

Ingrid Paoletti,

Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

ingrid.paoletti@polimi.it

Abstract. Questo articolo intende approfondire, all'interno del vasto tema della *cultura tecnologica, teoria e pratica del progetto architettonico*, a quale cultura industriale fa e farà riferimento il progetto architettonico in un prossimo futuro, sottolineando il potenziale che le tecniche contemporanee stanno lentamente ma pervasivamente offrendo all'industria delle costruzioni.

Parole chiave: sperimentazione architettonica, cultura industriale, tecnologie innovative, sistemi e componenti costruttivi.

La possibilità di accedere a una vastissima quantità di dati e lo sviluppo di sistemi di programmazione informatica, la rivoluzione nella meccanica di precisione e la robotica, la necessità cogente di maggiori prestazioni ed efficienza, sono tutti fattori che rendono necessario un aggiornamento sulle possibilità offerte dalla tecnologia per il progetto.

In particolare, il saggio indagherà, dopo aver delineato alcune considerazioni sullo scenario in atto, il contributo della relazione tra visione creativa e scelte tecniche: ampliando la conoscenza di strumenti, tecniche e materiali oggi disponibili, i progettisti hanno la possibilità di costruire la propria cultura industriale corrente sviluppando sistemi costruttivi personalizzabili.

Il contributo approfondirà in particolare alcune ricerche sviluppate presso il Dipartimento ABC del Politecnico di Milano.

Gli esempi si riferiscono allo sviluppo di sistemi costruttivi sperimentali, e in particolare a tre casi. Il primo riguarda la produzione di un blocco di paglia fabbricato e prodotto in una prospettiva ecologica, assemblato a secco, progettato e sviluppato insieme ad alcuni produttori industriali. Il secondo caso riguarda la fabbricazione additiva di un mattone di argilla, con lo scopo di verificare la sperimentazione di sistemi costruttivi tradizionali: il disegno del componente è stato sviluppato in modo da essere

Industrial culture and contemporary project design: examples of experimental building construction systems

Abstract. This paper intend to deepen, within the broad theme of *technological culture, theory and practice of architectural project*, at which industrial culture does and will refer the architectural project in the near future, emphasizing the potential that contemporary techniques are slowly but pervasively offering to the construction industry.

Keywords: architectural experimentation, industrial culture, innovative technologies, construction systems and components.

The ability to access to an enormous amount of data and the development in computer programming systems, the revolution in precision engineering and robotics, the binding need for greater performance and efficiency are all factors that make necessary an update upon the possibilities offered by technology for the project.

in grado di rimanere nelle dimensioni di blocchi standard e di alloggiare sistemi di illuminazione. Il terzo consiste nella progettazione di un sistema di costruzione autoportante sempre realizzato con la stampa additiva ma con materiali polimerici, per approfondire le possibilità di efficienza strutturale di un sistema a traliccio ottimizzato topologicamente.

Ogni caso prevede l'impiego di strumenti computazionali, di macchine a controllo numerico gestite direttamente dal progettista, grazie anche a una grande ricerca scientifica sui materiali e la loro caratterizzazione strutturale.

In conclusione, il saggio cercherà di trarre delle conclusioni dai casi, evidenziando le opportunità offerte al progettista dagli strumenti innovativi a disposizione, cercando di contribuire al dibattito su quale sia la cultura industriale a cui riferirsi oggi, e come introdurre innovazione tecnologica attraverso il progetto di architettura.

Introduzione

A livello globale vi è una grande consapevolezza che l'industria si trovi sull'orlo di una nuova rivoluzione, guidata da innovazioni tecnologiche come l'informatica computazionale, le grandi quantità di dati, la robotica avanzata e la produzione avanzata.

Queste tecnologie aprono nuovi orizzonti per l'industria spingendola a diventare più efficiente, sia per migliorare i processi, sia per sviluppare prodotti e servizi innovativi.

Inoltre aiutano l'industria a rispondere alla domanda crescente di prodotti personalizzati, nonché a una migliore efficienza energetica e ottimizzazione delle risorse.

Molti studiosi hanno già nominato questa fase 'Industria 4.0', identificandola come la rivoluzione che riferisce alla possibilità

Specifically, the paper will investigate, after outlining some considerations on the scenario, the contribution of the relationships between creative vision and technological choices: expanding the knowledge of tools, techniques, materials available today, designers have the opportunity to build their own current industrial culture for the project, developing customized building systems and components.

The contribution will deepen specifically some research developed at the Department ABC of Politecnico di Milano.

The examples refer to the development of experimental construction systems, and in particular to three case studies. The first concerns the production of a straw construction system completely manufactured and carried in an environmentally friendly perspective, dry assembled, designed and developed

together with some industrial manufacturers. The second case concerns the additive manufacturing of a clay brick, with the aim of verifying the experimentation of traditional building systems: the design of the component has been developed in order to be able to stay in the traditional block dimensions and additional lighting systems. The third consists of the design of a self-supporting construction system always realized with the additive manufacturing but with polymeric materials, deepening the possibilities of structural efficiency of a topologically optimized structure.

Each case study takes into account the use of computational tools, of numerically controlled manufacturing machines that are managed directly by the designer, thanks also to a large scientific research on materials and their structural characterizations.

di produrre con elevata quantità di dati (Schwab, 2015).

L'industria europea è forte in settori quali l'elettronica, l'automobile, la sicurezza e l'energia, la produzione industriale e la robotica, nelle apparecchiature di telecomunicazione, nelle tecnologie laser e sensori, ma sembra a volte dimenticare come queste applicazioni possano essere declinate per l'industria delle costruzioni, che in realtà ha enormi responsabilità sia sullo sviluppo della società che sull'uso delle risorse.

In effetti le tecniche della manifattura e i metodi di produzione innovativi sembrano spesso molto resistenti al cambiamento nelle costruzioni. Ciò è dovuto a metodi di costruzione tradizionali e processi di produzione consolidati, in cui l'innovazione è spesso un processo molto lento, guidato più da ragioni economiche che da effettive necessità di nuovi prodotti o sistemi.

Tuttavia, i processi di costruzione emergenti sono sempre più influenzati da metodologie di progettazione innovative che consentono al contempo nuovi procedimenti manifatturieri. Tra questi, la progettazione computazionale, l'ingegnerizzazione sin dalla fase iniziale, l'ottimizzazione topologica e la distribuzione del materiale, sono i più significativi (Aires, 2012).

In questo contesto si parla spesso di *Mass Customization* (Pine, 1983) con riferimento alla possibilità di passare da sistemi standardizzati a sistemi che possano essere personalizzati, senza incrementarne il costo e sviluppando soluzioni innovative.

In particolare nel settore Architettura Ingegneria e Costruzioni (AEC), al fine di soddisfare le esigenze contemporanee di tecniche performative e direttamente producibili, è importante produrre elementi, componenti e sistemi costruttivi con una caratterizzazione molto specifica in termini di prestazioni, mantenendo bassi i costi.

In conclusion, the essay will try to draw some conclusions from the cases, highlighting the opportunities given to the designer by the expanded power of the tools available, trying to contribute to the debate on which industrial culture to refer to today, and how to introduce technical innovation through architectural design.

Introduction

Globally there is a high awareness that industry stands on the brink of a new revolution, driven by technological breakthroughs such as advanced computing, big data analytics and cloud, advanced robotics and advanced manufacturing.

