

Angelo Figliola,

Dipartimento di Pianificazione Design Tecnologia dell'Architettura, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Italia

angelo.figliola@uniroma1.it

**Abstract.** I prototipi, realizzati in collaborazioni con partner industriali, rappresentano i risultati di sperimentazioni transdisciplinari, in cui performance ambientali, strutturali e materiali, informano il processo computazionale e la fabbricazione robotica. *Fusta Robotica*, è il risultato di un'esplorazione tettonica derivata dall'utilizzo di materiale non ingegnerizzato, *Digital Urban Orchard* è espressione formale di un programma funzionale complesso, risultato dalla relazione tra forma, funzione e contesto. L'analisi dei processi, oltre a definire i limiti e le potenzialità dell'approccio progettuale, apre il dibattito sul ruolo della sperimentazione tecnologica nell'era post-digitale caratterizzata dall'informazione del processo che integra computazione digitale, materiali e fabbricazione.

**Parole chiave:** era post-digitale, mass customization, performance, data-informed design, fabbricazione robotica.

## Introduzione

La recente pubblicazione *Parametricism 2.0* (Schumacher, 2016) ha messo in evidenza l'inizio di una nuova fase di sperimentazioni che ha come obiettivo l'utilizzo degli strumenti computazionali-algoritmici per la risoluzione di problematiche concrete di natura ambientale e sociale, tornando a occuparsi di tematiche che avevano giustificato la nascita della computazione digitale stessa negli anni 70' (Frazer, 2016). La possibilità di processare informazioni e utilizzare i dati come elementi guida del processo progettuale (Deutsch, 2015) apre numerose, e in gran parte inesplorate, possibilità per la progettazione ambientale e tecnologica. L'assunto teorico che vede la forma architettonica come risultato di un diagramma di forze all'interno di un processo morfogenetico (Hensel, Menges, 2006; Hensel, Menges, 2008) apre nuovi campi d'indagine in relazione alla possibilità di realizzare architetture *performance-based* (Kolarevic, 2003; Kolarevic, Malkawi, 2005; Grobman, Neuman, 2012; Oxman, 2009), o *performance-oriented* (Hensel, 2013). I requisiti prestazionali, espli-

cati da codici e normative, a cui oggi l'architettura è chiamata a rispondere pone il tema delle *performance* al centro del dibattito, come *focus* progettuale. Se la prima era digitale ha interpretato le *performance* come antidoto necessario contro l'arbitrarietà formale generata dai processi digitali, o come rappresentazione di una nuova complessità iper - funzionale, oggi rappresentano un'assoluta necessità, obbligo etico della professione. Per operare all'interno di questo scenario la computazione digitale e le innovazioni tecnologiche dell'era contemporanea, quali la *datification* dei processi e il ricorso ad algoritmi di ottimizzazione genetica, risultano essenziali per far sì che le *performance* non permangano unicamente parametri numerici ma costituiscano fonte di esplorazione formale e informazione dei processi. Di conseguenza, la generazione geometrico - formale ha come obiettivo guida il raggiungimento di parametri performativi che possono essere ottimizzati in relazione a uno spazio di possibilità progettuali (De Landa, 2000) definito dal progettista attraverso un meta progetto (Kolarevic, 2015) che prevede la definizione di parametri geometrici variabili e invariabili. Il processo generativo offre la possibilità di esplorare, in maniera flessibile e veloce, geometrie complesse e informate, trasformando la materia da ricettore passivo di forma ad *agente* progettuale, come elemento guida del processo creativo, attraverso l'esplorazione delle sue caratteristiche meccaniche, strutturali e comportamentali (Menges, 2012). L'applicazione della metodologia prevede il superamento del paradigma tipologico a favore di una continua variazione formale al modificarsi delle condizioni al contorno del sistema con il quale si confronta. Grazie alla strategia *data-driven*, e alla possibilità di interconnettere progettazione e fabbricazione in un unico flusso di lavoro, la customizzazione della forma può essere

Post-industrial robotics:  
exploring informed  
architectures in the post-  
digital era

**Abstract.** The prototypes, made in collaboration with industrial partners, represent the results of transdisciplinary experiments in which environmental, structural and material performances inform the computational process and the robotics manufacturing. *Fusta Robotica*, is the result of a tectonic exploration deriving from the use of non-engineered material, *Digital Urban Orchard* is the formal expression of a complex functional program arising from the relationship amongst form (shape), function and context. The analysis of processes, in addition to the definition of the limits and potentialities of the design approach, opens the debate on the role of technological experimentation in the post-digital era, characterized by the process information that includes digital computation, materials and fabrication.

**Keywords:** post-digitale era, mass customization, performance, data-informed design, robotic fabrication.

## Introduction

The recent publication "Parametricism 2.0" (Schumacher 2016) has highlighted the beginning of a new testing phase that targets the use of computational-algorithmic tools for the resolution of environmental and social matters, returning to deal with issues that warranted the birth of digital computing itself in the 70-s' (Frazer 2016). The ability to process information and then to use the data as guiding elements of the design process (Deutsch 2016) opens many, and largely unexplored, possibilities for environmental and technological design. The theoretical assumption defines the architectural shape as a result of a diagram of forces within a morphogenetic process (Hensel & Menges, 2006; Hensel & Menges, 2008) and opens new investigation fields in relation to the possibility of creating performance - based (Kolarevic, 2003;

Kolarevic & Malkawi, 2005; Grobman & Neuman, 2012; Oxman, 2009), or *performance-oriented* (Hensel, 2013) architectures, (Hensel 2010). The performance requirements, made clear by codes and regulations, to which architecture responds today raise the issue of *performance* as a design *focus* at the centre of the debate. So far, the first digital era has interpreted the performance as a necessary antidote against formal arbitrariness generated by digital processes, or as a representation of a new hyper - functional complexity. Today, they represent an absolute necessity, ethical obligation of the profession. To operate within this scenario, the digital computation and technological innovations of the modern era, such as processes *datification* and the use of genetic optimization algorithms, are essential to ensure that the *performances* do not remain only numerical param-

legata a un'interpretazione responsiva rispetto a caratteristiche locali e variazioni regionali (Yuan, 2015). Per trasferire un'architettura *informata* dal mondo digitale a quello fisico bisogna integrare varie competenze e trasferire tecnologie utilizzate in altri settori nel campo dell'architettura per implementare i processi produttivi standard. La nascita del primo laboratorio di fabbricazione robotica nel 2005 presso l'*ETH*, con la direzione di Gramazio & Kohler, ha segnato un nuovo corso per la fabbricazione digitale in architettura introducendo nuovi paradigmi progettuali presto diventati capisaldi delle principali ricerche sui temi in questione. La macchina generica di derivazione industriale diviene uno strumento progettuale in grado di tramutare i modelli virtuali in sistemi materiali attraverso una connessione diretta tra modello digitale e processo produttivo trasformando il materiale da semplice ricettore passivo a elemento generatore della forma grazie a un processo digitale informato (Gramazio & Kohler, 2014). Le potenzialità di questa metodologia progettuale, estensione dei concetti di *file-to-factory* (Kolarevic, 2003), vengono indagate rispetto a diverse linee di ricerca che hanno in comune lo sviluppo di processi legati alla definizione di architetture informate attraverso un percorso digitale che include la computazione materiale e nuovi metodi di fabbricazione digitale. La relazione digitale-materiale permette di combinare la ricerca su nuovi codici formali con aspetti performativi che garantiscono la possibilità di fabbricare ciò che viene generato nello spazio digitale e applicarlo alla scala dell'architettura (Gramazio & Kohler, 2008). L'integrazione tra architettura informata e le nuove tecnologie di fabbricazione digitale apre un'era basata sulla customizzazione performativa dell'architettura. Lo spazio ibrido di iterazione tra designer e *machina* viene contaminato da altre

