

## STRUMENTI E MATERIALI PER LA FABBRICAZIONE DIGITALE IN ARCHITETTURA *INSTRUMENTS AND MATERIALS FOR DIGITAL MANUFACTURING IN ARCHITECTURE*

Cesare Sposito\* Francesca Scalisi\*\*

**ABSTRACT** - Il contributo descrive strumenti e materiali oggi disponibili per la fabbricazione digitale in architettura, offrendo un'ampia panoramica sulle tecniche di stampa 3D e su come potrebbe rivoluzionare le costruzioni con importanti ricadute tecniche, economiche e sociali. Dal concetto di mass customization alla creazione dei Fab Lab, dal Contour Crafting alla tecnologia D-Shape e al progetto WASP assistiamo a un ripensamento del processo architettonico, ma anche a una ricerca sui materiali naturali, ecosostenibili e "programmabili".

The article describes tools and materials available today for digital manufacturing in architecture, offering a wide overview of 3D printing techniques and how it could revolutionize the construction world with important come backs and not only technical ones. From the concept of mass customization to the creation of the Fab Lab, from Contour Crafting to D-Shape technology and to the WASP project, we are witnessing a radical rethinking of the architectural process, but also a continuous research on the materials.

**KEYWORDS** - Fabbricazione digitale, stampa 3D, mass customization, materiali innovativi.

Digital production, 3D printing, mass customization, innovative materials.



Figg. 1, 2 - L'Aqua Tower di Chicago (Gang, 2009).

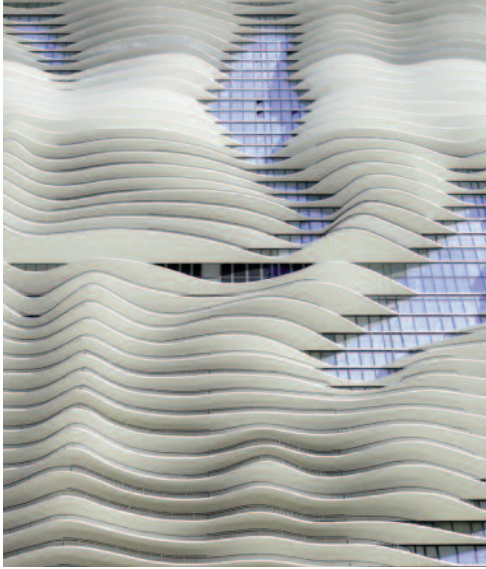
Nel lungo saggio sugli operatori nel processo edilizio riferito all'architettura antica, Giuseppe De Giovanni ha presentato i processi di formazione e di trasformazione del costruito, ricercandone soggetti operatori, materiali, tecniche, procedimenti e strumenti di lavoro; dall'*homo faber* all'*homo sapiens*, dalla cultura mesopotamica (*ex oriente lux*) fino all'inizio dell'Età Moderna. Una lunga panoramica storica, sintetica ma significativa, con alcune domande che ciascuna epoca e cultura ha affrontato con operatori e mano d'opera varia per qualità e numero, con materiali e attrezzature diverse, con procedimenti adeguati all'opera e con un'adeguata programmazione dei lavori. E concludeva che, dagli anni Settanta, con l'introduzione del «*construction management* si ha la possibilità di correggere le scelte progettuali, trasformando il progetto in programma in continua evoluzione; il *construction management* agisce in nome di una committenza pubblica o privata, gestendo il processo edilizio integralmente dalla progettazione alla realizzazione dell'opera e agendo per appalti separati e indipendenti con un'attiva azione di controllo e di coordinamento. Solitamente impiegato per interventi di grande dimensione, il *construction management* è paragonabile ai *clerici operationum*, ai *curatores operum* o agli *epistatati* del processo edilizio antico» (De Giovanni, 1992).

Ma come ha affermato negli anni '90 Vladimir Bazjanac, ricercatore del Lawrence Berkeley National Laboratory alla University of California, «il processo di progettazione e realizzazione delle strutture è cambiato rapidamente. Il cambiamento è dovuto soprattutto all'emergere del metodo BIM e alla sua intrinseca capacità di garantire la validità dei dati inseriti nel manufatto in ogni momento del suo ciclo di vita, permettendo un realizzazione integrata della commessa impossibile fino ad ora». Nonostante sia uno dei settori trainanti della nostra economia, il mondo delle costruzioni è forse quello che storicamente ha mostrato una maggiore resilienza all'innovazione: le innovazioni avvengono con lenta evoluzione e con altrettanta lentezza vengono percepite da costruttori e progettisti, determinando non pochi problemi di adeguamento e adattamento: «*l'evento del nuovo, nel settore delle costruzioni, è dato dalla sua interazione con una realtà di industrializzazione sempre più avanzata. Questo incontro può avere ripercussioni positive solo se mediato e disciplinato dalla figura di un*

*progettista culturalmente preparato*» (Nardi, 2003).

Negli ultimi decenni le figure professionali sono cambiate e gli strumenti di progettazione si sono evoluti: si è passati dal CAD agli strumenti digitali tridimensionali; tali strumenti hanno generato una profonda trasformazione nella produzione contemporanea attraverso un repertorio d'infinito forme e contenuti riconducibili a quella che Partick Schumacker ha definito nel 2008 *Architettura Parametrica*, svincolata dagli stereotipi della tradizione e dal rapporto forma-funzione, espressione diretta di parametri e delle loro relazioni, matematicamente determinati, al software BIM (*Building Information Modeling*). Qui i dati rilevanti della costruzione sono raccolti, combinati e collegati digitalmente per consentire un maggiore livello d'integrazione tra le componenti tecnologiche, verificandone in anticipo le possibili interferenze ed eliminandone gli errori progettuali e di realizzazione (Figg. 1-8). La figura dell'architetto si è quindi arricchita di competenze introdotte dall'uso di nuovi processi di fabbricazione digitale: non solo deve progettare forme e geometrie da realizzare con macchinari sofisticati, ma deve acquisire competenze di programmazione, una profonda conoscenza sulle tecniche di fabbricazione e sui materiali. Ci indirizziamo verso una produzione capace di sovvertire i tradizionali rapporti progettista-produttore-esecutore-utente: ci troviamo all'alba di un'epoca, in cui gli auto-produttori, conosciuti anche come *Makers*, diventeranno i principali operatori del processo edilizio (Anderson, 2012).<sup>1</sup>

*Digital Manufacturing*<sup>2</sup> - È un processo attraverso cui è possibile realizzare oggetti solidi e tridimensionali partendo da disegni digitali; è utilizzato ampiamente in manifattura per la creazione rapida di modelli e prototipi ma anche nell'industria automobilistica e aerospaziale. È opinione condivisa che la fabbricazione digitale stia inaugurando una nuova era per il settore delle costruzioni (Gershenfeld, 2005; Anderson, 2010); oggi, come rileva Neri Oxman, architetto e fondatore del gruppo Mediated Matter presso il MIT Media Lab, «le tecnologie digitali, come additivo di produzione, consentono all'artigianato e all'industria di fondersi, generando mestiere con l'aiuto della tecnologia». Ai ritmi dell'attuale ricerca, è probabile che nel prossimo futuro gli edifici saranno del tipo "ibrido", in parte costruiti con sistemi tradi-



zionali e in parte “stampati in 3D”. Ciò che sicuramente rende la stampa 3D attraente per il settore edilizio è la possibilità di potenziare i benefici tipici della produzione industriale (economia di mezzi, riduzione degli sprechi, controllo di qualità del prodotto finito), con un’adattabilità pressoché illimitata alle specifiche esigenze del progetto. Se finora le tecnologie di produzione seriale hanno faticato non poco ad affermarsi, prevalentemente a causa di un’intrinseca rigidità del linguaggio architettonico, con la stampa 3D si apre uno scenario diametralmente opposto, in cui i mezzi della produzione sono in grado di assecondare per intero il progetto nelle sue complesse articolazioni geometriche e “formali”.

