

Sara Codarin, <https://orcid.org/0000-0003-2310-821X>  
College of Architecture and Design, Lawrence Technological University, Southfield, Michigan, United States

scodarin@ltu.edu

**Abstract.** Lo stato di avanzamento tecnologico dell'automazione robotica nelle costruzioni permette di individuare una rinnovata agenda progettuale al punto di confluenza tra professione, ricerca accademica, *higher-education* e contesto culturale in cui le innovazioni hanno luogo. Il presente contributo delinea una ricerca svolta nell'ambito della fabbricazione digitale robotica additiva alla scala architettonica presso il College of Architecture and Design della Lawrence Technological University in collaborazione con lo studio Daub e la start-up Citizen Robotics in Metro Detroit. La realizzazione di un prototipo per un'installazione temporanea ha posto le basi per lo studio di fattibilità di una residenza di cui parte dell'involucro verrà stampato in 3D e la cui realizzazione è prevista nel corso del 2023.

**Parole chiave:** Fabbricazione digitale robotica; Stampa 3D; Design computazionale; Robotica additiva; Trasformazione digitale nei flussi di lavoro.

## Introduzione e contesto culturale

### *Il settore delle costruzioni nel quadro globale*

L'attuale sviluppo della Quarta

Rivoluzione Industriale nelle economie trainanti del mondo, intesa come l'insieme dei progressi smart nell'ambito dell'automazione industriale (Oesterreich *et al.*, 2016; Schwab, 2017), ha fatto emergere dei limiti afferenti al settore delle costruzioni, il quale da sempre tende ad opporre resistenza all'appropriazione di innovazioni tecnologiche capaci di influire su efficienza e produttività dei processi. A oggi, l'offerta di forza lavoro per le attività di cantiere è inferiore alla crescente domanda, in quanto i lavori edili non sono attrattivi ma percepiti come 4D – *dull, dirty, dangerous e difficult*, ovvero banali, sporchi, pericolosi e difficoltosi (Keramas, 1998). Sebbene l'edilizia registri un valore globale in crescita di 7,3 trilioni di dollari<sup>1</sup>, la convergenza di fattori come l'aumento del costo di materiali e manodopera<sup>2</sup>, la diminuzione del costo dell'automazione<sup>3</sup> e la contrazione della

disponibilità di maestranze qualificate richiede un approccio strategico nella formazione di nuove competenze professionali necessarie all'interno della filiera (Vial, 2021).

In questo sistema complesso, la robotizzazione può essere trasformativa nello strutturare il lavoro edile come professione intellettuale ove le macchine estendono le capacità umane tra mondo digitale e fisico (Daugherty and Wilson, 2018). In tal senso, in Europa, il programma euRobotics<sup>4</sup>, incentiva meccanismi per rafforzare competitività e promozione dell'impiego multi-settoriale di tecnologie robotiche finalizzate alla produzione customizzata nell'economia di scala. A livello internazionale, la necessità di riformare le competenze caratterizzanti il mercato del lavoro è espressa nell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite definita dai 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile<sup>5</sup>. La presente discussione si allinea, in modo particolare, agli obiettivi 8, 9 e 11 (Guenat *et al.*, 2022) che riguardano crescita economica, industrializzazione innovativa e accesso a città resilienti ed inclusive.

### *Test-bed operativo in Metro Detroit*

Lo Stato del Michigan, e nello specifico l'area metropolitana di Detroit, ha un ruolo centrale in relazione al contesto culturale in cui questo lavoro s'inserisce. Con oltre 15 mila robot installati in ambiente industriale ed una proporzione di 8,5 robot ogni mille lavoratori, Detroit è una delle città con la più alta concentrazione di robot negli Stati Uniti<sup>6</sup>. Per inquadrare questo dato in un contesto più ampio, un report dell'*International Federation of Robotics* dimostra che, nel 2021, la densità di strumenti di automazione per mille operai nell'industria manifatturiera risultava pari a 93.2 in Corea del Sud, 25.5 negli USA e,

Enhancing the workforce  
in construction: robotic  
concrete printing in  
Detroit

**Abstract.** The technological advancement of robotic automation in construction allows for the identification of a renewed design agenda at the intersection of professional practice, academic research, higher education, and the cultural context in which innovations take place. This paper outlines research conducted in the field of large scale digital robotic additive manufacturing at Lawrence Technological University, College of Architecture and Design, in collaboration with the architecture firm Daub and the start-up Citizen Robotics in Metro Detroit. The creation of a prototype for a temporary installation is used to assess the building feasibility of a home scheduled for completion in 2023, in which a portion of the exterior will be 3D printed.

**Keywords:** Additive manufacturing; Robotics; 3D printing; Computational design; Digital transformation.

## Introduction and cultural background

### *The construction sector in the global framework*

The current development of the Fourth Industrial Revolution in the world's leading economies, described as the set of intelligent advancements in industrial automation (Oesterreich *et al.*, 2016; Schwab, 2017), has revealed inherent limitations in the construction sector. Such limitations are due to the long-standing resistance to adopting technological innovations that could increase efficiency and productivity. Moreover, a noticeable labour shortage in construction jobs results from the industry being viewed as unattractive and perceived as 4D – *dull, dirty, dangerous, and difficult* (Keramas, 1998). Although the construction sector registers a global value of 7.3 trillion dol-

lars, the convergence of factors such as the increasing cost of materials and labour, the decreasing cost of automation, and the declining availability of skilled labour, requires a strategic approach to training new professional skills necessary within the industry (Vial, 2021).

In this intricate system, robotics can revolutionise the construction industry by making it an intellectually demanding profession where machines augment human abilities between digital and physical realms (Daugherty and Wilson, 2018). To that end, the euRobotics programme in Europe fosters mechanisms to boost competitiveness and promote the multi-sectoral use of robotic technology for customised production at scale. In addition, the United Nations 2030 Agenda, with its 17 Sustainable Development Goals, calls for reforms in labour market

in ordine decrescente nello scenario europeo, 37.1 in Germania, 28.9 in Svezia, 24.6 in Danimarca e 22.4 in Italia<sup>7</sup>. Data la forza trainante dell'industria pesante in Michigan e di quella automobilistica a Detroit, la capacità produttiva industriale è parte integrante del patrimonio culturale locale.

Tuttavia, nonostante il recente trasferimento tecnologico in architettura di workflow e strumenti derivanti dalle filiere della produzione seriale ai fini della customizzazione automatizzata (Carpo, 2017), si individua la carenza di un'infrastruttura in grado di diffondere conoscenza tecnologica collettiva nelle articolazioni granulari della comunità di Metro Detroit. Questa premessa definisce la motivazione per contribuire a promuovere *know-how* tecnologico e opportunità per l'*upskill* professionale tramite la ricerca d'innovazione nei processi progettuali e costruttivi in un sistema interconnesso caratterizzato da fattori ambientali, accademici, sociali, simbolici e culturali.

#### **Obiettivi e metodologia: sistemi automatizzati e opportunità per il design**

Il presente contributo espone gli esiti preliminari di una ricerca attualmente in corso che risulta da una collaborazione

tra accademia, professione e industria attraverso il coinvolgimento del College of Architecture and Design della Lawrence Technological University (LTU-CoAD, Detroit, Michigan), lo studio di architettura Daub e il fab-lab Citizen Robotics<sup>8</sup>, un laboratorio-officina che sviluppa servizi di fabbricazione digitale finalizzati ad impattare positivamente l'ambiente costruito in Metro Detroit fornendo accesso a robot e formazione sul territorio, nelle sue accezioni materiale e sociale.

