

Ornella Iuorio,

Scuola di Ingegneria Civile, Università di Leeds, Regno Unito

o.iuorio@leeds.ac.uk

Abstract. Competenze e conoscenze multidisciplinari hanno caratterizzato per secoli le costruzioni storiche. La necessità di ripensare il modo in cui progettiamo e realizziamo l'ambiente costruito in risposta ai cambiamenti climatici richiede una ri-convergenza delle conoscenze. Lo sviluppo di pratiche multidisciplinari e piattaforme di comunicazione digitale sta consentendo una nuova transizione. Il cross-over di conoscenze è certamente evidente nella progettazione e realizzazione di shell. Le tecnologie digitali stanno facilitando le sperimentazioni di geometrie complesse per shell, un uso più sapiente dei materiali e lo sviluppo di nuovi processi di costruzione. Questo articolo partendo da un'evoluzione storica delle strutture a guscio, discute l'importanza degli approcci multi-disciplinari, attraverso la presentazione di un prototipo di shell sviluppato per una competizione internazionale.

Parole chiave: Shell; Progettazione digitale; Fabbricazione digitale; Embodied carbon; Decostruzione.

Introduzione

I cambiamenti climatici richiedono una revisione critica dell'intero settore edilizio. L'ambiente costruito è responsabile di circa il 40% di emissioni di gas serra (Abergel *et al.*, 2017) e, in quanto tale, la riduzione degli impatti ambientali è uno degli obiettivi principali delle politiche energetiche a livello mondiale (Iuorio *et al.*, 2019). Il settimo programma europeo di azione ambientale indica che la prosperità e la salute dell'ambiente richiedono un'economia innovativa e circolare in cui nulla viene sprecato e dove le risorse naturali sono gestite in maniera sostenibile (EAP, 2014).

Pertanto, è di primaria importanza ripensare il modo in cui progettiamo e realizziamo l'ambiente costruito per ottimizzare sia l'utilizzo di energia (*operational energy*) che l'*embodied carbon*. Mentre, molti passi in avanti sono stati fatti in termini di riduzione dell'energia operativa, molto poco è stato raggiunto in termini di riduzione dell'*embodied carbon* di edifici, strutture e infrastrutture. Il termine "*embodied carbon*" indica le emissioni di

gas serra nel ciclo di vita associate alla realizzazione e trasporto di materiali e componenti per le costruzioni, al processo costruttivo e al fine ciclo di vita incluso demolizione, re-uso e riciclo. Una riduzione di *embodied carbon* per gli edifici richiede: l'ottimizzazione dei sistemi strutturali, l'utilizzo mirato dei materiali, la circolarità dei sistemi, e l'estensione del fine vita attraverso re-uso e riciclo.

La modellazione parametrica consente l'analisi di una vasta gamma di geometrie, e il corrispondente comportamento strutturale fin dai primi stadi di progettazione, consentendo un più cosciente utilizzo dei materiali nel pieno rispetto delle performance strutturali (Bletzinger and Ramm, 2014). Inoltre, facilita l'integrazione dei processi di produzione e le limitazioni costruttive nei primi stadi della progettazione. L'adozione di modellazione parametrica e di tecniche di realizzazione digitale può favorire lo sviluppo di sistemi architettonici efficienti sia dal punto di vista strutturale che ambientale (Dunn, 2012).

Le strutture a guscio (shell) appartengono alla famiglia di geometrie complesse e sistemi strutturali che sono stati utilizzati per secoli in architettura in risposta al bisogno storico di coprire ampie superfici libere (Andriaessens *et al.*, 2014). La loro presenza, importanza e complessità ha visto una rinascita nell'architettura contemporanea, grazie alla capacità di ricoprire ampie superfici con l'utilizzo minimo di materiali. Le shell sono infatti conosciute per la loro eleganza e le sfide strutturali. La modellazione parametrica ha indubbiamente favorito l'adozione di strutture a guscio, grazie alla possibilità offerta di descrivere e investigare sistemi complessi con poche variabili (Basso *et al.*, 2009).

Questo articolo analizza la progettazione di strutture a guscio che pongono l'ibridazione dei saperi al proprio centro. Partendo

Learning from the past
to build the future:
multidisciplinary design
process

Abstract. Multidisciplinary skills and knowledges were common in historical constructions. The necessity to rethink the way we design and realize our built environment in response to the climate change is requiring the re-convergence of knowledge. The development of multidisciplinary practices and digital communication platforms are enabling the new transition. The design and fabrication of shell is one the field, where the cross-over of knowledge is most evident. Digital technologies are facilitating experimentations of complex shell geometries, a wise use of materials, and the development of new construction processes. This paper explores the transformation of shell designs, and the importance of multiple actors, through the analysis of a shell prototype developed for an international context.

Keywords: Shell; Digital design; Digital fabrication; Embodied carbon; Design for deconstruction.