Lo Studio Gehry & Partners LLP sperimenta il processo di fabbricazione digitale per la prima volta alla fine del 1980 e nel 1992 lo utilizza per la realizzazione del padiglione a forma di pesce sul *waterfront* di Barcellona (Fig. 9): produzione e assemblaggio dei diversi componenti strutturali sono stati governati esclusivamente dal modello digitale, non potendo i produttori operare con gli strumenti tradizionali. L’impiego dei software di modellazione ha drasticamente ampliato le possibilità di disegno, mentre le tecnologie di fabbricazione digitale hanno notevolmente ampliato la portata di ciò che può essere costruito, riducendo il tempo e i possibili errori dovuti al trasferimento di informazioni (Kolarevic, 2003). La combinazione di questi due strumenti ha dato l’opportunità di immaginare e realizzare un’architettura di massa ma altamente personalizzata, oltre ogni limite in termini di complessità ed efficienza, creando terreno fertile per la sperimentazione su macchine, tecniche di fabbricazione e materiali applicati per la costruzione (Figg. 10-14).

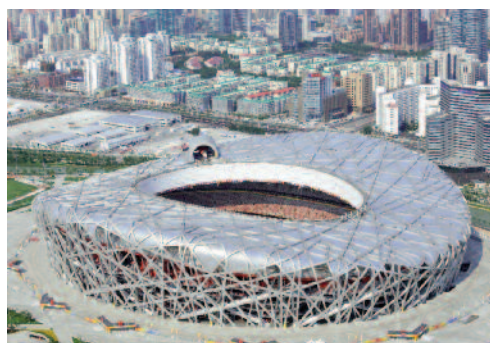
*Mass Customization*<sup>1</sup> - La locuzione *mass customization* (personalizzazione di massa) è stata impiegata da Stanley Davis (1987) nel volume *Future Perfect*: qui viene fornito un quadro concettuale per quel processo emergente che sei anni dopo Joseph Pine avrebbe definito come una combinazione di artigianato e di elementi in produzione di serie (Pine, 1992). In ambito edilizio, l’innovazione radicale è rappresentata da un nuovo approccio nella produzione dell’architettura, in cui le fasi della progettazione e della costruzione si sviluppano senza soluzioni di continuità. Fondamentali in questa prospettiva sono state la progettazione digi-

tale e le macchine a controllo numerico, il cui primo prototipo è stato sviluppato dal MIT e introdotto sul mercato nel 1952.

Dopo circa settant’anni dall’introduzione dei primi utensili a controllo numerico, le macchine per la fabbricazione digitale si sono molto evolute e sono diventate economicamente più accessibili, grazie soprattutto al *Center for Bits and Atoms* del MIT, diretto da Neil Gershenfeld, laboratorio sperimentale che nasce con l’obiettivo di esplorare il confine tra informatica e scienza fisica e, nel caso della progettazione digitale, studiare come trasformare i dati in cose e viceversa (Gershenfeld, 2012), attraverso soluzioni di interfaccia tra due storiche fasi cruciali del fare architettura, quella progettuale e quella realizzativa (Katz, 2002). Al giorno d’oggi, gli strumenti digitali di progettazione e di costruzione ci permettono di immaginare nuovi modi per collegare queste due dimensioni, per descrivere sinteticamente l’ambiente fisico e il suo comportamento attraverso strumenti di simulazione avanzata, ovvero per collegare bits e atomi.

Uno dei progetti più rappresentativi del *Center for Bits and Atoms* è il *Fab Lab*, piattaforma di prototipazione che fornisce strumenti di fabbricazione accessibili ed economici per la prototipazione rapida di qualsiasi oggetto, replicabile in qualsiasi parte del mondo, autosufficiente e disponibile per l’uso di comunità di studenti, educatori, tecnici, ricercatori, responsabili e innovatori (Fab Foundation, 2014). Ampiamente diffusi nelle Scuole di architettura, i *Fab Labs* (Figg. 15, 16) hanno sviluppato programmi di progettazione-costruzione al fine di consentire un’esperienza diretta nella produzione di architettura, non solo in termini di progetto, ma anche di macchinari, materiali e strumenti che intervengono globalmente nel processo creativo; parafrasando il designer Alastair Parvin possiamo dire che ci stiamo dirigendo verso un futuro in cui la fabbrica è ovunque e il team di progettazione siamo tutti noi (Parvin, 2013). I *Fab Labs* sono luoghi di produzione dove si condividono conoscenza e informazioni nella rete; la loro diffusione rappresenta anche l’inizio di un nuovo modello industriale, integrato all’interno del tessuto urbano della città, come strumento che sta plasmando la città, e viceversa (Diez, 2012).

Con la diffusione dei *Fab Labs* e delle macchine per la fabbricazione digitale, diversi autori hanno teorizzato l’avvento di una terza rivoluzione industriale (Rifkin, 2011; Troxler, 2013). Mentre la prima rivoluzione industriale si è caratterizzata per la meccanizzazione del processo produttivo e la seconda ha aperto l’era della produzione di massa (standardizzazione del prodotto), la terza rivoluzione industriale rende accessibili gli strumenti di produzione per la personalizzazione di massa, e l’utente è egli stesso produttore, è un *prosumer* (Troxler, 2013): si è passati dalla diffu-



Figg. 3, 4 - Il Bird’s Nest (nido d’uccello), lo Stadio nazionale di Pechino (Herzog & de Meuron, 2008).

sione democratica dei prodotti alla democratizzazione della produzione. L’occasione per un cambiamento di produzione, offerta dal “controllo computazionale” nella fabbricazione avanzata, è già maturata in diversi settori industriali. Sebbene sia improbabile immaginare che la fabbricazione avanzata possa sostituire completamente gli strumenti di produzione delle industrie, essa stimola la visione di un nuovo concetto di personalizzazione per una vasta varietà di componenti, capaci di superare la stagnazione della produzione ripetitiva nelle costruzioni avuta con la prefabbricazione (Gramazio et al., 2014). Secondo Anderson, la *terza rivoluzione industriale* è da leggersi come la combinazione tra una produzione digitale e una personale (Anderson, 2010), visione questa che suggerisce una possibile risposta ai dubbi sulla diffusione radicale di prodotti personalizzati.

Le domande da porsi sono: quali tecnologie di stampa 3D sono più adatte per l’architettura? I risultati delle sperimentazioni architettoniche che abbiamo osservato negli ultimi anni saranno in grado di soddisfare le attuali aspettative? Il miglioramento delle caratteristiche chimico-fisiche del materiale di stampa da un lato e della tecnologia 3D dall’altro sono oggetto di ricerca e di investimenti per molte aziende nei diversi settori industriali come in quello edilizio, tanto che nel 2014 si è avviata la stampa della prima casa. Ma quali sono i risvolti di tale innovazione? È la tecnologia di stampa 3D abbastanza matura per essere applicata all’edilizia? Fino a che punto la stampa 3D può sostituire le tecnologie tradizionali nel settore delle costruzioni?

*La fabbricazione digitale per l’Architettura*<sup>2</sup> - La stampa 3D nasce nel 1986 con la registrazione del brevetto di Chuck Hull sulla stereolitografia (Figg. 17-19), brevetto che consente la realizzazione di oggetti da strati successivi solidificati di resina; in pratica una luce ultravioletta viene concentrata sulla superficie di una vasca piena di fotopolimero liquido e, attraverso *software* e *hardware* specifici, disegna ogni strato dell’oggetto sulla superficie liquida, che si indurisce e si polimerizza (Hull, 1986). Dalla sua nascita la stampa 3D si è evoluta avvalendosi di tecnologie differenti tra cui, oltre la *Stereolitografia (SLA)*, la *Sinterizzazione Laser*

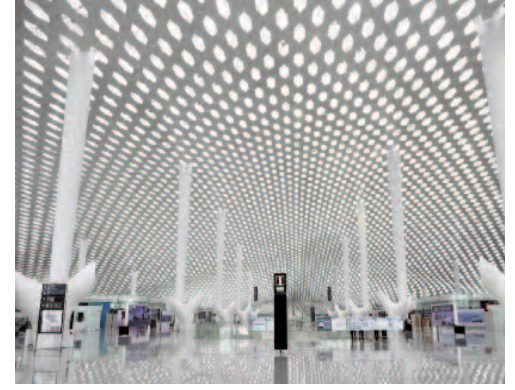


Fig. 5, 6 - Il Terminal 3 all'Aeroporto di Shenzhen (Fuksas, 2013).