L'attività è consistita nello sviluppare un flusso di lavoro basa-

skills. The discussion featured in this paper aligns particularly with Goals 8, 9, and 11 (Guenat *et al.*, 2022), which address economic growth, innovative industrialisation, and access to resilient and inclusive cities.

#### *A testbed in Metro Detroit*

The State of Michigan, specifically the Detroit metropolitan area, plays a central role due to the cultural context in which this work is carried out. With over 15,000 robots installed in industrial settings and a ratio of 8.5 robots per thousand workers, Detroit is one of the cities with the highest concentration of robots in the United States. A report by the International Federation of Robotics indicates that in 2021, the density of automation tools per thousand workers in the manufacturing industry was equivalent to 93.2 in South Korea, followed by 25.5 in the

US, and decreasingly 37.1 in Germany, 28.9 in Sweden, 24.6 in Denmark, and 22.4 in Italy. Given the driving force of heavy industry in Michigan and the automotive industry in Detroit, industrial production capacity is a foundational component of the local cultural heritage. However, despite the recent technological transfer of workflow and tools in architecture from serial production lines to pursue automated customisation (Carpo, 2017), the Metro Detroit community lacks infrastructure that supports the dissemination of collective technological knowledge. This premise explains the motivation to promote technical expertise and professional development by exploring innovation in design and building processes in an interconnected system shaped by environmental, academic, social, symbolic, and cultural elements.

to sull'uso della robotica alla scala architettonica per realizzare componenti costruttive tramite fabbricazione additiva utilizzando materiale cementizio. Il processo si è suddiviso in due fasi:

- 1) studio di fattibilità preliminare attraverso la realizzazione di un prototipo stampato in 3D all'interno di un corso di progettazione offerto dal College of Architecture and Design;
- 2) affinamento delle capacità tecnologiche tramite la progettazione esecutiva di un'unità residenziale costituita da una componente di involucro stampata in 3D per la quale sono in corso test quantitativi di verifica della performance termico-strutturale.

Gli obiettivi si sono strutturati sulla base di contenuti specifici che afferiscono agli ambiti progettuale, processuale, formativo e normativo della ricerca, ovvero:

- la definizione di un'agenda progettuale *fabrication-aware* (Pottmann, 2013) che mantenga la variabilità delle proposte formali nonostante i limiti tecnici, sociali ed economici che ostacolano l'integrazione diffusa della robotica in ambienti dinamici come i cantieri edilizi (Fingrut and Lau, 2022);
- l'elaborazione di un workflow basato sulla continuità computazionale e di fabbricazione affinché la tecnologia non venga espressa come esternalità (Picon, 2022) bensì come risorsa fondativa del settore disciplinare;
- lo sviluppo di *know-how* tecnologico sul territorio attraverso l'istruzione superiore per consentire la formazione di designer e tecnici specializzati in grado di adattare flessibilmente macchine generiche come i robot a sequenzialità

#### **Research objectives and methodology: automated systems and design opportunities**

This contribution outlines the preliminary results of current research resulting from a collaboration between academia, profession, and industry through the involvement of the College of Architecture and Design at Lawrence Technological University (LTU-CoAD), the architecture firm Daub and the fab-lab Citizen Robotics. This fab-lab develops digital manufacturing services aimed at positively impacting the built environment in Metro Detroit by providing access to robots and training in both material and social factors.

The activity involved developing a workflow based on the use of robotics at the architectural scale to produce building components through additive manufacturing using cement-based

materials. The process was divided into two phases:

- 1) preliminary feasibility study through the creation of a 3D printed prototype in a design course offered at the College of Architecture and Design;
- 2) refinement of technological capabilities through the design and execution of a residential unit consisting of a 3D printed envelope component for which quantitative performance and thermal-structural tests are ongoing.

The objectives were structured based on specific content pertaining design process, digital workflow, culture of education, and regulatory aspects of the research, namely:

- defining a fabrication-aware design agenda (Pottmann, 2013) that maintains the variability of a design proposal despite the technical, so-

operative mono e multi-obiettivo;

- l'individuazione di specificità tecnologiche nell'implementazione di unità costruttive da utilizzare come leva per contribuire a colmare le lacune del regolamento edilizio locale e del codice delle costruzioni.

Tale compendio ha costituito una linea guida per impostare i processi decisionali nelle fasi di ideazione creativa, settaggio tecnico e concretizzazione materica delle proposte progettuali illustrate in seguito.

### Stato dell'arte della tecnologia: caratteristiche della stampa 3D robotica su larga scala

Nel palinsesto di ricerche promosse dall'Association for Computer Aided Design in Architecture<sup>9</sup>, una delle fonti *peer-reviewed* più autorevoli nell'ambito della ricerca computazionale e fabbricazione digitale, è possibile determinare il percorso metodologico delle sperimentazioni robotiche additive in architettura. Nell'archivio degli atti di convegno, dal 1985, la dicitura *large scale manufacturing* si riscontra per la prima volta in un contributo del 2009 in cui vengono esaminate le tecnologie ingegneristiche di stampa 3D in grado di sviluppare processi su larga scala per la produzione di componenti costruttivi e, potenzialmente, architettonici (De Kestelier and Buswell, 2009). Tra questi sistemi, vengono individuati il *contour crafting* (Khoshnevis *et al.*, 2006), il *powder-bed deposition* (Morgante, 2011) e l'estrusione robotica di materiali cementizi, o *concrete printing* (De Kestelier, 2011). Attraverso una disamina dello sviluppo tecnologico nel settore manifatturiero, i processi additivi vengono descritti come manifestazione esplicita della connessione tra digitale e fisico che per-

Nel palinsesto di ricerche promosse dall'Association for Computer Aided Design in Architecture<sup>9</sup>, una delle fonti *peer-reviewed* più autorevoli nell'ambito della ricerca computazionale e fabbricazione digitale, è possibile determinare il percorso metodologico delle sperimentazioni robotiche additive in architettura. Nell'archivio degli atti di convegno, dal 1985, la dicitura *large scale manufacturing* si riscontra per la prima volta in un contributo del 2009 in cui vengono esaminate le tecnologie ingegneristiche di stampa 3D in grado di sviluppare processi su larga scala per la produzione di componenti costruttivi e, potenzialmente, architettonici (De Kestelier and Buswell, 2009). Tra questi sistemi, vengono individuati il *contour crafting* (Khoshnevis *et al.*, 2006), il *powder-bed deposition* (Morgante, 2011) e l'estrusione robotica di materiali cementizi, o *concrete printing* (De Kestelier, 2011). Attraverso una disamina dello sviluppo tecnologico nel settore manifatturiero, i processi additivi vengono descritti come manifestazione esplicita della connessione tra digitale e fisico che per-

mette di ampliare la *palette* progettuale di architetti e designer attraverso un'inedita libertà geometrica (De Kestelier and Buswell, 2009).

Dagli anni 2010, si sono sviluppate ulteriori modalità tecniche (Naboni and Paoletti, 2015; Craveiroa *et al.*, 2019), come la tecnologia delta di Wasp<sup>10</sup>, i manipolatori meccanici di Apis Cor<sup>11</sup> o droni programmati per depositare strati di polimeri cementizi<sup>12</sup>. A differenza di questi strumenti, l'estrusione robotica a sei o sette assi ha il vantaggio di essere implementabile con setup standard e permettere una customizzazione flessibile dello spazio di lavoro grazie alla versatilità dei robot industriali. Sperimentazioni recenti hanno riguardato l'uso di materiali come terra cruda<sup>13</sup>, biopolimeri a base di cellulosa<sup>14</sup>, idrogel<sup>15</sup> e combinazioni multi-materiale (Mostafavi *et al.*, 2019). Ciò nonostante, l'effettiva applicabilità nel settore delle costruzioni oggi si limita all'uso di malte e impasti cementizi, in quanto più facilmente reperibili e certificabili (si vedano la DFab House o i progetti realizzati da Besix3D, Vertico, XtreeE, TwenteAM).