Introduction

The climate change is requiring a critical analysis of the whole construction sector. The built environment is responsible for about 40% of greenhouse gas emissions (Abergel *et al.*, 2017), and as such the reduction of its environmental impacts is a worldwide prime objective for energy policy (Iuorio *et al.*, 2019). The 7th European Environmental Action Program indicates that the prosperity and healthy of the environment requires an innovative, circular economy where nothing is wasted and where natural resources are managed sustainably (EAP, 2014). Therefore, it is of primary importance to rethink the way, we design and fabricate our built environment to reduce both the associate operational energy and embodied carbon. While many improvements have been attained in terms of reduction of operational en-

ergy, very little has been achieved for the reduction of the embodied carbon of buildings, structures and infrastructures. The term "embodied carbon" refers to the lifecycle greenhouse gas emissions, that occurs during the manufacturing and transportation of construction materials and components, as well as the construction process itself and end-of-life aspects of the building including demolition, reuse and recycling. Therefore, the reduction of the buildings embodied carbon requires: optimization of the structural system, wise use of material, increase of the circularity, potential extension of the end of life through reuse and recycling.

The parametric modelling allows the analysis of a range of geometries, and their corresponding structural behaviours very early in the design process, enabling the possibility to experi-

dall'analisi di shell storiche, se ne ripercorre l'evoluzione in congiunzione con lo sviluppo della progettazione e fabbricazione digitale. Infine, lo studio presenta il progetto e la realizzazione del padiglione ECHO, progettato e realizzato in risposta ad un concorso internazionale lanciato nell'ambito della conferenza IASS 2019.

Studiando le shell storiche Le strutture a guscio rispondono alla necessità di ricoprire ampi spazi col minimo utilizzo di supporti e sono state ampiamente utilizzate nell'architettura classica, egregio esempio è il Pantheon a Roma. Nel corso di migliaia di anni, molte civiltà hanno contribuito allo sviluppo di costruzioni voltate, fino a che la loro popolarità è iniziata a vacillare con l'introduzione dei sistemi a telaio in cemento armato. La riscoperta dei lavori di Guastavino ha aperto una nuova era per le shell nel ventesimo secolo. Guastavino, ingegnere e costruttore del diciannovesimo secolo, è inventore del sistema noto come "Tile arch system", ampiamente utilizzato per realizzare archi e volte autoportanti mediante l'uso di mattoni sottili posti a spina di pesce, e intervallati da malta a presa rapida (Ochsendorf, 2010). Gli studi sulle caratteristiche della statica grafica (Heyman, 1997) abbinati allo studio del sistema di costruzione di Guastavino hanno portato allo sviluppo di nuove metodologie digitali per le analisi di equilibrio, automatizzate e incorporate in strumenti digitali oggi ampiamente utilizzati per la progettazione di shell. Il Droneport e l'Armadillo Vault (Fig. 1), esposti alla Biennale di Venezia 2018, sono due esempi di architetture sviluppate attraverso la programmazione informatica avanzata, l'ottimizzazione strutturale e la fabbricazione digitale. Mentre il Droneport

ment with less material for analogous structural performance (Bletzinger and Ramm, 2014). Moreover, fabrication processes and constraints can be considered earlier in the process, as part of the conceptual design process. Through the use of parametric modeling and digital fabrication techniques, it is possible to generate optimized workflows from design to fabrication that can allow the development of architectural systems that are structurally and environmentally efficient (Dunn, 2012). This is of particular interest when the intent is to develop sustainable demountable architectures. Shells are one of the complex geometries and structural systems that have been used for centuries in architecture to response to the ancient need of covering long span spaces (Andriaessens *et al.*, 2014). Their presence and complexity have seen a new rise in the last

decades, because they allow covering large spaces with minimum amount of material. They are known for their aesthetic sophistication and structural challenges. Parametric modelling has certainly unlocked the adoption of shell structures, because it allows describing and investigating large complex systems with few variables (Basso *et al.*, 2009). This paper debates shell projects that pose hybridization of knowledge at their core. It starts with analysing hybridization of knowledge in historical shells to then discuss the evolution brought by the introduction of digital design and fabrication. Finally, it presents the process developed for the digital design and fabrication of a thin shell that has the shape of sound waves replicating like in an Echo, which has been designed and fabricated answering the brief set within an international context at the IASS 2019 conference.

(Heathcote, 2018) è stato concepito come una serie modulare di volte in muratura da realizzarsi in Africa, ed estendibile al crescere della domanda, la volta Armadillo, è una struttura a guscio di forma libera sviluppata specificamente per l'esposizione di Venezia. Il design dell'Armadillo Vault e dei suoi componenti sono stati fortemente influenzati dalle limitazioni di fabbricazione al punto che già nel processo di progettazione, la geometria è definita considerando il processo di lavorazione CNC per il taglio della pietra, e l'assemblaggio in loco (Rippman *et al.*, 2016; Block *et al.*, 2018). Inoltre, la volta è stata concepita per essere assemblata e dis-assemblata al finire della Biennale per essere ricomposta altrove.

Le strutture a guscio temporanee, e de-componibili sono state il focus di una serie di concorsi sponsorizzati dall'Associazione Internazionale per Strutture a Guscio (IASS). Le più recenti, nel 2015 e 2019, hanno favorito l'esplorazione di shell dispiegabili (*deployable*), superfici a forma libera, strutture pneumatiche e pieghevoli, per citarne solo alcune, tutte aventi come minimo comune denominatore l'intento di sviluppare architetture leggere che siano strutturalmente ottimizzate, e per le quali vengano utilizzate tecniche all'avanguardia che ne consentano la circolarità. Il concorso del 2019 ha richiesto lo sviluppo di sistemi che favoriscono l'uso di metodi di fabbricazione avanzata e rispondono ad una logica di progettazione per la decostruzione. Le opere dovevano essere spedite a Barcellona in massimo 6 scatole e costruite in un giorno, in uno spazio 4x4x4 m. I padiglioni sviluppati hanno mostrato una forte integrazione tra i processi di progettazione e fabbricazione, sono stati caratterizzati da componenti stampati in 3D (incluso stampa tessile 3D) e il taglio laser. Tra questi, l'autrice ha progettato e costruito con il suo team di ri-

