



INDUSTRIALIZZAZIONE EDILIZIA E PREFABBRICAZIONE TRA MATERIALITÀ E IMMATERIALITÀ

BUILDING INDUSTRIALIZATION AND PREFABRICATION BETWEEN MATERIALITY AND IMMATERIALITY

Sergio Russo Ermolli^a, Giuliano Galluccio^b

ABSTRACT

Il presente contributo intende investigare le possibilità offerte dai paradigmi di progettazione e produzione dell'Industria 4.0 nell'ambito del settore Architecture, Engineering & Construction, attraverso il coordinamento tra sistemi per la gestione integrata del processo progettuale (Building Information Modeling) e strumenti per la prototipazione rapida (Computer Aided Manufacturing). Si propone un'interpretazione del significato che una trasformazione industriale del settore AEC ha per il progetto di Architettura, simulando una metodologia in ambiente BIM per la progettazione di edifici ad uso residenziale in Cold-Formed Steel con involucri a secco, sfruttando le potenzialità della fabbricazione digitale e degli strumenti avanzati per il design computazionale.

This paper aims to investigate the possibilities offered by the design and production paradigms of Industry 4.0 in the Architecture, Engineering & Construction industry, through the coordination between systems for the integrated management of the design process (Building Information Modeling) and rapid prototyping tools (Computer Aided Manufacturing). It hereby proposed an interpretation of the meaning that an industrial transformation of the AEC industry takes over for the Architectural design, simulating a methodology in a BIM environment for the design of residential buildings in Cold-Formed Steel with drywall envelopes, exploiting the potential of digital manufacturing and computational design advanced tools.

KEYWORDS

BIM, fabbricazione digitale, file to factory, lean production, off-site manufacturing

BIM, digital fabrication, file to factory, lean production, off-site manufacturing

L'idea di ottimizzare l'efficienza dei processi costruttivi attraverso la prefabbricazione degli elementi non è recente. Fin dagli inizi degli anni Venti del Novecento il dibattito sorto intorno a standard tipologici e tecnici, prototipi di produzione, caratteristiche degli elementi ripetibili e intercambiabili, dimostra la volontà di misurarsi con i problemi dell'industrializzazione edilizia, di cui si iniziarono a comprendere potenzialità e limiti (Campioli, 1992). Già a partire dagli anni Settanta comincia a delinearsi una via inedita per l'industrializzazione edilizia, finalizzata, soprattutto, a un maggior controllo delle prestazioni formali e tecnologiche di sistemi e componenti (Bacigalupi, 1978; Nardi, 1981). La produzione off-site si trova infatti per la prima volta nella possibilità di utilizzare procedure versatili e adattabili basate su sistemi integrati di lavorazione, frutto di una combinazione efficiente di flessibilità e automazione. Anche se contraddistinta da costi elevati, la comparsa di frammenti di Intelligenza Artificiale all'interno del processo produttivo apre alla prefabbricazione nuove opportunità, capaci di ridurre molte delle criticità che la avevano caratterizzata nei decenni precedenti. Dalla metà degli anni Ottanta, l'emergere del Digitale, del Parametrico e dell'Informativo trasforma in profondità il modo di progettare e produrre architettura. I cambiamenti epistemologici che affrontano i domini del sapere progettuale, derivanti dalle potenzialità computazionali degli strumenti digitali in tutte le fasi del processo, dischiudono indubabilmente grandi opportunità di sviluppo soprattutto per il settore della produzione industriale. Nuovi processi, soluzioni, strumenti e tecniche trasformano la stessa natura della produzione in fabbrica, a cui si richiede di riformulare i concetti fondamentali del manufacturing allo scopo di verificarne la appropriatezza rispetto al 'rivoluzionario' campo di ricerca emergente (Landolfo, 2012; Barucco, 2015).

Le tecnologie digitali applicate all'industria permettono di organizzare non solo i progetti in sistemi parametrici basati su logiche di relazione tra parti, offrendo la possibilità di alterare la configurazione complessiva del sistema agendo sulle variabili poste alla base del processo progettuale, ma soprattutto di introdurre nelle modalità produttive di sistemi e componenti radicali innovazioni di processo e di prodotto. In tale ambito è chiaramente individuabile l'emergere di strumenti di digital fabrication per la realizzazione di prodotti non

standardizzati a elevata customizzazione, svincolati oramai dai limiti produttivi degli scorsi decenni (Anderson, 2013). La diretta corrispondenza che si crea tra modellazione virtuale e produzione reale, si avvale infatti di tecnologie a controllo numerico (CNC – Computer Numerical Control) capaci di 'aprire' a illimitate modificazioni formali e prestazionali, guidando la trasposizione da virtuale a reale attraverso un percorso protetto che tende a limitare i rischi di perdita di informazioni secondo un flusso di lavoro file to factory (dal file alla fabbrica), cioè traducendo con macchine di derivazione industriale dei modelli digitali direttamente in produzione.

Alla luce di ciò, in riferimento a un contesto economico globale caratterizzato dalla persistente eredità di una profonda crisi finanziaria che ha impattato soprattutto il settore Architecture, Engineering & Construction, affiora la necessità di allineare il comparto delle costruzioni, tradizionalmente riluttante nei confronti delle innovazioni, agli altri settori produttivi, attraverso una trasformazione in senso realmente industriale. L'elevato grado di complessità delle opere di architettura e ingegneria, oltre alla quantità e disomogeneità degli attori che partecipano alla filiera, richiederebbe infatti una organizzazione del lavoro che faciliti innanzitutto il controllo della qualità del prodotto nel rispetto dei requisiti prestazionali forniti dalla committenza e dalle normative. Le trasformazioni in atto nel settore AEC derivanti dalla digitalizzazione di processi, prodotti e strumenti stanno determinando infine profondi ripensamenti su ruoli e competenze dei differenti protagonisti del processo edilizio, ma soprattutto una rivisitazione del concetto stesso dei luoghi all'interno dei quali vengono 'prodotte' le architetture: lo studio di progettazione, l'industria, il cantiere, stanno infatti assumendo definitivamente paradigmi industriali di natura digitale che li rendono radicalmente differenti rispetto solo al decennio trascorso (Russo Ermolli, 2018).

Lo stato della filiera edilizia – Il comparto dell'industria AEC si presenta come quello caratterizzato da uno dei più bassi indici di digitalizzazione tra tutti i settori produttivi, secondo la comparazione di tre parametri, ossia: livello generale di digitalizzazione dell'impresa (assets); transazioni, interazioni, processi relativi al business o relativi alle campagne e le strategie di marketing (usage); im-

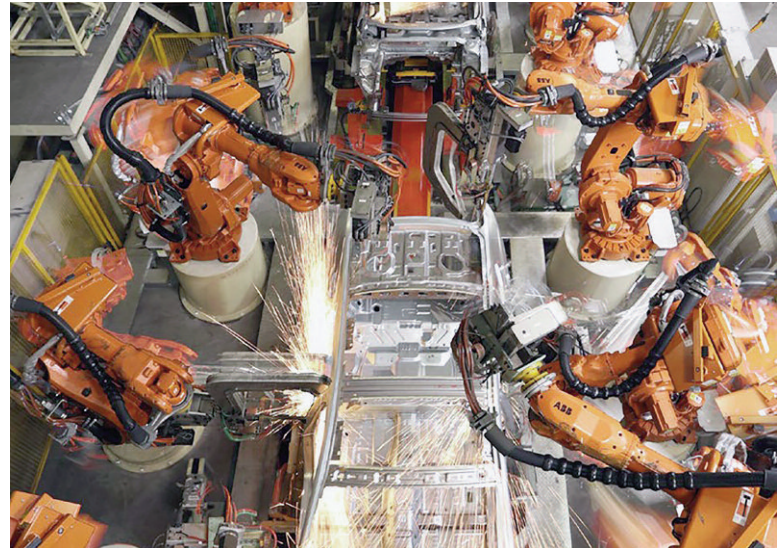


Fig. 1, 2 - Typical criticalities of inefficient productive sectors; Automated assembly plant of Chrysler car parts.

patto delle nuove tecnologie sulla digitalizzazione del lavoro (labor; McKinsey, 2016). Tale disavanzo incide in relazione alla maggiore probabilità di presenza di difetti nei prodotti, causati da errori dovuti a correzioni, conflitti e informazioni errate o incomplete; ostacola un'efficiente pianificazione, altrimenti guidata da analisi della domanda secondo metodi non aggiornati, generando un problema di sotto/sovraproduzione; contribuisce alla perpetuazione di processi obsoleti che generano attese, le quali spesso dipendono da una insufficiente programmazione delle fasi del processo produttivo (Fig. 1).