Il setup tecnico di Citizen Robotics (Fig. 1) è stato definito sulla base di sistemi già consolidati, in modo da inserirsi in un contesto favorevole allo scambio di informazioni e diffusione della conoscenza da trasferire sul territorio. La tecnologia a disposizione del fab-lab include un robot industriale ABB a sette assi installato su una piattaforma mobile. Il robot è equipaggiato con un estrusore per la fabbricazione additiva collegato al meccanismo di carico del materiale<sup>16</sup>, il quale è assimilabile ad una malta a presa rapida priva di inerti<sup>17</sup>. A oggi, si tratta dell'applicazione più diffusa nello stato dell'arte in materia, in quanto non esistono ancora tecnologie affidabili per produrre elementi di armatura in simultanea all'implementazione dei

cial, and economic limitations that hinder the widespread integration of robotics in dynamic environments such as construction sites (Fingrut and Lau, 2022);

- defining a workflow based on computational and manufacturing continuity so that technology is not expressed as an externality (Picon, 2022) but as a foundational resource of the discipline;
- developing technological know-how in the territory through higher education to enable the training of designers and professionals specialised in adapting generic machines, such as robots, to mono and multi-objective operational sequences;
- identifying technological specificities in the implementation of construction units to be used as leverage to help close gaps in local building regulations and construction codes.

This body of work served as a guideline for decision-making processes in the creative ideation, technical setup, and material realisation phases of the projects illustrated below.

#### State of the art of technology: features of large-scale robotic 3D printing

Within the research promoted by the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), it is possible to determine the methodological path of additive robotic experiments in architecture over time. ACADIA is a well respected source in the field of computational research and digital fabrication. The conference proceedings archive, dating back to 1985, mentions large-scale manufacturing for the first time in a 2009 paper that examines 3D printing engineering technologies capable of producing construction components, including

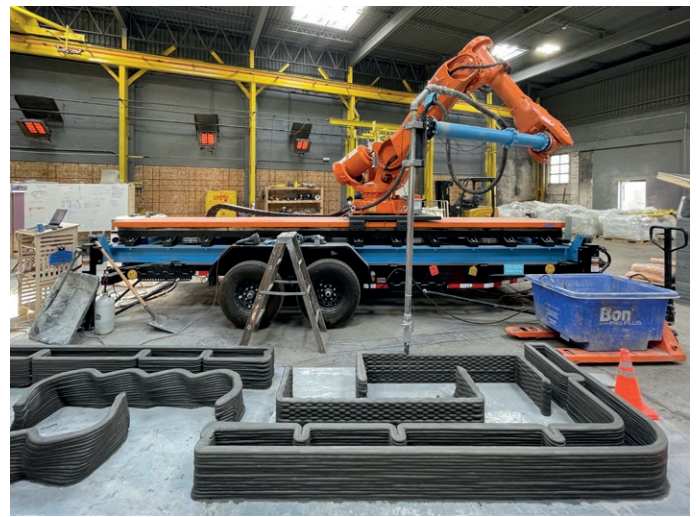
architectural elements (De Kestelier and Buswell, 2009). The systems analysed include contour crafting (Khoshnevis *et al.*, 2006), powder-bed deposition (Morgante, 2011), and robotic extrusion of cement-like materials, or concrete printing (De Kestelier, 2011). By examining technological advancements in manufacturing, the paper describes additive processes as a connection between the digital and physical, allowing architects and designers to expand their design capabilities through unprecedented geometric freedom (De Kestelier and Buswell, 2009).

Since the 2010s, new modes have emerged, such as Wasp Delta technology, Apis Cor's mechanical manipulators, and drones programmed to deposit cement polymers (Naboni and Paoletti, 2015; Craveiroa *et al.*, 2019). However, six or seven-axis robotic

extrusion has the advantage of being implementable with standard setups and allowing for flexible customisation of the workspace due to industrial robots' versatility. Recent experiments have involved the use of materials such as raw earth, cellulose-based biopolymers, hydrogels, and multi-material combinations (Mostafavi *et al.*, 2019). Despite this progress, the construction industry is currently limited to using mortars and cement mixtures, as they are more widely available and easily certifiable (see DFab House or projects by Besix3D, Vertico, XtreeE, and TwenteAM).

The technical setup of Citizen Robotics (Fig. 1) has been defined based on established systems, to fit into a context conducive to information exchange and dissemination of transferable knowledge to the local community. The fab-lab owns a seven-axis ABB

01 | Il robot a sette assi installato su piattaforma mobile di Citizen Robotics durante una sessione di stampa 3D di prototipi di involucro edilizio. Foto dell'autore  
 A seven-axis robot installed on Citizen Robotics' mobile platform during a 3D printing session of prototypes for building envelopes. Photo by the author



layer di stampa<sup>18</sup>. Il flusso di lavoro per la stampa 3D cementizia si imposta a partire dalla progettazione digitale basata sulla manipolazione algoritmica scritta in linguaggio Python che traduce le informazioni geometriche in percorso macchina, o *toolpath*. La conversione dei pixel in voxel avviene profilando le poli-superfici di progetto in *layer* orizzontali a loro volta scomposti in punti target. La stabilità della stampa è data dalla corretta negoziazione di parametri quali spessore degli strati, posa di rinforzi metallici *intra-layer*, velocità di estrusione e tempi di presa del materiale.

**Fasi della ricerca: fabbricazione digitale e progettazione architettonica**

*Critical Practice: un primo studio di fattibilità*  
 Il College of Architecture and Design offre, nel *core curriculum*, l'apprendimento di

workflow computazionali le cui decisioni informate in fase progettuale confluiscono nella programmazione e implementazione robotica. Tale processo è facilitato dall'accesso, da parte dell'università, a robot di seconda mano dismessi dalle catene di montaggio del settore automobilistico di Detroit. Questo trasferimento tecnologico *manufacturing-design* è supportato dalla prospettiva che il futuro delle costruzioni includa la robotica, attraverso realizzazioni materiche additive, sottrattive o combinate.

Nel semestre estivo 2022, si è voluto testare in modo incrementale il passaggio di scala dalla fabbricazione di plastici di studio alla produzione additiva alla scala architettonica utilizzando la tecnologia di Citizen Robotics. Il lavoro si è concretizzato con la progettazione e realizzazione, nel contesto del laboratorio

industrial robot installed on a mobile platform. The robot is equipped with an extruder for additive manufacturing, which is connected to the material loading mechanism. The material is a rapid-setting mortar without any aggregates. Currently, this is the most commonly used application in the field, as there are still no reliable technologies to produce reinforcement elements while implementing the print layers. The workflow for 3D cement printing starts with digital design, which is created using algorithmic manipulation written in Python language that translates geometric information into a machine path, or *toolpath*. The conversion of pixels into voxels happens by profiling the design's poly-surfaces into horizontal layers and dividing them into target points. The stability of the print is achieved by properly adjusting parameters such

as layer thickness, placement of intra-layer metal reinforcements, extrusion speed, and material setting times.