eters but represent a source of formal exploration and process information. Hence, the geometrical and formal generation exploration has the achievement of performative parameters that can be optimized in relation to a space of design possibilities (De Landa 2011) defined by the designer himself through a project goal (Kolarevic 2016) that considers the definition of variable and invariable geometric parameters. The generative process offers the opportunity to explore complex and informed geometries in a flexible and fast way, transforming the material from a passive recipient of shape to a design agent, as driving element of the creative process, through the exploration of its mechanical, structural and behavioural features (Menges 2012). The application of the methodology involves the overcoming of the typological paradigm in favour of a continuous formal variation

that changes depending on the conditions around the system it confronts. Thanks to the *data-driven* strategy and the ability to interconnect design and manufacture in a single workflow, the customization of the form can be linked to a responsive interpretation of local and regional variations in characteristics (Yuan, 2015). To transfer an informed architecture from the digital to the physical world you must integrate various skills and transfer technologies used in other areas of architecture to implement standard processes. The birth of the first robotic production plant at the *ETH* in 2005, with the direction of Gramazio & Kohler, marked a new course for the digital fabrication in architecture by introducing new design paradigms that soon became cornerstones of the main researches on the issues in question. The generic industrial machine becomes a design

discipline nell'intento di indagare nuovi metodi di fabbricazione ma anche di stimolare la creatività attraverso un fecondo processo di collaborazione. L'interdisciplinarietà, apre di fatto una fase *post-industriale* nella quale aspetti legati a metodologie di progettazione e produzione analogiche, vengono interrelate con le dirompenti tecnologie digitali.

### Output sperimentali

La metodologia operativa è stata applicata per la costruzione di due architetture sperimentali alla scala 1:1. I padiglioni *Fusta Robotica* e *Digital Urban Orchard*, realizzati nell'ambito del programma *Open Thesis Fabrication 2015*<sup>1</sup> presso lo IaaC, *Institute for Advanced Architecture of Catalunya*, in collaborazione con industrie quali *Serradora Boix*, *Tallfusta Incafast*, *Mecakim*, *Decustik* e *Merefsa*, rappresentano la materializzazione di un nuovo paradigma progettuale basato sull'informazione del processo che vede le performance, ambientali, strutturali e materiali, come elemento guida del processo progettuale. I criteri prestazionali informano il processo computazionale, successivamente esplicitato mediante l'utilizzo di un robot antropomorfo in grado di trasporre nella realtà fisica modelli digitali informati, attraverso setting non industriali e utilizzando elementi irregolari e *low-engineered*.

### Fusta Robotica: material-informed design

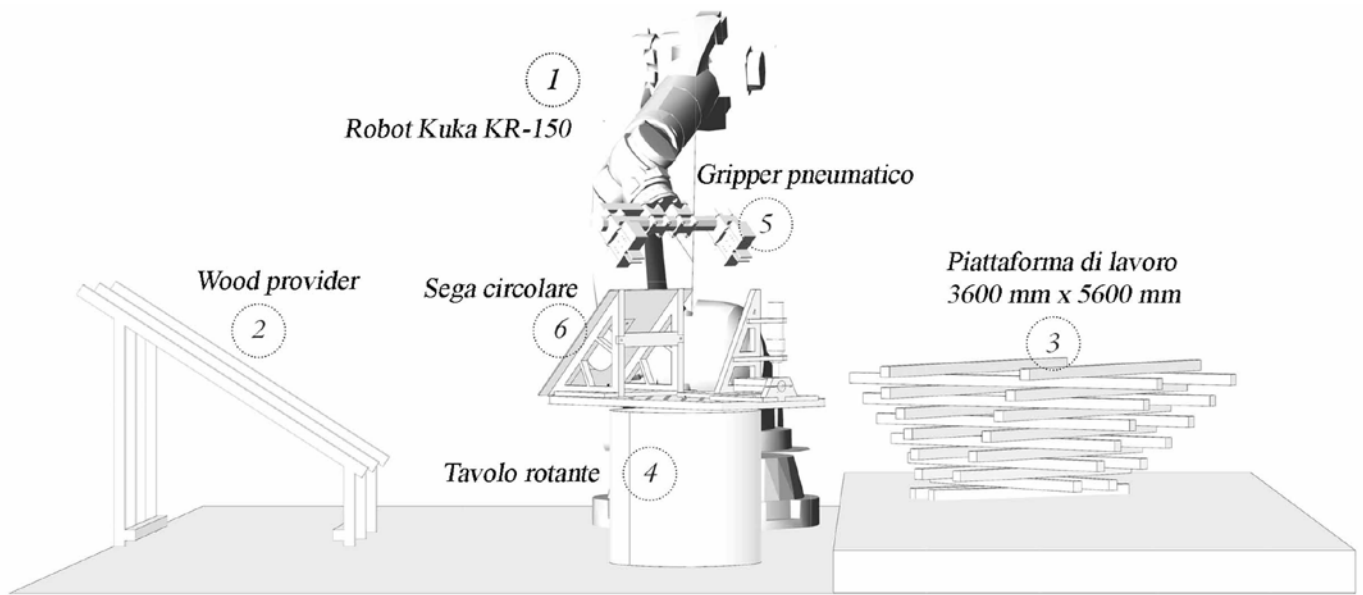
Il padiglione *Fusta Robotica*, prima struttura in legno a basso impatto ambientale realizzata mediante fabbricazione robotica in Spagna, nasce dalla collaborazione tra università, IaaC, *Institute of Advanced Architecture of Catalunya*, e l'industria *Serradora Boix S.r.l.*, come sperimenta-

tool able to convert virtual models in material systems through the direct connection between the digital model and production process. It transforms the material from a passive recipient of shape to a design agent through an informed digital process (Gramazio & Kohler, 2014). The potentials of this design methodology, extension of the *file-to-factory* (Kolarevic, 2003) concepts, are investigated with respect to several lines of research that have in common the development of processes related to the definition of informed architectures through a digital path that includes material and new computation methods of digital manufacturing. The digital-material relationship allows to combine the research of new formal codes with performative aspects that ensure the manufacturability of what is generated in the digital space and apply it to the scale of architecture (Gramazio

& Kohler, 2008). The integration of informed architecture and new digital manufacturing technologies opens an era based on the customization of performative architecture. The hybrid space of interaction between designer and machine is contaminated with other disciplines in order to investigate new methods of manufacture but also to stimulate creativity through a fruitful collaboration process. The interdisciplinary actually opens a post-industrial phase in which issues related to analogue design and manufacturing methods are interrelated with disruptive digital technologies.

### Experimental Outputs

The proposed methodology was applied to build two experimental architecture at 1:1 scale. *Fusta Robotica* and *Digital Urban Orchard* pavilions, realized as part of the *Open Thesis Fabrica-*



zione tettonica da esporre alla *Setmana de la fusta 2015*<sup>2</sup> con l'intento di indagare e mostrare le potenzialità derivate dall'applicazione della computazione digitale e della fabbricazione robotica alla costruzione di strutture lignee. Le finalità della ricerca sottendono alla promozione e valorizzazione del legno catalano, pino mediterraneo, e allo scambio di conoscenze tra accademia e industria per l'innovazione del modello produttivo al fine di sperimentare nuovi codici formali per il progetto sostenibile. Il materiale utilizzato, altamente deformabile e non ingegnerizzato per essere impiegato nelle costruzioni, costituito da semplici profili in legno, irregolari e di piccole dimensioni, viene comunemente utilizzato per la produzione di pallets industriale o di biomassa. I profili a sezione quadrata che l'industria ha messo a disposizione per il progetto presentano le seguenti dimensioni: 38 mm x 38 mm x 2000 mm. Ulteriore aspetto da integrare nel pro-

cesso progettuale è il metodo di fabbricazione e l'area di produzione con i relativi *tools* utilizzati. Per la costruzione del padiglione si è ricorso a un *setting* non industriale, rappresentato da un Robot industriale KuKa KR-150, dotato di *gripper* pneumatico, un dispositivo per lo stoccaggio dei profili in legno e una sega circolare disposta su un tavolo rotante (Fig. 1), all'interno del laboratorio di fabbricazione digitale dell'università (Fig. 2). L'intero processo progettuale è stato informato dalle proprietà meccaniche del materiale, estratte attraverso una serie di sperimentazioni analogiche finalizzate alla comprensione del comportamento del sistema materiale e strutturale. Tra queste, possiamo citare la deformabilità delle aste lignee, dovuta alla variazione della curvatura in seguito al processo di asciugatura, e la scarsa rigidità strutturale dei profili dovuta alle caratteristiche meccaniche del materiale. Anche il metodo di fabbricazione adottato contribuisce ad

tion 2015 program (1) at IaaC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya in collaboration with Serradora Boix, Tallfusta Incajust, Mecakim, Decustik and Merefesa, represent the practice of a new design paradigm based on the information of the process that sees environmental, structural and material performances as a factor driving the entire design process. The performance criteria inform the computational process, subsequently materialized using an anthropomorphic robot that is able to transpose informed digital models into physical reality, through non-industrial settings and using irregular and *low-engineered* elements.