Tali problematiche sono imputabili al mancato aggiornamento degli operatori del settore, la cui sopravvivenza è connaturata all'avvio di processi di rinnovamento, attraverso l'introduzione di innovazioni di prodotto, processo, organizzative o di marketing (ANCE, 2016). Ciò non può dipendere dall'impegno del singolo soggetto, ma fa riferimento necessariamente al ridisegno dell'intero sistema e delle relazioni che intercorrono tra tutte le sue parti, partendo proprio dall'osservazione della generalizzata ed elevata frammentazione del sistema produttivo italiano. Al confronto di altri comparti produttivi, quello delle costruzioni si distingue per la peculiarità del luogo finalizzato alla realizzazione dei suoi prodotti, ovvero il cantiere, che non consente l'attuazione di modelli di produzione basati su flussi 'snelli' (Lean Manufacturing), tipici invece dell'industria automobilistica o aerospaziale, nelle quali la produzione e l'assemblaggio dei prodotti finiti avviene tutta all'interno dell'officina/stabilimento, permettendo un maggiore grado di controllo qualitativo, automazione, riduzione dell'errore e di produzione di scarti di lavorazione (Kieran, 2004; Fig. 2). In aggiunta, la filiera edile è ancorata a processi a cascata, di fasi linearmente sequenziali che però non sono più in grado di soddisfare la complessità delle attuali esigenze del mercato. Questa condizione di inefficienza aggrava i tempi di realizzazione, i costi di produzione e gestione e le prestazioni dei prodotti in termini di impatto sull'ambiente e di consumi energetici¹, particolarmente elevati proprio nel settore delle costruzioni.²

Lo sforzo normativo dell'ultimo decennio³ sull'impiego di strumenti di modellazione integrata

avanzata nelle attività di progettazione per le opere pubbliche ha perseguito il fine di incoraggiare l'utilizzo del Building Information Modeling per i progetti edili e infrastrutturali finanziati con fondi pubblici nell'Unione Europea, già a partire dal 2016. Con il Nuovo Codice degli Appalti⁴ anche nel nostro Paese vengono recepite, su indicazione delle direttive europee, le nuove linee guida e i nuovi indirizzi strategici per il conseguimento degli obiettivi di ottimizzazione e produttività nel settore delle costruzioni. Ciò evidenzia ancora maggiormente quanto il BIM, a prescindere dalla sua definizione, rappresenti una delle chiavi per l'evoluzione dell'intera filiera nello scenario più ampio della digitalizzazione, del data-driven design, della progettazione performance-oriented (Ciribini, 2016).

Processi avanzati per la progettazione integrata – L'avvento della Quarta Rivoluzione Industriale è descritto come connesso all'adozione contestuale di diverse tecnologie abilitanti, in grado di incidere in maniera radicale nel modo di concepire la produzione industriale e il consumo di risorse (Marsh, 2013). A caratterizzare in maniera peculiare la nuova industria è la fusione di realtà virtuale e produzione industriale in un unico sistema, ovvero cyber-fisico, il quale presuppone la creazione di un network di comunicazione autonoma tra macchine intelligenti e sistemi di stoccaggio, in grado di replicare il mondo fisico e assumere decisioni decentralizzate, anche attraverso la capacità predittiva di queste macchine, ovvero la possibilità di eseguire simulazioni delle decisioni che, grazie ai feedback forniti nel sistema virtuale, consentono di modificare le strategie operative (National Building Standard, 2018; Fig. 3). In edilizia, l'influenza di tali cambiamenti interesserà la concezione stessa del cantiere (Gramazio, 2014), come luogo di produzione e assemblaggio di elementi non standard, sia prefabbricati in officina che realizzati in opera da macchinari avanzati a controllo numerico (CNC), nella direzione di una ricucitura tra la qualità artigianale e la rapidità di esecuzione, ripensando al ruolo della standardizzazione (Iwamoto, 2009; Fig. 4).

Dal punto di vista del progetto, tali strumenti di fabbricazione e simulazione digitale consentono la

realizzazione, a costi contenuti, di morfologie complesse, ad altissime performance sia ambientali che strutturali, derivate da processi di form-finding, ovvero di ottimizzazione morfologica e topologica (Frazer, 1995). Tali processi offrono inoltre la possibilità, già in fase di progettazione, di stabilire un principio di uso razionale delle risorse e controllare le prestazioni secondo i parametri di progetto, anche sulla base di specifiche esigenze del mercato attuale, caratterizzato da fenomeni di customization, servitization e in generale diffusa frammentazione della domanda (Russo Ermolli, 2018; Fig. 5). Secondo Reiser e Umemoto (2006), le nuove tecnologie di produzione non-standard aprono le porte al superamento dei paradigmi fordisti, mutando profondamente le logiche industriali, nell'introduzione del concetto di unicità: ogni nodo – ogni asta – è unico, o meglio è al tempo stesso simile e diverso da ogni nodo – asta – che vi si trovi accanto. Ma l'assemblaggio di tali componenti richiede una concezione radicalmente diversa della produzione stessa, oltre che della consegna e della catalogazione, differente dal modello modernista della produzione di massa.

Per Negroponte (2010), il rapporto uomo-macchina non si limita alla creazione di un sistema correttivo dell'errore umano, quanto a un mutuo supporto nell'elaborazione di modelli comportamentali, basati sull'analisi dell'esperienza, che ricadano in strutture-dati estrapolabili, modificabili, interrogabili, simulabili, ovvero sia che costituiscano una base affidabile per assecondare decisioni logiche.

In questo scenario, il BIM si propone come il processo di gestione e generazione dei dati: le informazioni sono intrinsecamente legate agli oggetti e ogni oggetto porta con sé, al suo interno, una serie di informazioni strutturate (Garber, 2014). In questo senso, ancora Negroponte segnala la differenza che intercorre tra l'adozione di processi computerizzati (computerised) ovvero digitalizzati e pertanto velocizzati, e processi assistiti dal computer (computer-aided) che, piuttosto, sfruttano l'intelligenza della macchina per individuare nuove soluzioni sulla base dei dati raccolti e della capacità di farli interagire. Il BIM consente, come tecnologia di terzo ordine, un elevato livello di integrazione tra le diverse professionalità e sistemi ar-

tificiali, poiché si basa su un modello condiviso, in maniera collaborativa, tra tutte le figure coinvolte (Fig. 6). L'adozione del BIM, in rapporto a processi file to factory, si lega con le possibilità produttive garantite dagli attuali sistemi CAD/CAM, ovvero grazie alla diffusione di macchine a controllo numerico, come stampanti 3D o laser cutter che stanno radicalmente modificando il concetto stesso di standardizzazione, consentendo di fondare una sorta di nuova fabbrica artigianale in bilico tra tradizione e Industria 4.0 (Fig. 7).