These technologies open new horizons for industry to become more efficient, to improve processes and to develop innovative products and services. They also help industry to respond to custo-

mers' demand for personalised products, as well as improved energy and resource efficiency.

Many researchers have already named it Industry 4.0, tackling it as the revolution that refers to the possibility to manufacture with a very high quantity of data (Schwab, 2015).

European industry is strong in sectors such as electronics automotive, security and energy markets, manufacturing, robotics, telecommunication equipment and laser/sensor technologies but seem sometime to forget how these applications can be fostered into construction industry, while in reality it has a lot of responsibility in society development and use of resources.

In fact manufacturing techniques and innovative production methods in construction seem often quite resilient to change. This is due to traditional construction methods and consolida-

I motori dell'innovazione nel settore delle costruzioni

I due motori al momento più rilevanti per l'innovazione nel settore delle costruzioni sono:

- Progettazione Computazionale
- Manifattura Avanzata.

La progettazione computazionale è un metodo contemporaneo che incrementa la possibilità di sviluppare sistemi 'design-to-fabrication', incorporando diversi materiali, proprietà strutturali e dati geometrici per comporre un progetto e informarlo di prestazioni. Questo significa che il processo non è più lineare, valutando le proprietà dei materiali e le prestazioni quando la fase di progettazione è conclusa, ma iterativo, dove le informazioni sono scambiate e connesse alle possibilità del progetto sin dall'inizio. La progettazione computazionale può apportare almeno tre vantaggi:

- ingegnerizzazione di una forma particolare fin dalle prime fasi di progettazione euristica;
- personalizzazione di strumenti con codici specifici;
- attivazione di proprietà specifiche dei materiali in relazione alle prestazioni desiderate nel progetto.

I progettisti e tutti gli operatori del settore AEC possono quindi combinare e sviluppare strumenti molteplici capaci di generare forme geometricamente complesse, ottimizzando il controllo di diversi parametri sia in ingresso che in uscita. La conoscenza di un linguaggio di programmazione come Python, C# o Visual Basic, apre nuove prospettive nella possibilità di codificare geometrie e proprietà desiderate (Xiangyu W, Ning G., 2012).

ted process of production, where innovation is often a very slow process which is driven by economic reasons more than by effective need of new products or systems. However, emerging construction processes are more and more influenced by novel design methodologies that enable new ways of manufacturing. Among them, computational design, early stage engineering, topology optimization and material distributions are the most significant ones (Aires, 2012)

In this context we often talk about Mass Customization (Pine, 1983) referring to the possibility to evolve from already existing systems to novel ones that can be personalized, without increasing their cost and causing new technologies to emerge. In Architecture Engineering Construction (AEC) sector particularly, in order to meet requirements of nowadays performative and competing

design-to-fabrication techniques, it is important to produce elements, components or overall integrated systems with highly specific characterisation in term of performances, while keeping low its costs.

Innovation drivers for AEC

Two of the most relevant drivers for innovation in construction industry are:

- Computational design;
- Advanced manufacturing.

Computational Design is a contemporary technique that enhances overall design-to-fabrication processes by incorporating various material, structural and geometrical data to compose architectural design and inform it of performances. This means that the process is no longer linear, assessing properties and performances when the design phase is over, but reiterative,

La manifattura avanzata, secondo motore rilevante, si riferisce alla possibilità di personalizzare le macchine a controllo numerico, in modo da affinare la produzione del singolo prodotto, componente o sistema. Oggigiorno l'industria si sta muovendo verso macchine di produzione sempre più versatili e reattive che consentono di minimizzare i tempi di realizzazione incrementando la qualità e flessibilità dei prodotti.

Questo tipo di manifattura avanzata consente di trasferire più rapidamente ricerche sperimentali che provengono da innovazioni di prodotto o da nuove applicazioni in processi di produzione. Inoltre la nuova frontiera del 'machine learning' – ossia la possibilità che gli strumenti imparino dalle informazioni che gestiscono a migliorare il processo produttivo autonomamente – apre un ventaglio di prospettive decisamente interessante.

Di fatto la cultura industriale a cui fare riferimento in generale è profondamente influenzata dalle nuove competenze informatiche computazionali evidenziate sopranzi e dalle capacità innovative delle macchine a controllo numerico, che consentono ai progettisti e ai produttori di sviluppare tecnologie innovative anche per il settore delle costruzioni.

Ricerche su sistemi costruttivi sperimentali presso il Dipartimento ABC del Politecnico di Milano

Le ricerche descritte in questo articolo sono sviluppate da ACT-LAB, unità di ricerca del Dipartimento ABC del Politecnico di Milano con il contributo di docenti, ricercatori, dottorandi e tesi, sul tema della progettazione di sistemi e component innovativi. Il gruppo di ricerca è focalizzato sulla possibilità di sviluppare innovazione attraverso l'uso di materiali sperimentali, tecniche

where information are exchanged and connected to design from the very beginning. Computational design can give at least three possibilities:

- to engineer a specific form from the early concept of the Design Process;
- to customize tools for the materialization of a specific design;
- to activate certain embedded properties of a material more than others as a main driver of performative design.

Designers and all the operators along the AEC process, are therefore able to combine and develop multiple tools and create geometrically complex structures, optimizing various parameters to control whether the inputs or the results. The knowledge of a proper coding language, such as Python, C# or

Visual Basic, opens up wide range of possibilities for scripting desired geometries and properties.

Advanced Manufacturing, second driver, refers to the possibility to tailor each Computer Numerically Control (CNC) machine in order to fit in an appropriate way the design of each product, component or system. Nowadays industry is moving very fast along this direction due to the fact that new machines has userfriendly tool to set them, are much for efficient in terms of time and quality and allow new types of work that can improve products.

Advanced Manufacturing refers to the possibility to transfer in a fast and effective way the experimental researches coming from innovative discovery or design application into manufacturing process or products. Also the new frontier of 'machine learning', that means that the instrument is able to use infor-

che usino programmi computazionali, macchine a controllo numerico personalizzate.

Tra i diversi lavori sviluppati, questo articolo illustra tre casi di studio:

- un componente in paglia ecologico non portante dalle alte prestazioni;
- un mattone stampato3D;
- una struttura a traliccio in PLA ottimizzata topologicamente e stampata3D.

Un componente in paglia non strutturale dalle alte prestazioni

La paglia in architettura ha molteplici impieghi, a partire dalla fine del '800, con l'invenzione della macchina impacchettatrice che ha caratterizzato l'involucro di molti edifici moderni. Da allora molti passi avanti sono stati fatti per scoprire le proprietà che fanno della paglia un materiale virtuoso sia per i casi di riqualificazione energetica sia per le nuove costruzioni.

Il gruppo di ricerca ha ottenuto un contratto di ricerca da un gruppo composto da progettisti e imprese per sviluppare un componente edilizio in paglia che potrebbe garantire benefici dal punto di vista della sostenibilità ambientale, del risparmio energetico, dell'efficienza economica, manutenibilità, sicurezza, salute degli ambienti interni, oltre alla riduzione del rumore e la conformità alle normative di recente legislazione nazionale GU 162 Supplemento 39 / 2015/07/15 e successive modifiche e regionale DDUO N.6480 / 2015 e ulteriori successive modifiche che stabiliscono i nuovi limiti di prestazioni (NZEB quasi zero edifici a energia) per la riqualificazione / ristrutturazione e nuove costruzioni.

mation data management to improve the process autonomously, can open wider perspectives of improvement.