Selettiva (SLS), il Digital Light Processing (DLP), il PolyJET, la Modellazione a Deposizione Fusa (FDM), la Produzione di Oggetti Laminati (LOM), la Fusione Laser Selettiva (SLS), la Two-Photon Polymerization (2PP), la Direct Metal Laser Sintering (DLMS), la Selective Heat Sintering (SHS), l'Anti-Gravity Object Modelling (AOM), la recente Produzione Additiva lungo le direttrici di maggiore sollecitazione (SLAM), ma anche impiegando materiali diversi, con specifiche caratteristiche meccaniche, stampabili sia da soli che in combinazione, utilizzabili in ambiti che spaziano dall'industria all'artigianato, dal medicale all'alimentare, rendendo di fatto accessibile a tutti la prototipazione di nuovi prodotti. Tra i materiali più utilizzati l'ABS (Acrilnitrile Butadiene Stirene) o il PLA (Acido Polilattico) fatto da amido di mais o canna da zucchero, biodegradabile e capace di aumentare la gamma di applicazioni e di dare alle stampe l'aspetto del legno, metallo (Fig. 20) e arenaria (ColorFabb, 2016).

Negli ultimi decenni, diverse sono state le stampanti 3D a basso costo introdotte sul mercato. La prima, prodotta dalla 3D Systems, è stata la Actua 2100 nel 1996, con la quale si depositava cera su strati successivi utilizzando il meccanismo della stampa a getto d'inchiostro. Da allora, i costruttori di macchine utensili hanno sviluppato per il mercato parecchi dispositivi che utilizzano tecnologie sia sottrattive sia additive ma anche dotate di accessori per operazioni di taglio o fresatura (Zelinski, 2014). La tecnologia di produzione additiva continua a migliorare nella precisione del dettaglio di stampa, nella riduzione dei tempi di realizzazione dell'oggetto, mentre aumenta la dimensione degli oggetti stampabili e materiali e attrezzature sono sempre meno costosi e più accessibili. Oggi sono una cinquantina diverse procedure di fabbricazione additiva, che si basano su diversi principi di funzionamento chimico, che

possono essere utilizzati in ogni fase della progettazione e produzione di un componente con modeste limitazioni legate alla geometria, alla complessità o alla composizione del materiale.

L'attività di costruzione in generale, può essere considerata un processo additivo, che consiste principalmente nella posa in opera di diversi componenti e nella sovrapposizione di strati successivi di materiale (Naboni e Paoletti, 2015). La produzione additiva può essere applicata al settore edile essenzialmente in due modi: per produrre componenti da assemblare e collegare per creare strutture più grandi, o per "stampare" su larga scala intere strutture architettoniche. Dalla metà degli anni Novanta, diversi gruppi di ricerca e industrie hanno tentato di applicare la produzione additiva alla scala dell'edificio, cercando di superarne il limite principale rappresentato dalle dimensioni delle macchine rispetto alla scala degli edifici. L'implementazione dell'automazione nel settore delle costruzioni è stata ed è ancora piuttosto lenta per una serie di motivi tra cui: l'approccio della progettazione tradizionale non è adattabile al nuovo processo e all'innovazione; le tecnologie disponibili sono inadeguate per realizzazioni su larga scala; si ricercano ancora materiali con caratteristiche fisiche e meccaniche compatibili con il processo di stampa; le macchine sono piuttosto costose. Di contro l'industria delle costruzioni si trova a fronteggiare un tasso di infortuni e di mortalità nei cantieri ancora elevato, un'efficienza e una qualità della produzione ancora bassa. La stampa 3D, se impiegata nel settore delle costruzioni, promette di limitare i problemi connessi agli errori umani, rispettare i tempi di consegna, di esaltare l'estro creativo dei progettisti per le geometrie e le forme complesse, di migliorare la funzionalità delle strutture, il controllo dei materiali e la qualità delle finiture (Fischer et al., 2013).

Tra i diversi processi di stampa si porrà l'at-

tenzione sulla fabbricazione additiva, processo di formazione incrementale, eseguito mediante l'aggiunta di strati successivi di materiali senza l'utilizzo di strumenti supplementari o stampi (Kolarevic, 2003). Processi fisici e chimici portano alla creazione di forme solide omogenee, composte da materiali amorfi come liquidi, polveri, gas e fibre. Questo processo offre un ampio grado di flessibilità e un notevole potenziale economico, perché i componenti sono realizzati direttamente da materiali naturali, e permette di realizzare componenti unici, che non sarebbero economicamente sostenibili se prodotti con tecniche tradizionali (Hauschild and Karzel, 2011). Questa caratteristica, unitamente all'elevata libertà nella realizzazione di forme complesse, rende il processo di produzione additiva particolarmente rilevante nella prospettiva di una personalizzazione avanzata, e spiega il crescente coinvolgimento di ricercatori nello sviluppo di tecniche e applicazioni in questo campo.

*Contour Crafting*<sup>2</sup> - Il primo tentativo di realizzare un'architettura interamente con la Digital Manufacturing è da ricondurre alla tecnologia di fabbricazione additiva denominata *Contour Crafting* (CC), sviluppata a partire dal 1998 da Behrokh Khoshnevis, direttore del Center for Rapid Automated Fabrication Technologies (CRAFT) presso la University of Southern California. Il CC impiega un modello digitale che, attraverso un computer, governa il processo di estrusione dei materiali con uno o più ugelli, strato su strato, e il processo di finitura grazie a una spatola (Zhang, 2013). La "stampante", gestita da un software CAD 3D, è costituita da un telaio a portale che scorre su due rotaie poste a circa un metro dal perimetro della casa da stampare; sul portale è collocato un braccio robotico (con ugelli e spatola) capace di muoversi lungo l'altro asse orizzontale e lungo la verticale (Fig. 21, 22). Prevalentemente



Fig. 7 - Il Heydar Aliyev Center a Baku in Azerbaigiani, progettato da Zaha Hadid Architects nel 2013 (© Iwan Baan).



Fig. 8 - Il Serpentine Gallery Pavilion a Londra (Ito, Balmond e Arup, 2002).



Fig. 9 - Il Peix d'Or realizzato con pannelli in acciaio color bronzo, sul waterfront di Barcellona (Gehry, 1992).

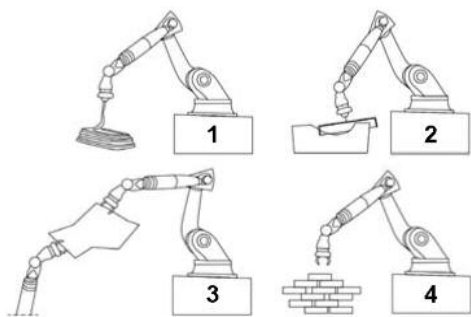


Fig. 10 - Tecniche per la fabbricazione digitale: 1) additiva; 2) sottrattiva; 3) trasformativa; 4) assemblativa (Naboni e Paoletti 2015).

il materiale impiegato è un impasto di calcestruzzo additivato con speciali indurenti e fibre per rendere ogni strato sufficientemente duro, nelle more che l'estrusore circumnavighi l'intera struttura, in modo tale da reggere lo strato successivo. Il *Contour Crafting* è pensato per realizzare grandi costruzioni in tempi contenuti e pertanto può, con l'ausilio di bracci robotizzati, installare le armature per la struttura, le canalizzazioni idrauliche, elettriche e di condizionamento in sezioni ridotte che non ostacolano il movimento dell'estrusore e della spatola (Khoshnevis, 2012).