Sistemi innovativi di prefabbricazione – In virtù della logica prestazionale che il processo BIM impone nella progettazione, non è possibile prescindere da una ricerca di tipo scientifico, indirizzata ai fattori che riguardano l'ottimizzazione dei processi produttivi che stanno alla base del settore delle costruzioni (Davies, 2005). La svolta digitale nel processo edilizio passa pertanto non solo attraverso l'adozione di un diverso paradigma progettuale, ma anche tramite nuovi paradigmi industriali, che distribuiscono sul mercato sistemi costruttivi e prodotti a elevata eco-efficienza e, in generale, con elevati standard prestazionali. Disporre di sistemi di progettazione avanzati non assicura che ciò che si sta progettando abbia effettivamente le qualità desiderate: occorre innanzitutto orientare diversamente le strategie di progettazione, su sistemi costruttivi industrializzati, in modo da offrire soluzioni che assicurino un elevato grado di personalizzazione. Allo stesso modo, adottare strategie digitali implica inesorabilmente anche un profondo cambiamento all'interno delle dinamiche degli studi di progettazione e del loro rapporto con le aziende e le imprese (Smith, 2017).

Nel settore dell'edilizia prefabbricata, in particolare, le processualità assumono i lineamenti della produzione industrializzata, dove le principali attività vengono svolte fuori dal cantiere, ovvero in fabbrica. Nell'ottica della filosofia Lean, il concetto di prefabbricazione (Off-Site Manufacturing – OSM) ha assunto un significato differente da quello che, nella memoria collettiva, ad esso è stato sempre attribuito, soprattutto nel nostro Paese (Albus, 2017). Nell'obiettivo di superare le criticità relative al carattere di serialità, ripetitività e impersonalità della produzione edilizia standardizzata tipica della prefabbricazione dei decenni passati, l'applicazione di procedure DFMA – Design For Manufacturing And Assembly (progettazione per la produzione e l'assemblaggio) è finalizzata a re-

stituire un maggiore grado di personalizzazione, riducendo al contempo la complessità delle operazioni sia nella fase di progettazione che in quella di produzione e successivo assemblaggio, consentendo la riduzione di tempi e costi di fabbricazione. Tale metodologia si basa, da un lato (DFM – Design For Manufacturing) sull'implementazione di accorgimenti che consentono di includere informazioni sul processo di fabbricazione già nello sviluppo progettuale del prodotto, dall'altro (DFA – Design For Assembly) mira alla riduzione del numero delle parti, all'ottimizzazione delle loro proprietà fisico-geometriche che incidono sui tempi di assemblaggio, alla razionalizzazione dei tempi di giunzione, ecc. (Landolfo, 2012).

Nell'ambito dell'attività di ricerca svolta, grazie al contributo di numerose aziende produttrici, tra le quali Lamieredil e Irondom srl, entrambe eccellenze presenti nel Sud Italia, è stato possibile analizzare da vicino il processo produttivo di un particolare tipo di sistema costruttivo in acciaio, ovvero costituito da profili sottili formati a freddo (CFS) e caratterizzato, in generale, da elevata versatilità nei confronti della domanda e delle tipologie di applicazioni possibili. In ambito applicativo è possibile avvalersi di differenti soluzioni costruttive che si caratterizzano da gradi di prefabbricazione diversi, oltre che per specifiche metodologie di progettazione, verifica e assemblaggio. La metodologia di lavoro adottata ha inteso verificare la relazione che sussiste tra le soluzioni per la progettazione e gestione delle opere basate sulla digitalizzazione con le più avanzate tecnologie per la manifattura artigianale e industriale. L'applicazione del BIM a sistemi prefabbricati in CFS è coadiuvata dalle possibilità della fabbricazione digitale con macchine CNC, sia per la loro leggerezza, che consente di trasportare in cantiere gli elementi da formare con apparecchiature in situ, sia per l'alto grado di prefabbricazione che garantiscono, offrendo la possibilità di effettuare le operazioni di verifica e montaggio in officina, lasciando al cantiere il solo compito di assemblare anche moduli completi di significativa dimensione.

Nello specifico dei sistemi in CFS, l'interoperabilità dei sistemi BIM facilita la definizione e catalogazione degli elementi costruttivi, così come l'integrazione tra design e progettazione impiantistica per la modellazione degli elementi (clash detection – verifica delle interferenze). Come risultato, i profili, tagliati e forati dalle CNC, sono pronti per essere assemblati in cantiere con un ridotto nu-

mero di operazioni da eseguire in opera, riducendo tempi e costi (Fig. 8). Se nei processi tradizionali, la standardizzazione riguardava la geometria e le caratteristiche degli elementi fisici, nel sistema proposto avviene l'opposto, grazie all'introduzione di formati standard (tipo Industry Foundation Classes – IFC⁵), processati da precise tipologie di macchine additive o sottrattive, che realizzano tipi pressoché illimitati di oggetti personalizzabili.

Caso studio – L'introduzione di una nuova processualità, basata sull'utilizzo di strumenti digitali per la modellazione e gestione informativa dei dati e degli elementi di progetto, determina al tempo stesso la necessità di un ripensamento, o meglio di un aggiornamento, della prassi progettuale, in modo da meglio approfittare della disponibilità delle nuove tecnologie per il controllo tecnico-prestazionale del progetto (Dunn, 2012; Fig. 9). Oltre a definire, quindi, un vero e proprio workflow BIM-oriented, parte del lavoro qui presentato è stata dedicata alla sperimentazione pratica attraverso la modellazione di un edificio residenziale costituito da un modulo costruttivo volumetrico in CFS, di dimensioni 3x10x3,5 metri, realizzabile completamente off-site, che si configura come modello aperto, ovvero la cui caratteristica peculiare sta nell'essere personalizzabile ma al tempo stesso prefabbricabile, oltre che utilizzabile, nei suoi componenti, per interventi edilizi di scale differenti. Ciò che quindi si è inteso dimostrare è che l'implementazione delle tecnologie digitali può consentire di superare la dicotomia tra artigianale e industriale, permettendo, a parità di costi, di realizzare prodotti di manifattura avanzata, altamente performanti, attraverso processi snelli.

Il modulo si propone pertanto come 'genotipo', ovvero cellula elementare a partire dalla quale ne sono state esplorate le possibilità aggregative, in relazione a numero di utenti, disposizione in pianta, tipologia di chiusura verticale e orizzontale, nonché materiali di rivestimento (Fig. 10). Il principale beneficio che comporta tale processo, innanzitutto progettuale e poi produttivo, è che le aziende possono disporre di strumenti utili per indirizzare le scelte dei clienti rispetto alla propria linea di produzione. Le fasi progettuali individuate per la sperimentazione sono le seguenti: 1) definizione degli obiettivi e delle strategie progettuali; 2) elaborazione del processo progettuale e delle caratteristiche del sistema costruttivo; 3) analisi e ridisegno dei processi aziendali e produttivi; 4) modella-