#### Fusta Robòtica: material - informed design

The *Fusta Robòtica*<sup>1</sup> pavilion is the first low environmental impact wooden structure built using robotic manufac-

turing in Spain. It was born from a collaboration between the IaaC, Institute of Advanced Architecture of Catalunya and Serradora Boix Srl as a tectonic testing to be exposed at the *Setmana de la fusta 2015* (2), with the intent to show the potential derived from the application of digital computation and robotics manufacturing in the construction of wooden structures. The objectives of the research were represented by the promotion and enhancement of the Catalan wood, Mediterranean pine timber, by an exchange of knowledge between industries and research centres for the innovation of the production of the model in order to test new formal codes for a sustainable design. The material used, highly deformable and non-engineered to be used in construction, consists of small simple and irregular wooden profiles and is used for the production of in-



02 | Laboratorio di fabbricazione robotica, Robot cell, IaaC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya, foto di Andrea Quartara.  
Robotics manufacturing lab, Robot cell, IaaC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya, picture by Andrea Quartara.



03 | Padiglione Fusta Ròbotica installato alla *Setmana de la Fusta* di Barcellona, e processo di sviluppo formale dell'iperboloide, in cui la rotazione di elementi geometrici continui ha generato la configurazione spaziale dinamica, elaborazione di Angelo Figliola.

*Fusta Ròbotica Pavilion installed at Setmana de la Fusta 2015 in Barcelona and formal development process of the hyperboloid, where the rotation of continuous geometric elements created the dynamic spatial configuration, developed by Angelo Figliola, designed by OTF research group.*

informare il processo progettuale, mediante le dimensioni minime e massime dei profili che possono essere lavorati e dei componenti che possono essere aggregati in relazione all'area di lavoro, alle caratteristiche del robot e alla loro maneggevolezza. In relazione a ciò, è stato informato il processo progettuale utilizzando le *performance* materiali come input progettuale. Attraverso l'utilizzo di una struttura ridondante, iperstatica, è possibile evitare problemi strutturali dovuti all'eccessiva curvatura dei profili in legno mentre per massimizzare la sezione resistente dei componenti in corrispondenza dei nodi strutturali, sono stati utilizzati dei giunti chiodati anziché incastri. Inoltre, la discretiz-

zazione della forma in otto sezioni di spessore costante, ha permesso di ottimizzare lo spazio di lavoro della *robot cell*, evitando problemi di collisione, oltre a ottimizzare il peso e agevolare l'assemblaggio. Costituito da circa 1000 profili a sezione quadrata, il padiglione, nasce dall'elaborazione di una geometria complessa, iperboloidi, in cui la rotazione di elementi geometrici continui ha permesso di ottenere una configurazione spaziale dinamica da utilizzare come manifesto delle potenzialità risultanti dall'impiego del materiale nella realizzazione di strutture complesse (Fig. 3). In parallelo allo sviluppo di test analogici sul sistema materiale, è stato sviluppato l'algoritmo<sup>3</sup> per trasportare i solidi 3D

dustrial or biomass pallets. The square section profiles the industry has made available for the project have the following dimensions: 38 mm x 38 mm x 2000 mm. Another aspect to be integrated in the design process is the method of production and the production area with their *tools*. The pavilion was built using a non-industrial setting, represented by a Kuka KR-150 industrial robot equipped with pneumatic gripper, a device for the storage of the wooden profiles and a circular saw arranged on a rotary table (Fig. 1), within the university digital fabrication laboratory (Fig. 2). The entire design process was informed by the mechanical properties of the material that were extracted through a series of analog tests necessary to the understanding of the material and structural system behaviour. Among these, we can mention the excessive bending of

the wooden profiles, due to the variation of the curvature following the drying process, and the lack of structural rigidity of the profiles due to the mechanical characteristics of the material. The manufacturing method adopted also contributes to inform the design process, using the minimum and maximum workable dimensions of profiles and components that can be aggregated depending on the work area, the characteristics of the robot and their handling. In relation to this, the design process was informed using the material performances as a design input. It is possible to avoid structural problems due to excessive bending of the wooden profiles using a redundant, hyper static structure. To maximize the resistant section of the components, in correspondence of the structural nodes, we used nailed joints. The discretization of the shape

in eight sections with a constant thickness has allowed optimizing the working space of the *robot cell* avoiding collision problems, optimizing weight and facilitating assembly. The pavilion, formed by about 1000 square section wooden profiles, is the result of the elaboration of a complex geometry, hyperboloid, in which the rotation of geometric continuous elements has allowed to obtain a dynamic spatial configuration to be used as the manifesto of the potentials resulting from the use of material in the production of complex structures (Fig. 3). In parallel with the analog test development on the material system, the algorithm (3) was developed to transpose the 3D solids of the digital model in simple geometric elements, such as lines and planes, necessary for the definition of the various processing stages. Thanks to the direct connection between the

parametric model and tool manufacturing, the various stages of the production process have been defined. They can be summarized as follows (Fig. 4):

- Taking of the wooden profiles from the storage device;
- Cutting of profiles to the corresponding size of the digital model;
- Profile deposit on the assembly platform;

Each stage of production included the manufacture of a half-arch to facilitate the operations of manual assembly and the transport to the installation site. At the end of the production process 940 pieces of wood in 8 arches, divided into 16 parts were processed and assembled in 35 hours of production. The eight sections that make up the roof were assembled at the university laboratory and aggregated on the site of the installation.



del modello digitale in elementi geometrici semplici, come linee e piani, necessari per la definizione delle varie fasi di lavorazione. Grazie alla connessione diretta tra modello parametrico e strumento di fabbricazione, sono state definite le varie fasi del processo produttivo, che possono essere così sintetizzate (Fig. 4):

- Presa dei profili in legno dal dispositivo di stoccaggio;
- Taglio dei profili rispetto alle dimensioni corrispondenti del modello digitale;
- Deposito del profilo sulla piattaforma predisposta all'assemblaggio.

Ogni fase di produzione ha interessato la fabbricazione di mezzo arco per facilitare le operazioni di assemblaggio manuale e trasporto al sito d'installazione. Al termine del processo produttivo sono state lavorate e assemblate 940 aste di legno in 8 archi, suddivisi in 16 parti, con 35 ore di produzione. Le otto sezioni che costituiscono il padiglione sono state assemblate presso il laboratorio universitario e aggregate sul sito dell'installazione.

