, this technology has since evolved into experimental applications involving clay-based compounds and bio-based materials (Alzarrad and Elhouar, 2019).

In the first decade of the 21st century, following the expiration of patents related to SLS and FDM printing processes (in 2006 and 2009, respectively), several manufacturing

ventures emerged to develop new, often large-scale printers for use in the construction sector. These printers were designed to fabricate building systems of varying complexity through AM processes. Among these companies is Kentstrapper, a partner in the REVERSING research project for developing envelope components produced via additive manufacturing, founded in 2010 by brothers Lorenzo and Luciano Cantini. Inspired by the visionary RepRap⁶ project initiated by A. Bowyer, a mechanical engineering researcher at the University of Bath, they began assembling self-replicating devices capable of autonomously producing everyday objects.

It is noteworthy that over the past decade, large-scale experimentation with additive manufacturing (AM) processes has triggered intense technological competition aimed at achieving global

Tab. 1 | Applicazioni nel settore edilizio e nella prototipazione avanzata di costruzioni realizzate tramite Large-scale 3DP
Applications in the construction sector and advanced prototyping of buildings created through Large-scale 3DP

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), Plymvent (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-printed building	2024	HASELL (International architecture firm), Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), EOC (LE)	Hope Village, Tanzania	(Zeitoun, 2024)

| Tab. 01

nel settore delle costruzioni) è stata condotta, in linea con quanto emerso dall’analisi dello stato dell’arte, con l’obiettivo di ampliare il *know how* e il *market business* delle aziende partner, e per dimostrare come l’utilizzo di tecnologie AM possa incidere positivamente sull’impatto ambientale dell’intero processo realizzativo grazie alla possibilità di controllare tempi e costi di produzione. Il progetto REVERSING ha, infatti, l’ambizione di promuovere l’uso della 3DP per 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, realizzabili con processi di stampa FDM e materiali innovativi (bio-polimeri, plastiche

firsts (e.g., the first 3DP steel bridge in Amsterdam; the first eco-sustainable 3DP housing prototype in Massa Lombarda, Italy) (Alzarad and Elhouar, 2019). These innovations have primarily affected the construction sector (Table 1) and have been made possible through collaborations between major construction firms (e.g., WINSUN, ICON) and international architecture and engineering studios (e.g., BIG, Zaha Hadid Architects), which have invested in the development of large-scale robotic and printing machinery, laying the foundation for an unprecedented cultural and technological transformation (Jassmi *et al.*, 2018). In parallel, the 21st century has witnessed significant growth in small-scale additive manufacturing (AM), particularly in advanced prototyping and manufacturing (Table 2), with

strong market transfer potential. In this field, university research centres (e.g., TU Delft, ETH Zurich, MIT) have been central 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, 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 3DP 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 activity carried out within the framework of Work Package O.O.4 of the REVERSING project (aimed at developing internal and external finishing components through commercially viable additive manufacturing processes for the construction sector) was conducted, under the findings of the state-of-the-art analysis, to expand the know-how and market potential of the partner companies. The ultimate aim was to demonstrate how the use of AM technologies can positively influence the environmental impact of the entire construction process, owing to the possibility of controlling both production time and costs. The REVERSING project aims to promote the use of 3DP to explore the potential for expanding the customisation of technological envelope systems.

It seeks to tailor this customisation to meet client requirements, and to achieve specific acoustic and thermal performance levels closely aligned with the climatic conditions of the construction site. The project will also support decentralising production processes to promote new smart factory models. In line with this ambition, the team has initiated the design and prototyping of modular systems. They create these systems using FDM printing processes and innovative materials (e.g., biopolymers and recyclable plastics) that can be integrated into vertical envelope surfaces through dry assembly systems. The creative phase was managed in close synergy with Kentstrapper, Polistamp, and ZetaLab, who supported the research team in validating the metadesign choices, and in the digital

Tab. 2 | Applicazioni nell'industria manifatturiera e nella prototipazione avanzata di sotto-componenti di involucro realizzati tramite Small-scale 3D printing
Applications in the manufacturing industry and advanced prototyping of envelope subcomponents created through Small-scale 3DP