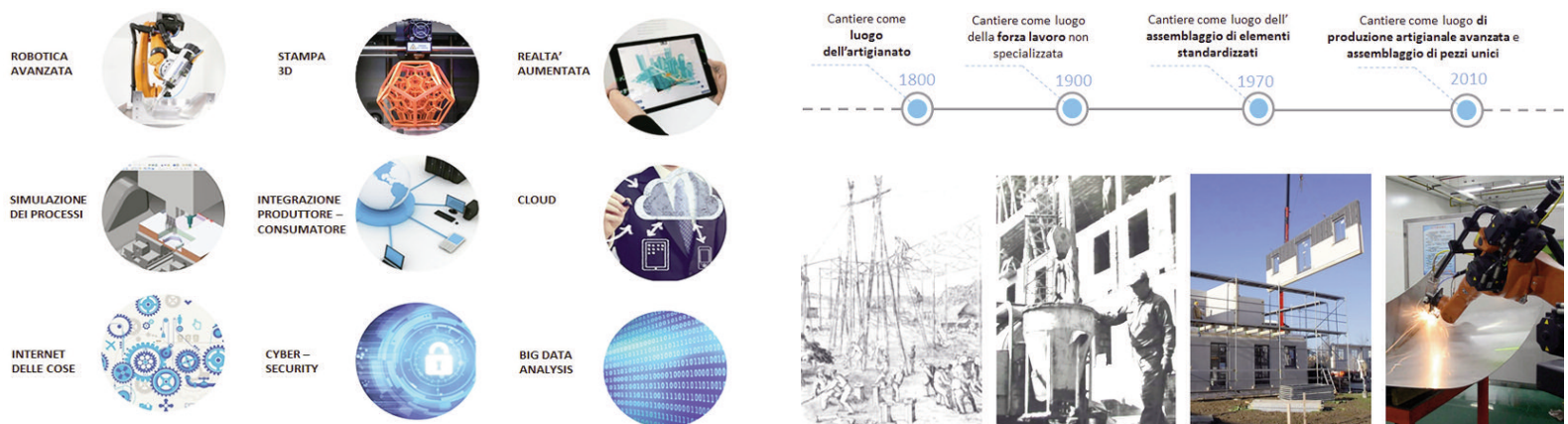
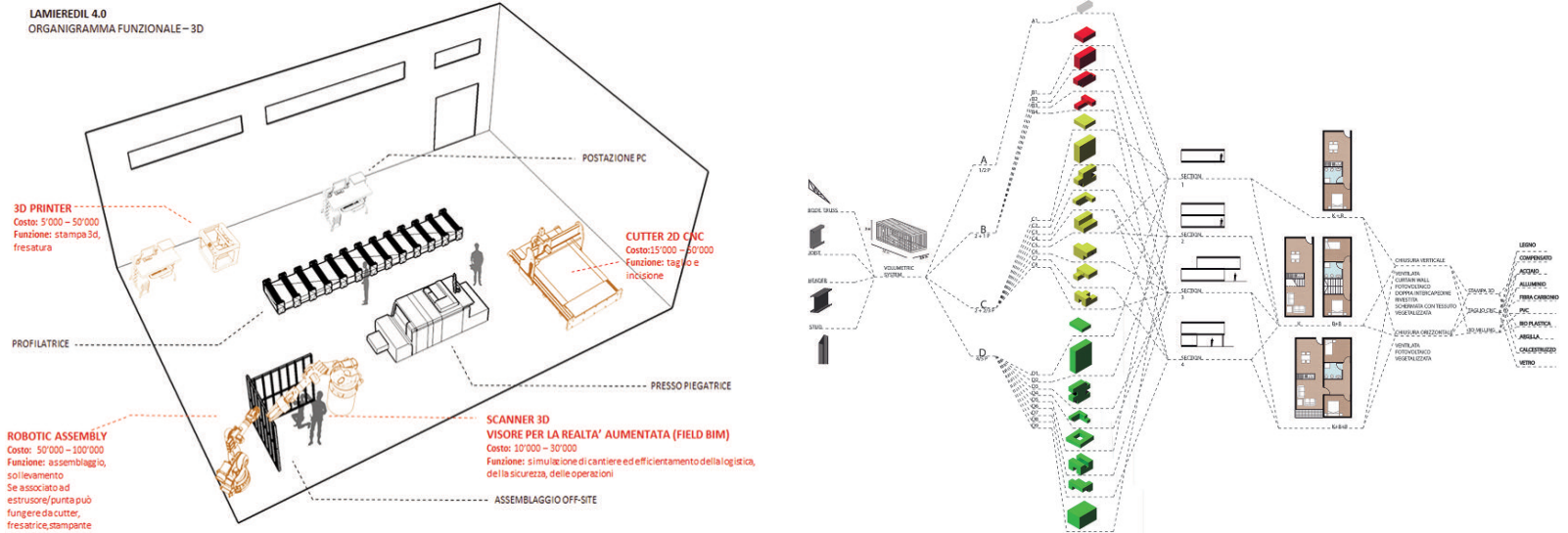


Fig. 3, 4 - Enabling technologies of Industry 4.0; Evolution of the construction site during the four industrial revolutions.



Figg. 9, 10 - Lamieredil plant: reconversion hypothesis in an Industry 4.0 key; Diagram of the customization of standard accommodation in CFS.

zione degli elementi costruttivi strutturali e dei pacchetti di chiusura; 5) simulazione delle prestazioni e analisi dei feedback; 6) redazione dei disegni costruttivi (kit di assemblaggio) e preparazione dei file per la linea di produzione CAD/CAM.

Sulla base di costanti confronti con le aziende partner, gli obiettivi hanno inteso incidere su differenti aspetti. Innanzitutto, si è tentato di efficientare la produzione, in quanto la capacità di simulazione dei processi implicita nel BIM, specialmente nell'ambito del "quantity take off" (BIM 5D), ha consentito una più efficace gestione degli acquisti di materiale: l'azienda acquista il materiale strettamente necessario a soddisfare la commessa, evitando sprechi di denaro e soprattutto limitando l'accumulo di prodotto inutilizzato in deposito (just in time). È stata studiata la possibilità di formatura degli elementi, grazie all'automazione CAD/CAM delle operazioni: l'integrazione delle operazioni con strumenti CNC ha contribuito ad aumentare la precisione delle lavorazioni, riduce gli scarti di lavorazione e velocizza la lavorazione. Sono state sviluppate strategie in merito alla tipologia e la modalità di offerta dei prodotti sul mercato, personalizzabili a seconda delle contingenze e fruibili sotto forma di BIM Library interoperabile, inseribili dagli stessi progettisti direttamente nei modelli che creano; inoltre, ne è stato migliorato l'assemblaggio, in relazione alla possibilità di estrapolare i disegni dal modello BIM (Fig. 11).

In fase di produzione, la capacità di simulazione dei processi implicita nel BIM ha consentito una più efficace gestione dell'approvvigionamento del materiale (produzione just in time), incidendo sugli oneri derivanti dall'accumulo di prodotto inutilizzato in magazzino; in fase di formatura, l'automazione CAD/CAM ha aumentato la precisione, riducendo gli scarti e velocizzando le operazioni. Sono emerse al contempo criticità rispetto all'adozione di soluzioni BIM, in particolare per aziende e studi professionali di dimensione medio-piccola. Le principali difficoltà hanno riguardato il costo di investimento iniziale per software e hardware, la necessità aggiornamento delle risorse umane e di adozione degli standard da parte di tutti gli operatori coinvolti nella filiera.

Una volta definiti gli obiettivi e gli strumenti

all'interno di un ecosistema di operatori coinvolti nel processo di progettazione, è stata svolta la modellazione, tramite il software di BIM Authoring Autodesk Revit, di una serie di prototipi di edifici residenziali costituiti da struttura in acciaio sottile formato a freddo. Nel caso degli elementi maggiormente complessi, come le travi reticolari, la modellazione ha riguardato prima i loro componenti, ovvero i profili a U o a Omega, che poi sono stati introdotti nell'ambiente di modellazione delle travi stesse, costituendo perciò quella che si definisce una famiglia "nidificata". Lo stesso principio che vale per gli elementi strutturali ha senso anche per quelli di chiusura: grazie alla modellazione parametrica è stato infatti possibile controllare in maniera istantanea le conseguenze che determinate scelte tecniche e progettuali hanno sulle prestazioni termo-igrometriche degli involucri, consentendo quindi di poter monitorare costantemente le performance dell'edificio. Tale processo ha inoltre facilitato l'operazione di optioneering, ovvero di valutazione tra più ipotesi progettuali, sulla base della miglior scelta possibile tra un ventaglio di variabili (Figg. 12-15).