Anche se il CC appare molto semplice e intuitivo, questa tecnologia deve ancora maturare nella gestione del processo, nella completa automazione robotica e nell'impiego di materiali eco-compatibili prima che si possa applicare su larga scala. Nonostante ciò la tecnologia, per le caratteristiche attuali e per quelle potenziali, fornisce diversi spunti di interesse per il mondo delle costruzioni (Kreiger et al., 2015). In primo luogo per la *garanzia di qualità esecutiva*. Come ogni cosa che venga realizzata con un sistema robotico, a meno di errori progettuali o nella programmazione del *software*, il rischio di errori nell'esecuzione che possano pregiudicare la qualità del prodotto è nullo. In tutti i lavori manuali o che dipendono dalla forza lavoro umana, invece, esiste il rischio di errori dovuti alla scarsa capacità o attenzione dell'operatore ma anche alle interferenze che si generano in cantieri complessi.

In secondo luogo per l'*impatto sociale*, sebbene uno dei primi effetti del *Contour Crafting* sul cantiere potrebbe essere la riduzione del numero di lavoratori: una volta che quasi tutte le fasi di

costruzione saranno gestite da un *software*, oltre a un paio di tecnici con conoscenze informatiche, sarebbero necessari pochi operai. In realtà con la nuova tecnologia è presumibile che il lavoro si qualificherà in modo differente, da prevalentemente manuale a intellettuale (programmatori, ingegneri informatici, chimici ecc.), si potrà allargare alle donne, vedrà aumentare l'età media degli operatori e ridurrà drasticamente il rischio di infortuni sul lavoro; inoltre, la velocità di realizzazione delle unità abitative e il contenimento dei costi di realizzazione, rende questa tecnologia molto interessante per risolvere i problemi dell'emergenza abitativa a favore dei meno abbienti e in caso di calamità naturali. In terzo luogo per l'*impatto ambientale* ridotto, grazie al minor consumo di energia richiesta durante la realizzazione dell'opera, alla drastica riduzione del materiale di scarto, dell'inquinamento acustico e delle emissioni di polveri nocive e di percolato prodotti nel cantiere (Hager et al., 2016).

Infine per la *considerevole riduzione dei tempi e dei costi di realizzazione*, che nei processi edilizi tradizionali sono determinati prevalentemente dalla manodopera, dagli scarti di lavorazione e dagli imprevisti. Un gruppo di ricerca coordinato da Farook Hamzeh del *Department of Civil and Environmental Engineering* presso la *American University of Beirut* ha condotto delle simulazioni, utilizzando il *software EZStrobe*, per raffrontare i tempi di esecuzione di una abitazione con le tecniche tradizionali e con la tecnologia del *Contour Crafting* (Rouhana et al., 2014). L'abitazione analizzata, di forma quadrata, con un'altezza libera di tre metri e una superficie di 200 metriquadri, è stata divisa in quattro piccoli appartamenti da quattro vani ciascuno. La simulazione, che ha escluso in entrambi i casi la fondazione, gli impianti e le opere di finitura, ha previsto la realizzazione di dieci setti in cemento armato dello spessore di cm 20 e della superficie di m<sup>2</sup> 42; nel modello convenzionale il solaio di copertura è stato ipotizzato in latero-cementizio da cm 30, mentre nel modello CC con piastre di acciaio e una caldana da cm 10 di calcestruzzo. La simulazione ha dimostrato come la realizzazione di un manufatto con le tecniche tradizionali sia notevolmente più lenta di un'equivalente realizzata con il CC: la differenza tra le 92 ore della prima e le 29 ore della seconda simulazione è ascrivibile all'installazione e rimozione delle casseforme, all'attesa

per l'indurimento del calcestruzzo gettato in opera, all'organizzazione del lavoro in cantiere. Con l'ottimizzazione del processo gli autori della ricerca pensano che il CC potrà ridurre a un quarto i tempi di realizzazione rispetto a un processo edilizio tradizionale (Figg. 23-25).

Ovviamente, ci sono ancora delle *questioni da risolvere*, quali l'elevato costo della macchina, la sua trasportabilità e adattabilità alla morfologia del terreno: a causa delle sue dimensioni e del suo peso, sebbene realizzata con componenti modulari, la "stampante" necessita di un'autogru per il suo trasporto; inoltre, il sistema con telaio a portale che scorre sui binari non può essere impiegato su terreni che non sono perfettamente pianeggianti mentre una valida soluzione, in via di sperimentazione, potrebbe fornirla un sistema in cui l'estrusore è sospeso attraverso cavi (Bosscher et al., 2007). Il nuovo paradigma di costruzione introdotto dal *Contour Crafting* richiederà un approccio innovativo anche per la logistica di costruzione. Una tecnologia che potrà in futuro realizzare un'unità edilizia in ventiquattro ore richiederà una logistica di supporto capace di consegnare in cantiere tutti i materiali necessari in un arco temporale ristretto e di organizzarli per la loro posa in opera secondo una corretta sequenza temporale. Oltre a ciò servirà lo sviluppo di un complesso software capace di governare lo stoccaggio dei materiali, l'organizzazione del cantiere e le diverse fasi operative, ovvero un piano di fabbricazione dettagliato, capace di ottimizzare i tempi di esecuzione e la fase intermedia di ispezione da parte degli operatori, almeno fino a quando non si metterà a punto un sistema di sensori per la verifica automatizzata in tempo reale (Yossef et al., 2015).

Un altro nodo da risolvere riguarda l'individuazione di un materiale (alternativo al calcestruzzo) che sia a basso impatto ambientale, lavorabile, estraibile, con una buona velocità d'indurimento, facilmente miscelabile e resistente alla compressione. L'impatto che il cemento (dalla sua estrazione alla sua lavorazione) determina sull'ambiente incide in percentuale variabile tra il 5 e l'8% sulle emissioni globali di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera, e anche se calcare, argilla e marna non sono proprio indisponibili, la loro estrazione determina comunque un considerevole impatto ambientale, amplificabile in modo smisurato qualora il CC venisse utilizzato con il calcestruzzo per la risolvere su larga scala il problema dell'emergenza abitativa nel



Figg. 11, 12 - Una quinta di mattoni, la cui tessitura è assemblata da un robot (© NCCR Digital Fabrication), e la Galleria d'arte nel Shanghai's West Bund District, il cui prospetto con trama in mattoni è stato posato in opera da un robot (Archi-Union Architects, 2016).



Fig. 13 - Un centrotavola in marmo prodotto da ARC, lavorato con macchina a controllo numerico (CNC) a 5 assi (© Lapidia, Erosion Collection 2017).

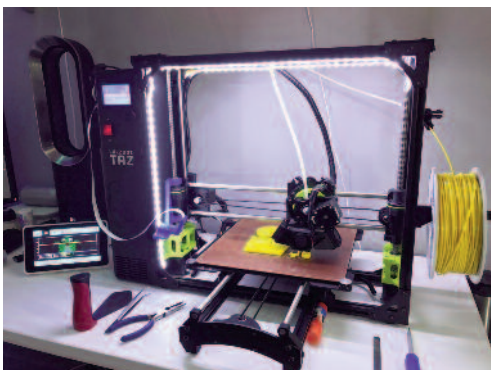


Fig. 14 - Una stampante 3D con tecnologia additiva per oggetti in silicone.

mondo occidentale e nei paesi del terzo mondo.