Tab. 02 |

Small-scale 3D printing envelope sub-components 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	Aguafoja I	2019	MIT Media Lab (Interdisciplinary Research Laboratory) and 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 printed concrete facades	2022-	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, Department for Microsystems Engineering (IMTEK), Cluster of Excellence Living, Adaptive and Energy-autonomous Materials Systems (livMatS)	Freiburg, Germany	(Burgos, 2025; Cheng et al., 2024)

modelling of a customised abacus of adaptive elements responsive to both internal and external microclimatic conditions. These elements were designed to:

- purify the air through the application of photocatalytic coatings, anti-bacterial paints, and the integration of vegetation;
- mitigate the urban heat island effect by enabling the fabrication of rough-textured surfaces using materials with a Solar Reflectance Index (SRI) greater than 0.28;
- reduce the building’s overall energy consumption for heating and cooling, through the use of insulating materials with low thermal conductivity and high thermal attenuation, alongside the integration of solar shading systems;
- enhance the acoustic insulation performance of the façade by develop-

ing internal and external finishing systems produced via 3D printing processes.

The REVERSING façade system has also been designed using subcomponents, whose shapes and colours are inspired by restorative design principles. The aim is to enhance users’ aesthetic perception and psycho-perceptual well-being.

Using energy simulations conducted under quasi-steady-state conditions, the O.R. supported the design and execution phases, collaborating with the participating companies to identify the most effective materials and geometric solutions for defining the modules’ characteristics (fig.4).

To this end, a series of B2B (Business-to-Business) meetings were organised with the following objectives:

- Draft the executive design of the internal and external envelope sys-

tems of the REVERSING opaque module, implementing the production process of the system’s subcomponents through the use of additive manufacturing techniques and dedicated parametric modelling tools, developed with the support of Kentstrapper (Fig. 5);

- Analyse the technological characteristics of the fastening systems required to anchor the internal and external finishing modules to the opaque façade component, developed with the contribution of Polistamp (Fig. 6);
- Develop, in collaboration with ZetaLab, acoustic simulations using advanced software to model and test, during the metadesign phase, the sound-absorbing properties of the tiles printed by Kentstrapper. These simulations aim to assess the impact of the internal and external

enclosure modules on the building’s overall acoustic insulation and reverberation phenomena within enclosed spaces.

These moments of interaction have led to increased knowledge among all parties involved, fostering technological innovation processes aligned with the principles outlined in the EU’s Knowledge Transfer Matrix strategy (2022). This strategy aims to facilitate the systematic exchange and application of knowledge among diverse stakeholders, thereby optimising the impact of research outcomes and accelerating the translation of innovation into best practices.

Conclusions

In the coming decades, the construction sector will face a perfect storm, precisely that of meeting the growing demand for new buildings and infra-

riciclabili, ecc.), integrabili, attraverso sistemi di assemblaggio a secco, in superfici di chiusura verticale.

La fase creativa è stata gestita in stretta sinergia con Kentstrapper, Polistamp e ZetaLab, che hanno supportato il team di ricercatori nella validazione delle scelte metaprogettuali e nella modellazione digitale di un abaco customizzato di elementi adattivi alle condizioni microclimatiche interne ed esterne, pensati per:

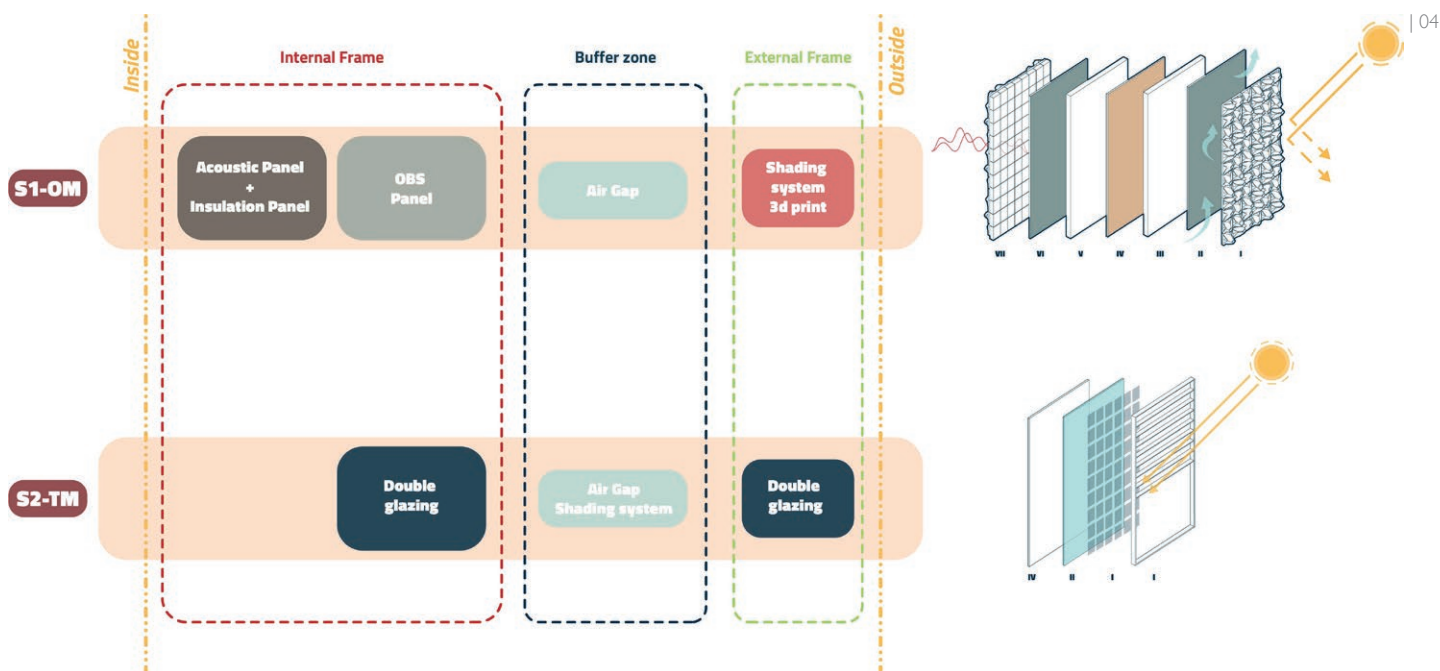
- depurare l'aria, attraverso l'applicazione di *coating* fotocatalitici, vernici antibatteriche e integrazione di vegetazione;
- ridurre l'effetto isola di calore, grazie alla possibilità di realizzare superfici scabre con materiali con un Indice di Riflettanza Solare (SRI) maggiore di 0,28;
- diminuire i consumi energetici globali dell'edificio per riscaldamento e raffrescamento, utilizzando materiali isolanti con bassa conducibilità e buona attenuazione termica;
- incrementare le prestazioni fonoisolanti di facciata, mediante la realizzazione di sistemi di finitura interni ed esterni realizzati con processi di 3DP.

Il sistema di facciata REVERSING è stato, inoltre, progettato per essere realizzato con sottocomponenti che hanno forme e colori ispirate dal *restorative design* così da migliorare la percezione estetica e il benessere psico-percettivo degli utenti (fig.4). 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 e le soluzioni geometriche più performanti per la definizione delle caratteristiche dei moduli.

Con questo intento sono stati organizzati una serie di incontri *Business-to-Business* finalizzati a:

- redigere il progetto esecutivo 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, sviluppati con il supporto di Kentstrapper (Fig. 5);
- analizzare le caratteristiche tecnologiche dei sistemi di aggancio necessari ad ancorare i moduli di finitura interni ed esterni al componente di facciata opaco realizzato con il contributo di Polistamp (Fig. 6);
- sviluppare, in collaborazione con ZetaLab, delle simulazioni acustiche con software avanzati, per modellare e testare in fase metaprogettuale le proprietà fonoassorbenti delle *tiles* stampate da Kentstrapper, valutando l'effetto dei moduli di chiusura interni ed esterni sull'isolamento acustico globale dell'edificio e sui fenomeni di riverbero dello spazio confinato.