Conclusioni – I temi che hanno stimolato il presente lavoro appaiono particolarmente attuali, sebbene discendano da riflessioni che hanno attraversato tutto il secolo scorso. Le trasformazioni verificatesi tra gli anni intercorsi tra la prima grande stagione di industrializzazione edilizia, avvenuta durante il periodo denominato dei Gloriosi Trenta (1945-1973) e l'epoca attuale, impediscono di riproporre il tema della prefabbricazione negli stessi termini (Poretti, 2013). Il dibattito contemporaneo non può infatti esimersi dal concentrarsi sul rapporto legato alla materialità e all'immaterialità della relazione tra componenti e utenti, che rappresenta una novità di estremo interesse e dalle implicazioni ancora inesplorate. D'altro canto, è diverso anche l'obiettivo, che se prima era rivolto alla ripetibilità delle soluzioni, oggi pare invece andare nella direzione della versatilità e della personalizzazione (customization), secondo una logica che lascia la standardizzazione solo ai formati file (immateriali), consentendo invece grande varietà alla produzione e alla prototipazione

(materialità). In altri termini, lo scenario più plausibile per l'industrializzazione pare essere non più nella prefabbricazione pesante, quanto nei sistemi di Lean Management and Manufacturing, guidati dai principi di una disciplina, il cosiddetto Knowledge Management, attraverso i nuovi strumenti per la gestione delle informazioni e della computazionalità dei processi (Ciribini, 2016).

ENGLISH

The idea of optimizing the efficiency of construction processes through the prefabrication of the elements is not recent. Since the early twenties of the twentieth century, the debate around typological and technical standards, production prototypes, characteristics of repeatable and interchangeable elements, demonstrates the desire to compete with the problems of building industrialization, whose potentials and limits began to be understood (Campioli, 1992). At the beginning of the seventies, a new way of building industrialization began to emerge, aimed, above all, at a greater control of the formal and technological performance of systems and components (Bacigalupi, 1978; Nardi, 1981). Off-site production is in fact for the first time in the possibility of using versatile and adaptable procedures based on integrated processing systems, as the result of an efficient combination of flexibility and automation. Although characterized by high costs, the appearance of fragments of Artificial Intelligence within the production process opens up new opportunities for prefabrication, capable of reducing many of the criticalities that had characterized it in previous decades. From the mid-eighties, the emergence of the Digital, the Parametric and the Information transforms in depth the way of designing and producing architecture. The epistemological changes that face the domains of design knowledge, deriving from the computational potential of digital tools at all stages of the process, undoubtedly open up great opportunities for development especially for the industrial production sector. New processes, solutions, tools and techniques transform the very nature of factory production, which requires reformulating the fundamental concepts of manufacturing in order to verify its appropriateness, relating to

the ‘revolutionary’ emerging field of research (Landolfo, 2012; Barucco, 2015).

The digital technologies applied to the industry allow not only to organize projects in parametric systems based on relations between parts, offering the possibility of altering the overall configuration of the system by acting on the variables at the base of the design process, but above all to introduce radical components of process and product innovations into systems and components production methods. In this context it is clearly identifiable the emergence of digital fabrication tools for the realization of non-standardized products with high customization, now free from the production limits of the past decades (Anderson, 2013). The direct correspondence that is created between virtual modeling and real production, in fact, makes the use of numerical control technologies (CNC – Computer Numerical Control) able to ‘open’ to unlimited formal and performance modifications, guiding the transposition from virtual to real through a protected path that tends to limit the risk of information loss according to a file to factory workflow, translating, through machines of digital derivation, digital models directly into production.

Considering this, with reference to a global economic context characterized by the persistent legacy of a profound financial crisis that impacted above all on the Architecture, Engineering & Construction sector, emerges the need to align the construction sector, traditionally reluctant towards innovations, to the other productive sectors, through a transformation in a truly industrial sense. The high degree of complexity of architectural and engineering works, in addition to the quantity and non-homogeneity of the actors who participate in the supply chain, would in fact require a work organization that first of all facilitates the control of product quality, in compliance with the performance requirements provided by the client and by the regulations. The transformations taking place in the AEC sector resulting from the digitalization of processes, products and tools are ultimately determining profound rethinking of the roles and skills of the different protagonists of the building process, but, above all, a review of the very concept of the places where the architectures are ‘produced’: the design study, the industry, the construction site, are in fact definitively taking on industrial digital paradigms that make them radically different compared just to the past decade (Russo Ermolli, 2018).

The state of the construction industry – The AEC industry is characterized by one of the lowest digitalization indexes among all the productive sectors, according to the comparison of three parameters, namely: general level of digitalisation of the company (assets); transactions, interactions, business-related processes or campaign-related processes and marketing strategies (usage); impact of new technologies on the digitalisation of workflows (labor; McKinsey, 2016). This deficit affects the greater probability of product defects being caused by errors due to corrections, conflicts and incorrect or incomplete information; hinders efficient planning, otherwise guided by demand analysis according to outdated methods, generating a under/overproduction problem; contributes to the perpetuation of obsolete processes that generate pauses, which often depend on an insufficient

programming of the phases of the production process (Fig. 1).

These problems are imputable to the failure of the sector’s operators update, whose survival is inherent in the start of renewal processes, through the introduction of product, process, organizational or marketing innovations (ANCE, 2016). This cannot depend on the commitment of the individual subject, but necessarily refers to the redesign of the entire system and the relationships that exist between all its parts, starting from the observation of the generalized and high fragmentation of the Italian production system. In comparison with other production sectors, the construction sector is distinguished by the peculiarity of the place aimed at the realization of its products, that is the construction site, which does not allow the implementation of production models based on ‘lean’ flows (Lean Manufacturing), typical instead of the automotive or aerospace industry, where the production and assembly of finished products takes place all within the workshop/plant, allowing a greater degree of quality control, automation, error and processing waste production reduction (Kieran, 2004; Fig. 2). In addition, the construction supply chain is anchored to cascade processes, based on linearly sequential phases which, however, are no longer able to satisfy the complexity of current market requirements. This condition of inefficiency aggravates production times, management costs and performance in terms of environmental impact and energy consumption¹, which are particularly high precisely in the construction sector.²

The regulatory effort of the last decade³ on the use of advanced integrated modeling tools in design activities for public works has pursued the

aim of encouraging the use of Building Information Modeling for construction and infrastructure projects financed with public funds in the European Union, already starting from 2016. With the new procurement code⁴ also in our country are transposed the new guidelines and the new strategic indications for the achievement of the optimization and productivity objectives in the construction sector, according to the European directives. This further highlights how BIM, regardless of its definition, represents one of the keys to the evolution of the entire supply chain in the broader scenario of digitalization, data-driven design, performance-oriented design (Ciribini, 2016).

Advanced processes for integrated design – The advent of the Fourth Industrial Revolution is described as connected to the simultaneous adoption of different enabling technologies, capable of radically affecting the way of conceiving industrial production and resource consumption (Marsh, 2013). To characterize the new industry in a peculiar way is the fusion of virtual reality and industrial production in a single system, i.e. cyber-physical, which requires the creation of an autonomous communication network between intelligent machines and storage systems, able to replicate the physical world and take decentralized decisions, also through the predictive ability of these machines, or the possibility to perform simulations of decisions which, thanks to the feedback provided in the virtual system, allow for the modification of operational strategies (National Building Standard, 2018; Fig. 3). In Construction, the influence of these changes will affect the very conception of the construction site (Gramazio, 2014), as a place of production and assembly of non-standard elements, both prefabricated in the workshop and built on site by advanced numerical control machinery (CNC), in the direction of bridging the artisan quality and the speed of execution, rethinking the role of standardization (Iwamoto, 2009; Fig. 4).