#### Digital Urban Orchard: form follows data flow

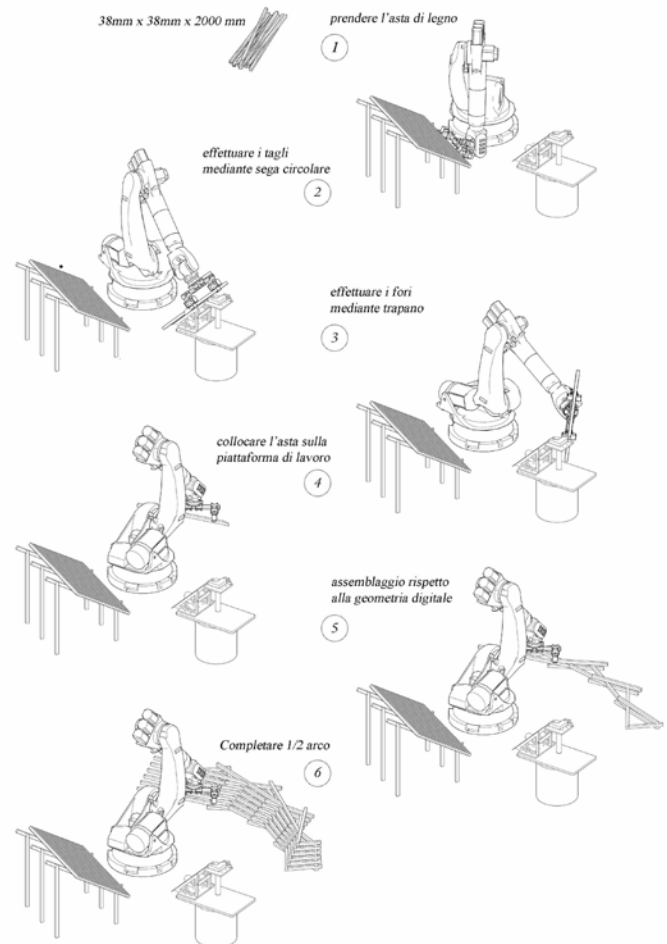
Il progetto di ricerca *Digital Urban Orchard* (Fig. 5) prevede la realizzazione di un prototipo

funzionale da implementare negli spazi pubblici urbani, all'interno dell'agenda legata alla *self-sufficiency* della città di Barcellona, che nasce dalla relazione tra forma, funzione e contesto applicativo per un nuovo concetto di spazio di socializzazione e produzione di cibo. Il padiglione è completato da un impianto di coltivazione idroponica, seconda fase del progetto, e prevede l'installazione di una pelle adattiva in silicone in grado di garantire le condizioni di confort indoor necessarie alla crescita delle colture (Fig. 6). La necessità di progettare una struttura stabile ma legge-

#### Digital Urban Orchard: form follows data flow

The *Digital Urban Orchard* research project (Fig. 5) involves the construction of a functional prototype to be implemented in urban public spaces within the *self-sufficiency* programme of the city of Barcelona, which stems from the relation among form, function and application context for a new concept of space of socialization and food production. As second part of the project, the pavilion hosts a hydroponic cultivation system and an adaptive silicone skin able to ensure the indoor comfort conditions that are essential for the plants growth (Fig. 6). The need to design a stable yet lightweight structure and to ensure maximum solar gain for a proper growth of crops, at the same time, required multiple responsiveness able to get the proper compliance with the performance required by each

of the single parameters listed above. To integrate the functional, structural and environmental-energy performance criteria, and inform the design process, the *data-driven* strategy was necessary to correctly set the genetic optimization by defining the genotype, the geometrical characteristics of the shape and the phenotype or quantitative parameters by which the genotype can be modified. The flexibility of the parametric model allowed to structure the meta project through the clarification of invariable parameters and genotype variable geometric data, which may vary within a range aptly defined by the designer in relation to the values of the phenotype or rather quantitative parameters of performance analysis. The final shape has been selected from a catalogue of design solutions (Fig. 7), the result of genetic optimization and creative process which included the in-



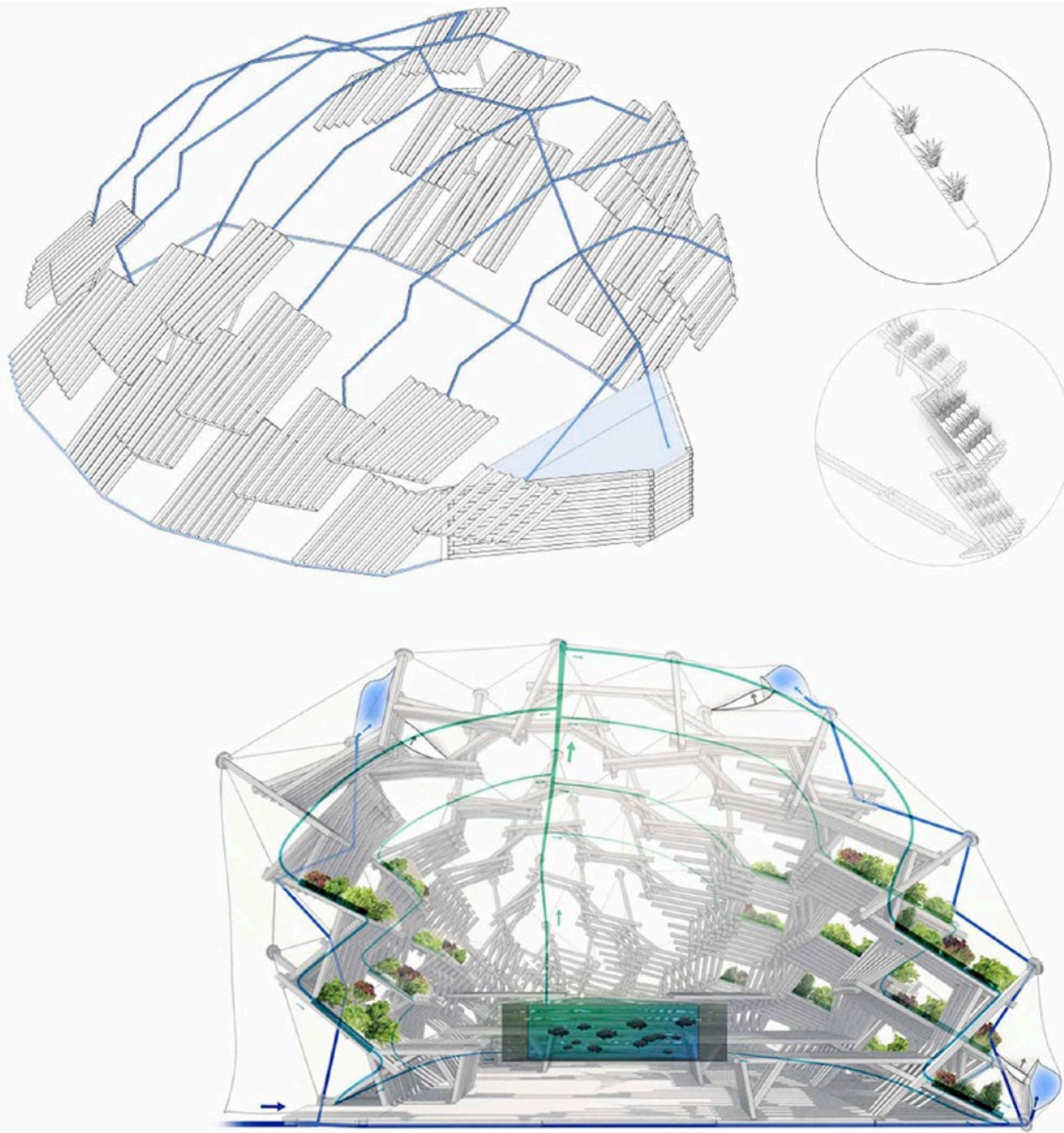
04 | Processo di fabbricazione robotica con indicazioni delle fasi consequenziali di costruzione del mezzo arco: presa dei profili, taglio delle aste in relazione alla dimensione corrispondente al modello digitale, foro mediante trapano e, infine, posizionamento sulla piattaforma di lavoro, disegno di Angelo Figliola.

*Robotic manufacturing process with details of consequential steps of construction of the half-arch: profiles, cutting the profiles depending on the size on the digital model, drill hole and finally placement on the work platform, developed by Angelo Figliola, designed by OTF research group.*



05 | Padiglione *Digital Urban Orchard* installato sulla copertura piana dell'università, foto di Andrea Quartara.

*Digital Urban Orchard Pavilion installed on the university roofing laaC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya, picture by Andrea Quartara.*



06 | Diagramma di funzionamento del sistema idroponico che prevede l'installazione di una vasca con pesci in grado di depurare l'acqua e sostituire la presenza di filtri e l'utilizzo di fertilizzante per la crescita delle piante, elaborazione di Angelo Figliola.