Learning from historical shells

Shell structures are able to span large spaces with minimum supports and were used by classical architects and are seen in buildings such as the Pantheon in Rome. Throughout thousands years, many civilisations contributed to the development of dome and vaulted constructions, until their use and popularity started to fade with the introduction of reinforced concrete frame systems. The re-discovery of Guastavino nineteenth century work proved to be the catalyst for a new era of shell structures in the 21st century. Guastavino was an engineer and builder that developed the Guastavino tile, a "Tile Arch System", which was used to realise robust, self-supporting arches and architectural vaults using interlocking terracotta tiles and layers of mortar (Ochsendorf, 2010). Studies of the features of graphic statics

(Heyman, 1997) coupled with study of Guastavino tiles brought to the development of new digital equilibrium methodologies, that have been automated and embedded in digital tools that are today broadly used by architects and engineers for shell design.

The Droneport and the Armadillo Vault (Fig. 1), exposed at the 2018 Biennale, are two examples of architectures developed through advanced computer programming, structural optimization and digital fabrication. While the Droneport (Heathcote, 2018) has been conceived as a modular canopy made of masonry vaults that aims to be built in Africa and grow in extension as demand increases, the Armadillo vault, is, instead, a free-form canopy developed specifically for the Venice exposition place. The design of the Armadillo vault and the individual pieces were strongly influenced

01 |



by fabrication constraints to the point that already in the design process, the geometry is defined considering the CNC machining process for the stone cutting, and the on-site assembly (Rippman *et al.*, 2016). Moreover, this vault has been conceived to be assembled and then disassembled after the Biennale and to be re-assembled elsewhere.

The topic of temporary and demountable shell structures has been largely explored during a series of competitions sponsored by the International Association of Shell Structures (IASS). In the most recent one, in 2015 and 2019, there has been a vast exploration of deployable shells, free-form surfaces, pneumatic and foldable structures, to cite just a few, all having in common the purpose of developing lightweight architectures that are structurally optimized, and for which cutting-edge

techniques are used to experiment circularity. The 2019 competition, in particular, requested development of systems that could showcase exploration of advanced manufacturing and could respond to a logic of design for deconstruction to be shipped to Barcelona in maximum 6 boxes and built in a 4x4x4m space in one day. The developed pavilions showed strong integration between design and fabrication processes, advancements in 3D printing materials (as for example in knitting printing), and precise cutting. Among them, the author designed and built with her research team a shell title ECHO (Iuorio and Korkis, 2019) that is discussed in the next section.

The ECHO shell

The ECHO shell is a temporary pavilion measuring 3m x 3m x 2m. It gets inspiration from biology and clas-

sical Rome, incorporating the latest research in structural engineering. It can be easily manufactured, assembled on-site within a day, just as easily dismantled, and stored in three packing cases. Weighing in at 30 kg, less than half the weight of an average man, it demonstrates the potential to create green, low-carbon, and structurally efficient buildings.

Design

The ECHO shell has been developed in answering the brief set by the international context within the IASS 2019 conference, which required to develop an innovative lightweight pavilion that followed a logic of design for disassembly.

Our aim was to develop a space that had the shape of echo soundwaves, in which the portion having single curvature is made of a continuous shell,

while the double curvature is obtained through a sequence of arches (Fig. 2). The pavilion aimed to be a first prototype of a tessellated shell, to be fabricated with in-house tools, i.e. CNC machine and commercial 3D printers, and allow the circularity, responding to a logic of design for deconstruction. For this reason, dry connecting systems that can be fast to set with minimum amount of tools, and facilitate assembling and disassembling multiple times, have been explored.

The design stages included definition of the initial geometry, surface definition, optimization and tessellation. The initial geometry was generated in Rhinoceros® and referenced into Grasshopper to be used directly in the tessellation process. The surface was defined following a parametric approach. Parametric design is an algorithm-based process, that uses parameters to define

cerca un padiglione intitolato ECHO (Iuorio and Korkis, 2019), presentato di seguito.

Il padiglione ECHO

La shell ECHO è un padiglione temporaneo che misura 3m x 3m x 2m. Cogliendo ispirazione dalla biologia e dalla Roma classica, incorpora le ultime ricerche nel campo dell'ingegneria strutturale. La shell può essere facilmente prodotta, assemblata in loco in poche ore, smontata, e conservata in tre scatoli. Pesando solo 30 kg, meno della metà del peso medio di un uomo, dimostra la possibilità di creare padiglioni sostenibili, a basso impatto ambientale e strutturalmente efficienti.