Therefore the industrial culture to refer to nowadays is deeply embedded to the advancement in software skills and machine capability, increasing designers and producers possibility to develop innovative technologies also for AEC.

Research for experimental construction systems at ABC Department, Politecnico di Milano

The researches described in this paper are developed under the activities of ACTLAB, at ABC Department, with the contribution of professors, Phd and graduating students, and are focusing on the development of innovative building components and systems.

The Research Group topic idea is to

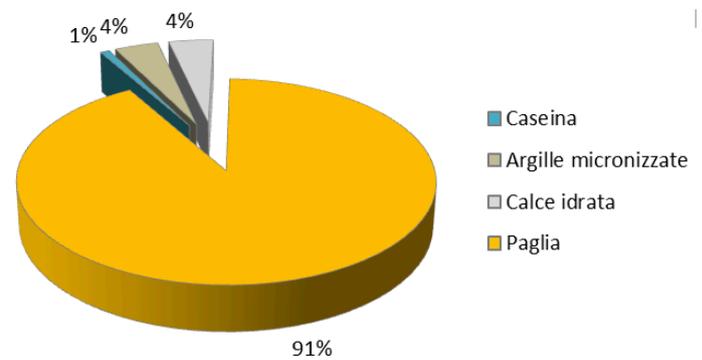
foster innovation through the use of experimental materials and techniques with the use of innovative computational tools, data analysis, customized machines.

Among various works, this paper will concentrate on analysis of a three case studies:

- a high performance non-loading straw component;
- a 3D printed clay brick;
- a lattice structure structurally optimized thanks to topological optimization and additive manufacturing.

A high performance non-loading straw component

The use of straw in architecture has several usage, starting by the end of the '800, with the invention of the packing machine to make the envelope of those architectural buildings which reflect



Il blocco in paglia ha una composizione molto semplice di elementi naturali tutti certificati e tracciabili, che non danneggiano né l'essere umano né l'ambiente. Nello specifico essi sono:

- caseina
- argilla
- calce
- paglia

Le percentuali sono indicative e si riferiscono a diversi test fatti con additivi e svariate composizioni e tipi di paglia. Al laboratorio sono stati realizzati dei mock-up e lasciati asciugare per un periodo di un mese circa, per verificare il processo di reazione degli elementi in gioco.

La caseina è una proteina del latte che viene qui utilizzata come legante naturale (caseinato di calcio) perché può saldare tenacemente le fibre. Il caseinato e la paglia, in combinazione con l'azione di compressione fatta da una pressa, formano una struttura naturale in grado di resistere alle sollecitazioni che il componente edilizio dovrà sostenere.

L'argilla è attivata legandosi a calce e acqua, diventando così un legante idraulico che, idratando nel tempo, favorisce il processo di essiccazione naturale del blocco, collegando gli steli e fornendo una maggiore resistenza alla compressione.

Grazie al suo pH basico, la calce svolge anche il compito di sterilizzazione/disinfezione dello paglia e coopera, insieme all'acqua, al processo di coagulazione della caseina per l'indurimento/idratazione delle argille.

La paglia è un elemento residuale proveniente da scarti di coltivazione dei cereali ed è presente in grandi quantità a Km 0 in agro-produzione nell'area lombarda. Inoltre, il mattone da realizzare in fabbrica e /o in sito con apposita pressa non richiede

l'uso di una fibra specifica; è quindi pensabile utilizzare diversi steli che sono disponibili durante il raccolto da primavera ad autunno inoltrato. Tuttavia, prove di laboratorio suggeriscono l'uso di steli di cereali con gambo di diametro medio o piccoli atti a favorire la fase di compressione in situ.

La possibilità di realizzare direttamente i componenti necessari in cantiere fornisce vantaggi in termini di:

- consumo di materie prime (riduzione dei rifiuti, riutilizzo degli stessi);
- creazione di filiere virtuose nella zona in cui si verificano le operazioni di riqualificazione / costruzione.
- bassi valori di emissioni di CO₂e e di energia incorporata nella / energia grigia materiali (a causa della fase di estrazione, trasporto, lavorazione, installazione, manutenzione, smontaggio e riutilizzo / riciclo / smaltimento).

È inoltre vantaggioso per il territorio sfruttare questi residui agricoli locali per la produzione di prodotti isolanti atti a migliorare il rendimento energetico degli edifici, sia per ridurre il consumo di energia che gli inquinanti emessi nell'atmosfera dal settore delle costruzioni.

La paglia compressa genera delle micro-cavità in cui l'aria è quasi ferma e separata dagli altri strati attraverso le pareti interstiziali legnose dello stelo. Tale struttura è responsabile del basso livello di conducibilità termica dei blocchi in paglia, con un parametro va-

modern imagination. From then it has been possible to discover the properties that make straw a virtuous material either for energy upgrading cases either for new constructions.

For these properties and performances the research group has been granted of a research to develop a straw building component that could ensure benefits from the viewpoint of environmental sustainability, energy conservation, economic efficiency, maintainability, safety, indoor health, noise reduction and regulation compliance to recent national legislation GU 162 Supplement 39 / 15.07.2015 and subsequent amendments and regional DDUO N.6480 / 2015 and subsequent amendments that set new performance limits (NZEb nearly zero energy buildings) for redevelopment renovation and new constructions.

The straw brick proposed has an ex-

remely easy composition of natural elements certified and traced, totally harmless to humans and the environment. Specifically those elements are:

- casein
- clay
- lime
- straw

The percentages indicated refers to several testing with different additive materials and different compositions and types of straw. At the laboratory we have made mock-ups and let them dry in a period of one month more or less to verify the process of reaction of the elements involved.

Casein is a milk protein, which is used here as a natural binder (calcium caseinate) because it can weld tenaciously the stems. The caseinate and the straw, in combination with the action of compression, form a natural pattern between

the stems able to withstand normal stresses which the building component will have to bear.

Clay is activated by binding to the lime and water thus becoming a hydraulic binder which, hydrating in time, favors the natural drying process of the brick, connecting the stems and providing a greater resistance to compression.

Due to its basic pH, lime performs the task of sterilization/sanitation of the straw and cooperates, along with water, to the process of coagulation of the casein and to the hardening/hydration of the clay.

Straw is a residual element coming from scraps/cereal cultivation and is present in large amounts Km0 in agro-production Lombard district. In addition, the brick to be realized in the factory and/or on site with special press does not require the use of a specific straw; it is therefore conceivable to

use different straws that are available during the harvest from early spring to late autumn. However, laboratory tests suggest the use of stems from cereals with stem from the average diameter or small acts to favor the compression phase in situ.

The possibility to directly realize the necessary components in the pipeline provides the advantages in terms of:

- Consumption of raw materials (waste reduction, reuse of the same);
- Creation of virtuous production chains in the area where you are experiencing the redevelopment / construction operations.
- low values of CO₂e emissions and energy incorporated in the materials / gray energy (due to the extraction stages, transportation, processing, installation, maintenance, dismantling and reuse / recycling / disposal).

riabile tra 0,040 e 0,090 [W/m²K] in funzione della densità e dell'orientamento delle fibre rispetto alla direzione del flusso di calore. I bassi valori di conducibilità termica - con densità medie, che vanno da 150 e 350 [kg/m³] rendono questa soluzione adatta per entrambe le stagioni invernali (bassa conducibilità = elevata resistenza termica = bassa riduzione delle perdite di calore di potenza termica installata a servizio di ambienti confinati) che l'estate (le densità medie hanno una maggiore inerzia termica utile alla progettazione dello sfasamento (12-14 ore di progetto ideale) e all'attenuazione dell'onda termica, fornendo una temperatura pressoché costante delle superfici interne.