**Phases of the research: architectural design and digital fabrication**

*Critical Practice: a first feasibility study*  
 The College of Architecture and Design introduces computational workflows, robotic programming, and digital fabrication in its core undergraduate curriculum. This process is facilitated by the university's access to second-hand robots decommissioned from Detroit's automotive assembly lines. The resulting manufacturing-design technology transfer is supported by the expectation that the future of construction will include robotics through additive, subtractive, or combined material implementations. During the summer of 2022, a robot-

Critical Practice<sup>19</sup>, di un'installazione *free-form* stampata in 3D (Fig. 2). Un gruppo composto da sessanta studenti si è occupato dell'elaborazione della proposta creativa, implementazione tecnologica *off-site*, traslazione CAD/CAM, pianificazione delle tempistiche di stampa 3D, trasporto *on-site* ed installazione dei componenti. L'esito formale ha tenuto conto delle potenzialità della tecnologia stessa, programmata per realizzare oggetti in forme libere senza l'uso di casseforme. La geometria dell'installazione è stata suddivisa in sezioni che, una volta assemblate, sono state connesse senza soluzione di continuità al suolo circostante, ad enfatizzare la natura organica del design (Fig. 3). Durante il semestre, gli studenti hanno perseguito una strategia *fabrication-aware*, attraverso la quale è stato possibile stabilire una nuova correlazione tra le variabili: tempo / efficacia costruttiva / costo delle modifiche progettuali in opera, rappresentate nel grafico di MacLeamy<sup>20</sup> (Fig. 4). Poiché gli strumenti per la fabbricazione digitale permettono di tradurre quasi istantaneamente le intenzioni formali in realizzazioni materiche (Gramazio and Kohler, 2008), ciascun componente di progetto è stato predisposto per l'esecuzione robotica in fase progettuale,

ically-informed production strategy was implemented to incrementally test the scale shift from small prototypes to large-scale 3D printing using Citizen Robotics technology. The project was carried out in the Critical Practice design studio and resulted in a free-form 3D printed installation (Fig. 2). Sixty graduate students participated in the creation of the design, off-site technological implementation, CAD/CAM translation, 3D printing timing, transportation of the prototypes, and on-site installation. The design took advantage of the technology's ability to produce free-form objects without the use of moulds or construction formworks. The installation was split into sections that connected seamlessly to the ground, showcasing the organic design (Fig. 3). Throughout the semester, students pursued a fabrication-aware approach,

forming a new correlation between the variables: time / construction effectiveness / cost of design changes, as depicted in the MacLeamy graph (Fig. 4). With digital fabrication tools allowing a quick translation of design into material reality (Gramazio and Kohler, 2008), each design element was prepped for robotic execution during the design phase, forming a continuum between design and construction (Kolarevic, 2003; Leach *et al.*, 2004), and resulting in improved final quality.

*House in Grosse Pointe Woods: refining technological abilities*

The Critical Practice project has initiated a phase of experiments aimed at designing a residential project for a private client in Grosse Pointe Woods, Michigan. Part of the envelope will be 3D printed (Fig. 5). The design proposal (Fig. 6 and Fig. 7) was developed

02 | Installazione in forme libere stampata in 3D realizzata nel contesto del laboratorio di progetto Critical Practice, coordinato dai docenti Karl Daubmann, Azubike Ononye e Fernando Bales. Le fasi progettuali si sono sviluppate nel corso del semestre, mentre installazione e assemblaggio sono state comprese nella settimana finale. Foto di Steve Kroodsmma

*A freeform, robotically 3D printed prototype created during the Critical Practice design studio led by instructors Karl Daubmann, Azubike Ononye, and Fernando Bales. The design phases took place over the semester, with installation and assembly being completed during the final week. Photo by Steve Kroodsmma*

stabilendo un *continuum* tra design e costruzione (Kolarevic, 2003; Leach *et al.*, 2004) a beneficio della qualità finale.

### *Casa a Grosse Pointe Woods: affinamento delle capacità tecnologiche*

Il progetto Critical Practice ha dato avvio ad una fase di sperimentazioni finalizzate alla realizzazione di un progetto residenziale per un cliente privato a Grosse Pointe Woods, Michigan, di cui parte dell'involucro verrà stampato in 3D (Fig. 5). La proposta progettuale (Figg. 6, 7) è stata elaborata dall'autore del contributo in collaborazione con lo studio Daub - *design, architecture, urbanism, building*.

La materializzazione dell'edificio dovrà tenere conto di fattori e limitazioni dati dal contesto normativo - tema rilevante anche in Italia e nel quadro europeo - che si vuole contribuire ad aggiornare tramite la presentazione di un precedente progettuale. Il regolamento edilizio di Detroit, infatti, non menziona la stampa 3D come possibile procedura costruttiva da impiegare né in opera né per la fabbricazione di unità edilizie fuori opera. Questa premessa comporta diversi scenari a partire dall'impossibilità di allestire una struttura per la produzione di componenti costruttivi direttamente in cantiere e quindi stampare l'involucro come unico componente monolitico. Inoltre, non vi sono linee guida<sup>21</sup> che definiscano le caratteristiche strutturali di sistemi costruttivi realizzati tramite estrusione robotica ce-

by the author of the paper in collaboration with the architecture firm Daub - design, architecture, urbanism, building.

The materialisation of the building must consider factors and limitations established by the regulatory context - a significant issue also in Italy and the European framework. This design effort is intended to help update such regulations by establishing a building precedent. The Detroit building code does not mention 3D printing as a possible construction method on-site or for off-site building unit production. This leads to several challenges, including the inability to set up a temporary production facility for building components on site and, therefore, printing the envelope as a single piece. There are also no guidelines that summarise the structural characteristics of construction systems made with robotic

cement extrusion (American Concrete Institute, 2014). To overcome this, the print layout and the shape of individual wall segments were developed taking into account hollow vertical slots in which to cast reinforced concrete once the rigid thermal insulation panels are installed inside the stratigraphy. By regulation, the 3D printed envelope is considered formwork, which does not impact structural performance or thermal behaviour calculations.

The systematisation of the described design factors has established the current state of research progress. Currently, wall prototypes (Fig. 8) are being produced through printing sessions and full-scale design iterations, leading to a pilot typology for constructing economically sustainable buildings or construction units. Eliminating labour-intensive procedures, such as formwork installation, could

03 | Dettaglio dell'installazione progettata e installata dagli studenti nel campus della Lawrence Technological University, College of Architecture and Design. Foto di Steve Kroodsmma

*Detail of the installation designed and installed by students at Lawrence Technological University's College of Architecture and Design. Photo by Steve Kroodsmma*



reduce the cost of a reinforced concrete building structure by 40-60% (Aghaei *et al.*, 2021).

To validate form-finding, a sequence of structural tests on the envelope is being carried out with the assistance of the College of Engineering at Lawrence Technological University. The baseline prototype processed by Citizen Robotics will undergo compression and bending strength tests. Afterward, the adhesion and tensile strength of the printed layers will be evaluated to assess airtightness and the need for metal joints between layers. Furthermore, the continental climate in Michigan suggests exposing the 3D printed material to freezing and thawing cycles using the environmental chamber at the College of Engineering. Upon completion of the data collection, the architecture firm Daub will compile the information into an

executable document that will initiate the building construction phases by the summer of 2023.

### **Limitations and potential: discussion of experimental results**

Regulatory restrictions have informed design decisions and, more specifically, the processes of fabrication, transportation, and assembly of construction components. In response, ongoing experiments are dictating a feasibility study agenda to advance the state-of-the-art knowledge and improve the performance-based workflows involved, particularly for components like the building envelope.