From the design point of view, these digital manufacturing and simulation tools allow the realization, at low cost, of complex morphologies, with very high environmental and structural performances, derived from form-finding processes, i.e. morphological and topological optimization (Frazer, 1995). These processes also offer the possibility, already in the early design phase, to establish a principle of rational use of resources and performance control, according to design parameters, also based on specific needs of the current market, characterized by phenomena of customization, servitization and in general, widespread fragmentation of demand (Russo Ermolli, 2018; Fig. 5). According to Reiser and Umemoto (2006), new non-standard production technologies open the door to overcoming Fordist paradigms, profoundly changing industrial logics, in the introduction of the concept of uniqueness: each node – each strut – is unique, or rather it is at the same time similar and different from every node – strut – that is next to it. But the assembly of these components requires a radically different conception of production itself, as well as of delivery and cataloguing, unlike the modernist model of mass production.

For Negroponte (2010), the man-machine relationship is not limited to the creation of a corrective system of the human error, but to a mutual sup-

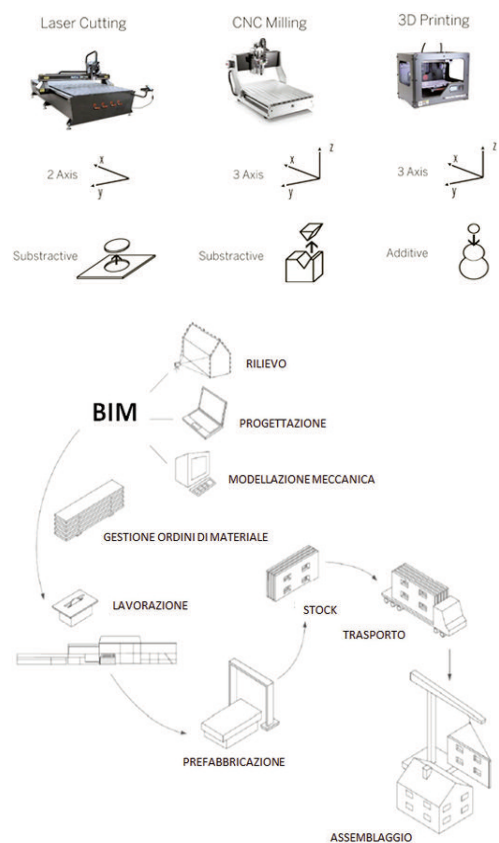


Fig. 7, 8 - Numerical control machines: main additive and subtractive technologies; Processes from BIM to production in off-site construction.

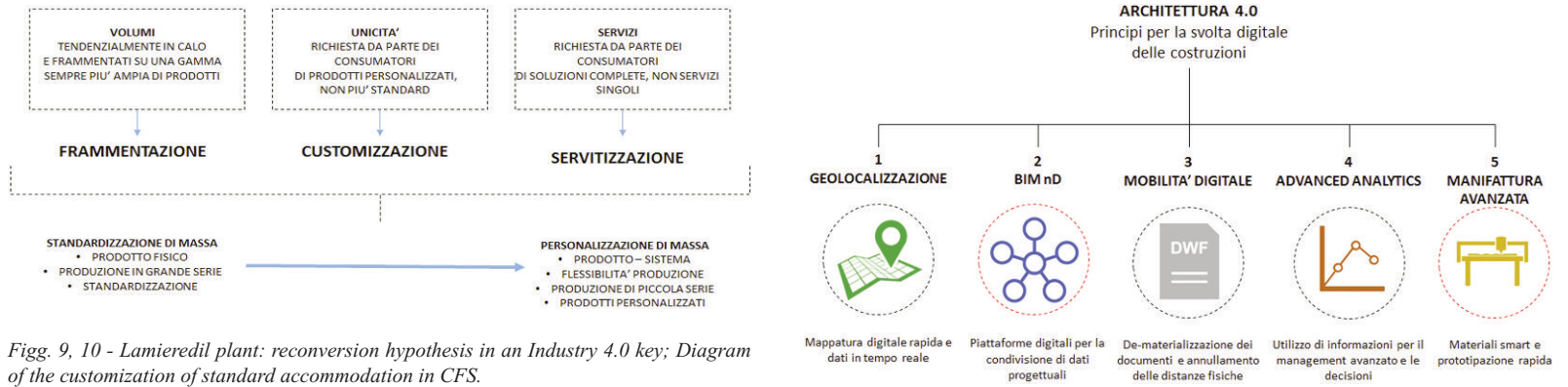


Fig. 9, 10 - Lamieredil plant: reconversion hypothesis in an Industry 4.0 key; Diagram of the customization of standard accommodation in CFS.

port in the development of behavioural models, based on the analysis of experience, which fall into data-structures that can be extrapolated, modified, interrogated, simulated, as they constitute a reliable basis for supporting logical decisions.

In this scenario, BIM is proposed as the process of data management and generation: information is intrinsically linked to objects and each object carries within it a series of structured information (Garber, 2014). In this sense, Negroponte still signals the difference between the adoption of computerized or therefore speeded up processes, and computer-aided processes that, rather, exploit the intelligence of the machine to identify new solutions based on the data collected and on the ability to make them interact. BIM allows, as a third-order technology, a high level of integration between the different professionalisms and artificial systems, since it is based on a shared model, in a collaborative way, among all the figures involved (Fig. 6). The adoption of BIM, in relation to file-to-factory processes, is linked to the production possibilities guaranteed by current CAD/CAM systems, or rather thanks to the spread of numerical control machines, such as 3D printers or laser cutters, that are radically changing the concept itself of standardization, allowing to found a sort of new artisan factory, between tradition and Industry 4.0 (Fig. 7).

Innovative prefabrication systems – By the performance logic that a BIM process imposes in design, it is not possible to leave aside a scientific research, addressed to the factors that concern the optimization of the productive processes that are at the base of the construction sector (Davies, 2005). The digital turning point in the building process therefore passes not only through the adoption of a different design paradigm, but also through new industrial paradigms, able to distribute on the market construction systems and products with high eco-efficiency and, in general, with high performance standards. Using advanced design systems does not ensure that what is being designed actually has the desired qualities: it is first of all necessary to orientate design strategies differently, on industrialized construction systems, so as to offer solutions that ensure a high degree of customization. Similarly, adopting digital strategies inexorably implies a profound change within the dynamics of design studies and their relationship with companies and businesses (Smith, 2017).

In the prefabricated building sector, the processes assume the features of industrialized pro-

duction, where the main activities are carried out outside the construction site, ie in the factory. In the perspective of the Lean philosophy, the concept of prefabrication (Off-Site Manufacturing – OSM) has taken on a different meaning from that which, in the collective memory, has always been attributed to it, especially in our country (Albus, 2017). In order to overcome the critical issues related to the character of seriality, repetitiveness and impersonality of standardized building production, typical of the prefabrication of past decades, the application of DFMA procedures – Design For Manufacturing And Assembly is aimed at returning a greater degree of customization, while reducing the complexity of operations both in the design, production and subsequent assembly phases, allowing the reduction of manufacturing times and costs. This methodology is based, on the one hand on the implementation of measures that allow information on the manufacturing process to be included already in the design development of the product (DFM – Design For Manufacturing), on the other; aims at reducing the number of parts, to the optimization of their physical-geometric properties that affect assembly times, to the rationalization of joining times, etc. (DFA – Design For Assembly; Landolfo, 2012).

As part of the research activity carried out, thanks to the contribution of numerous manufacturing companies, including Lamieredil and Irondom srl, both excellences present in Southern Italy, it was possible to closely analyze the production process of a particular type of construction system in Cold-Formed Steel (CFS) and characterized, in general, by high versatility towards the demand and the types of possible applications. In the application area, it is possible to use different construction solutions that are characterized by different degrees of prefabrication, as well as specific design, verification and assembly methods. The working methodology adopted was intended to verify the relationship existing between the design and management solutions based on digitization and the most advanced technologies for artisanal and industrial manufacturing. The application of BIM to CFS prefabricated systems is aided by the possibilities of digital fabrication with CNC machines, both for their lightness, which allows to move the elements to be formed on site with on-site equipment, and for the high degree of prefabrication, guaranteed by offering the possibility of carrying out verification and assembly operations in the workshop, leaving to the building site the sole task of assembling complete modules of significant size.