La distribuzione incrociata degli steli con la sovrapposizione di normali strati di finitura (intonaci) ad alta densità genera un effetto ripetuto di "massa-molle-massa-molle" responsabile per il principio di funzionamento dei prodotti destinati alla attenuazione dell'udienza trasmissione inquinanti e quindi è auspicabile utilizzare questa tecnologia in pareti perimetrali, pareti divisorie, pavimenti e tetti inclinati inter-ventilati, per l'isolamento da fonti di rumore esterne e tra le unità adiacenti.

La densità media del mattone (rispetto ai pannelli isolanti commerciali) offre un prodotto facile da tagliare direttamente in cantiere (sega a mano, sciabola, il nastro per i mattoni) per il ritaglio di finestre / porte / balconi. Per lo stesso motivo la creazione di tracce elettriche è semplice con normali attrezzi da cantiere (fresse, strumenti vari, ecc).

Queste ragioni portano a preferire la soluzione del blocco rispetto a quella dei singoli balle di paglia rimodellato loro smontaggio in situ e nella addice sbagliato istruzioni complesse dove la realizzazione di elementi personalizzati potrebbe comportare uno spreco di tempo significativo.

It's further advantageous for the territory enhance these local agricultural residues for the production of insulating products acts to improve the energy performance of buildings to reduce energy consumption and to that of pollutants emitted into the atmosphere from the civil sector.

The compressed straw generates a pattern of micro-cavities in which the air is almost stopped and separated from the other through the interstices woody walls of the stem. This structure is responsible for the low level of thermal conductivity of bricks in straw, variable parameter between 0,040 and 0,090 [W/m²K] as a function of the density and orientation of the rods relative to the direction of heat flow.

The low thermal conductivity values -with average densities which are between 150 and 350 [kg / m³] make this solution suitable for both win-

ter seasons (low conductivity = high thermal resistance = reduced heat loss reduction of thermal power installed at the service of confined spaces) that summer (average densities are greater thermal inertia useful to the design of the phase (12-14 hours of project ideal) and thermal wave attenuation, providing an almost constant temperature of the internal surfaces.

The conformation in alternating pattern between air and stems with the overlay of normal finishing layers (plasters) high density generates a repeated effect of "mass-spring-mass-spring" responsible for the functioning principle of the aimed products to attenuation of the transmission hearing pollutants and therefore it is desirable to use this technology in perimeter walls, partition walls, floors and inter-ventilated pitched roofs, for insulation from outside noise sources and between nei-



Con il blocco ipotizzato è anche permessa la sovrapposizione di giunti a secco. Questi raccordi prevengono la formazione di ponti termici/spifferi/discontinuità nel materiale che diventano evidenti sull'intonaco col passare del tempo.

ghboring units.

The average density of the brick (compared to mats / wool / commercial insulating panels) provides an easy product to be cut directly at the construction site (hand saw, saber, tape for bricks) for the cropping of windows / doors / balconies. For the same reason the creation of electrical traces is simple using normal construction site tools (cutters, multi-tools, etc).

These reasons lead to prefer the solution of the brick compared to that of the individual bales of straw remodeled taking them apart in situ and in the wrong befitting to complex statements where the realization of custom elements would result in a significant waste of time.

With our brick it is also allowed the overlap of dry joints. These fittings prevent the formation of thermal bridges / drafts / discontinuities in the material

that should become evident to the plaster within the passing years.

A 3D printed clay brick

This experiment starts from the idea to develop a customized design of a very traditional building component: a clay brick. The concept relies on the possibility to have a flexible system of tile modules, which could be site specific and ad hoc buildable with Additive Manufacturing (AM) in relation to the context. The design of the component is developed analytically with respect to a framework of requirements and performance typical of a clay component, with the addition of standard features of a wall system. The concept thus identifies the basic functionality to be integrated in a wall with insulation, electrical junction boxes and pipes, lamps, allowing the creation of specific shapes when required.

Un laterizio stampato 3D Questa sperimentazione nasce dall'idea di sviluppare un componente edilizio personalizzato a partire da uno molto tradizionale: un blocco in laterizio. Il concetto si basa sulla possibilità di ottenere un sistema flessibile di blocchi in laterizio per tramezze, che possa essere versatile e personalizzabile ad hoc con la stampa additiva in relazione al luogo di utilizzo.

La progettazione del componente è sviluppata analiticamente rispetto a un insieme di requisiti e prestazioni tipiche di un componente di argilla, con l'aggiunta di caratteristiche standard di un sistema di parete. Il concept identifica così la funzionalità di base, per poi poter essere integrato in una parete con isolamento, con scatole di derivazione elettriche e/o lampade, permettendo la creazione di forme specifiche su richieste.

I vincoli dimensionali sono guidati dal coordinamento modulare con gli elementi tecnici esistenti e con i formati standard sul mercato di mattoni non portante in argilla. L'idea principale qui presentata è quella di utilizzare questo tipo di componenti, non solo per le nuove costruzioni, ma anche per gli edifici esistenti in caso di riqualificazione.

Un algoritmo sviluppato con l'uso di software come Grasshopper e Python è stato applicato per determinare gli spessori e la quantità di materiale distribuito, ottimizzando le prestazioni strutturali in fase di design e considerando i vincoli produttivi. Si è così identificato come formato ideale (simile a quello che esiste in commercio), e compatibile con i vincoli di stampa, una dimensione di 250 x 250 x 120/125 mm.

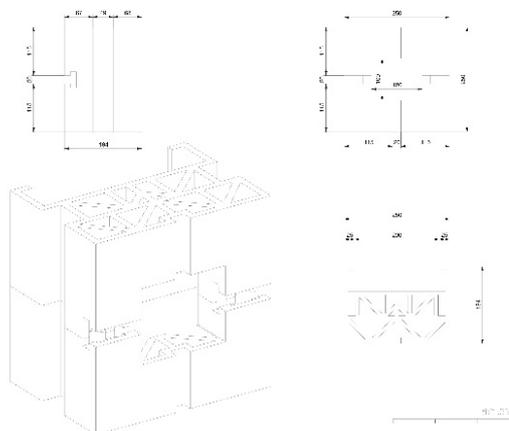
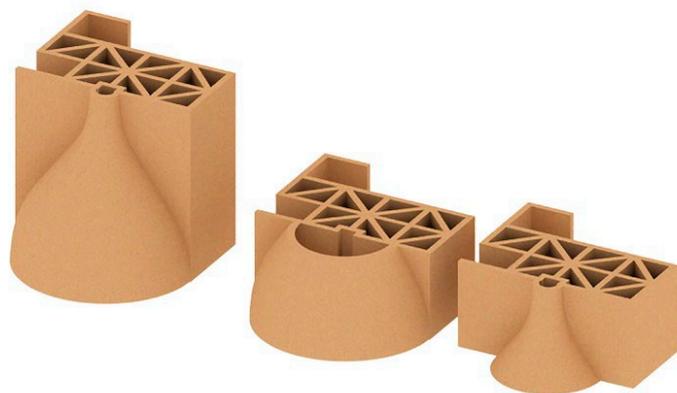
Questa dimensione può anche adattarsi all'integrazione per esempio di un isolante EPS in pannelli (500 x 1000 x 50 mm), integrati con cavi elettrici o con una scatola di derivazione di 120 x 100 x 70

mm. Un altro vantaggio di questo sistema è la possibilità di integrazione in qualsiasi forma o struttura, in relazione al suo uso. A causa della necessità di preservare l'equilibrio strutturale di un muro, progettazione di parti a sbalzo del mattoncino è stata eseguita all'interno del quantitativo di massa non superiore al 40% (Fig. 3-4).