While the technological infrastructure for large-scale 3D printing has yet to be fully developed, research has already shown that digital fabrication brings environmental, energy, and resource benefits (Bock and Linner, 2015). De-

04 | La curva di MacLeamy, di Patrick MacLeamy dimostra come la fase iniziale della progettazione abbia una forte influenza sul risultato, con un basso impatto sui costi. La presente ricerca (elaborazione del grafico in arancione), sostiene che, poiché gli strumenti di fabbricazione digitale permettono di traslare istantaneamente design e making, sia possibile estendere maggiormente la durata del processo progettuale ai fini di una migliore qualità del risultato. Immagine dell'autore

*The MacLeamy Curve by Patrick MacLeamy shows that early design decisions have a significant impact on outcomes with low effects on cost. The present research (represented by the orange overlays on the graph) argues that digital fabrication tools facilitate design-to-making translation, leading to longer design processes and higher quality outcomes. Image by the author*

mentizia (American Concrete Institute, 2014). Per questo motivo, il layout di stampa e la forma dei singoli segmenti murari sono stati elaborati tenendo conto di alloggiamenti nei quali gettare il calcestruzzo armato una volta posati i pannelli rigidi di isolamento termico all'interno della stratigrafia. Il sistema descritto caratterizza l'involucro stampato in 3D come una cassaforma che, da normativa, non collabora ai fini del calcolo della performance strutturale né del comportamento termico. La messa a sistema dei fattori di progetto sopra descritti ha definito lo stato attuale di avanzamento della ricerca. Sono infatti in corso di svolgimento sessioni di stampa ed iterazioni progettuali in scala reale per produrre prototipi murari (Fig. 8) che confluiscono in una tipologia pilota per la realizzazione di edifici, o porzioni di edificio, economicamente sostenibili. La rimozione di procedure *labor-intensive* come l'installazione delle casseforme, ad esempio, permetterebbe di abbattere dal 40 al 60% del costo di una struttura edilizia in calcestruzzo armato (Aghaei *et al.*, 2021). Per validare il *form-finding*, si è deciso di definire una sequenza ragionata di test strutturali<sup>22</sup> sull'involucro con il coinvolgimento del College of Engineering della Lawrence Technological University. Sulla base della configurazione geometrica del prototipo *baseline* processato roboticamente da Citizen Robotics, verranno testate in primo luogo resistenza a compressione e flessione. Conseguentemente, si potrà avviare l'analisi di aderenza e resistenza a tensione dei layer di stampa per valutarne tenuta all'aria ed eventuale necessità di inserire giunzioni metalliche tra gli strati. A corollario, il clima continentale del Michigan suggerisce l'utilità sperimentale di sottoporre il materiale stampato in 3D a cicli di congelamento e scongelamento

spite the limitations in creating load-bearing structural elements or a protocol for ensuring safety in automated construction sites, some of these benefits consist of the capability of enhancing construction practices that generate material waste, streamlining the design supply chain (Pizzi, 2013), and potentially incorporating the structural role of 3D printed components in the architectural system. An untapped potential is the possibility to create on-site prefabrication units with robots mounted on mobile platforms. Since buildings are multi-material entities, the future of the building industry could feature widespread construction sites where industrial robots can be programmed in real-time or remotely to perform manufacturing and assembly tasks of complex systems. In this scenario, a model of distributed practice (Slocum *et al.*, 2020) can assist in

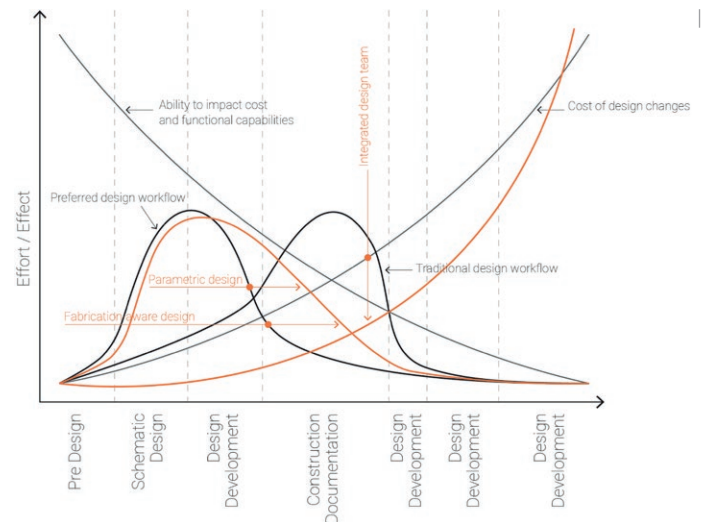
developing fabrication workflows that prioritise project variability and minimise repetition in robotic execution.

### Conclusions

The role of additive, subtractive, and combined fabrication tools is to establish new design languages based on the use of digital data as a tool for knowledge in the discipline (Claypool *et al.*, 2019; Lorenzo-Eiroa *et al.*, 2013). The research process described has validated the necessary phases for enabling competencies to translate digital projects into physical realities. The presence of a fab-lab in an area dominated by mass production also serves as a catalyst for creating a new cultural context in which the use of automation enhances the creative process in architecture. Architects currently provide builders and makers with operational

05 | Proposta progettuale per una residenza a Grosse Pointe Woods, Michigan, per cui parte dell'involucro verrà stampato in 3D con materiale cementizio. Immagine dell'autore

*Design proposal for a private home in Grosse Pointe Woods, Michigan. Part of the envelope will be 3D printed with cementitious material. Image by the author*



information using instructions and notations (Carpo, 2017) conveyed through the rules of graphic representation. In the future, the application of robotic knowledge to the construction industry may blur the distinction between design and construction (Melendez *et al.*, 2020). This approach raises questions about the need for producing two-dimensional drawings and construction details for the approval of building permits, as digital robotic fabrication processes are defined by abstract computational models that can be exported as machine codes. These codes are sequences of programmed spatial coordinates that execute specific tasks. In this scenario, advanced implementation tools like robots expand the workspace of designers and architects, allowing them to express craftspeople's implementation methods within the context of

the Fourth Industrial Revolution. The outcomes of this research will serve as the foundation for an infrastructure that promotes the culture of automation in architecture through educational programmes, where human-machine hybrids drive customisation of design processes and procedural freedom.

### ACKNOWLEDGMENTS

The research stems from a collaboration between Lawrence Technological University's College of Architecture and Design, the architecture firm Daub (design, architecture, urbanism, building) directed by Karl Daubmann, and the start-up Citizen Robotics. The graphics were created by Anjelo Hana, who contributed to the work in the role of Research Assistant.

utilizzando la camera ambientale a disposizione del College of Engineering. Lo studio Daub avrà il compito, a conclusione della raccolta dati sopra descritta, di far confluire le informazioni in un documento esecutivo che avvierà le fasi costruttive dell'edificio entro l'estate del 2023.