Specifically, in CFS systems, the interoperability of BIM systems facilitates the definition and cataloguing of construction elements, as well as the integration between architectural and systems design for element modeling (clash detection). As a result, the profiles, cut and drilled by the CNC, are ready to be assembled on site with a small number of operations to be performed on site, reducing time and costs (Fig. 8). If in traditional processes, the standardization concerned the geometry and the characteristics of the physical elements, in the proposed system the opposite occurs, thanks to the introduction of standard formats (such as Industry Foundation Classes – IFC⁵), processed by precise types of additive or subtractive machines, which produce almost unlimited types of customizable objects.

Case study – The introduction of a new process, based on the use of digital tools for data and project elements modeling and information management, determines at the same time the need for a rethinking, or rather an update, of the design practice, to better take advantage of the availability of new technologies for the technical-performance control of the project (Dunn, 2012; Fig. 9). In addition to defining, therefore, a real BIM-oriented workflow, part of the work presented here was dedicated to practical experimentation through the modeling of a residential building, consisting of a volumetric construction module in CFS, with dimensions 3x10x3.5 meters, to realize completely off-site, which is configured as an open model, whose peculiar characteristic lies in being customizable but at the same time prefabricated, as well as usable, in its components, for building interventions of different scales. What was therefore intended to prove is that the implementation of digital technologies might allow to overcome the dichotomy between artisanal and industrial practice, allowing, at the same costs, to create products of advanced manufacture, high performance, through lean processes.

The module is therefore proposed as a 'genotype', an elementary cell from which the aggregative possibilities have been explored, in relation to the number of users, layout, type of vertical and horizontal envelopes, as well as coating materials (Fig. 10). The main benefit of this, first and foremost design and then production, process, is that companies can adopt useful tools to guide customer choices, in line with their production line. The design phases identified for the experimentation are the following: 1) definition of the design goals and

strategies; 2) elaboration of the design process and of the characteristics of the construction system; 3) analysis and redesign of business and production processes; 4) structural construction elements and envelope packages modeling; 5) performance simulation and feedback analysis; 6) drafting of construction drawings (assembly kit) and files preparation for the CAD/CAM production line.

Based on constant comparisons with partner companies, the goals intended to affect different aspects. First of all, an attempt was made to make production more efficient, as the process simulation capability implicit in BIM, especially in the area of quantity take-off (BIM 5D), allowed a more effective management of material purchases: the company buys the strictly necessary material to satisfy the order, avoiding waste of money and above all limiting the accumulation of unused product in storage. The possibility of forming the elements has been studied, thanks to the CAD/CAM automation of tasks: the integration of operations with CNC tools has contributed to increase the precision of the machines, reducing processing waste and speeding up processing. Strategies have been developed regarding the type and method of offering products on the market, which can be customized according to contingencies and can be used in the form of interoperable BIM Libraries, which can be inserted by the designers themselves directly into the models they create; furthermore, the assembly has been improved, in relation to the possibility of extrapolating the drawings from the BIM model (Fig. 11).

In the production phase, the simulation capability of the processes implicit in BIM has allowed a more effective management of the supply of the material (just in time production), affecting the charges deriving from the accumulation of unused product in the warehouse; during forming, CAD/CAM automation has increased accuracy, reducing waste and speeding up operations. At the same time, critical issues emerged regarding the adoption of BIM solutions, for companies and professional firms of medium-small size. The main difficulties concerned the initial investment cost for software and hardware, the need to update human resources and the adoption of standards by all operators involved in the supply chain.

Once the goals and tools were defined within an ecosystem of operators involved in the design process, the modeling was carried out, through the Autodesk Revit BIM Authoring software, of a series of prototypes of residential buildings consisting of a Cold-Formed Steel structure. In case of the more complex elements, such as reticular beams, the modeling concerned first their components, i.e. the U or Omega profiles, which were then introduced into the modeling environment of the beams themselves, thus constituting what is defined as a 'nested' family. The same principle that applies to the structural elements also makes sense for the envelopes: thanks to parametric modeling it was in fact possible to instantly control the consequences that certain technical and design choices have on the thermo-hygrometric performance of walls, thus allowing to be able to constantly monitor building performance. This process also facilitated the optioneering operation, or rather the evaluation of several project hypotheses, based on the best possible choice between a range of variables (Fig. 12-15).

Conclusions – The themes that have stimulated the present work appear particularly topical, although they derive from reflections that have passed throughout the last century. The transformations that occurred between the years between the first great season of building industrialization, which took place during the period called Glorious Thirty (1945-1973) and the current era, prevent us from repeating the theme of prefabrication in the same terms (Poretti, 2013). The contemporary debate cannot in fact avoid concentrating on the relationship linked to the materiality and the immateriality of the relationship between components and users, which represents a novelty of extreme interest and with unexplored implications. On the other hand, the goal is also different, which, if before was aimed at the repeatability of solutions, today it seems instead to go in the direction of versatility and personalization (customization), according to a logic that leaves standardization only to file formats (immateriality), instead allowing great variety in production and prototyping (materiality). In other words, the most plausible scenario for industrialization seems to be no longer in heavy prefabrication, but in Lean Management and Manufacturing systems, guided by the principles of a discipline, the so-called Knowledge Management, through new processes information and computation management tools (Ciribini, 2016).

ACKNOWLEDGEMENTS

The contribution is the result of a common reflection of the Authors. However, the paragraphs 'Introduction' and 'Conclusions' are to be attributed to S. Russo Ermolli, the paragraphs 'The state of the construction industry', 'Advanced processes for integrated design', 'Innovative prefabrication systems' and 'Case study' are to be attributed to G. Galluccio.

NOTES

1) The data published by ISPRA (Higher Institute for Environmental Protection and Research) regarding CO₂

emissions into the atmosphere by production sector reveal how construction is one of the most responsible sectors, in similar terms to manufacturing and industry. [Online] Available at: www.isprambiente.gov.it/files/2017/publicazioni/rapporto/R_257_17.pdf [Accessed 10 April 2019].

2) Buildings, in particular residential buildings, entail very high annual costs for energy expenditure, being in first place for electricity consumption, more than the transport sector and industry, as denounced in 2018 by ENEA (National Agency for New Technologies, energy and sustainable economic development). [Online] Available at: www.efficienservgetica.enea.it/allegati/Some%20dati%20sui%20consumi%20energetici%20in%20Italia.%20per%20insegnanti%20e%20studenti%20di%20scuole%20secondarie%20.pdf [Accessed 10 April 2019].

3) On January 15 2014, the European Parliament approved the procurement reform (European Union Public Procurement Directive, EUPPD). [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32014L0024> [Accessed 10 April 2019].

4) Cfr. Legislative Decree n. 50, April 18 2016, and Legislative Decree n. 560 of, December 1 2017.

5) IFC is an open data format, not controlled by a single operator, according to the ISO16739 standard, promoted by Building Smart.