Hydroponic system function diagram that includes the installation of a tank with fish able to purify water and replace filters and the use of fertilizer for plant growth, developed by Angelo Figliola, designed by OTF research group.

tegration of different parameters:

- values of solar radiation on the surface of the housing;
- values of solar radiation on the inclined surfaces where the plants are placed;
- wind pressure on the outer surface;
- minimum and maximum size of wood profiles that can be made with respect to the *setting* used;
- mechanical and physical properties of materials.

The process of genetic optimization was handled varying the geometric curves, two base ones on the x, y plane and a higher one, from which a surface is generated by the creation of a Loft and the inclination of planes that host the hydroponic system. The analysis of solar radiation on an annual basis, and the subsequent optimization, have made it possible to determine the overall shape and inclination of wooden

shafts that host the hydroponic system. In parallel to the process described and thanks to a *form searching* process, the CFD analysis allowed minimizing the wind pressure on the outer surface of the pavilion in order to ensure the structural balance. The structural principles adopted are the same as those used in the Fusta Robotica pavilion: the hyper static structural pattern, generated by the alternation of diagonals and elements able to ensure structural rigidity, is a complex system that performs the structural function. It is designed as a support plan for the hydroponic system, as support for the silicone skin and as space-functional furniture. The density of the structural pattern responds to optimization logics for solar access into interior spaces and considers almost total transparency at the top of the pavilion (Fig. 8). The final shape has been discretized through

6 types of sections, for 12 components total. Three manufacturing strategies have been defined depending on the size of the sections and the work platform. They involve the construction of the entire section or the assembly of two/three parts of the final section with a total of 30 assembled parts (Fig. 9). To maximize the resistant section we used 2,524 nails in nailed joints with a collaborative process between manufacturing robotic and manual finishing. The structural analysis, conducted in cooperation with the engineering firm *Windmill* - project partner on a typical section under various load conditions, has allowed validating the structural choice made despite showing a high displacement due to the horizontal pressure of the wind in extreme conditions as set forth by the legislation. Thanks to the experience of the Fusta Robotica pavilion, the production pro-

cess was implemented at all stages in order to reduce material consumption and expand the *range* of achievable geometry. Implementations concerned the customization of *end effector*, *pneumatic gripper* and *tools* used for the production such as the circular saw and the device for the storage of wooden profiles (Fig. 10). The customization of the circular saw has allowed to create spatial cuttings in three dimensions. Thanks to a new *wood provider*, the length of the profiles was diversified in order to reduce waste material. Realized with 1681 profiles, the pavilion is the result of 52 hours of robotic and 24 hours of manual assembly coming from the information of the process and the optimization of the performance completed in a production process that can control the complexity and transform it into design opportunities while ensuring rapid execution, automation



07 | Catalogo di soluzioni progettuali in relazione ai parametri performativi definiti come guida del processo progettuale: nello specifico ogni generazione formale è guidata dalla massimizzazione della radiazione solare incidente sulla superficie esterna e sui piani in cui è disposto il sistema idroponico, e dalla minimizzazione della pressione del vento sulla superficie esterna, disegno di Angelo Figliola.

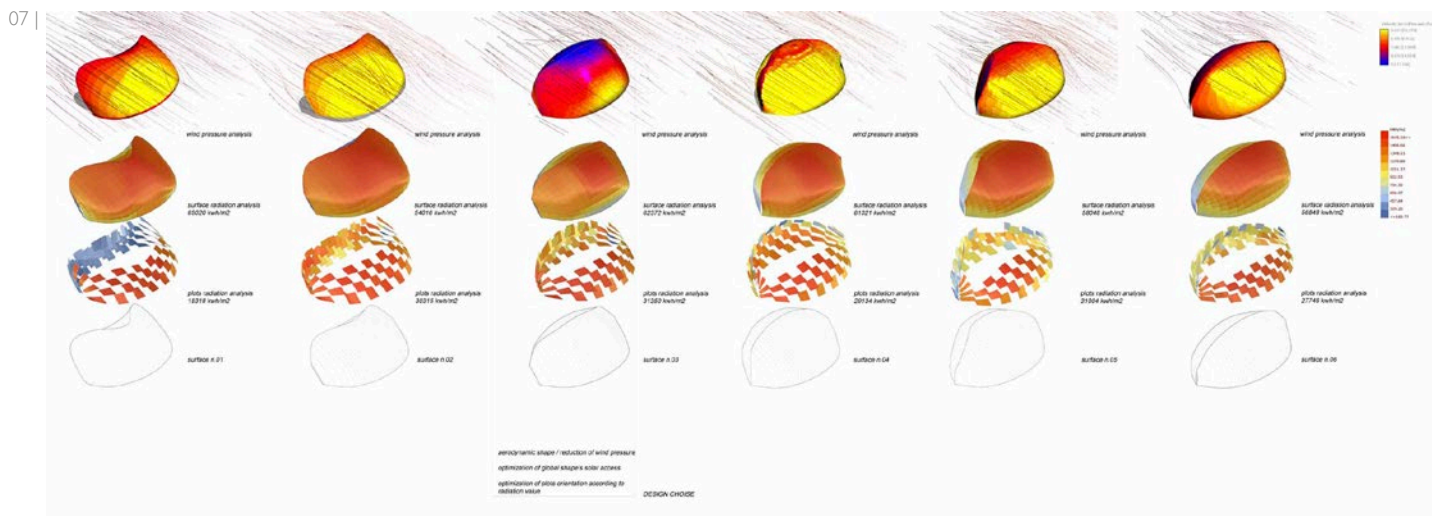
*Catalogue of design solutions in relation to the performative parameters defined as a guide in the design process: in particular, every formal generation is driven by the maximizing of solar radiation on the outer surface and on the planes where the hydroponic system is, and the minimization of the wind pressure on the outer surface, designed by Angelo Figliola.*

ra e allo stesso tempo di garantire il massimo apporto solare, per assicurare la corretta crescita delle colture, ha richiesto una responsabilità molteplice in grado di ottenere la corretta rispondenza alle performance richieste da ognuno dei singoli parametri sopra elencati. Per integrare i criteri relativi alle performance funzionali, strutturali ed energetico-ambientali, e informare il processo progettuale, si è ricorso alla strategia *data-driven*, necessaria per impostare correttamente l'ottimizzazione genetica mediante la definizione del genotipo, caratteristiche geometriche della forma, e del fenotipo ovvero dei parametri quantitativi in base ai quali modificare il genotipo. La flessibilità del modello parametrico ha permesso di strutturare il meta progetto attraverso l'esplicitazione dei parametri invariabili e dei dati geometrici variabili, genotipo, che possono variare all'interno di un *range* opportunamente definito dal progettista, in relazione ai valori del fenotipo, ovvero rispetto a parametri quantitativi delle analisi delle performance. La forma finale è stata selezionata da un catalogo di soluzioni progettuali (Fig. 7), risultato del processo creativo e dell'ottimizzazione genetica, che ha previsto l'integrazione di differenti parametri:

- Valori di radiazione solare incidente sulla superficie d'involucro;
- Valori di radiazione solare incidente sulle superfici inclinate in cui sono disposte le piante;
- Pressione del vento sulla superficie esterna;
- Dimensione minime e massime dei profili in legno che è possibile fabbricare rispetto al *setting* utilizzato;
- Caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali.