Progetto

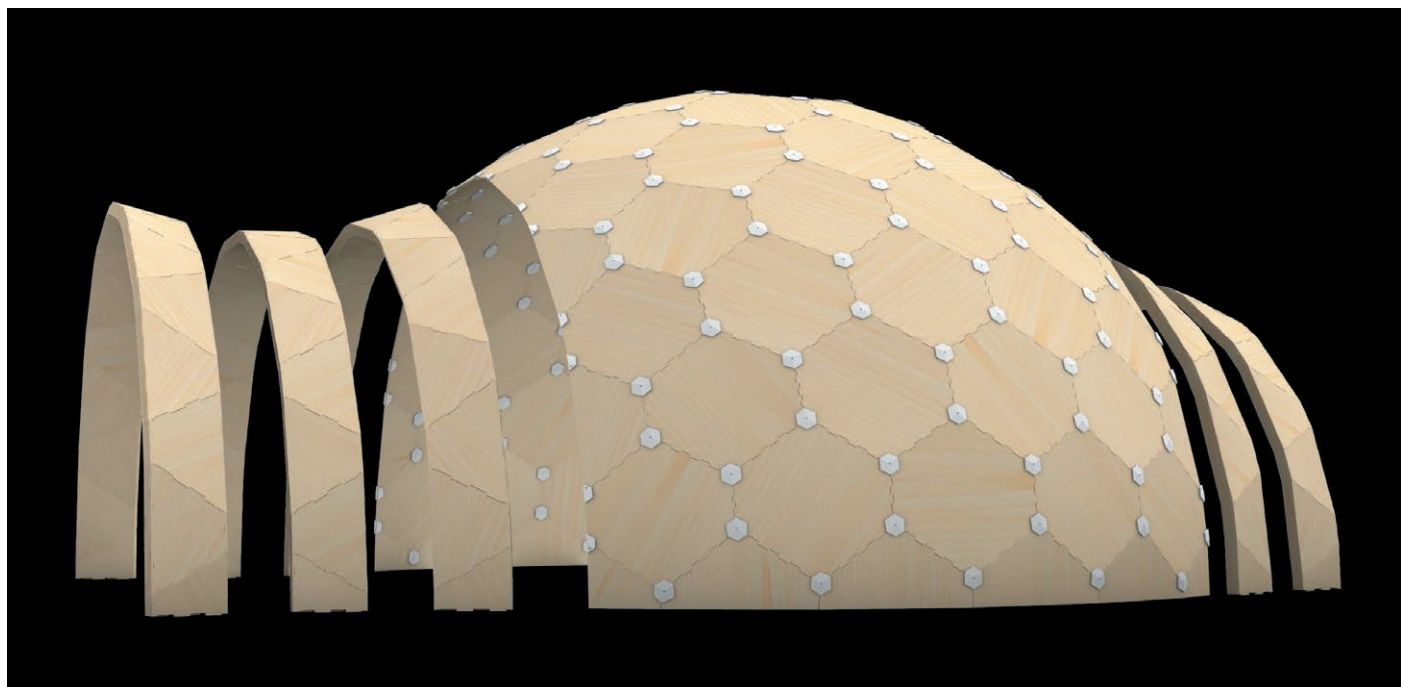
La shell ECHO aveva l'obiettivo di sviluppare uno spazio che avesse la forma di onde sonore, in cui la porzione a singola curvatura è definita da una shell, e la sezione a doppia curvatura è definita da una sequenza di archi (Fig. 2). Il padiglione intende essere un primo prototipo di guscio tassellato, da realizzarsi con macchine CNC e stampanti 3D commerciali, e che consenta la circolarità, rispondendo ad una logica di "design for de-struction". Per tale ragione, il prototipo ha visto la sperimentazione di sistemi di collegamento a secco, assemblabili con pochi strumenti, e che consentono l'assemblaggio e lo smontaggio del padiglione per usi multipli.

La progettazione ha incluso la definizione della geometria inizia-

le, lo sviluppo della superficie, l'ottimizzazione e la tassellatura. La geometria iniziale è stata generata in Rhinoceros® e referenziata in Grasshopper per essere utilizzata direttamente nel processo di tassellatura. La superficie è stata definita seguendo un approccio parametrico, ed è stata ottimizzata e discretizzata in un numero finito di esagoni nel processo di tassellatura. Gli esagoni sono stati scelti tra tutte le possibili forme geometriche per la tassellatura, perché come dimostrato dalla natura, nel caso di alveari e nella struttura di alcune pareti cellulari, gli esagoni sono complessivamente stabili, in quanto si incastrano perfettamente. Nel caso della shell ECHO, l'intenzione era quella di suddividere il guscio tridimensionale continuo in un numero finito di componenti planari, da realizzarsi con pannelli di legno. La discretizzazione automatica della superficie in sub-componenti di solito porta alla definizione di componenti non planari che seguono esattamente la superficie iniziale. Questo è avvenuto anche per la suddetta shell, per la quale è stato necessario rendere i tasselli piani, per consentire la fabbricazione utilizzando pannelli piani di legno. La progettazione parametrica ha favorito lo studio di una gamma di possibili combinazioni con il minimo sforzo, fino ad ottenere una superficie composta di sub-componenti piane, che approssima con molta precisione la superficie originale.

Fabbricazione

I requisiti di fabbricazione e assemblaggio sono stati considerati sin dalle prime fasi della progettazione. Le principali limita-



zioni erano connesse alle macchine CNC utilizzate per il taglio laser dei pannelli, ai limiti di trasporto, dal momento che tutti i componenti dovevano essere spediti in scatole di dimensioni prestabilite, dalla necessità di assemblare il padiglione in un solo giorno, e l'uso minimo di qualsiasi strumento elettrico.