*D-Shape*<sup>1</sup> - Una prima alternativa ecologica al CC, sebbene costituisca un sistema “ibrido” è la tecnologia *D-Shape* dell’ingegnere Enrico Dini che, con il suo grande formato, utilizza sabbia e un legante inorganico ed ecocompatibile per creare un materiale simile alla pietra (Fig. 30). Con movimento orizzontale del cavalletto la testa della stampante deposita uno strato (tra i mm 5 e 10) di sabbia mista con ossido di magnesio e, tramite una serie di ugelli, vi spruzza un liquido a base di cloro: quest’ultimo attiva una reazione chimica che solidifica l’impasto e crea l’arenaria sintetica. Successivamente il cavalletto viene sollevato, viene aggiunto un altro strato di sabbia e il processo si ripete. La forma desiderata è realizzata grazie all’azione selettiva e programmata di alcuni dei 300 ugelli disponibili e quando il *D-Shape* ha completato la sua stampa, trascorse le 24 ore del processo di solidificazione, la sabbia in eccesso viene accuratamente rimossa per rivelare l’oggetto solido che presenta una finitura superficiale simile al marmo, un’elevata durabilità e resistenza superficiale. Altri componenti, come fibra di vetro e fibra di carbonio possono essere aggiunti per aumentare ulteriormente la resistenza del sistema (Dini 2010). Per la *Landscape Architecture* dello studio olandese *Universe Architecture*, Dini ha messo a punto un sistema che vedrà due stampanti *D-Shape* lavorare fianco a fianco all’interno di strutture temporanee nei pressi del sito. Il *D-Shape* stamperà i vari componenti prefabbricati che verranno poi assemblati per formare la struttura del ciclo: ogni elemento presenterà delle cavità che saranno riempite con calcestruzzo fibro-rinforzato per assicurare l’integrità e la continuità strutturale dell’opera, consentendo al contempo considerevoli economie di tempo, di manodopera e di trasporto.

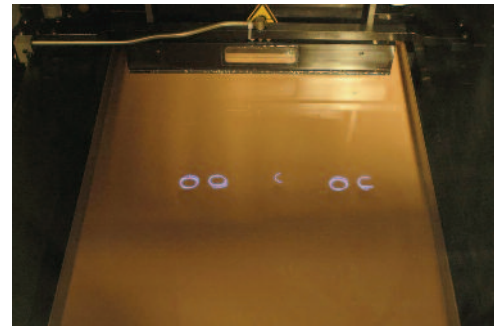
*WASP*<sup>1</sup> - Alternativa di chiara ispirazione ambientalista è il progetto *WASP* (*World’s Advanced Saving Project*) di Massimo Moretti, progetto che nasce nel 2012 con l’obiettivo di costruire una stampante 3D in grado di realizzare case con materiali reperibili localmente e con un costo irrisorio. Se in generale la stampa 3D lavora per deposizione di materiali compositi, la *WASP* predilige impasti di materiali fluido-densi, locali, che cambiano di stato tramite l’evaporazione di un solvente, ad esempio l’acqua. Usciti dalla logica dei materiali plastici, il team ha rivolto la ricerca verso materie facilmente reperibili, ad alto rendimento e dal basso costo di produzione, quali argilla e canapa. L’impiego dell’argilla per la realizzazione di case ha radici millenarie, soprattutto nelle regioni del Mediterraneo e la *WASP* può realizzare architetture interessanti, in tempi brevi e con manodopera ridotta (Figg. 31-32). L’impasto prevalentemente utilizzato contiene anche fibre discontinue di canapa, ma il team di Moretti sta attualmente valutando, per controllare il ritiro dell’argilla ed evitare variazioni eccessive delle proprie dimensioni, anche l’impiego dei semi di alcune graminacee: i semi delle piante assorbono l’umidità dell’argilla fino a svilupparsi e crescere, così che le loro radici costituiscano una sorta di armatura interna, completamente naturale.

La facilità di trasporto e il basso fabbisogno di energia sono le caratteristiche principali del *WASP*. Esistono stampanti per edilizia più grandi della *BigDelta*, che pesano però quintali e consumano quantitativi enormi di energia (Figg. 33-34). L’approccio *delta* è stato scelto proprio perché, con la struttura di supporto reticolare, i tre assi verticali consentono bassi consumi energetici, poiché ciò che si muove è solo l’estrusore. I bracci della *BigDelta* trasportano all’incirca 70 kg, per un consumo ridotto a meno di un decimo rispetto alle stampanti a portale ed equivalente a circa 300 watt, perfettamente gestibile quindi con una batteria e pochi metri quadri di pannelli solari. Oltre a ciò, la *BigDelta* è stata progettata per essere montata in tempi brevi: tre persone impiegano circa due ore per renderla operativa.

Una recente innovazione è rappresentata dall’*ugello rotante*. L’indispensabile controllo dei movimenti nella stampa 3D era stato limitato dall’origi-



Figg. 15, 16 - La Fab Lab House presentata al Solar Decathlon 2010 su progetto dell’IAAC, Istituto di Architettura Avanzata della Catalogna (© Adrià Goula).



Figg. 17-19 - Fasi del processo di stampa stereolitografica di alcuni auricolari prodotti dalla azienda danese Windex (dal sito [www.disruptiveinnovation.se/?tag=stereolithography](http://www.disruptiveinnovation.se/?tag=stereolithography), 2016).

nario estrusore a pompa peristaltica, oggi ridisegnato con un concetto a coclea. L’attuale estrusore è in grado di gestire addirittura la ritrazione, può cioè interrompere il lavoro e ritirare il materiale estruso. In poche parole si è passati dall’estrusione continua al controllo preciso dei flussi, alla possibilità di interrompere e riprendere l’erogazione in maniera micrometrica. Il nuovo estrusore può essere montato e smontato rapidamente, impasta il materiale in uscita, in modo da permettere una corretta adesione dei layer uno sull’altro, si pulisce automaticamente, ha un controllo costante a tutte le velocità e necessita di un quantitativo di energia minimo: per spingere argilla nei tubi occorrono diversi kilowatt, lasciandola cadere controllata con una vite bastano solo alcune decine di watt.

*Conclusioni*<sup>1</sup> - Oggi il potenziale delle tecnologie avanzate per la progettazione e per la fabbricazione digitale non riguarda solo un numero ristretto di operatori, ma è una priorità globale per lo sviluppo di un nuovo paradigma industriale, come provano i recenti stanziamenti del Governo americano di tre miliardi di dollari per la ricerca e lo sviluppo delle nuove tecnologie e di un miliardo di dollari per istituire una rete di 15 istituti di produzione innovativa nel 2015. Nel settore delle costruzioni, la fabbricazione digitale è oggi una realtà nella produzione di componenti *free-form* per gli involucri o per elementi tecnici capaci di “materializzare” la complessità tecnologica e la specificità formale di alcuni progetti architettonici. Il passag-



Fig. 20 - La maschera di Iron Man e alcune texture stampate con PLA e PHA, effetto bronzo e rame (© ColorFabb, 2015).



Fig. 21, 22 - La realizzazione di un edificio tradizionale tramite il Contour Crafting e il braccio robotico con ugelli e spatola (© Khoshnevis, dal sito [www.contour-crafting.org/high-resolution-photographs/](http://www.contour-crafting.org/high-resolution-photographs/), 2016).



Fig. 23-25 - L'unità residenziale prodotta dalla WinSun e alcuni particolari della struttura: l'azienda cinese stampa in 3D separatamente i componenti di base e poi li assembla in situ (© WinSun, Pechino 2014).

gio dalla componentistica alla grande scala richiede un'approfondita ricerca su diverse tematiche.

Innanzitutto sui materiali, sulle loro proprietà fisiche e meccaniche e sul loro comportamento quando vengono stampati. Il processo di stampa 3D, lavorando per addizione di materiale attraverso strati successivi, rende questa tecnologia flessibile e impiegabile con polimeri, metalli, compositi (come ad esempio l'ABS addizionato con resina e fibra di carbonio) e materiali cementizi. Bisogna però andare oltre e, grazie all'ingegneria dei materiali e alla biologia sintetica, approfondire la ricerca su materiali più sostenibili (più resistenti, opachi, trasparenti e isolanti) con caratteristiche che ci permetteranno di creare edifici biologici costruiti digitalmente, in pieno accordo e rispetto con la natura (Figg. 35-38). In tal senso si muove la ricerca di Neri Oxman sulla chitina, un materiale biodegradabile a base di gusci di gamberetti, variabile in densità e resistenza, che potrebbe in futuro sostituire la plastica, o sulle ali di alcuni insetti, molto leggere e resistenti, la cui geometria concentra il materiale solo lungo le linee di tensione.