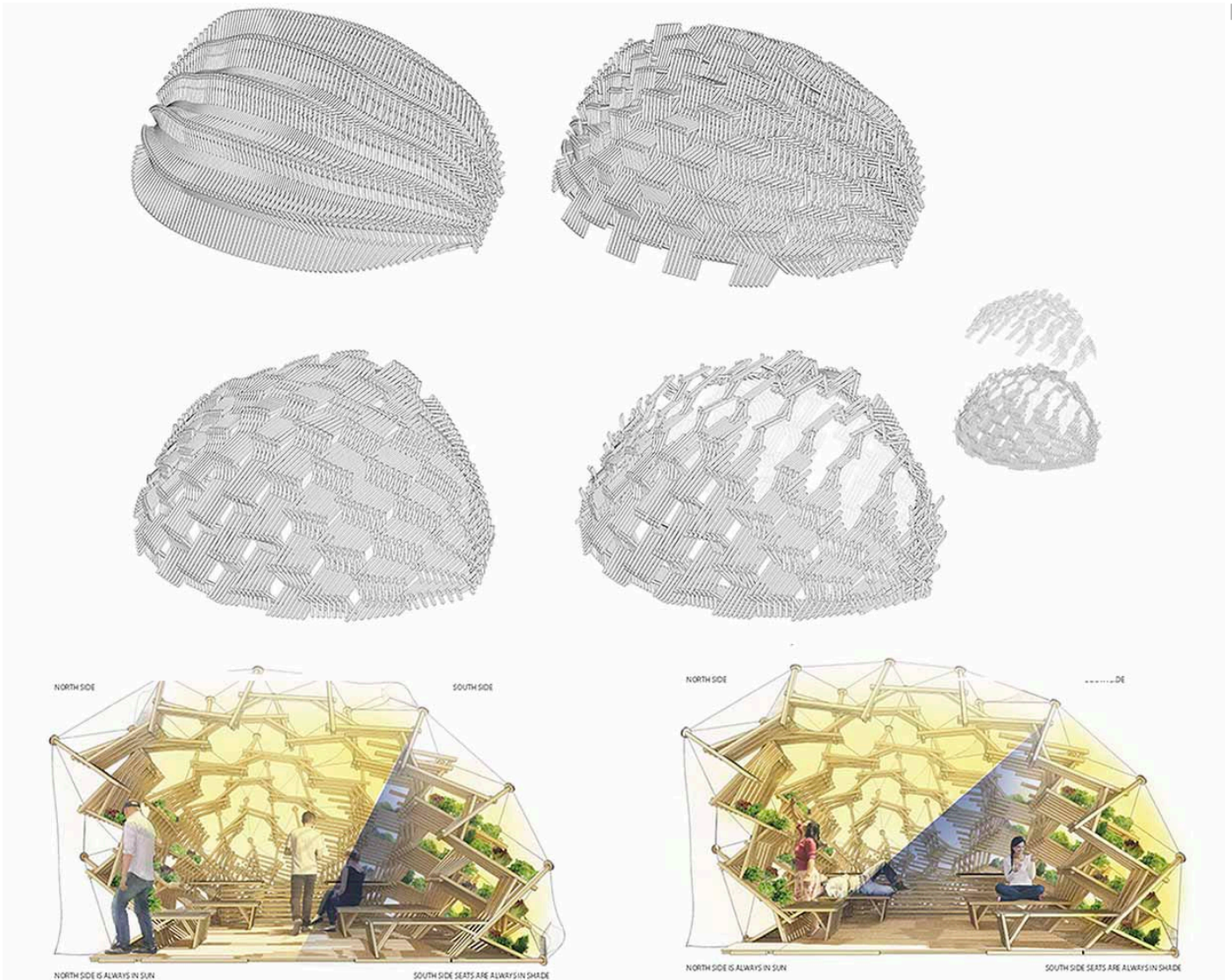
Il processo di ottimizzazione genetica è stato gestito mediante la variazione geometrica delle curve, due di base sul piano x, y

e una in elevato, dalle quali viene generata la superficie mediante un'operazione di Loft, e dall'inclinazione dei piani che ospitano l'impianto idroponico. L'analisi della radiazione solare su base annuale, e la successiva ottimizzazione, hanno permesso di determinare la forma globale e l'inclinazione delle aste di legno che ospitano l'impianto idroponico. In parallelo al processo descritto, è stata condotta l'analisi CFD che ha permesso, grazie a un processo di *form searching*, di minimizzare la pressione del vento sulla superficie esterna del padiglione per ridurre i carichi strutturali agenti sullo stesso. I principi strutturali adottati sono gli stessi utilizzati nel padiglione Fusta Robotica: il pattern strutturale iperstatico, generato dall'alternanza tra diagonali ed elementi in grado di garantire rigidità strutturale, costituisce un sistema complesso, che oltre ad assolvere la funzione strutturale, è progettato come sistema di sostegno per l'impianto idroponico, come supporto per la pelle in silicone e come complemento di arredo funzionale allo spazio. La densità del pattern strutturale risponde a logiche di ottimizzazione dell'accesso solare negli spazi interni e prevede la quasi totale trasparenza nella parte superiore del padiglione (Fig. 8). La forma finale è stata discretizzata attraverso 6 tipologie di sezioni, per un totale di 12 componenti. In relazione alla dimensione delle sezioni, e alla piattaforma di lavoro, sono state definite tre strategie di fabbricazione che prevedono la costruzione dell'intera sezione, o dell'assemblaggio di due o tre parti della sezione finale, per un totale di 30 parti assemblate (Fig. 9). Per massimizzare la sezione resistente sono stati utilizzati dei giunti chiodati, impiegando 2.524 chiodi, attraverso un processo combinato di fabbricazione robotica e assemblaggio manuale. L'analisi strutturale, condotta in collaborazione con lo studio d'ingegneria *Windmill*, partner del progetto, su una



sezione tipo rispetto a diverse condizioni di carico ha permesso di validare la scelta strutturale, seppur evidenziando uno spostamento elevato in mezz'ora dovuto alla pressione orizzontale del vento nelle condizioni estreme dettate dalla normativa. Grazie all'esperienza del padiglione Fusta Robotica, il processo produttivo è stato implementato in tutte le sue fasi al fine di ridurre il consumo di materiale ed espandere il *range* delle geometrie realizzabili. Le implementazioni hanno interessato la customizzazione dell'*end effector*, *gripper* pneumatico, e dei *tools* impiegati per la produzione come la sega circolare e il dispositivo per lo stoccaggio delle aste di legno (Fig. 10). La customizzazione della sega circolare ha permesso di realizzare tagli spaziali, nel-

le tre dimensioni, mentre grazie ad un nuovo *wood provider* è stato possibile diversificare la lunghezza delle aste per ridurre il materiale di scarto prodotto. Realizzato da 1,681 aste in legno, il padiglione è il frutto di 52h di fabbricazione robotica e 24h di assemblaggio manuale, conseguente all'informazione del processo e all'ottimizzazione delle performance, grazie ad un processo produttivo in grado di controllare la complessità e trasformarla in opportunità progettuale, pur garantendo rapida d'esecuzione, automazione e riducendo al solo 2% il materiale di scarto. Infine, in fase di costruzione la produzione dell'involucro in silicone ha beneficiato della collaborazione con l'industria produttrice di silicone *Merefsa s.r.l* che ha fornito il materiale necessario e gli