I pannelli sono in pino chiaro e spessore 6 mm. Per consentire un facile assemblaggio e massimizzare la possibilità di trasferire le forze attraverso azioni membranali, giunti a pettine sono stati inclusi all'interfaccia dei pannelli. Tuttavia, essendo disponibili solo macchine CNC a 2 assi, i tagli tra i pannelli non seguono perfettamente la curvatura della shell, e lasciano dei piccoli vuoti tra i pannelli. Questo è stato un problema chiave che ha richiesto lo sviluppo di sistemi di connessione appropriati. La progettazione del sistema di connessione è stata cruciale nella realizzazione dell'opera. Volendosi realizzare una connessione che consentisse l'uso minimo di manodopera in fase di assemblaggio, e adoperasse una quantità minima di materiale per la connessione stessa, così da ridurre l'*embodied carbon*, è stata effettuata un'attenta selezione della geometria, del materiale e dei parametri di stampa 3D per la connessione.

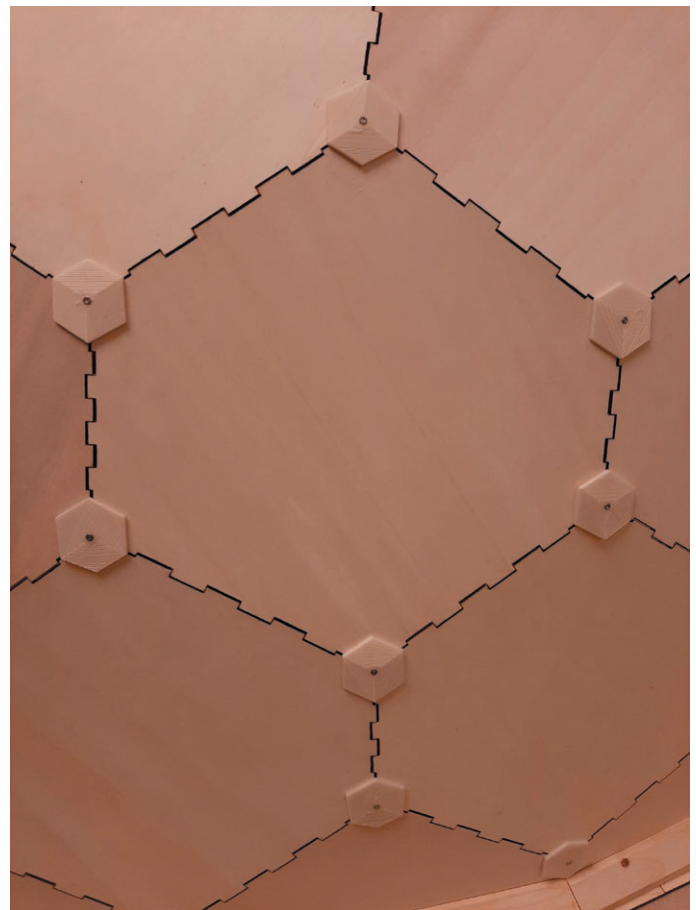
Le connessioni sono state progettate ipotizzando che la shell una volta completata porti la maggior parte del carico, e le connessioni siano soggette a flessione principalmente nella fase di costruzione. Dal momento che i pannelli sono spessi solo 6 mm, sono state escluse tutte le connessioni che interferissero assialmente con i pannelli. Il sistema di collegamento finale è stato progettato e stampato in 3D ed è costituito da 2 elementi che congiungono i pannelli ai vertici (Fig. 3). La parte inferiore della connessione interseca i pannelli in appositi slots, così che la connessione possa funzionare ad attrito.

the relationship between a set of inputs to derive a required result. The outputs of this process remain tightly related to these parameters. The shell surface was optimized and discretized in a finite number of hexagons in the tessellation process, that were then planarized. Hexagons fit together neatly, and this is a property that has been exploited by nature, as visible in honeycombs and in the structure of some cell walls. When hexagons slot together, they don't leave any wasted space. For the ECHO shell, the intention was to subdivide the continuous three-dimensional shell in a finite number of flat tiles, that could be later realized with wooden panels. Computer generated tiles using tessellation algorithms usually result in non-planar tiles that follow the shape of the initial surface exactly. This was the case of the ECHO project, for which planarization was

later applied to allow the fabrication by using planar sheets of plywood. The advantages of parametric design include the ability to check multiple valid combinations of parameters and compare the final outputs with minimum effort. This ability was utilized to obtain a final planarized shell that approximates the original shell as closely as possible.

Fabrication

Fabrication and assembly requirements have been central to the overall design. For the fabrication, limitation was given by CNC machine process, while for the assembly limitations were given by the transportation, since all the components had to fit boxes of given dimensions, other limitations were given by the available assembly time (i.e. one day) and minimum use of any electrical tool.



La ECHO shell è complessivamente realizzata da 94 pannelli connessi attraverso 144 connessioni. Nonostante la composizione simmetrica, le 144 connessioni sono tutte diverse, pertanto, la progettazione parametrica è stata fondamentale per evitare errori e progettare e realizzarle in tempi ridotti (Fig. 4).

Poplar plywood, characterized by light timber colour with imperceptible grain, and 6mm thickness was selected as material. To allow an easy assembling and maximize the possibility to transfer forces through membrane actions, the panels were interlocked with finger joints. However, since the available CNC machine was a 2-axis machine, the joints were perpendicular to the wood plate, as such the edge faces of the panels are not perfectly parallel to each other. This key issue required to develop appropriate connection systems.