Di particolare interesse è anche la ricerca sviluppata dal Laboratorio di Self-Assembly del MIT, in collaborazione con la Stratasy Ltd. e la Autodesk, su materiali nanostrutturati "stampabili", capaci di cambiare forma e funzionalità dopo la loro produzione, fornendo così caratteristiche aggiuntive, applicazioni e prestazioni a comando. Questo nuovo processo di fabbricazione, definito "4D printing", potrebbe permettere di modificare le proprietà del materiale stampato (ad esempio, flessibilità, porosità, conducibilità, proprietà ottiche, proprietà magnetiche, ecc.) programmandone le modifiche *post-fabrication* per adattarlo a forma o funzionalità desiderate o per decomporlo velocemente a beneficio dell'ambiente (Campbell et al., 2014). In secondo luogo sui nuovi software, che con il 3D printing consentono ai progettisti e ai costruttori di lavorare senza soluzione di continuità in ambiente digitale, ma spesso con l'uso di differenti applicativi per la modellazione del progetto, per l'ingegnerizzazione delle forme, ecc. Nella corsa al maggior controllo di ogni singolo aspetto del flusso di lavoro (dall'ideazione alla realizzazione) il rischio che i diversi software siano elaborati con una moltitudine di linguaggi, privi di possibilità di scambio informativo, impone una costante ricerca disciplinare sull'interoperabilità delle piattaforme.

Infine sull'organizzazione del lavoro e dei processi, Jeremy Rifkin sostiene che i costi marginali del lavoro prestato dall'uomo per la produzione e distribuzione di beni e servizi tenderanno ad azzerarsi con l'avanzare di tecnologie intelligenti in ogni settore e in ogni campo di applicazione tecnica



Fig. 26 - Il più grande edificio residenziale realizzato con stampa 3D additiva: il manufatto si estende su una superficie di 1.100 metriquadri e si sviluppa su cinque livelli (© WinSun, Pechino 2014).

e professionale. Ciò che appare più realistico è che le tecnologie di produzione avanzata non sostituiranno completamente quelle tradizionali, che rimarranno le soluzioni più appropriate per alcune applicazioni: bisognerà capire come robot ed esseri umani potranno lavorare fianco a fianco e studiare sensori intelligenti e interfacce uomo-macchina per avviarcì alla quarta rivoluzione industriale.

#### ENGLISH SUMMARY

Although it is one of the driving sectors of our economy, the construction world is perhaps one that historically has shown greater resistance to innovation: innovations are undergoing slow evolution and with the same slowness they are perceived by builders and designers, resulting in not few problems of adaptation. In recent decades, professional figures have changed and design tools have evolved: moving from CAD to 3D digital instruments, to BIM software; these tools have created a profound transformation into contemporary production through a repertoire of infinite forms which can be traced back to what in 2008 Partick Schumacker defined Parametric Architecture, free from the stereotypes of tradition and the form-function relationship, direct expression of parameters and their dealings (Figg. 1-8). The figure of the architect was then enriched with the skills introduced by the use of new digital manufacturing processes: not only he has to design forms to be realized with sophisticated machineries, but he must acquire programming skills and a profound knowledge on manufacturing techniques and on materials<sup>1</sup>.

Digital Manufacturing<sup>2</sup>- It is a process through which it is possible to achieve solid and three-dimensional objects starting from digital designs; it is used in manufacturing for the rapid creation of models and prototypes, but also in the automotive and aerospace industries. At the pace of current research, it is likely that in the near future buildings will be of the "hybrid" type, partially built with traditional systems and partially "printed in 3D". What surely makes 3D printing interesting for the building industry is the ability to enhance the typical benefits of industrial produc-

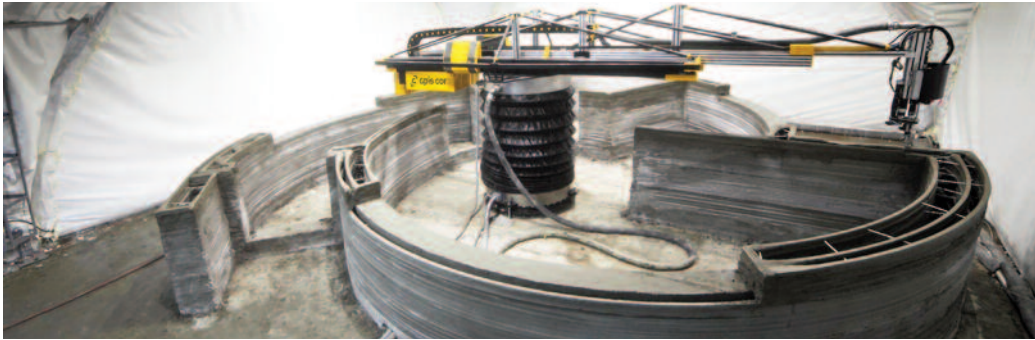


Fig. 27 - La casa low-cost prodotta dall'azienda russa APIS COR in costruzione (© APIS COR, 2017).

tion by opening up a diametrically opposed scenario in which the means of production are able to fully support the project in its "formal" complex articulations. The Gehry & Partners LLP Studio experimented with the digital manufacturing process for the first time at the end of 1980 and in 1992 used it to construct the fish-shaped pavilion on the Barcelona waterfront (Fig. 9): production and assembly of the various structural components have been governed exclusively by digital manufacturing technologies that have made it possible to create a mass architecture that is at the same time highly customized (Fig. 10-14).

Mass customization<sup>1</sup> - The expression mass customization was used by Stanley Davis (1987): here is a conceptual contest for that emerging process defined as a combination of craftsmanship and serial production elements, in which the design and construction phases develop without interruption (Pine, 1992). In this perspective digital design and numerical control machines were fundamental, whose first prototype was developed by MIT. One of the most prominent projects is the Fab Labs (Fig. 15, 16), a prototype platform that provides affordable and economical manufacturing tools for rapid prototyping of any object, replicable anywhere in the world, self-sufficient and available to be used by students, educators, technicians, researchers, managers and innovators (Fab Foundation, 2014). With the diffusion of the Fab Labs and the digital manufacturing machines, several authors have theorized the advent of a third industrial revolution (Rifkin, 2011; Troxler, 2013). While the first industrial revolution was characterized by the mechanization of the production process and the second opened the era of mass production (product standardization), the



Fig. 28 - La casa low-cost prodotta dall'azienda russa APIS COR ultimata (© APIS COR, 2017).

third industrial revolution makes the production tools accessible for mass customization, and the user himself becomes a producer; he is a prosumer (Troxler, 2013): it has shifted from the democratic spread of products to the democratization of production. The questions that the Authors put forward are: What 3D printing technologies are most suitable for architecture? Will the results of architectural experiments that we have observed in recent years be able to meet current expectations? The improvement of the chemical-physical characteristics of the printing material on the one hand and the 3D technology on the other are also the subject of research and investment for many companies even in the building industry, so that in 2014 the printing of the first home began. What are the implications of this innovation? Is 3D printing technology mature enough to be applied to building field? To what extent can 3D printing replace traditional technology in the construction industry?

Digital manufacturing for Architecture<sup>2</sup> - 3D printing was born in 1986 with the registration of Chuck Hull's patent on stereolithography (Fig. 17-19), a patent that permits the realization of objects by subsequent solidified resin layers; In practice, an ultraviolet light is concentrated on the surface of a tub filled with liquid photopolymer and, through specific software and hardware, draws every layer of the object onto the liquid surface, which is hardened and polymerized (Hull, 1986). Today, there are fifty different additive manufacturing processes, based on different chemical working principles, which can be used at any stage in the design and manufacture of a component with modest limitations related to geometry, complexity, or composition of the material



Fig. 31 - Ait Benhaddou in Marocco, dove tutti gli edifici sono costruiti con argilla mista a fibra tamarindica (© WASP Team).



Fig. 29 - Il primo ufficio realizzato a Dubai nel 2016 con stampa 3D e tecnologia additiva: i componenti di base, prodotti con una miscela di cemento speciale (armato), fibra di vetro e plastica rinforzata con fibre, sono stampati in stabilimento e poi assemblati in cantiere (© WinSun, 2016).