Questi momenti di interazione hanno portato alla crescita di conoscenza di tutti i soggetti coinvolti, promuovendo processi di innovazione tecnologica in linea con quanto indicato nella strategia *Knowledge transfer metric* adottata dell'UE (2022) e finalizzata a facilitare lo scambio e l'applicazione sistematica di conoscenza tra i diversi attori, ottimizzando l'impatto dei risultati della ricerca e accelerando la traduzione dell'innovazione in buone pratiche.



05 | Alcuni dei prototipi dei componenti di finitura REVERSING realizzati con l'utilizzo di stampanti 3D, elaborazione da parte degli autori
Some of the prototype models of the finishing components produced with AM, author's elaboration

06 | Alcuni studi inerenti l'analisi dei sistemi di aggancio delle tiles REVERSING realizzate con processi di AM, elaborazione da parte degli autori
Some studies concerning the analysis of tile attachment systems realised with AM processes, author's elaboration

05 |



Conclusioni

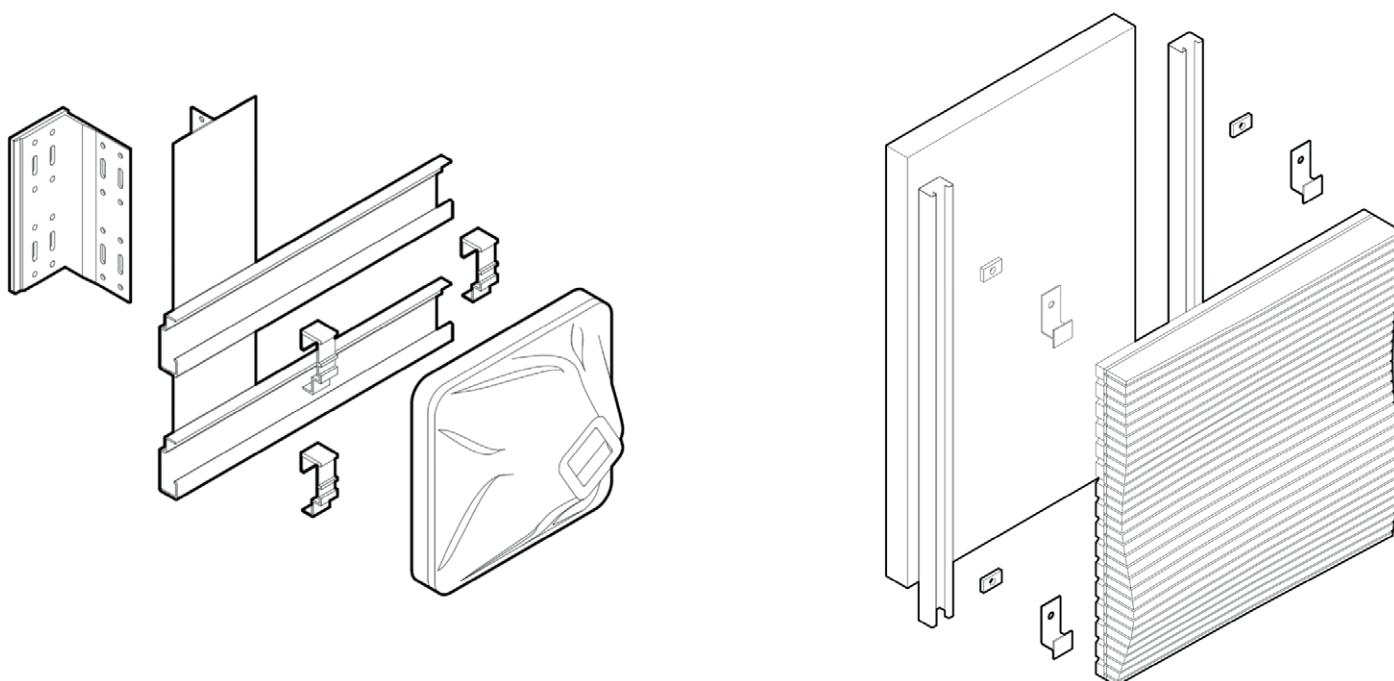
Nei prossimi decenni, il settore delle costruzioni dovrà affrontare una tempesta perfetta: soddisfare la crescente domanda di nuovi edifici e infrastrutture, soprattutto nei paesi in via di sviluppo; gestire i processi di manutenzione e rigenerazione del patrimonio esistente del mondo occidentale; adottare pratiche circolari per azzerare le emissioni di CO₂ e ottimizzare i processi produttivi a scala globale.