The design of the connection system has, therefore, been crucial in this project. Since minimum effort, minimum labour, minimum material wants to be adopted for the connections, a careful selection of the geometry, material and 3D printing parameters have been carried out.

ECHO shell connections were designed assuming the formwork will carry most of the load, but the connections will be subjected to a bending moment at the construction stage. The shell consisted of thin plywood panels. Since the panels were only 6mm thick, a connection that would interfere with the sheets axially was ruled out. The final connection system was designed, and 3D printed as 2 parts that will envelope the panels at the connection vertices. The lower part of the connection had three blocks that fit into slots cut into the panels. This design would depend on friction between the connection's blocks and the panels for stability, and to a lower degree on the clamping force provided between the two parts of the connection (Fig. 3). The ECHO shell consists of 94 planar panels connected using 144 ad-hoc

Ibridazione dei saperi

La progettazione, ottimizzazione e fabbricazione hanno richiesto l'integrazione orizzontale e verticale di un insieme di competenze, appartenenti ad attori diversi impegnati nella stessa fase del processo. Il progetto è stato infatti sviluppato da un team di architetti, ingegneri strutturalisti e meccanici guidato dall'Autore, che hanno collaborato a tutte le fasi del progetto. Mentre, architetti e ingegneri strutturalisti hanno co-sviluppato il progetto iniziale, l'ingegnere meccanico ha svolto un ruolo chiave nello sviluppo e fabbricazione della connessione.

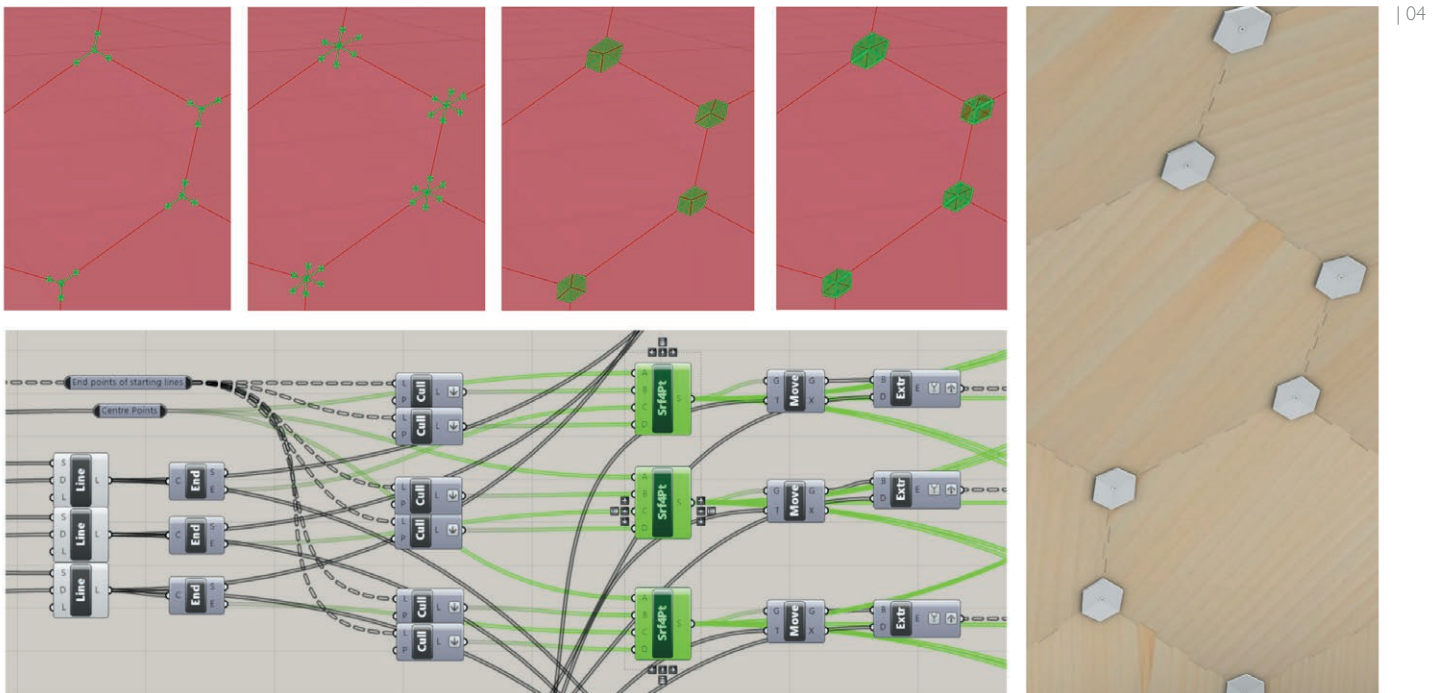
Il sistema di collegamento doveva essere fabbricato attraverso stampanti 3D commerciali, e adottando materiali disponibili. Tuttavia, la selezione del materiale, l'impostazione della stampa 3D e i tempi di produzione sono stati fondamentali per soddisfare al tempo stesso, i requisiti strutturali e i tempi richiesti dal concorso. Tre materiali, denominati Vero, ABS e PolyLactic Acid (PLA) sono stati testati. In termini di proprietà meccaniche PLA e ABS hanno resistenze simili, ma il PLA ha una minore flessibilità. Il PLA è risultato tra tutti il più indicato, perché soggetto a minori deformazioni e perché necessita di temperature più basse nel processo di stampa. Inoltre, il PLA è meno soggetto a variazioni di temperatura e produce fumi meno dannosi.