REFERENCES

Albus, J. and Meuser, P. (2017), *Prefabricated Housing: Construction and Design Manual*, Dom. Pub., Berlin.
 ANCE – Associazione Nazionale Costruttori Edili (2016), *Una politica industriale per il settore delle costruzioni – Le proposte dell'ANCE*. [Online] Available at: www.ance.it/multimedia/file/160621%20Documento%20AN-CE%20per%20politica%20industriale.pdf [Accessed 10 April 2019].
 Anderson, C. (2013), *Makers. The new industrial revolution*, Random House, New York.
 Bacigalupi, V. et alii (1978), *Edilizia per progetti e componenti*, Officina Edizioni, Roma.
 Barucco, M. (2015), *Progettare e costruire in acciaio sagomato a freddo*, Edicom, Monfalcone.
 Campioli, A. (1992), *I presagi di un nuovo costruire. Il linguaggio delle tecniche esecutive nell'architettura della seconda età della macchina*, Franco Angeli, Milano.
 Ciribini, A. (2016), *BIM e digitalizzazione dell'ambiente costruito*, Grafill, Palermo.
 Davies, C. (2005), *The Prefabricated Home*, Reaktion

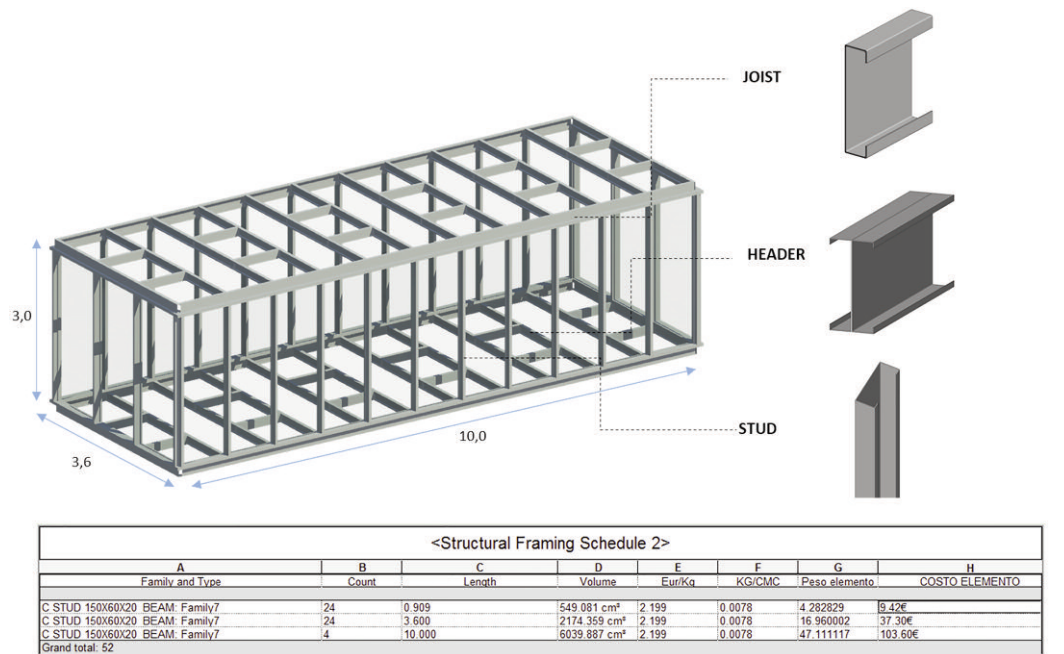


Fig. 11 - CFS volumetric pod realized in a BIM modeling environment.

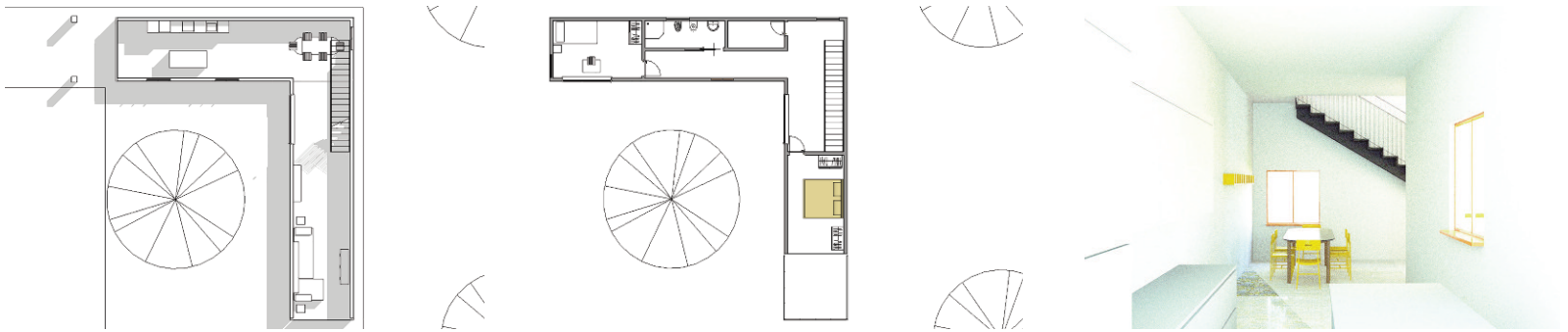


Fig. 12-15 - Case study: ground floor plan; first floor plan; view of the interior; external view

Books, London.

Dunn, N. (2012), *Digital fabrication in Architecture*, Laurence King Publishing, London.

Frazer, J. (1995), *An Evolutionary Architecture*, AA Press, London.

Garber, R. (2014), *BIM Design. Realising the creative potential of Building Information Modelling*, John Wiley & Sons, New Jersey.

Gramazio, F., Kohler, M. and Willmann, J. (2014), *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*, Park Books, Zurich.

Iwamoto, L. (2009), *Digital Fabrications. Architectural and material techniques*, Princeton Architectural Press, New York.

Kieran, S. and Timberlake, J. (2004), *Refabricating architecture. How manufacturing methodologies are poised to transform building construction*, McGraw Hill, New York.

Landolfo, R. and Russo Ermolli, S. (2012), *Acciaio e sostenibilità. Progetto, ricerca e sperimentazione per l'housing in cold-formed steel*, Clean, Napoli.

Marsh, P. (2013) *The new industrial revolution. Consumers, globalization and the end of mass production*, Yale University Press, Padstow, Cornwall.

McKinsey Global Institute (2016), *Imagining construc-*

tion's digital future. [Online] Available at: www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future [Accessed 10 April 2019].

Nardi, G. (1981), *Tecnologia dell'architettura e industrializzazione nell'edilizia*, Franco Angeli, Milano.

National Building Standard (2018), *Four phases of industrial revolution: Phase Four*. [Online] Available at: <https://www.thenbs.com/knowledge/four-phases-of-industrial-revolution-phase-four> [Accessed 10 April 2019].

Negroponce, N. (2010), "Towards a new Humanism through machines", in Menges, A. and Alquist, S. (eds), *Computational Design Thinking*, AD Reader series, John Wiley & Sons, New Jersey.

Poretti, S. (2013), "Un'industrializzazione sfasata", in Basiricò, T. and Bertorotta, S. (eds), *L'industrializzazione nei quartieri di edilizia residenziale pubblica*, Aracne, Roma.

Reiser, J. and Umemoto, N. (2006), *Atlas of novel tectonics*, Princeton Press, New York.

Russo Ermolli, S. (ed.) (2018), *The Changing Architect. Innovazione tecnologica e modellazione informativa per l'efficienza dei processi*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna.

Smith, R. E. and Quale, J. D. (2017), *Offsite Architecture:*

Constructing the future, Routledge, London/New York.

^a SERGIO RUSSO ERMOLLI, Architect, is Associate Professor of Architectural Technology at the Department of Architecture of the University of Naples 'Federico II' (Italy); he develops research on the relationship between project and digital innovation in industrial production processes within the transformation of the building heritage. Mob. +39 340/51.81.989. E-mail: russermo@unina.it

^b GIULIANO GALLUCCIO, Architect, is a PhD student in Architecture at the Department of Architecture of the University of Naples 'Federico II' (Italy); he carries out his research on the subject of design and production, in relation to the use of BIM-oriented methodologies and of digital manufacturing technologies applied to off-site construction. Mob. +39 333/50.12.048. E-mail: giuliano.galluccio@unina.it