La miscela corretta deve essere scelta in modo da garantire sia un buon grado di fluidità, sia una buona coesione del filamento estruso. Le sostanze utilizzate per realizzare la miscela di argilla sono: terracotta rossa per il 58% della miscela, chamotte rossa (0-0.5 mm) per il 20% della miscela e sodio carbonato per 1% della miscela. A questa miscela è stato aggiunto il 21% di acqua. Tutti i materiali scelti sono naturali e facilmente accessibili sul mercato. Sulla base della miscela decisa, il disegno è stato raffinato con aggiunta di nervature interne organizzate sotto gli angoli di 90° e 45°. Questo dettaglio del disegno del componente è stato fondamentale per assicurare una risposta isotropa del componente. Anche se questo dettaglio non è stato testato in laboratorio, si è rivelato empiricamente lavorare verso una maggiore resistenza ai carichi orizzontali.

La stampante utilizzata per la fabbricazione del mattone è una Delta Wasp 40/70, con un'area di stampa cilindrica del diametro di 40 cm e altezza massima di 70 cm. Quando estruso, il materiale argilloso non è sempre immediatamente solido e ha bisogno di un certo tempo per indurire. Per questo motivo, il rischio di collasso della struttura quando progressivamente il materiale viene stampato esiste. Per ovviare a questo problema, il mattone è stato progettato in modo tale da consentire la stampa con numerosi punti di connessione tra le pareti interna ed esterna in modo che la stereometria dell'oggetto determini il suo sostegno progressivo durante il processo di stampa. Il materiale argilloso estruso potrebbe anche

03 |



03 | Progettazione di laterizi stampati 3D printing con parti per l'alloggiamento di isolanti o illuminazione.

3D printing studies for components with specific design requirements (insulation assembly and light integration)

crollare con cambi di direzione eccessivi; è quindi una buona prassi creare sezioni di XZ o YZ che non siano meno di 55°.

Considerando il volume di stampa e i vincoli di fabbricazione, sono stati presi in considerazione alcuni fattori aggiuntivi: la massa massima di argilla a disposizione per l'estrusione a seconda della capacità del serbatoio e del tipo di estrusore. In particolare, il serbatoio della Delta Wasp 40/70 aveva una capacità di 7 kg e il diametro dell'estrusore di 3 mm. Inoltre, va anche considerato che durante i processi di essiccazione e cottura, il ritiro dimensionale sarà di circa il 10% a causa dell'evaporazione dell'acqua.

Il processo di stampa di due tipologie di componenti ha preso meno di 8 ore (Fig. 4). Entrambi i mattoni avevano una parte personalizzata: il primo uno spazio per l'isolamento e il secondo parti a sbalzo per l'illuminazione. Dopo la produzione, il componente è stato essiccato naturalmente per 2 settimane. Il processo di essiccazione corretta è infatti cruciale per la polimerizzazione finale dei prototipi, le variazioni di temperatura incontrollabili possono causare una riduzione del materiale irregolare. Questo fenomeno è parzialmente successo al prototipo, a causa del cambiamento della percentuale di temperatura e umidità durante il giorno e la notte.

I componenti sono stati poi sottoposti a 9 ore di cottura a 1050 °C e ulteriori 9 ore di raffreddamento controllato. Sul prodotto finito è stata rilevata una riduzione dell'argilla in volume del 10% rispetto ai valori di progetto. Questo processo di ritiro è avvenuto per graduale evaporazione dell'acqua, sia nella fase di essiccazione che di cottura.

I due laterizi sono stati sottoposti a due principali test per verificare le loro caratteristiche e le prestazioni: il test di assorbimento all'acqua e la prova di resistenza strutturale, con l'obiettivo prin-

cipale di confrontare le caratteristiche dei componenti fabbricati con la stampa additiva con quelli prodotti convenzionalmente con proprietà simili, e per mettere così a bilancio le possibilità di personalizzazione con quelle di ottenere migliori prestazioni. In primo luogo, il test di assorbimento è stato eseguito secondo la norma EN UNI 772-21, che determina le regole per la verifica di un prototipo di argilla stampata. I risultati hanno mostrato che l'assorbimento non è significativamente diverso rispetto alla tradizionale tavella in laterizio non portante.

È stato eseguito anche il test IRIS, che consiste nell'ammollo del prototipo per 60 secondi, regolando l'assorbimento massimo in relazione al peso, anche questo test è stato positivo per il laterizio stampato 3D che è risultato conforme alle normative.

In secondo luogo, sono stati realizzati i test strutturali in conformità alle norme UNI-ISO Norma UNI EN 772-1-2011.

La prima accortezza è stata quella di livellare il piano del laterizio per avere una superficie parallela alla superficie della pressa con una tolleranza molto bassa, in modo da essere in grado di eseguire il test. È stato applicato il primo carico e subito dopo la velocità di caricamento è stata ridotta in modo da raggiungere il punto di rottura in più di un minuto (come da regolamento).

Una misurazione molto accurata delle dimensioni è stata fatta al fine di calcolare l'area lorda e netta.

I valori sono stati ulteriormente normalizzati in relazione al processo di essiccazione che potrebbe potenzialmente causare alcune irregolarità del rapporto h/d. Pertanto i valori risultanti finali della superficie netta normalizzato sono stati:

$$N/A \text{ (MPa)}: (300 * 1000) / 15170.7614 = 19.7748 * 1 * 0.6 = 11.86488 \text{ (MPa)}$$

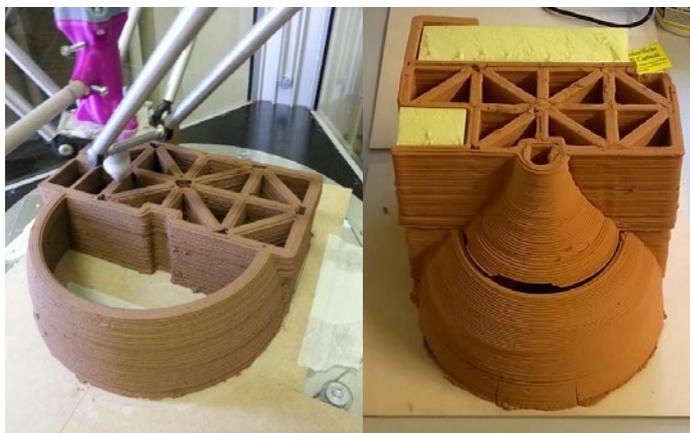
The dimensional constraints are guided by modular coordination with the existing technical elements and standard formats on the market of a non-load bearing clay brick. The main idea presented herein is to use this type of components not only for new construction, but also for existing buildings systems when having to be refurbished.