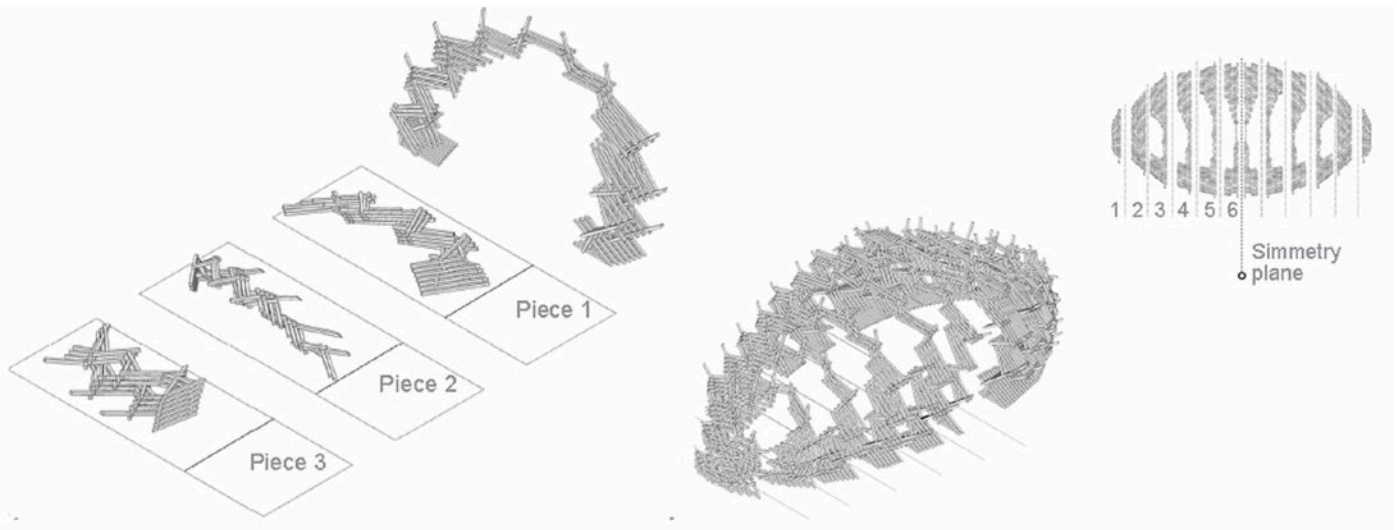




09 | Implementazione dell'area di lavorazione per il progetto *Digital Urban Orchard*: customizzazione della sega circolare per effettuare tagli tridimensionali, personalizzazione del dispositivo di stoccaggio per diminuire il materiale di scarto, attraverso disegno di Andrea Quartara.

Implementation of the working area for the project *Digital Urban Orchard*: customization of the circular saw to make three-dimensional cuts and of the storage device to reduce the waste material, designed by Andrea Quartara.

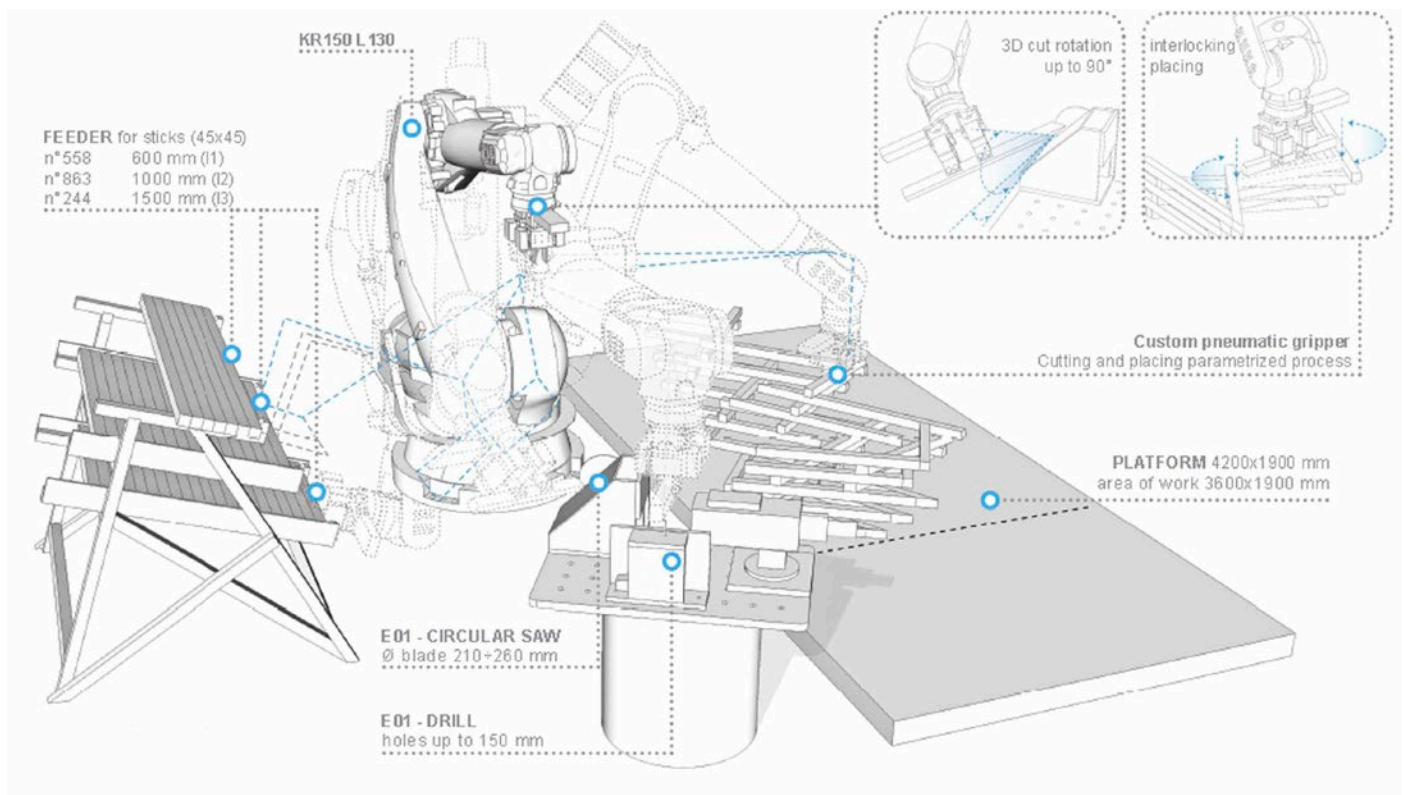
09 |



10 | Discretizzazione della forma per il processo produttivo mediante tre tipologie di sezione per un totale di 30 componenti, disegno di Angelo Figliola.

Discretization of the shape for the production process by means of three types of section for a total of 30 components, designed by Angelo Figliola.

10 |



and only 2% of material waste. Finally, during construction, the silicone wrap production benefited from the collaboration with the silicone industry *Merefa s.r.l.* that provided the necessary material and laser cutting tools for the proper production of components.

### Conclusions

Through experimental *outputs*, the possibility to transfer the design complexity of the digital space, derived from *performances* optimization processes in architectural organisms at 1:1 scale was verified to define the poten-

tial and critical issues. The integration of computational optimization processes and innovative production technologies allow to use the material according to the information of processes and performative parameters, used to guide the design process. In this regard,

the additive processes represent the most productive method that is suitable to optimize the material resources: the possibility to compose generic elements, considering all degrees of freedom of movement that the instrument provides, promotes the exploration of

strumenti di taglio laser per la corretta produzione dei componenti.

## Conclusioni

Attraverso gli *output* sperimentali è stata verificata la possibilità di trasferire la complessità progettuale dello spazio digitale, derivata dai processi di ottimizzazione delle *performance*, nella costruzione di organismi architettonici alla scala 1:1 per analizzarne le potenzialità e le criticità. L'integrazione di processi di ottimizzazione computazionale e tecnologie produttive innovative, permettono di impiegare il materiale in base all'informazione dei processi e ai parametri performativi, assunti come guida del processo progettuale. Al riguardo, i processi additivi rappresentano la metodologia produttiva che più si presta all'ottimizzazione delle risorse materiali: la possibilità di comporre elementi generici considerando tutti i gradi di libertà di movimento che lo strumento offre, favorisce l'esplorazione di sistemi aggregativi complessi, per componenti edilizi *high-performance*, gestiti mediante algoritmi. Un'ulteriore implementazione è rappresentata dalla reintroduzione in ambito progettuale di materiali vernacolari, come il legno, e di approcci *low-engineered*, che agevolano lo sviluppo di nuovi codici formali per il progetto sostenibile in grado di estendere il concetto di *performance* alle prestazioni dei materiali utilizzati, considerati in relazione all'intero ciclo di vita degli edifici. Passando dai materiali all'organizzazione del processo produttivo, i risultati ottenuti hanno evidenziato le potenzialità della fabbricazione digitale nella materializzazione della complessità progettuale, utilizzando *setting* non industriali, all'interno di laboratori universitari e *FabLab*. L'efficienza dei processi produttivi viene garantita dalla potenza dello strumento utilizzato che permette di ridurre i