Fig. 30 - Un'abitazione stampata con la D-Shape su progetto di Marco Ferreri, esposta e commissionata dalla Triennale Milano nel 2010. (© D-Shape.com).

(Fig. 20). Construction activity in general, which consists mainly of the laying of different components and the overlapping of subsequent layers of material, can be considered an additive process (Naboni and Paoletti, 2015). Additive production can be applied to the construction industry essentially in two ways: to produce components to be assembled into larger structures, or to "print" on large-scale whole architectural structures.

Since the mid-1990s, several research groups



Fig. 32 - La Città di Shibban nello Yemen con i suoi grattacieli in terra cruda.



Figg. 33, 34 - La presentazione della BigDelta a Massa Lombarda (RA) nel 2015 e la stampa dimostrativa di un volume circolare: altezza e diametro del manufatto rispettivamente m 2,70 e 5, t 40 di materiale distribuito su 135 layer, m<sup>3</sup> 2 d'acqua e 200 Kwh di energia consumati (© WASP Team).

and industries have attempted to apply additive production to the scale of the building, trying to overcome the main limit represented by the size of the machines compared to the scale of the buildings. The increasing of automation in the construction sector has been and is still rather slow for a number of reasons including: the traditional design approach is not adaptable to the new process and innovation; the technologies available are inadequate for large-scale realization; there is still a search on materials with physical and mechanical characteristics compatible with the printing process; and the machines are quite expensive.

**Contour Crafting<sup>2</sup>** - The first attempt to realize an architecture entirely with Digital Manufacturing is to be attributed to additive manufacturing technology called Contour Crafting (CC), developed since 1998 by Behrokh Khoshnevis, director of the Center for Rapid Automated Fabrication Technologies (CRAFT) of the University of Southern California. The CC employs a digital model that, through a computer, governs the

material extrusion process with one or more nozzles, layer by layer, and the finishing process with a spatula (Zhang, 2013). The “printer”, which is managed by a 3D CAD software, is a portal frame that runs on two rails placed about one meter around the perimeter of the house to be printed; on the portal there is a robotic arm (with nozzles and spatula) capable of moving along the horizontal axis and along the vertical one (Figg. 21, 22). Contour Crafting is designed to build large constructions in a timely manner and can therefore, with the help of robotic arms, install structural scaffolding, water system, electrical and air conditioning ducts in small sections which do not hinder the movement of the extruder and spatula (Khoshnevis, 2012).

Although the CC seems very simple and intuitive, this technology has yet to mature in process management, in a complete robotic automation and in the use of eco-friendly materials before it can be applied on a large scale. Despite all this, technology provides several points of interest for the construction world for current and potential features (Kreiger et al., 2015). Firstly, for the guaranteeing of executive quality, for the significant social impact, but also for reduced times and costs compared to a traditional building process (Figg. 23-25). Of course, there are still issues to be solved, such as the high cost of the machine, its transportability and adaptability to soil morphology.

**D-Shape<sup>1</sup>** - The first ecological alternative to CC is the D-Shape technology by the engineer Enrico Dini that, through its large format, uses sand and an inorganic and eco-friendly binder to create a stone-like material (Fig. 30). The desired shape is achieved thanks to the selective and programmed action by some of the 300 available nozzles and, when the D-Shape has completed its printing, once finished the 24 hours of the solidification process, the excess sand is carefully removed to reveal the solid object which presents a marble-like surface finishing, high durability and external resistance.

**WASP<sup>1</sup>** - A clear environmental inspiration is the WASP (World's Advanced Saving Project) project by Massimo Moretti, a project that was born in 2012 with the goal of building a 3D printer capable of making homes with locally available and low cost materials. WASP prefers mixes of fluid-dense, locally-based materials that change state by evaporating a solvent such as water. Free from



Fig. 35 - Saltygloo è una stanza realizzata con componenti modulari che richiamano la forma cristallina del sale e che sono ruotati e aggregati in modo casuale; la miscela, composta da sale e colla, è resistente, impermeabile, leggera, traslucida ed economica (© Rael, San Fratello e Lee, 2013).

the logic of plastic materials, the team has sought research into easily obtainable, high-yielding and low-cost materials such as clay and hemp. To control clay retention and to avoid excessive variations in its size, Moretti is also currently evaluating the use of seeds of some grass types: plant seeds absorb clay moisture until it develops and grows so that their roots become a kind of internal, totally natural armor.

**Conclusions<sup>1</sup>** - Today, the potential of advanced digital design and manufacturing technologies is not limited to a small number of operators, but it is a global priority for the development of a new industrial paradigm, as demonstrated by the US government recent funding in favor of the research and the development of new technologies and to set up a network of 15 innovative production institutes in 2015. In the construction industry, digital manufacturing is now a reality in the production of free-form components for the casing or for the technical elements capable of “materializing” the technological complexity and the formal specificity of some architectural projects. The transition from component to large scale requires thorough research in different themes. First of all on the materials, on their physical and mechanical properties and on their behaviour when printed. The 3D printing process, working by adding material through subsequent layers, makes this technology flexible and usable with polymers, metals, composites and cement materials. However, we need to deepen the search for more sustainable materials with characteristics that will allow us to create biologically digitally built buildings, in full agreement and respect with nature (Figg. 35-38).

At the same time it is of particular interest the research developed by the MIT Self-Assembly Laboratory, in collaboration with Stratasy Ltd. and Autodesk, on “printable” nanostructured materials, able to change shape and functionality after their production, thus providing additional features, and applications and performance on command. This new manufacturing process, called “4D printing”, may allow the properties of printed material (for example, flexibility, porosity, conductivity, optical properties, magnetic properties, etc.) by programming its modifications post-fabrication to fit the shape or the functionality wanted or to decompose it quickly for the benefit of the environment. Finally, on the organization of the proceedings, Jeremy Rifkin argues that the marginal cost of man-made labor for the production of goods will tend to be abandoned by advancing intelligent technologies in every sector and in every field of technical and professional application. What is more realistic is that advanced production technologies will not completely replace traditional ones, which will remain the most appropriate solutions for some applications. It will be necessary to understand how robots and humans can work side by side and study intelligent sensors and man-machine interfaces to start the fourth industrial revolution.

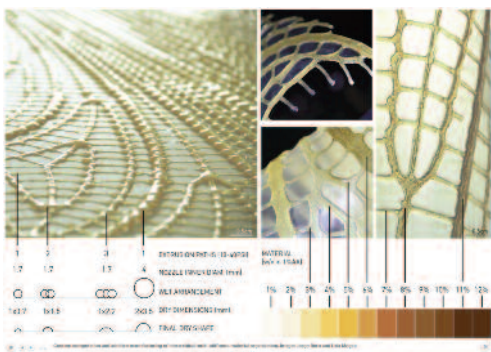
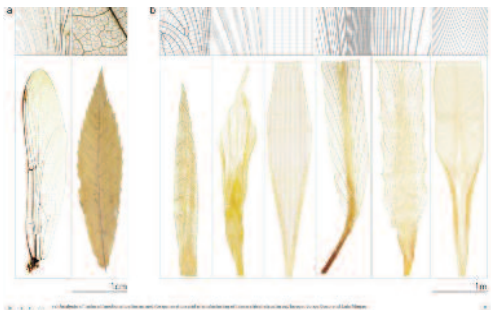
#### NOTES

- 1) Questi paragrafi sono stati curati da Cesare Sposito.
- 2) Questi paragrafi sono stati curati da Francesca Scalisi.





Fig. 36 - Wood-Block è un esempio di materiale stampato in 3D utilizzando un impasto a base di rifiuti agricoli riciclati; esso riproduce le venature del legno naturale e si caratterizza per una leggera traslucenza (© Giannini, 2016).



Figg. 37, 38 - Piattaforma di fabbricazione digitale con materiali a base acqua, biodegradabili ed eterogenei, del MIT Media Lab: analisi dei modelli funzionali naturali e generazione-produzione di strutture gerarchiche; tabella per la produzione di additivi finalizzata all'organizzazione gerarchica dei materiali a rigidità differenziata (© Duro e Mogas, MIT Media Lab 2015).