### Discussione dei risultati sperimentali tra limiti e potenzialità

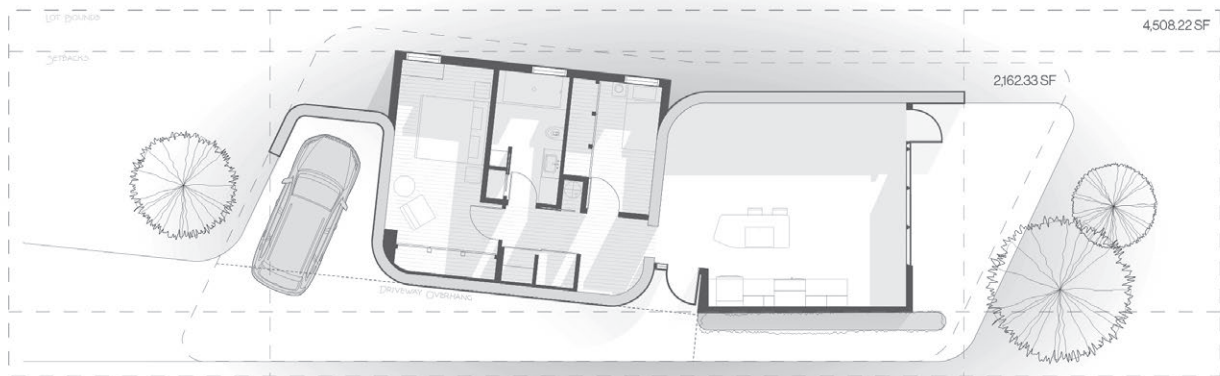
Le limitazioni normative hanno indirizzato le scelte progettuali e, in misura più concreta, i processi previsti di fabbricazione, trasporto e assemblaggio dei componenti costruttivi. In risposta, le sperimentazioni in corso dettano un'agenda di studi di fattibilità per avanzare lo stato dell'arte della conoscenza ed ottimizzare i flussi di lavoro *performance-based* coinvolti, in particolar modo per componenti come l'involucro edilizio. Nonostante l'infrastruttura tecnologica per la stampa 3D alla scala architettonica non sia del tutto risolta – non vi è ancora la capacità tecnica di realizzare orizzontamenti portanti o un protocollo metodologico per gestire la sicurezza nel cantiere automatizzato

– studi scientifici hanno già evidenziato come la fabbricazione digitale apporti benefici relativi ad impatto ambientale, consumo energetico ed utilizzo di risorse (Bock and Linner, 2015). Parte di questa ottimizzazione deriva da fattori quali l'upgrade delle routine costruttive che generano spreco di materiale, la riduzione della filiera progettuale (Pizzi, 2013) e, possibilmente, l'accettazione del contributo strutturale delle formulazioni stampate in 3D.

Un potenziale inesplorato riguarda, a esempio, la possibilità di allestire unità di prefabbricazione in opera con robot installati su piattaforme mobili. Poiché gli edifici sono situazioni multi-materiale, si può ambire ad un futuro delle costruzioni caratterizzato da unità di cantiere diffuse in cui bracci meccanici industriali vengono programmati in tempo reale o in remoto per svolgere compiti differenziati di manifattura e assemblaggio di sistemi complessi. In questo scenario, un modello di *distributed practice* (Slocum *et.al.*, 2020) può contribuire alla definizione di workflow di fabbricazione volti a mantenere la variabilità del progetto come fattore centrale e, al contempo, minimizzare le ripetizioni nell'esecuzione robotica.

Hollywood House  
2133 Hollywood Ave., Grosse Pointe Woods

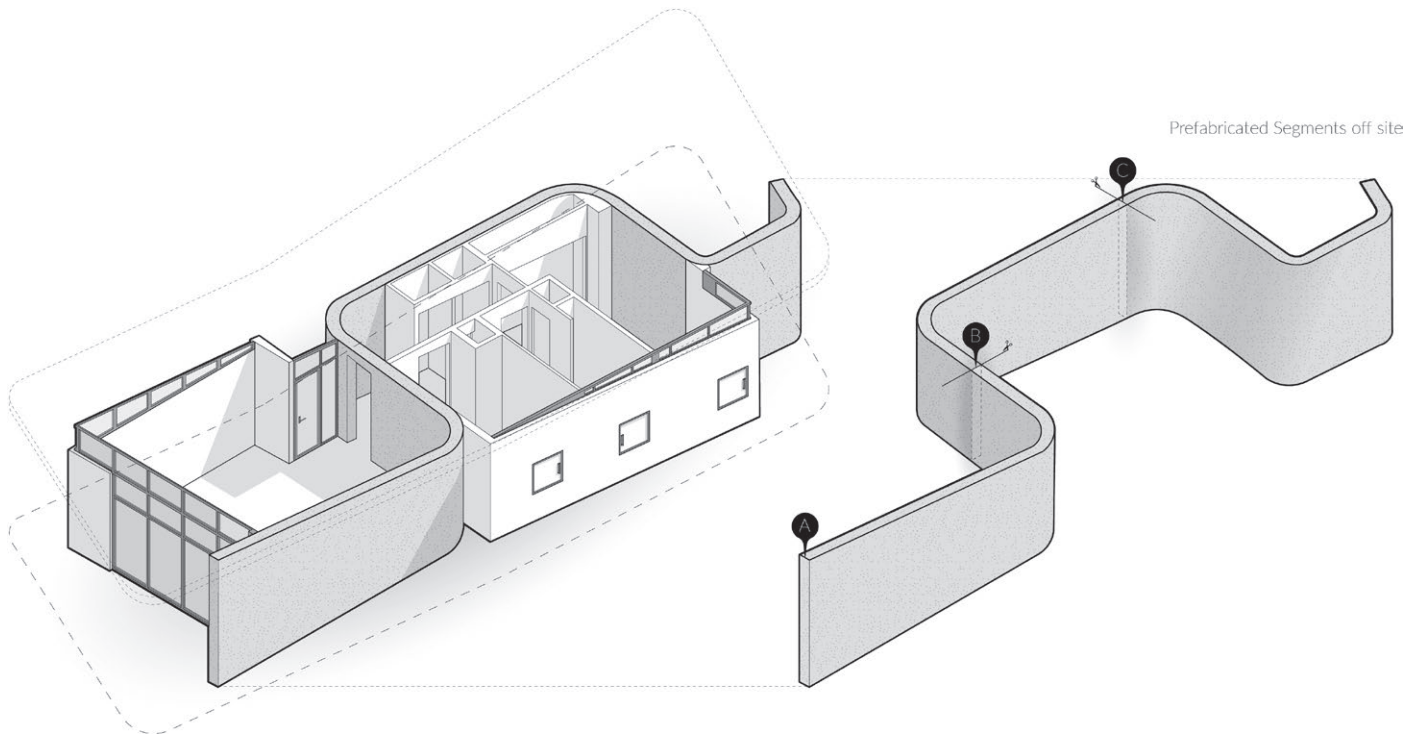
Site Plan | 06



07 | Vista assonometrica, residenza a Grosse Pointe Woods. Immagine dell'autore  
Axonometric view of Grosse Pointe Woods' house. Image by the author

08 | Prototipi di involucro architettonico stampati in 3D da Citizen Robotics  
Architectural envelope prototypes 3D printed by Citizen Robotics. Photos by the author

07 |



**Annotazioni conclusive** Gli strumenti per la fabbricazione additiva, sottrattiva, combinata hanno il ruolo di definire linguaggi progettuali inediti basati sull'uso dei dati digitali come strumento conoscitivo della disciplina (Claypool *et al.*, 2019, Lorenzo-Eiroa *et al.*, 2013). In tal senso, il processo di ricerca descritto è stato utile per validare le sequenzialità necessarie per abilitare competen-

ze coinvolte nella traslazione di progetti digitali in materializzazioni fisiche. Inoltre, l'attività di un fab-lab in un'area fortemente caratterizzata dalla fabbricazione in serie si inserisce come leva per definire un nuovo contesto culturale, all'interno del quale vi è una traslazione di significato tra produzione di massa ed utilizzo dell'automazione per affermare il processo creativo in architettura.

#### NOTES

<sup>1</sup> Size of the Global Construction Market from 2020 to 2021, with Forecasts from 2022 to 2030. See: <https://www.statista.com/statistics/1290105/global-construction-market-size-with-forecasts/> (Online 27/11/2022).