An algorithm developed with the use of Grasshopper and Python has been applied to determine the wall thicknesses and amount of material distributed, while optimizing structural performances of a design and considering production constraints. It has thus been identified as an ideal format (similar to what exists in trade), and compatible with printing constraints, a dimension of 250 x 250 x 120/125 mm.

This dimension could also fit within existing insulating EPS panels (500 x 1000 x 50 mm), integrated with elec-

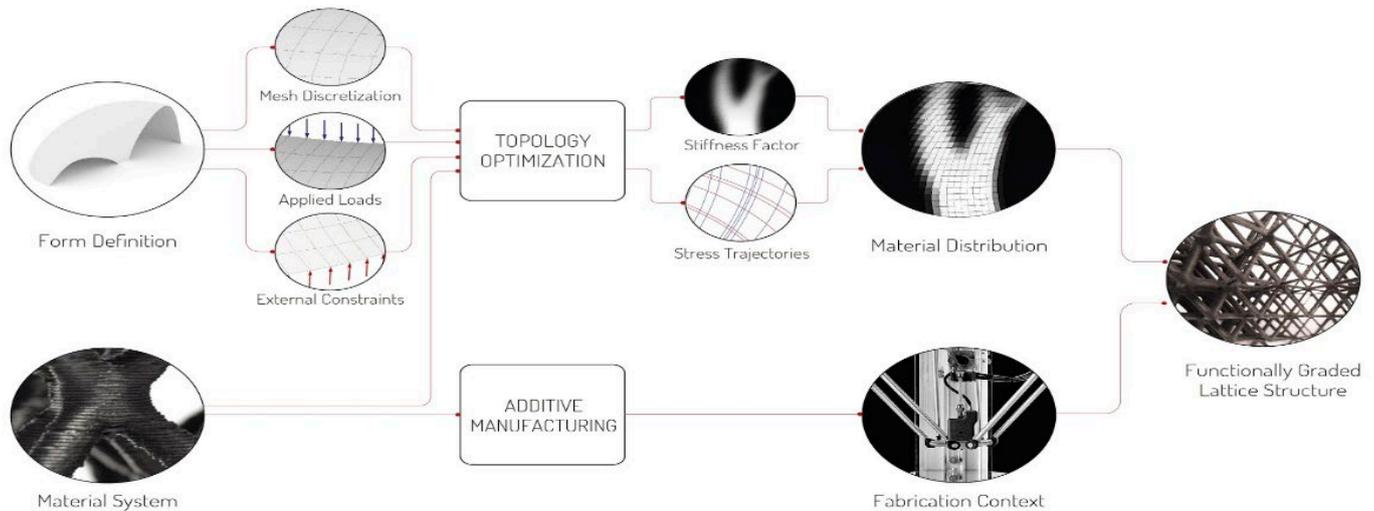
trical pipes of 8 mm or junction box of 120 x 100 x 70 mm. Another advantage of this system is the possibility of integration within any kind of form or structure, in relation to its use. Due to the necessity to preserve structural equilibrium within a wall, design of cantilevered parts of the brick has been performed within the mass quantity not superior to 40% (Fig. 3).

The correct mixture has to be chosen in order to ensure either a good degree of fluidity, either a good extruded filament cohesion. The substances used to make the mixture of clay are: slip from red earthenware casting for 58% of the mixture, chamotte red end (or 0.5 mm) for 20% of the mixture and sodium-carbonate for 1% of the mixture. To this mixture it has been added 21% of water. All the materials chosen are natural and easily accessed on the market. Based on decided mixture, the design



04 | Laterizi progettati e stampati 3D con la possibilità di alloggiare l'isolamento o inserire corpi luminosi.

Clay 3D printing studies for components with specific design requirements (insulation assembly and light integration)



05 | Schema del processo di progettazione e fabbricazione con manifattura additiva.
Workflow and process of design and manufacturing

N/A (MPa): $(338 \cdot 1000) / 15170.7614 = 22.2796 \cdot 1 \cdot 0.6 = 13.36776$ (MPa)

Il punto di rottura si è verificato sotto il carico di 330 KN come prime crepe e 338 KN come rottura finale.

Rispetto ai tradizionali laterizi non portanti il valore non è molto lontano, infatti il laterizio stampato additivamente ha dimostrato di avere valori di resistenza elevati: 5 N/mm² sulla faccia orizzontale e 7 N/mm² sulla faccia inferiore.

Pertanto, l'utilizzo della manifattura additiva per un laterizio ha dimostrato che essi hanno un ottimo comportamento e possono benissimo essere liberamente impiegati entro muri o setti tradizionali, rispettando le normative.

Per poter ulteriormente sviluppare questa possibilità costruttiva si potrebbe approfondire la tecnica di stampa anche per laterizi portanti, che hanno una resistenza di 40 N/mm² sulla faccia principale e 7 N/mm² su quella corta, attraverso ulteriori analisi

has been refined with addition of internal ribs organized under the angles of 90° and 45°. This was fundamental in order to assure an isotropic response of the component. Even though this trial was not laboratory tested, it proved empirically to be working for a higher horizontal load resistance.

The printer used for the fabrication of the brick is a Delta Wasp 40/70, with a cylindrical printing area of 40 cm diameter and maximum height of 70 cm. When extruded, the clay material is not becoming immediately solid and it needs certain time to harden. For this reason, the certain risk of structure collapse when progressively printed exists. To obviate this problem, the brick was designed in such a way to allow printing with numerous points of connection between the inner and outer walls so that the object stereometry determines its progressive support during the

printing process. The extruded clay material might also collapse against excessive directional changes; it was therefore a good practice to create sections in the XZ or YZ plane that are not less than 55° angle.

Considering the printing volume and fabrication constraints, some additional factors had to be taken in account: maximum mass of clay available for extrusion depending on the extruder's reservoir capacity. Specifically, the reservoir of Delta Wasp 40/70 had capacity of 7 kg and extruder diameter of 3mm. Moreover, it should be also considered that during the processes of drying and firing, the dimensional shrinkage of about 10% occurs due to evaporation.

The printing process of the two components took less than 8 hours (Fig. 4). Both the bricks had the space provided for insulation and cantilevered parts for lighting. After the production, the

e principi progettuali di ottimizzazione strutturale, di scelta del materiale e di verifica della modalità di produzione e cottura.

Manifattura additiva per struttura a solidi cellulari traliccio in materiali polimerici

Per questo motivo vengono impiegati in modo massiccio per la manifattura additiva in particolare per la deposizione con materiale fuso, tecnica tipica delle stampanti 3D.

Questo sistema di costruzione sperimentale a traliccio formato da solidi cellulari è una pelle con una distribuzione del materiale altamente specifica che è concepita per la manifattura additiva, in modo tale da ottimizzare la resistenza strutturale, con un metodo che comprende la progettazione computazionale, esperi-

I materiali polimerici sono tra i materiali in crescente evoluzione in generale, grazie alle proprietà personalizzabili del materiale e al basso costo di produzione.

component has been naturally dried for 2 weeks. The correct drying process is indeed crucial for the final curing of the prototypes, due to quite uncontrollable temperature changes that can cause material reduction in an irregular manner. This had partially happened to the prototype, due to change of temperature and humidity percentage during day and night.

The components have been afterwards than subjected to 9 hours of baking at 1050 ° C and a further 9 hours of controlled cooling. The finished clay product was found to be reduced in volume by 10% with respect to the design values. This withdrawal process happened due to the gradual water evaporation, both in the phase of drying and firing.