tempi e i costi di produzione oltre a ottimizzare l'impiego di risorse umane nell'intera filiera produttiva. L'analisi dei processi ha anche evidenziato il limite principale della metodologia operativa nella gestione delle tolleranze derivate dall'imprecisione del processo produttivo, in assenza di strumentazioni complesse basate su sensori e strategie *feedback loop*. Il ricorso alla fabbricazione robotica favorisce lo sviluppo di un pensiero tecnologico basato sulla prefabbricazione di sistemi costruttivi da realizzare a secco e completamente reversibili grazie all'utilizzo di materiali eco compatibili e soprattutto riciclabili. Il potenziale maggiore, per quello che riguarda il processo produttivo, è rappresentato dalla realizzazione di unità e sistemi tecnologici, la cui dimensione minima e massima è legata alle caratteristiche dello strumento utilizzato, da aggregare sul sito di progetto con processi a secco, riducendo al minimo il dispendio di risorse notoriamente elevato per questa fase del progetto architettonico. Tale aspetto potrà essere ulteriormente implementato con l'introduzione degli strumenti operativi direttamente sul sito di progetto che, di fatto, annullerebbe anche il consumo di risorse legato al trasporto dei componenti. Ciò favorirebbe la sperimentazione di sistemi di aggregazione innovativi in grado di esaltare i parametri performativi dell'architettura e allo stesso tempo stimolare la creatività progettuale al fine di superare la prefabbricazione industriale aperta che caratterizza i processi progettuali contemporanei. La flessibilità dei modelli parametrici permette di indagare e gestire la complessità che deriva dall'aggregazione dei componenti. Gli aspetti legati al materiale e alle tecnologie di fabbricazione digitale, congiuntamente alla nozione di architettura informata, rappresentano le principali innovazioni della metodologia proposta in quanto reintroducono aspetti del progetto che la prima era digitale ha identificato come

complex aggregative systems for *high-performance* building components, managed by algorithms. A further implementation is represented by the reintroduction of vernacular materials in designing, such as wood, and by *low-engineered* approaches that facilitate the development of new formal codes for the sustainable design that are able to extend the concept of *performance* to the materials used, considered in relation to the entire life cycle of buildings. Going from materials to the organization of the production process, the results showed the potential of digital fabrication in the development of the design complexity, using non-industrial setting in university laboratories and *FabLab*. The efficiency of production processes is guaranteed by the power of the instrument used that allows to reduce time and production costs as well as optimize the use of human re-

sources in the entire production chain. The analysis of processes has also highlighted the main limit of the operating method in the management of the derivatives tolerances given by the imprecision of the production process, without complex instrumentation based on sensors and *feedback loop* strategies. The use of robotic manufacturing supports the development of a technological thought based on the prefabrication of building systems to be realized "dry" and completely reversible through the use of eco-friendly and especially recyclable materials. The greatest potential, for what concerns the production process, is represented by the realization of units and technological systems whose minimum and maximum size is linked to the characteristics of the instrument used, to be aggregated on the project site through dry processes, minimizing the notoriously high expenditure of

resources for this stage of the architectural design. This aspect could be further implemented with the introduction of operating instruments directly on the project site which, in fact, would even terminate the consumption of resources associated with the transport of components. That would encourage the testing of innovative aggregation systems that enhance the performative architecture parameters and, at the same time, stimulate design creativity in order to overcome the open industrial prefabrication featuring contemporary design processes. The flexibility of parametric models allows to examine and manage the complexity resulting from the aggregation of components. Aspects related to material and digital manufacturing technologies, together with the notion of informed architecture, are the main innovations of the proposed methodology as they rein-

troduce aspects of the project that the first digital era had identified as consequential and non-integrated processes. The informed architecture leads to the integration of the parameters concerning geometry, material and manufacturing from the *early stage* phase of the project giving two direct consequences: the reduction of the space of design possibilities relating to the power of digital computation and the introduction of the manufacturability limit that binds the digital model to the physical space. Further developments concern the quantitative analysis of the benefits arising from the adoption of the project methodology in the context of environmental certification protocols in the entire design process, with a *focus* on the performance of materials and the construction phase, as well as the quantification of the impact on grey or hidden energy of processes.

processi consequenziali e non integrati. L'architettura informata, induce all'integrazione dei parametri relativi alla geometria, al materiale e alla fabbricazione sin dalla fase *early stage* del progetto con due conseguenze dirette: la riduzione dello spazio delle possibilità progettuali rispetto alla potenza della computazione digitale e l'introduzione del vincolo di producibilità che lega il modello digitale allo spazio fisico. Ulteriori sviluppi riguardano l'analisi quantitativa dei benefici che derivano dall'adozione della metodologia progettuale nell'ambito dei protocolli di certificazione ambientale nell'intero processo progettuale, con *focus* sulle performance dei materiali e sulla fase di cantiere, nonché sulla quantificazione dell'impatto sull'energia grigia o nascosta dei processi.

#### NOTE

<sup>1</sup> Programma professionale post-laurea erogato dallo IAAC, *Institute of Advanced Architecture of Catalunya*.

<sup>2</sup> *Setmana de la Fusta*, è una fiera espositiva annuale che si svolge a Barcellona che promuove l'utilizzo del legno catalano.

<sup>3</sup> Per la realizzazione del modello 3D è stato utilizzato il software Rhinoceros™, mentre per la generazione del codice necessario ad informare il robot si è utilizzato Kuka | PRC e il plug in di *visual scripting* Grasshopper.

#### RESEARCH TEAM

Students: Josep Alcover, Andrea Quartara, Angelo Figliola, Yanna Haddad, Ji Won Jun, Monish Kumar, Nada Shalaby, Fathimah Sujna Shakir e Mohamad Mahdi Najafi.

Faculty: Areti Markopoulou, Alexandre Dubor, Silvia Brandi, Djordje Stojanovic, Maria Kuptsova.

#### NOTES

<sup>1</sup> Professional Postgraduate Program of IAAC, *Institute of Advanced Architecture of Catalunya*.

<sup>2</sup> *Setmana de la Fusta* is an annual trade fair which takes place in Barcelona promoting the use of Catalan wood.

<sup>3</sup> For the making of the 3D model we used Rhinoceros™ software, while for the generation of the code necessary to inform the robot we used Kuka | PRC and plug in *visual scripting* Grasshopper.

#### REFERENCES

Deutsch, R. (2015), *Data-driven design and construction: 25 strategies for capturing, analyzing and applying building data*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken.

Frazer, J. (2015), "Parametric Computation", *AD Architectural Design*, No. 240, pp. 18-24.

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

Gramazio, F., Kohler, M., Willmann, J. (2014), *The robotic touch: how Robots change architecture*, Park Books, London.

Grobman, Y., Neuman, E. (2012), *Performatism: Form and Performance in Digital Architecture*, Routledge, London and New York.

Hensel, M.U., Menges, A. (2006), *Morpho-Ecologies*, Architectural Association, London.

Hensel, M.U., Menges, A. (2008), "Versatility and Vicissitude Performance", *AD Architectural Design*, Vo. 78, No.2, pp. 6-11.

Hensel, M.U. (2013), *Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment*, Wiley, Chichester, West Sussex.

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

Kolarevic, B., Malkawi, A. (2005), *Performative architecture: beyond instrumentality*, Spon Press, New York.

Kolarevic, B. (2015), "From Mass Customisation to Design 'Democratisation'", *AD Architectural Design*, No. 238, pp. 48-54.

Menges, A. (2012), "Material Resourcefulness: activating material information in architectural design", *AD Architectural Design*, No.216, pp. 34-44.

Oxman, R. (2009), "Performative design: A performance-based model of digital architectural design", *Environment and Planning B Planning and Design*, Vol. 36, No. 6, pp. 1026-1037.

Schumacher, P. (2015), "Parametricism 2.0", *AD Architectural Design*, No. 240, pp. 8-13.

Yuan, P. (2015), "Parametric Regionalism", *AD Architectural Design*, No. 240, pp. 92-100.

#### GRUPPO DI RICERCA

OTF research team 2015/2016. Josep Alcover, Andrea Quartara, Yanna Haddad, Ji Won Jun, Monish Kumar, Nada Shalaby, Fathimah Sujna Shakir e Mohamad Mahdi Najafi. Faculty: Areti Markopoulou, Alexandre Dubor, Silvia Brandi, Djordje Stojanovic.