<sup>2</sup> Automation, Robotics, and the Factory of the Future. See: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/automation-robotics-and-the-factory-of-the-future> (Online 27/11/2022).

<sup>3</sup> Industrial Robot Cost Declines. See: <https://ark-invest.com/articles/analyst-research/industrial-robot-cost-declines/> (Online 27/11/2022).

<sup>4</sup> euRobotics - European Robotics. See: <https://eu-robotics.net/> (Online 01/09/2022).

<sup>5</sup> The 17 UN Sustainable Goals. See: <https://sdgs.un.org/goals/> (Online 01/09/2022).

<sup>6</sup> Brookings Analysis: "Where the Robots Are." See: <https://www.brookings.edu/blog/the-avenue/2017/08/14/where-the-robots-are/> (Online 01/08/2022).

<sup>7</sup> International Federation of Robotics Report. See: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-density-nearly-doubled-globally> (Online 01/09/2022).

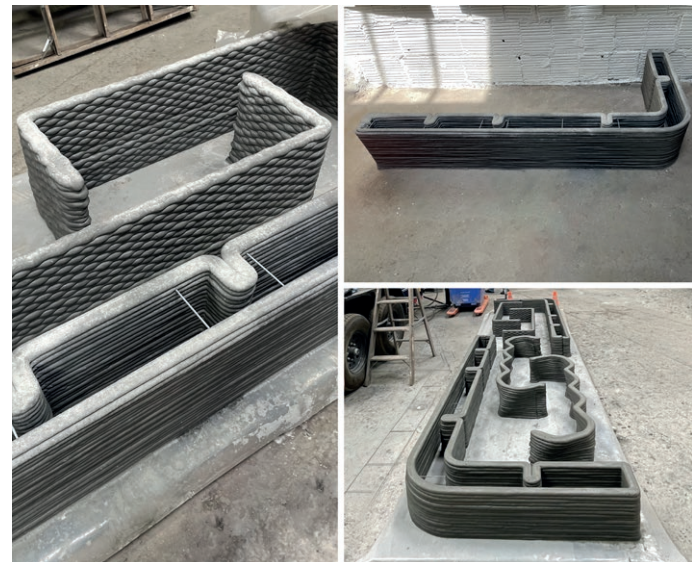
<sup>8</sup> Citizen Robotics is a start-up founded in 2020 in Detroit, Michigan. See: <https://www.citizenrobotics.org/> (Online 01/07/2022).

<sup>9</sup> ACADIA. See: <http://acadia.org/> (Online 01/09/2022).

<sup>10</sup> Wasp technology. See: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> (Online 01/12/2022).

<sup>11</sup> Apis Cor technology. See: <https://apis-cor.com/> (Online 01/11/2022).

<sup>12</sup> Aerial Additive Manufacturing with Multiple Autonomous Robots. See: <https://www.nature.com/arti>



| 08



Oggi, gli architetti producono informazioni operative per i costruttori/makers tramite istruzioni, o notazioni (Carpo, 2017), espresse attraverso le regole della rappresentazione grafica. In futuro, la conoscenza robotica applicata al settore delle costruzioni può configurarsi come il superamento della demarcazione netta tra progetto e costruzione (Melendez *et.al.*, 2020). Tale approccio porta a dibattere se sia ancora opportuno produrre disegni e dettagli esecutivi per l'approvazione di documenti come i permessi di costruire, in quanto i flussi di lavoro finalizzati alla fabbricazione digitale robotica sono definiti da modelli computazionali astratti esportabili come codici macchina, ovvero sequenze di coordinate spaziali programmate per compiere determinate *tasks*. In questo scenario, strumenti di implementazione avanzata come i robot rappresentano l'estensione materiale dello spazio di lavoro di progettisti e designer, i quali possono operare come espressione dell'artigianato digitale nel quadro della Quarta Rivoluzione Industriale. I risultati avanzati della ricerca costituiranno la base per la creazione di un'infrastruttura per la diffusione della cultura dell'automazione alla scala architettonica attraverso programmi educativi per i quali le ibridazioni uomo-macchina saranno una forza trainante nel perseguire personalizzazione dei processi progettuali e libertà procedurale.

## RINGRAZIAMENTI

La ricerca risulta da una collaborazione tra il College of Architecture and Design della Lawrence Technological University, lo studio Daub (design, architecture, urbanism, building), diretto da Karl Daubmann, e la start-up Citizen Robotics. Le elaborazioni grafiche sono di Anjelo Hana, che ha contribuito al lavoro nel ruolo di Research Assistant.

cles/s41586-022-04988-4 (Online 01/09/2022).

<sup>13</sup> 3D Printing Strategies Towards the Realization of Load-bearing Earthen Structure. See: <https://iaac.net/iaac-wasp-new-3d-printing-strategies-towards-realisation-load-bearing-earthen-structures/> (Online 01/12/2022).

<sup>14</sup> Eco-Metabolistic Architecture. See: <https://royaldanishacademy.com/case/eco-metabolistic-architecture> (Online 01/12/2022).

<sup>15</sup> Aesthetically Repurposing Architectural Elements with Nanocellulose Hydrogels. See: [https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2022/06/Rudin\\_Rebecka\\_MTBooklet\\_2022\\_43.5MB.pdf](https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2022/06/Rudin_Rebecka_MTBooklet_2022_43.5MB.pdf) (Online 01/12/2022).

<sup>16</sup> TwenteAM technology. See: <https://www.twente-am.com/> (Online 01/09/2022).

Laticrete. See: <https://laticrete.com/en/>

solution-center/featured-solutions/3d-printing (Online 01/09/2022).

<sup>17</sup> Branch Technology. See: <https://branchtechnology.com/> (Online 01/09/2022).

<sup>18</sup> Critical Practice Studio. See: [https://www.ltu.edu/architecture\\_and\\_design/critical-practice.asp](https://www.ltu.edu/architecture_and_design/critical-practice.asp) (Online 01/09/2022).

<sup>19</sup> The MacLeamy Curve. See: <https://www.danieldavis.com/macleamy/> (Online 01/09/2022).

<sup>20</sup> See the standards ASTM C109, ASTM C1583, and ASTM F42.07.07. By 2022, ASTM International has proposed to write a draft standard (ASTM WK77614) entitled: "New Specification for Additive Manufacturing for Construction - Qualification Principles - Structural and infrastructure elements": <https://www.astm.org/workitem-wk77614> (Online 01/09/2022).

## NOTE

<sup>1</sup> Size of the Global Construction Market from 2020 to 2021, with Forecasts from 2022 to 2030. Si veda: <https://www.statista.com/statistics/1290105/global-construction-market-size-with-forecasts/> (Online 27/11/2022).

<sup>2</sup> Automation, Robotics, and the Factory of the Future. Si veda: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/automation-robotics-and-the-factory-of-the-future> (Online 27/11/2022).

<sup>3</sup> Industrial Robot Cost Declines. Si veda: <https://ark-invest.com/articles/analyst-research/industrial-robot-cost-declines/> (Online 27/11/2022).

<sup>4</sup> euRobotics - European Robotics. Si veda: <https://eu-robotics.net/> (Online 01/09/2022).

<sup>5</sup> The 17 UN Sustainable Goals. Si veda: <https://sdgs.un.org/goals/> (Online 01/09/2022).

<sup>6</sup> Brookings Analysis: "Where the Robots Are." Si veda: <https://www.brookings.edu/blog/the-avenue/2017/08/14/where-the-robots-are/> (Online 01/08/2022).