La procedura di assemblaggio è stata sviluppata per ridurre il sistema di supporto e i tempi di costruzione. L'assemblaggio ha dimostrato la capacità della shell e del sistema di collegamento di supportare il proprio peso fino a metà dell'altezza (cioè fino

a 80 cm, Fig. 5), dopodiché un numero minimo di supporti temporanei sono stati introdotti fino alla formazione di un primo arco di bordo. Una volta formati gli archi di bordo (Fig. 6), la shell è risultata perfettamente stabile, ed è stata completata senza alcun supporto (Fig. 7). La realizzazione ha dimostrato la capacità di questo piccolo padiglione di essere assemblato più volte, ed ha confermato il ruolo sostanziale della precision engineering per la realizzazione e consegna del progetto nei tempi stabiliti.

Conclusioni e riflessioni

Questo lavoro riflette sulla trasformazione dei processi di progettazione e costruzione in risposta ai cambiamenti climatici. Oggi si assiste ad una dicotomia tra un mondo digitale che permette l'articolazione di forme visionarie, architetture e spazi urbani, che raramente trovano pieno sviluppo nel mondo reale, e processi digitali che invece promuovono lo sviluppo di geometrie complesse e architetture smart grazie alla possibilità di incorporare la complessità dei processi geometrici, di fabbricazione e di trasformazione fin dalla fase concettuale. Questa seconda è probabilmente una visione ottimistica dell'impatto che il design e la fabbricazione digitale possono avere sull'architettura contemporanea. Una visione ottimistica che riconosce l'importanza di ogni rivoluzione industriale e che crede che il design e la fabbricazione digitale siano parte della trasformazione industriale da 2.0 all'industria 4.0.



La rivoluzione industriale/digitale a cui stiamo partecipando, richiede una fortissima collaborazione tra i diversi attori del processo edilizio. L'architetto non può più fermarsi alla definizione della forma architettonica, ma deve essere artefice delle tecnologie, deve considerare i processi di produzione, e di manutenzione, per poter ridurre gli impatti ambientali del costruito nell'intero ciclo di vita. Così come in antichità le case romane o il Pantheon a Roma, rispondevano non solo a richieste formali, ma anche a leggi non scritte di statica e richieste ambientali. Questo lavoro guarda alle shell per analizzare la trasformazione in architettura e, a partire dalle volte di Guastavino, discute le recenti realizzazioni alla Biennale di Architettura di Venezia e i prototipi realizzati per i concorsi internazionali sponsorizzati dall'IASS. I principali esempi discussi in questo lavoro, ovvero il Droneport, l'Armadillo Vault e l'ECHO shell intendono dimostrare come la progettazione parametrica, l'ottimizzazione strutturale e la fabbricazione digitale possono contribuire alla definizione di nuove geometrie per l'architettura, e al tempo stesso favorire un uso sapiente di materiali e componenti per la riduzione del *embodied carbon*, in risposta ai cambiamenti climatici. Tutti e tre i progetti sono esempi tangibili di un'architettura profondamente radicata nella ricerca interdisciplinare, che combina ricerca storica, computazionale, strutturale e manifatturiera. Queste architetture sono anche esempi di due proposizioni opposte, una fatta di materiali di uso comune come i mattoni sottili di argilla del Droneport o i pannelli a base di legno dell'ECHO shell e l'altra fatta di pietre costose come l'Armadillo. Tutte dimostrano come l'ottimizzazione delle geometrie, favorita dalle analisi parametriche, consentano un sapiente uso dei materiali, al punto che nella ECHO shell, pannelli di spessore 6



connections. Despite the symmetry of the shell, designing a large number of connections individually is time consuming, less efficient and more prone to errors. Developing the connections through parametric design was crucial to avoid these problems (Fig. 4).

Hybridization of knowledge

Design, optimization and fabrication required horizontal integration of a set of skills, belonging to different actors engaged in the same phase of the process, and vertical integration aimed at enriching the development of the ECHO project. The project was indeed developed by a team of architect, structural engineer and a mechatronics led by the Author, that collaborated to all phases of the project. While indeed architects and structural engineer co-developed the initial design, the mechatronics played a fundamental role

in the development and fabrication of the connections.

The connection system needed to be fabricated through commercial 3D printers, by adopting available plastic base materials. However, the selection of the material, the setting of the 3D printing, and the manufacturing time were crucial for satisfying structural requirements while meeting competition deadlines. Vero, ABS and PolyLactic Acid (PLA) were tested. In terms of mechanical properties PLA and ABS have roughly the same strength but PLA has a lower flexibility. One of the main advantages of PLA over ABS is that is considered to be easier to print, since PLA warps less when printing, requires lower temperatures, and has a less harmful smell.

Each panel and connection were properly labelled, and its specific location

was uniquely identified. The assembling pattern was developed to reduce the support system and reduce time. The assembling process demonstrated the capacity of both the shell and the developed connection system to carry its own weight up to half of the height (i.e. up to 80 cm, Fig. 5), after that, minimum supports were required up to the formation of the edge arch. Once the edge arches were formed (Fig. 6), the shell was completely stable, and the top part was completed without any support (Fig. 7). The assembling and disassembling process demonstrated the capacity of this small pavilion to be assembled multiple times and how the precision engineering of the components was essential in the delivery of the project on time.