The two bricks have undergone two main tests to verify their characteristics and performances: the water absorp-

tion test and the structural resistance test, with the main goal of comparing the characteristics of additively manufactured components with the conventionally produced ones of similar properties, while balancing the possibilities of customization and obtaining improved performances.

Firstly, the absorption test has been run under EN UNI 772-21, which determined the rules for verification of a printed clay prototype. The outcomes showed that the absorption is not significantly changing compared to the traditional non-load bearing clay brick. Additionally, the IRIS test that consist of 60 seconds soaking of the prototype has been performed.

IRIS test regulates the maximum weight absorption, and this test was quite successful for the 3D printed brick which was complying regulations.

Secondly, the structural tests have been

menti di fabbricazione digitale e una valutazione performativa dei prototipi in scala reale. I solidi cellulari sono una conformazione tipica della natura, per esempio del legno, che consente di avere una struttura molto resistente a flessione e deformazione. Sono stati impiegati algoritmi per l'ottimizzazione topologica delle forme in modo tale da organizzare il materiale in modo performativo, creando una microstruttura reticolare personalizzata definita come strutture a traliccio, con un sistema di aste interconnesse che reattive al carico in funzione delle caratteristiche spaziali variabili.

Il potenziale di questa struttura si basa sulla sua resistenza implicita dovuta alla forma e sull'uso personalizzato di materiale, unitamente alla possibilità di adattarsi a qualsiasi forma architettonica. Queste strutture sono costituite da una rete interconnessa di aste, con delle connessioni rigidamente connessione. Questo tipo di microstrutture reticolari da un lato può essere analizzata con tradizionali strumenti di simulazione meccanica, come se fosse strutture a traliccio, dall'altro lato, entro una certa scala, la struttura a solidi cellulare può esser considerato un materiale simile ai materiali omogenei. Le proprietà meccaniche di queste tipologie sono regolate dunque, in parte, da quelle del materiale di cui sono realizzate, ma soprattutto dalla topologia e densità relativa della struttura cellulare.

Questa metodologia richiede la predisposizione di algoritmi computazionali per generare strutture reticolari con parametri personalizzabili modificabili in base alla risposta della macchina per la stampa additive, il codice viene continuamente riaggiornato a seconda dei risultati di produzione.

Il risultato di queste analisi reiterative è quindi direttamente tradotto in una microstruttura reticolare che si orienta seguendo

made in compliance with UNI-ISO Norma EN UNI 772-1-2011.

The first procedure has been to grind the brick in order to have parallel surface with a very low tolerance in order to be able to run the test. First load was applied and soon after the load speed was reduced in order to reach breaking point in more than one minute (as per regulation). A very accurate dimension measuring has been done in order to calculate gross and net area.

The values have been further normalized in relation to drying process that could potentially cause some irregularities to the h/d ratio. Thus the final resulting values of the net area normalized are:

N/A (MPa): $(300 * 1000) / 15170.7614 = 19.7748 * 1 * 0.6 = 11.86488$ (MPa)
 N/A (MPa): $(338 * 1000) / 15170.7614 = 2$

$2.2796 * 1 * 0.6 = 13.36776$ (MPa)

The breaking point occurred under the load of 330 KN as a first cracks and 338 KN as final disruption.

Compared with the traditional non-load bearing clay brick, additively manufactured brick showed to have higher resistance values: 5 N/mm² on the horizontal face and 7 N/mm² on the shorter face. Therefore, the utilization of 3D printed clay bricks proved to have a superior performance and behaviour and that can be freely employed within the traditional walls and structures, complying the regulations. However, the 3D printed brick in such configuration was compared only with non-load bearing traditional bricks. Certainly, in order to make it comparable also with the load bearing systems and structural bricks whose resistance is 40 N/mm² on the main face and 7 N/mm² on the short

le principali linee di stress e variando la porosità del materiale, secondo valori di sollecitazione locali. In questo processo, i principali parametri di input sono proprietà del materiale e vincoli di fabbricazione, oltre alla geometria complessiva e alle condizioni al contorno. Variazioni in ognuno di questi parametri generano diverse strutture reticolari, poiché il metodo è parametrico e personalizzabile, dove morfologia, materiale e prestazioni vengono lette, analizzate e modificate iterativamente.

L'efficienza delle strutture a traliccio è funzione della geometria complessa. Nella nostra ricerca, la manifattura additiva è impiegata per gestire questa alta complessità e per la possibilità di sperimentare materiali diversi, che a sua volta possono portare alla definizione di nuove ipotesi strutturali. Una nota importante sulla parte di produzione riguarda la tipologia di manifattura che prevede la deposizione di una serie di strati orizzontali.

Questo permette da un lato una grande libertà nella produzione, ma anche alcuni vincoli da prendere in seria considerazione. Tra i limiti di questa tipologia di produzione possiamo annoverare: la difficoltà di realizzare geometrie sporgenti, a seconda del materiale utilizzato e la risoluzione di stampa desiderata, un limitato angolo di 30-45 gradi rispetto all'asse verticale e infine la resistenza strutturale dipende molto dall'adesione tra i diversi strati. Vari test di produzione sono stati condotti per raffinare le impostazioni di stampa con materiali diversi e di definire la geometria in relazione alla velocità di stampa e alla risoluzione delle cellule a ottaedro.

La geometria del componente costruttivo risulta dunque adeguato al tipo di produzione scelta in quanto valorizza alcuni aspetti che con tecniche di produzione tradizionali sarebbero molto complesse (si pensi alla produzione con stampi di elevatissimo

one, additional analysis and material optimization principles are required.

Additive manufacturing for cellular solid lattice structure in pla

Polymeric materials are one of the most evolving materials in general, due to there customizable properties and low cost of mass production.

That's why it is one of the most favourable materials for additive manufacturing and in particular for Fused Deposition Material techniques.

This experimental construction system with cellular solid lattice structure is a skin with highly specific material distribution which has been conceived with the use of AM to efficiently provide structural resistance, with a method that encompasses computational design workflow, fabrication experiments and performative assessment of full-scale prototypes.

Cellular solid structures come from nature and are typical of materials like wood, where a high resistance to buckling and bending is obtained thanks to this type of structure.

Algorithms for topology optimization of freeform shapes are employed to determine the material organization as well as a performative matrix for the creation of a custom lattice microstructure defined as Functionally Graded Lattice Structures, a system of load-responsive interconnected struts with spatially varying characteristics.

The potential of this system relies on its implicit resistance and reduced use of material, combined with the possibility to adapt to any architectural shape. They are composed by an interconnected network of struts, pin-jointed or rigidly bonded at their connections. At one level, they can be analyzed using classical methods of mechanics, as

costo e con una precisione non necessaria al settore delle costruzioni) (Fig. 6).

Considerazioni finali

I tre casi di studio illustrano le potenzialità e le possibilità di sviluppo di sistemi costruttivi innovativi che possono iniziare a livello sperimentale e poi cambiare scala diventando il seme per una produzione industriale personalizzata.

L'idea è che le sperimentazioni con diversi materiali, tecniche e strumenti di progettazione computazionali possano favorire l'innovazione nel settore delle costruzioni, grazie a una forte interrelazione tra le istanze di mercato e le potenzialità del design computazionale e manifatturiero avanzato, introdotto dal progettista sin dalla fase iniziale di progettazione.