<sup>7</sup> International Federation of Robotics Report. Si veda: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-density-nearly-doubled-globally> (Online 01/09/2022).

<sup>8</sup> Citizen Robotics è una start-up fondata nel 2020 con sede a Detroit, Michigan. Si veda: <https://www.citizenrobotics.org/> (Online 01/07/2022).

<sup>9</sup> ACADIA. Si veda: <http://acadia.org/> (Online 01/09/2022).

<sup>10</sup> Tecnologia Wasp. Si veda: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> (Online 01/12/2022).

<sup>11</sup> Tecnologia Apis Cor. Si veda: <https://apis-cor.com/> (Online 01/11/2022).

<sup>12</sup> Aerial Additive Manufacturing with Multiple Autonomous Robots. Si veda: <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04988-4> (Online 01/09/2022).

<sup>13</sup> 3D Printing Strategies Towards the Realization of Load-bearing Earthen Structure. Si veda: <https://iaac.net/iaac-wasp-new-3d-printing-strategies-towards-realisation-load-bearing-earthen-structures/> (Online 01/12/2022).

<sup>21</sup> See the guidelines: <https://www.ul.com/news/build-trust-3d-manufactured-buildings-ul-3401> and <https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac509/> (Online 01/09/2022).

<sup>14</sup> Eco-Metabolistic Architecture. Si veda: <https://royaldanishacademy.com/case/eco-metabolistic-architecture> (Online 01/12/2022).

<sup>15</sup> Aesthetically Repurposing Architectural Elements with Nanocellulose Hydrogels. Si veda:

[https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2022/06/Rudin\\_Rebecka\\_MTBooklet\\_2022\\_43.5MB.pdf](https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2022/06/Rudin_Rebecka_MTBooklet_2022_43.5MB.pdf) (Online 01/12/2022).

<sup>16</sup> Tecnologia TwenteAM. Si veda: <https://www.twente-am.com/> (Online 01/09/2022).

<sup>17</sup> Laticrete. Si veda: <https://laticrete.com/en/solution-center/featured-solutions/3d-printing> (Online 01/09/2022).

<sup>18</sup> Branch Technology. Si veda: <https://branchtechnology.com/> (Online 01/09/2022).

<sup>19</sup> Critical Practice Studio. Si veda: [https://www.ltu.edu/architecture\\_and\\_design/critical-practice.asp](https://www.ltu.edu/architecture_and_design/critical-practice.asp) (Online 01/09/2022).

<sup>20</sup> The MacLeamy Curve. Si veda: <https://www.danieldavis.com/macleamy/> (Online 01/09/2022).

<sup>21</sup> Si vedano i riferimenti agli standard ASTM C109, ASTM C1583, e ASTM F42.07.07. Entro il 2022, ASTM International si è proposta di redarre una bozza normativa (ASTM WK77614) intitolata “New Specification for Additive Manufacturing for Construction – Qualification Principles – Structural and infrastructure elements”: <https://www.astm.org/workitem-wk77614> (Online 01/09/2022).

<sup>22</sup> Si vedano le linee guida: <https://www.ul.com/news/build-trust-3d-manufactured-buildings-ul-3401> e <https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac509/> (Online 01/09/2022).

## REFERENCES

Aghaei Meibodi, M., Craney, R., and McGee, W. (2021), “Robotic Pellet Extrusion: 3D Printing and Integral Computational Design”, *Proceedings of the 41st Annual Conference of ACADIA - Toward Critical Computation*, Online + Global, November 3-6, 2021, pp. 410-419.

American Concrete Institute (2014), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 18-14)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Bock, T., and Linner, T. (2015), *Robot-oriented Design*. Cambridge University Press, Cambridge.

Carpo, M. (2017), *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*, MIT Press, Cambridge.

Claypool, M., Jimenez Garcia, M., Retsin, G., and Soler, V. (2019), *Robotic Building: Architecture in the Age of Automation*. De Gruyter, Berlin.

Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolola, H., and Bartolod, P. J. (2019), “Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0”, *Automation in Construction*, Vol. 103 7/19, pp. 251-267.

Daugherty, P. R., and Wilson, H. J. (2018), *Human+Machine: Reimagining Work in the Age of AI*. Harvard Business Press, Cambridge.

De Kestelier, X. (2011), “Design potential for large-scale additive fabrication. Free-form construction”, in Glynn, S. and Sheil, B. (Eds.), *Fabricate: Making Digital Architecture*, UCL Press, pp. 244-249.

De Kestelier, X., and Buswell, R. (2009), “A digital design environment for large-scale rapid manufacturing”, *Proceedings of the 29th Annual Conference of ACADIA – Building a Better Tomorrow*, Chicago, IL, October 22-25, 2009, pp. 201-208.

Fingrut, A., and Lau, D. (2022), “Construction Automation and Design Research”, *Technology| Architecture+ Design*, Vol. 6(2), pp.159-161.

Gramazio, F., and Kohler, M., (2008), *Digital Materiality in Architecture*, Lars Muller Publisher, Zurich.

Guenat, S., Purnell, P., Davies, Z. G., Nawrath, M., Stringer, L. C., Babu, G. R., et.al (2022). “Meeting sustainable development goals via robotics and autonomous systems”, *Nature communications*, 13(1), pp. 1-10.

Keramas, J. G. (1998), *Robot Technology Fundamentals*, Delmar Learning, New York.

Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K. T., and Yeh, Z. (2006), “Mega-scale fabrication by contour crafting”, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 1(3), pp. 301-320.

Kolarevic, B., 2003, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York and London: Spon Press - Taylor & Francis Group.

Leach, N., Turnbull, D., and Williams, C. J. (2004), *Digital Tectonics*, Academy Press, Cambridge.

Lorenzo-Eiroa, P., and Sprecher, A. (2013), *Architecture in Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture*, Routledge, New York.

Naboni, R., and Paoletti, I. (2015), *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Cham, Springer International Publishing.

Oesterreich, T. D., and Teuteberg, F. (2016), “Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry”, *Computers in industry*, Vol. 83, pp. 121-139.

Melendez, F., Diniz, N., and Del Signore, M. (Eds.). (2020), *Data, Matter, Design: Strategies in Computational Design*, Routledge, New York.

Mostafavi, S., Kemper, B. N., and Du, C. (2019), Materializing Hybridity in Architecture: Design to Robotic Production of Multi-materiality in Multiple Scales, *Architectural Science Review*, 62(5), pp. 424-437.

Picon, A. (2022), “Digital Technology and Architecture: Towards a Symmetrical Approach”, *Technology| Architecture+ Design*, 6(1), pp. 10-14.

Pizzi, E. (2013), “Verso la riduzione della filiera progettuale per ottimizzare i processi produttivi ai fini della innovazione e della competitività/Toward the simplification of the design process chain aimed at optimizing the productive processes to improve innovation and competitiveness”, *Techne*, 6, pp. 55-62.

Pottmann, H. (2013), “Architectural geometry and fabrication-aware design”, *Nexus Network Journal*, 15(2), pp. 195-208.

Schwab, K. (2017), *The Fourth Industrial Revolution*, Currency, New York.

Vial, G. (2021), “Understanding digital transformation: A review and a research agenda”, *Managing Digital Transformation*, pp. 13-66.

Slocum, B., Ago, V., Doyle, S., Marcus, A., Yablonina, M., and del Campo, M. (Eds.) (2020), *Distributed Proximities, Proceedings of the 40th Annual Conference of ACADIA - Distributed Proximities*, Online + Global, October 24-30, 2020.