Conclusions and reflections

This work reflects on the transforma-

tion of design and construction processes, in response to climate change. Today, there is a clear dichotomy between a digital world that enables the articulation of visionary shapes, architectures and urban spaces, that rarely find full development in the real world, and digital processes that instead enable the development of complex geometry and smart architecture, thanks to the possibility to embed the complexity of geometry, fabrication and transformation processes since the conceptual stage. This second is probably an optimistic vision of what digital design and fabrication can bring to architecture. An optimistic vision that recognises the importance of each industrial revolution and that believes digital design and fabrication being part of the transformation from industry 2.0 to industry 4.0.

Today industrial/digital revolution re-



| 06



| 07

mm, consentono di realizzare una volta di luce 3m. In relazione alla vita utile, e alla circolarità dei sistemi strutturali ed architettonici i 3 progetti sono testimoni di architetture modulari che possono crescere al crescere della domanda, come il Droneport, concepito come “abitazione/porto” per i droni nelle aree remote del Sud Del Mondo, che può estendersi in maniera modulare all’aumentare della richiesta, o sono simbolo di architetture che possono essere disassemblate e realizzate altrove, come l’ECHO shell e l’Armadillo Vault. Le opere trattate dimostrano come la progettazione e realizzazione di padiglioni e/o edifici, basata su processi di ottimizzazione strutturale e tecniche di produzione avanzate, possano promuovere un’architettura circolare.

REFERENCES

Abergel, T., Dean, B. and Dulac, J. (2017), *Towards a Zero-Emission, efficient, and resilient buildings and construction sector: global status report 2017*, UN Environment and International Energy Agency, Paris.

Andriaessens, S., Block, P., Veenendaal, D. and Williams, C. (2014), *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*, Routledge, New York.

Basso, P., Del Grosso, A.E., Pugnale, A. and Sassone, M. (2009), “Computational morphogenesis in architecture: the cost optimization of free-form grid shells”, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 50, n. 3, pp.143-150.

Bletzinger, K.U. and Ramm, E. (2014), “Computational form finding and optimization” in Andriaessens et al. (Eds.), *Shell structures for architecture, form finding and optimization*, Routledge, New York.

Block, P., Van Mele, T., Liew, A., DeJong, M., Escobedo, D. and Ochsendorf, J. (2018), “Structural design, fabrication and construction of the Armadillo vault”, *Structural Engineer*, Vol. 96, n. 5, pp. 10-20.

quires a strong collaboration among the several actors of the building process. The architect can no longer only define the architectural form, he/she needs to be responsible of the technologies, as well as considering the production and maintenance processes, to reduce the environmental impacts of the built environment within the entire life cycle. So as, in ancient times, the roman houses or the Pantheon in Rome, responded to formal requirements, as well as to non-written static laws, and environmental requirements.

This work focuses on shells to analyse the transformation in architecture and starting with the Guastavino vaults reflects about recent works showcased at the Biennale of Architecture in Venice, and the prototypes developed for the IASS competitions. The cited Droneport, Armadillo Vault and ECHO shell demonstrate how parametric design,

structural optimization, and digital fabrication can contribute to define new geometries in architecture, while favouring an improved used of materials and components to reduce the embodied carbon, in response to climate change. All projects are tangible examples of architecture deeply rooted in historical, computational, structural and manufacturing research. They are also pivotal because they are not only manifest evidence of intertwined digital processes, but they also enunciate the new possibilities opened by the digital to traditional construction materials, such as brick masonry for thin vaults in the visionary idea of the Droneport, or the wood panels in the ECHO shell. They all demonstrate how geometrical optimization, facilitated by parametrical analysis, allows an improved use of material, by using only what needed where needed, to the point

Dunn, N. (2012), “Digital Fabrication in Architecture”, Laurence King, London.

7th EAP (2014), The new general Union Environment Action Programme to 2020. Living well, within the limits of our planet, *European Commission*.

Heathcote, E. (2018), “The smallest airport in the world”, *AA’ L’Architecture d’aujourd’hui*.

Heyman, J. (1997) “Equilibrium of shell structures”, *Oxford Engineering Science Series*, Clarendon Press, Oxford.

Iuorio, O., Napolano, L., Fiorino, L. and Landolfo, R. (2019), “The environmental impacts of an innovative modular lightweight steel system: the ELISSA case”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 238.

Iuorio, O. and Korkis, E. (2019), “Design and fabrication of a tessellated shell”, *Proceedings of the 1st International fib Symposium on Conceptual Design of Structures*, Madrid.

Ochsendorf, J. (2010), *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, Princeton Architectural Press, New York.

Rippmann, M., Van Mele, T., Popescu, M., Augustynowicz, E., Echenaguia, T., Barentin, C., Frick, U. and Block, P. (2016), “The Armadillo Vault. Computational Design and Digital Fabrication of a Freeform Stone Shell”, *Advances in Architectural Geometry*.

that, in the ECHO shell, 6 mm wooden panels are appropriate for a 3m span vault. Looking at the life span and to the circularity of the structural and architectural systems, the three projects testify modular architectures that can modularly extend as request increases, as in the Droneport, the visionary idea of a “port”, i.e. an house, for drones in remote areas of the Global South, that can be extended as request increases, or they symbolise architectures that can be disassembled and reassembled multiple times as the ECHO shell and the Armadillo vault. They all, with a special reference to the ECHO shell, demonstrate how building design coupled with optimization processes and advanced manufacturing techniques can play a key part in the promotion of circular economy in architecture.