Rispetto a questa prospettiva futura la diffusione e la standardizzazione dei processi di AM e di approcci produttivi integrati guidati da tecniche di *Computational Intelligence* determinano progressi sostanziali a sostegno della transizione sostenibile del settore edilizio. Dal punto di vista sociale, le macchine replican-

ti potranno mitigare la carenza di manodopera e migliorare la sicurezza nei cantieri, ma comporteranno cambiamenti significativi che richiederanno il coinvolgimento di tutti gli attori del processo edilizio, chiamati a gestire l'innovazione sviluppando protocolli tecnico-normativi per regolamentare sicurezza, protezione dei dati e integrazione della manodopera, garantendo una diffusione equa e responsabile della robotica autonoma.

La ricerca REVERSING affronta queste sfide, promuovendo a scala locale l'innovazione delle filiere di produzione di sistemi di facciata prefabbricati, mediante la realizzazione e la 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

06 |



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

Può essere considerato promettente che i risultati conseguiti, alcuni dei quali presentati in queste pagine, abbiano già suscitato l'interesse di attori esterni al partenariato, portando al finanziamento della ricerca di dottorato R3NEW⁷ e del progetto di *Public Engagement Urban Bloomers*⁸ finalizzati a sviluppare dei prototipi di apparato murario realizzati con processi di 3DP che saranno installati e monitorati in 2 edifici scolastici del Comune di Firenze con l'obiettivo di dimostrare come i processi e la diffusione di nuove conoscenze e pratiche responsabili possano essere utili ad affrontare le transizioni socio-ecologiche nel medio e lungo periodo e le sfide della scienza aperta per il prossimo futuro.

ATTRIBUZIONI E RICONOSCIMENTI

Questo articolo è stato sviluppato nell'ambito del progetto REVERSING ("Regenerative EnVelopE foR deep regeneration of School and office buildings"), finanziato dal Fondo di Sviluppo Regionale 2021-2027 di cui è coordinatrice scientifica la prof.ssa R. Romano. Si ringraziano tutti i partner coinvolti nell'attività di ricerca, in particolare Luciano Cantini di Kentstrapper per il supporto dato nello sviluppo dei sistemi realizzati con processi di Manifattura Additiva.

L'articolo è stato redatto in modo congiunto dai due autori. Tuttavia: alla prof.ssa R. Romano (che ha curato la revisione dei contributi) possono essere attribuiti i paragrafi Introduzione, il progetto Reversing e Componenti REVERSING realizzati con processi di Manifattura Additiva; alla dott.ssa E. Mazzoni (che si è occupata della redazione generale dei contenuti) possono essere attribuiti i paragrafi: Manifattura Additiva e trasferimento tecnologico *market oriented* e Conclusioni.

structure, particularly in developing countries; managing the maintenance and regeneration of the existing building stock in the Western world; and adopting circular practices to achieve net-zero CO₂ emissions and optimise production processes on a global scale. In light of this future outlook, the widespread adoption and standardisation of AM processes and integrated production approaches driven by computational intelligence techniques will bring substantial advancements to support the construction industry's sustainable transition.

From a social perspective, replicating machines could mitigate labour shortages and improve safety on construction sites. However, they will also entail significant changes requiring the involvement of all actors in the construction process, who must manage innovation by developing techni-

cal and regulatory protocols to govern safety, data protection, and workforce integration, ensuring the equitable and responsible deployment of autonomous robotics.