## REFERENCES

Anderson, C. (2010), "In the next industrial revolution, Atoms are the new bits", *Wired Magazine*, 25.01.2010. Available from: [http://www.wired.com/2010/01/ff\\_newrevolution/all/1](http://www.wired.com/2010/01/ff_newrevolution/all/1). [Accessed: 7 october 2015].

Anderson, C. (2013), *Il ritorno dei produttori. Per una nuova rivoluzione industriale*, Rizzoli Etas, Milano, p. 21.

Bosscher, P. et al. (2007), "Cable-suspended robotic contour crafting system", in *Automation in Construction*, Vol. 17, pp. 45-55.

Campbell, T.A., Tibbits S. and Garrett B. (2014), *The next wave: 4D printing programming the material world*, Atlantic Council, May 2014, Washington, DC. [Online] Available from: <http://www.atlanticcouncil.org/publications/reports/the-next-wave-4d-printing-and-programming-the-material-world> [Accessed 22 April 2017].

ColorFabb (2016), *Specials*. [Online] Available from: <http://colorfabb.com/specials> [Accessed: 30 april 2017]

Davis, S. (1987), *Future perfect*, Addison Wesley Reading, Massachusetts.

De Giovanni, G. (1992), "Gli operatori nell'architettura antica", in Sposito A., *Elogio della Tecnologia*, Alloro

Editrice, Palermo, pp.73-135.

Diez, T. (2012), "Personal fabrication: Fab labs as platforms for citizen-based innovation, from microcontrollers to cities", *Nexus Netw Journal*, Vol. 14, Issue 3, pp. 457-468.

Dini, E. (2010), *What is D-shape*. [Online] Available from: <http://www.d-shape.com/cose.htm> [Accessed 6 June 2014].

FabFoundation (2014), What is a fab lab? [Online] Available from: <http://www.fabfoundation.org/index.php/what-is-a-fab-lab/index.html>. [Accessed: 13 september 2015].

Fischer, M., Bazjanac, V., and Mrazovic, N., (2013), "Framework for bringing 3D printing into the construction industry", Center for Integrated Facility Engineering, CIFE, Stanford University.

Gershenfeld, N. (2005), *Fab: The coming revolution on your desktop – from personal computers to personal fabrication*, Basic Books, New York.

Gershenfeld, N. (2012), "How to make almost anything. The digital fabrication revolution", *Foreign affairs*, Vol. 91, Issue 6, pp. 43-57. Available from: <https://www.foreignaffairs.com/articles/2012-09-27/how-make-almost-anything> [Accessed: 15 march 2016].

Gramazio, F., Kohler, M. and Willmann, J. (2014), *The Robotic touch: How robots change architecture*, Park Books, Zurich.

Hager, I., Golonka, A. and Putanowicz, R. (2016), "3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?", in Drdlová, M., Kubátová, D. and Boháč, M. (eds.) *Ecology and new Building materials and products*, Procedia Engineering 151, Elsevier, Amsterdam, pp. 292-299.

Hauschild, M. and Karzel, R. (2011), *Digital Processes (Detail Practice)*, Birkhäuser GmbH, Basel.

Hull, C.W., *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, Patent US4575330A (1986).

Katz, R. (2002), "An interview with Neil Gershenfeld", *Educause Review*, march/april, pp. 34-38. Available from: <https://net.educause.edu/ir/library/pdf/erm0223.pdf> [Accessed: 03 July 2016].

Khoshnevis, B. (2012), *Contour crafting: Automated construction*. [Online] Available from: <http://www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gxqog> [Accessed: 03 april 2017].

Khoshnevis, B. (2004), "Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies", *Automation in Construction*, Vol. 13, Special Issue: The best of ISARC 2002, pp. 5-19.

Kolarevic, B. (2003), *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*, Spoon Press, New York.

Kreiger, M.A. et al. (2015), "The current state of 3D printing for use in construction", in White, D.J., Alhasan, A. and Vennapusa, P. (eds.) *The Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure*, Trans Project Reports. Paper 141. pp. 149-158. Available from: [http://lib.dr.iastate.edu/intrans\\_reports/141](http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/141) [Accessed: 10 april 2017].

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

Nardi, G. (2003), *Percorsi di un pensiero progettuale*, CLUP, Milano.

Parvin, A. (2013), *The DIY house of the future: Alastair Parvin at TED2013*. [Online] Available from:



Fig. 39 - Uomini e umanoidi lavorano fianco a fianco: fantascienza o industria 4.0?

<http://blog.ted.com/2013/02/27/the-diy-house-of-the-future-alastair-parvin-at-ted2013/> [Accessed 25 november 2015].

Peng, W., 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.

Pine, J. (1992), *Mass customization: The new frontier in business competition*, Harvard Business Review Press, Boston.

Rifkin, J. (2011), *The third industrial revolution. How lateral power is transforming energy, the economy, and the world*, Palgrave MacMillan, New York.

Rifkin, J. (2014), *La società a costo marginale zero. L'Internet delle cose, l'ascesa del Commons Collaborativo e l'eclissi del capitalismo*, Mondadori, Milano.

Rouhana, C.M. et al. (2014), "The reduction of construction duration by implementing contour crafting", Proceedings for the 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC & Akademia forlag, Oslo, pp.1031-1042.

Sargent, J.F. (2014), *The Obama administration's proposal to establish a national network for manufacturing innovation*, Congressional Research Service report. [Online] Available from: <http://fas.org/sgp/crs/misc/R42625.pdf> [Accessed 12 June 2015].

Scalisi, F. (2010), *Nanotecnologie in edilizia. Innovazione, tecnologica e nuovi materiali per le costruzioni*, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna (RM).

Schumacker, P. (2008), *Parametricism as Style*, XI Biennale di Architettura di Venezia.

Troxler, P. (2013), "Making the 3rd industrial revolution", in Walter-Herrmann, J. and Büching, C. (eds.) *FabLabs: Of Machines, Makers and Inventors*, Transcript Publishers, Bielefeld.

Yossef, M. and Chen, A. (2015), "Applicability and limitations of 3D printing for civil structures", in White, D.J., Alhasan, A. and Vennapusa, P. (eds.) *The Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure*, Trans Project Reports. Paper 141. pp. 237-246. Available from: [http://lib.dr.iastate.edu/intrans\\_reports/141](http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/141) [Accessed: 10 april 2017].

Zelinski, P. (2014), *Add-on additive manufacturing. The capacity to build 3D metal forms is a retrofittable option for subtractive CNC machine tools*. [Online] Available from: <http://www.mmsonline.com/articles/add-on-additivemanufacturing> [Accessed 20 september 2015].

Zhang, J. (2013), "Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting", in *Automation in Construction*, Vol. 29, pp. 50-67.

\* CESARE SPOSITO è Professore Associato presso il Dipartimento di Architettura, Scuola Politecnica, dell'Università degli Studi di Palermo, docente del Laboratorio di Costruzione dell'Architettura. I suoi principali campi di ricerca sono: sistemi di protezione per i siti archeologici, i materiali innovativi per l'architettura, nanotecnologia in architettura, il risparmio energetico degli edifici. Cell. +39 328/00.89.765. Mail: [cesare.sposito@unipa.it](mailto:cesare.sposito@unipa.it).

\*\* FRANCESCA SCALISI, Dottore di Ricerca in Recupero e Fruizione dei Contesti Antichi, è stata titolare di Assegno di Ricerca presso il Dipartimento di progetto e Costruzione Edilizia dell'Università degli Studi di Palermo, con una tesi dal titolo "Sperimentazioni di materiali nanostrutturati nei siti archeologici di Agrigento, Morgantina e nella Villa Romana del Casale". Mail: [francesca.scalisi@unipa.it](mailto:francesca.scalisi@unipa.it).

Finito di stampare nel Giugno 2017  
presso FOTOGRAFI s.r.l.  
viale delle Alpi n. 59, Palermo.