Il caso di studio del laterizio stampato, per esempio, illustra molto bene i vantaggi e le potenzialità delle tecniche di produzione additiva, integrando materiale, tecniche di produzione e software di progettazione in un rapporto interdipendente. Lo studio della geometria ha giocato un ruolo chiave nell'ottimizzazione della forma e nel comportamento strutturale, proprietà influenzando lo sviluppo del prototipo. In questo caso l'idea di rimanere entro i limiti dimensionali di un laterizio standard, al fine di adattarsi a strutture murarie esistenti e convenzionali, ha guidato la progettazione delle dimensioni specifiche, lasciando libertà di espressione dove possibile.

Questo significa che un componente innovativo può trovare la sua allocazione in un processo di costruzione tradizionale e potrebbe essere affiancata una produzione additiva personalizzata, che integri e sviluppi nuovi sistemi costruttivi man mano che il cantiere evolve.

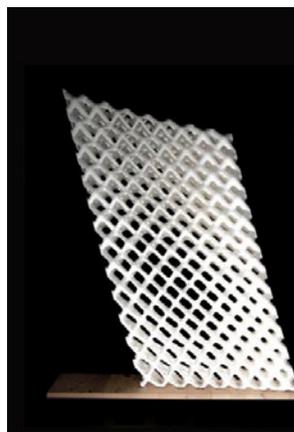
typical space frames, on the other side, within a certain scale range, lattice can be considered as a material, with its own set of effective properties, allowing direct comparison with homogeneous materials. Mechanical properties of lattice materials are governed, in part, by those of the material from which they are made, but most importantly by the topology and relative density of the cellular structure.

This methodology requires the description of custom algorithms to generate lattice structures parametrized on the base of a continuous feedback loop from a Topology Optimization and manage the additive process of materialization.

The outcome of this analysis is then directly translated into a lattice microstructure which, orients itself following principal stress lines and varying material porosity, according to local stress

values. In this process, main input parameters are material properties and fabrication constraints of AM, overall geometry and boundary conditions. Variations in any of these parameters generate different lattice structures, as this research develops a global method for highly specific design, where morphological, material and performative information is read, analyzed and modified iteratively.

The efficiency of Functionally Graded Lattice Structures relies on highly specific complex geometries. In our research, AM is employed to manage high intricacy and resolution, while offering the potential of experimenting with different materials, which in turn can become new inputs to the structural definition. Typically, AM methods produce objects in a sequence of horizontal layers. This allows great freedom in production but also some constraints



Il caso di studio del sistema a traliccio mostra che oggi si può 'personalizzare' il materiale sino alla sua composizione molecolare, attribuendogli delle proprietà e dei ruoli specifici che ne ottimizzano il comportamento. In entrambi i casi la manifattura additiva ha contribuito a relazionare la fase di progettazione con quella di esecuzione in un continuo processo di affinamento di ricezione e introduzione delle informazioni per la generazione anche di forme complesse.

Il caso di studio del componente paglia è in realtà non soltanto un progetto di prodotto ma si dilata sino a prendere in considerazione il montaggio, l'assemblaggio nell'edificio con attenzione alla sostenibilità e anche come realizzare una nuova filiera di produzione strategicamente flessibile. (Cagliari, Spina, 2000).

Queste sperimentazioni vanno nella direzione della riduzione del divario tra la fase di progettazione e la fase di produzione di un sistema costruttivo, creando una sinergia efficace tra le diverse fasi, che consentono un alto livello di personalizzazione delle proprietà dei materiali che vengono utilizzati, delle modalità produttive e delle prestazioni, innovando la cultura industriale a cui riferirsi ai giorni nostri.

Una nuova cultura industriale emergente che fa riferimento a tecniche consolidate ma anche alla possibilità di introdurre pro-

to be taken into account. Overhanging geometries are difficult to print and, according to the material used and the printing resolution required, have to be limited to an angle of 30-45 degree from the vertical axis. Various production tests have been conducted to refine print settings with different materials and to define struts geometries and dimensions in relation to print speed and resolution. Octahedron cells have proven to be ideal to guarantee a streamlined production while offering a degree of freedom allowing variable mechanical and visual features.

The building component geometry is thus adequate to the type of manufacturing because it enhance some characteristics that would be impossible to reach with traditional manufacturing techniques (for example injection or compression with high cost moulds even to precise for construction sector)

Final considerations

The three case studies illustrate the potential and possibilities of development of innovative construction systems that can start at an experimental level and then change scale becoming the customized industrial production.

The idea is that experimentations with different materials, techniques and tools can foster innovation in AEC thanks to a strong interrelation between the instances of market and the potential of computational design and advanced manufacturing introduced by the designer from the early phase of design.

The case study of the printed clay brick, for example, illustrates very well the advantages and potentials of Additive Manufacturing techniques, involving material, machinery and software in an interdependent relation. Furthermore, geometry played a key role in the optimization of form and structural

cessi di produzione di massa personalizzati, capaci – dove necessario – ti innovare con creatività il modo in cui costruiamo.

REFERENCES

- Ayres, P. (2012), *Persistent modelling: extending the role of architectural representation*, Routledge, Oxon.
- Cagliano, R., Spina, G. (2000), “Advanced Manufacturing technologies and strategically flexible production”, *Journal of operations Management*, Vol. 18, No. 2, pp. 169-190.
- Hauschild, M., Karzel, R. (2011), *Digital Processes (Detail Practice)*, Birkhäuser GmbH, Basel.
- Naboni, R., Paoletti, I. (2014) *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Springer, Verlag.
- Pine, J. (1983), *Mass Customization. The new frontier in Business Competition*, Harvard Business School Press, Cambridge.
- Schwab, K. (2015), *The Fourth. Industrial. Revolution*, Davos conference.
- Xiangyu, W., Ning, G. (2012), *Computational Design Methods and Technologies*, IGI Global, Hershey.

ACKNOWLEDGEMENTS

Si ringrazia il Dipartimento ABC del Politecnico di Milano con le strutture di SapeLAB e l'unità di ricerca ACTLAB, Luca DeSantis per il lavoro sviluppato nella tesi di laurea in collaborazione +Lab del Politecnico e WASP partner tecnico della manifattura additiva.

behaviour, mechanical properties and therefore construction requirements of the prototype development. In this case the idea of staying within the standard dimension boundaries in order to fit in an existing and conventional wall structures, has guided to specific size restrictions, but allowed a lot of freedom for design, material and production developments.

This could mean that an innovative component could fit also in a traditional construction process, that is a very important issue for its success.

The case study of lattice shows that nowadays, we are able to engage the materials on their molecular level and 'customize' their properties for the specific functions and roles that they will be taking with a design. Material optimization is able to respond to the sustainability issues through its advanced use and distribution methods.

In these two examples, additive technologies have the potential to go two steps further than traditional methods, and to design specific performative patterns according to a high-variety of purposes. With such a fabrication process it is possible to generate complex shapes without any additional production complication or costs increase.

The case study of straw component became not only a product design but also an assembly construction design, thinking at the possibility to produce it in a strategically flexible production (Cagliari, Spina, 2000).

These experiments goes in the direction of the reduction of the gap between project design and production phase, creating direct design-build construction systems which can be highly customized with the use of personalized tools and techniques, considering the properties of materials that are

used, their optimized organization and the final performances aim in order to innovate the industrial culture to refer to nowadays.

A new Industrial Culture able to refer to traditional techniques while introducing hybrid process of mass customization that will be able – where necessary- to innovate the way we build.