The REVERSING research project addresses these challenges by fostering local-scale innovation in the production chains of prefabricated façade systems through developing and commercialising innovative envelope systems. These systems are produced using additive manufacturing and mass customisation processes. They are inspired by blue economy principles to positively impact the business and organisational models of the industrial partners involved and their associated production ecosystems.

It is promising that the results, some of which are presented here, have already attracted interest from external stakeholders beyond the partnership. This

NOTE

¹ https://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

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>

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

⁶ RepRap (*Replicating Rapid Prototyper*), concepito come un sistema robotico completo, comprendente software CAD e CAM, oltre a driver per convertire i progetti in istruzioni per la stampa fisica. Tutti i contenuti sono stati rilasciati con licenze *open source*, promuovendo la diffusione della conoscenza, l'accesso democratico e l'innovazione rapida, con l'obiettivo di favorire un cambio di paradigma: dalla produzione centralizzata e brevettata alla fabbricazione personale, aperta e non proprietaria (Kantaros, 2024).

⁷ Il progetto di ricerca di dottorato R3NEW - *Restorative 3D-Printed Envelope for New Environments in Public Building Renovation*, è stato co-finanziato dal Comune di Firenze nell'ambito del bando borse di Dottorato XXXIX CICLO su fondi PNRR. La ricerca, condotta dalla dott.ssa E. Mazzoni con la supervisione delle prof.sse R. Romano (DIDA, UNIFI) e M. Turrin (BK&T, TU Delft) mira a sviluppare sottocomponenti di involucro edilizio multi-prestazionali mediante l'utilizzo di tecnologie di 3DP per la stampa di materiali naturali e metodologie di *Computational Intelligence*, al fine di esplorare configurazioni geometriche innovative che migliorino l'efficienza energetica degli edifici, favorendo al contempo l'integrazione di consorzi vegetali per il ripristino della biodiversità urbana e il miglioramento del comfort microclimatico.

⁸ <https://www.urbanbloomers.unifi.it/> *Urban Bloomers* è un progetto di Public Engagement inter e trans-disciplinare, sviluppato in collaborazione tra 3 Dipartimenti dell'Università di Firenze (DIDA, BIO e DAGRI), 2 Pubbliche Amministrazioni (Regione Toscana e Comune di Firenze), 2 SME locali (Kentstrapper e R3direct), e 2 associazioni nazionali (Accademia Italiana

has led to funding for the doctoral research project R3NEW⁷ and the Public Engagement initiative Urban Bloomers⁸, aimed at creating prototypes of wall assemblies manufactured through 3DP processes. These prototypes will be installed and monitored in two school buildings in the Municipality of Florence to demonstrate how processes and disseminating new knowledge and responsible practices can effectively address socio-ecological transitions over the medium and long term, and the challenges of open science.

ATTRIBUTIONS AND ACKNOWLEDGMENTS

This paper was developed within the framework of the REVERSING project ("Regenerative EnVelopE for deep regeneration of School and office buildings"), funded by the 2021-2027 Regional Development Fund,

with Professor R. Romano serving as the scientific coordinator. The authors thank all partners involved in the research activities, particularly Luciano Cantini of Kentstrapper, for his support in developing systems produced through Additive Manufacturing processes.

Both contributors jointly authored the paper. However, the following attribution applies: Professor R. Romano, who oversaw the review of contributions, is responsible for the sections Introduction, the REVERSING project, and REVERSING components created through Additive Manufacturing processes; Dr. E. Mazzoni, who managed the overall drafting of the content, is responsible for the sections Additive Manufacturing and Market-Oriented Technology Transfer, and Conclusions.

di Scienze Forestali e Citizen Science Italia) e sarà sviluppato grazie al finanziamento ottenuto nell'ambito del bando UNIFI EXTRA 2025 dell'Università di Firenze.

REFERENCES

Alzarrad, M. A., and Elhouar, S. (2019), "3D Printing Applications in Construction from the Past and into the Future", in *Proceedings of the Creative Construction Conference 2019*, available at: <https://doi.org/10.3311/CCC2019-103> (Accessed on 02/03/2025).

Curth, A. (2022), "Slip Forming to Construction 3D Printing: The early history of Large-Scale Additive Manufacturing", *ICI Journal*, Vol. 23, pp. 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 02/03/2025).

EIC - European Innovation Council (2024), *EIC Tech Report. BACKING VISIONARY ENTREPRENEURS*, available at: https://eic.ec.europa.eu/document/download/6db51313-d1d5-4866-be94-ac7cee6dfb77_en?filename=EIC-tech-report-2024.pdf (Accessed on 02/03/2025).

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 02/03/2025).

EC - European Commission (2020), *NextGenerationEU. European Commission*, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/nextgenerationeu_en (Accessed on 02/03/2025).

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 on 02/03/2025).

Hull, C. W. (1984). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, United States Patent, Appl., No. 638905, Filed, available at: <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en> (Accessed on 03/03/2025).

NOTES

¹ https://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

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>

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

⁶ RepRap (Replicating Rapid Prototyper) was conceived as a complete robotic system, including CAD and CAM software as well as drivers for converting digital designs into instructions for physical printing. All content was released under open-source licenses, fostering knowledge dissemination, democratic access, and rapid innovation, with the aim of promoting a paradigm shift—from centralised, proprietary manufacturing to open, non-proprietary personal fabrication (Kantaros, 2024).

⁷ The doctoral research project R3NEW - Restorative 3D-Printed Envelope for New Environments in Public Building Renovation, has been co-funded by the Municipality of Florence in the framework of the XXXIX CYCLE doctoral scholarship call on PNRR funds. The research, conducted by Dr. E. Mazzoni with the supervision of profs. Romano (DIDA, UNIFI) and M. Turrin (BK&T, TU Delft), aims at developing multi-purpose building envelope sub-components through the use of 3DP technologies for the printing of natural materials and Computational Intelligence methodologies. The purpose is to explore innovative geometric configurations that improve the energy efficiency of buildings, while favouring the integration of plant consortia for the restoration of urban biodiversity and the improvement of microclimatic comfort.

⁸ <https://www.urbanbloomers.unifi.it/> Urban Bloomers is an inter- and trans-disciplinary *Public Engagement project*, developed in collaboration between 3 Departments of the University of Florence (DIDA, BIO and DAGRI), 2 Public Administrations (Tuscany Region and Municipality of Florence), 2 local SMEs (Kentstrapper and R3direct), and 2 national associations (Accademia Italiana di Scienze Forestali and Citizen Science Italia), and will be developed thanks to the funding of the UNIFI EXTRA 2025 by the University of Florence.

Al Jassmi, H., Al Najjar, F. and Mourad, A.-H.I. (2018), "Large-Scale 3D Printing: The Way Forward", *Proceedings of the 5th International Conference on Mechanical Engineering, Materials Science and Civil Engineering*, Kuala Lumpur, Malaysia, 15–16 December 2017, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 324, IOP Publishing, Article 012088, available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/324/1/012088> (Accessed on 03/03/2025).

Kantaros, A. (2024), "Intellectual Property challenges in the age of 3D Printing: Navigating the digital copycat dilemma", *Applied Sciences*, Vol. 14(23), 11448, available at: <https://doi.org/10.3390/app142311448> (Accessed on 03/03/2025).

Khoshnevis, B. (2004), "Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies", *Automation in Construction*, Vol. 13(1), pp. 5-19, available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012> (Accessed on 03/03/2025).

Romano, R., AND Mazzoni, E. (2025), "Sustainability performance analysis of innovative small-scale 3D printed envelope sub-components", *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 16(1), pp. 111-140, available at: <https://doi.org/10.22712/susb.20250008> (Accessed on 15/04/2025).

Wu, P., Wang, J., AND Wang, X. (2016), "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry", *Automation in Construction*, Vol. 68, pp. 21-31, available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005> (Accessed on 03/03/2025).

Wu, P., Wang, J., AND Wang, X. (2016), "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry", *Automation in Construction*, Vol. 68, pp. 21-31, available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005> (Accessed on 03/03/2025).