

# Prefabbricazione robotizzata e innovazione

Struttura su due livelli con assemblaggio robotico

**Alessandro Dell'Endice** ETH Zurich, Block Research Group  
dellendice@arch.ethz.ch

**Pietro Odaglia** ETH Zurich, Digital Building Technologies  
odaglia@arch.ethz.ch

**Fabio Gramazio** ETH Zurich, Architecture and Digital Fabrication  
gramazio@arch.ethz.ch

Tecnologie digitali e robotica iniziano a dare il loro contributo nel mondo dell'architettura portando a risultati progettuali altrimenti non raggiungibili. Le conseguenze di questo avvicinarsi influiscono sulla figura dell'architetto-ingegnere. Il progetto qui descritto riguarda la costruzione della prima struttura su due livelli con l'applicazione di un rivestimento esterno, fabbricata e assemblata con due robot, utilizzando tecnologie di fabbricazione additiva e strumenti digitali. Il progetto è stato sviluppato nel contesto del MAS ETH (Master in Advanced Studies) in Architecture and Digital Fabrication organizzato da Gramazio Kohler Research e diretto da Philipp Eversmann presso il Politecnico di Zurigo (ETH) [1].

*Prefabbricazione robotica, Design parametrico, Ottimizzazione, Costruzioni in legno, Processo digitale*

Digital technologies and robotic have now started to play a key role in architecture, achieving results otherwise not reachable. The several consequences arising from this role directly affect the professional profiles involved. The described project is about the construction of the unique double story structure with an envelope, fabricated and assembled by two robots, using additive manufacturing technologies and digital tools. The project has been developed in the context of the MAS ETH (Master in Advanced Studies) in Architecture and Digital Fabrication organized by Gramazio Kohler Research and lead by Philipp Eversmann at the Zurich Federal Polytechnic (ETH).

*Robotic prefabrication, Parametric design, Optimization, Wooden structures, Digital workflow*

A. Dell'Endice Orcid id 0000-0002-4799-6015

P. Odaglia Orcid id 0000-0002-6939-8366

F. Gramazio Orcid id 0000-0002-3761-7675

## **Introduzione**

La sperimentazione portata avanti da figure di rilievo nel panorama architettonico è sicuramente da riconoscersi come parte motrice dell'attuale interesse nei confronti delle tecnologie qui prese in esame: progetti incentrati sulla geometria free-form, hanno infatti valorizzato l'utilizzo in ambito edilizio di strumenti in grado di offrire una vasta gamma di lavorazioni meccaniche sviluppate a un livello di precisione senza precedenti, evidenziandone al contempo limiti e vantaggi [fig. 01]. Lo scopo dell'attuale ricerca e dell'interessante dibattito che introduce, non consiste nel velocizzare processi noti, né nel ridurre i costi, quanto nel valutare quali e quanti nuovi processi possano fiorire nel pieno utilizzo dell'odierna tecnologia, e il contributo architettonico che tale tecnologia può apportare al manufatto finale, tanto nella tecnica costruttiva quanto nell'estetica progettuale.

L'espansione di tali strumenti non comporta una riduzione dell'apporto umano al processo, ma una crescita delle competenze delle figure coinvolte, investendo l'architettura, l'ingegneria, le tecniche di fabbricazione, il design computazionale e parametrico, la programmazione informatica e la robotica. Si è dimostrato inoltre che il raggiungimento di un risultato efficace in un simile ambito interdisciplinare è inscindibile dalla piena conoscenza, da parte di ciascun attore coinvolto, di tutte le problematiche presenti. A differenza di quanto generalmente avviene, soprattutto nel caso di progetti di piccole e medie dimensioni, la fase di progettazione non è stata sviluppata a compartimenti stagni, dove le figure professionali operano in maniera autonoma. Tale mancanza di comunicazione infatti rende fortemente probabile che errori e problemi affiorino solo quando il costo per risolverli è ormai massimo, ovvero in fase esecutiva. Quanto detto offre diversi spunti utili a colmare la separazione che ancora oggi si tenta di tenere in auge tra architettura e ingegneria, separazione che sempre più appare superflua e anacronistica.

## **Fabbricazione digitale di strutture in legno**

La fabbricazione digitale di strutture in legno viene suddivisa solitamente secondo due categorie: tecnologie sottrattive e tecnologie additive. Riguardo le tecnologie sottrattive, queste rappresentano quello che è stato storicamente realizzato nella carpenteria lignea e che oggi ha subito un notevole impulso tecnologico grazie all'utilizzo di macchinari a controllo numerico (CNC). Tali tecnologie permettono di realizzare, in maniera molto precisa, nodi di collegamento e sezioni variabili, in risposta a diversi criteri costruttivi e strutturali. In particolare nel mondo della prefabbricazione, solitamente viene automatizzata la



01

produzione di singoli sotto-componenti bidimensionali o a sviluppo planare, i quali poi richiedono un successivo assemblaggio spaziale manuale per arrivare a costituire veri e propri componenti architettonici. Questo comporta imprecisione nell'assemblaggio e spreco di materiale dovuto alla natura sottrattiva della tecnica utilizzata. Queste tecnologie sono attualmente studiate e sviluppate ad esempio presso l'EPFL di Losanna (Robeller, 2014), dove vengono effettuate delle ricerche sulle potenzialità di connessioni automatizzate di elementi spaziali. Le tematiche relative alla fabbricazione robotizzata di strutture in legno con tecniche additive, sono state a lungo affrontate invece presso l'ETH di Zurigo da Gramazio e Kohler Research (Asbjørn, 2016). La loro attività di pionieri nella robotica in architettura, comprende diversi esempi e ricerche in questo settore. Queste hanno riguardato la sovrapposizione robotizzata di elementi in legno lineari per la realizzazione di elementi architettonici con geometrie complesse (Dörfler, 2012), e lo sviluppo di tecniche di assemblaggio e nodi di collegamento di elementi lineari con l'utilizzo di colle a presa rapida (Helm, 2016). Questi studi hanno anche implementato metodologie per l'utilizzo sincronizzato e collaborativo di due bracci robotizzati in grado di interagire ed assemblare strutture spaziali (Parascho, 2017). Lo sviluppo di tali tecnologie additive e con assemblaggio spaziale, è poi proseguito all'interno del primo Master in Architettura e Fabbricazione Digitale (MAS ETH). Durante l'intero anno di studi sono state investigate diverse tipologie di connessione degli elementi in legno, tra cui

01  
Vista lato nord-est  
della struttura  
realizzata

l'holistic trimming e lo shifting dei nodi con l'utilizzo di viti o colla. Per il progetto che andremo ad illustrare è stata scelta una soluzione intermedia con l'utilizzo quasi esclusivo di viti. Questa ricerca si colloca quindi in tale panorama, proponendo un diverso grado di innovazione improntato alla realizzazione e all'assemblaggio spaziale di componenti architettonici in scala reale con tecniche additive, incrementando la precisione del prodotto finale, e dimostrando l'esclusiva complessità implementabile con la fabbricazione robotica, difficilmente raggiungibile con lavorazioni tradizionali.

### **La struttura programmata**

Il lavoro di progettazione qui descritto è segnato da alcune sostanziali novità rispetto alle procedure tradizionali. A differenza del processo a cascata comunemente implementato nel caso di realizzazione di progetti architettonici, il termine più efficace per descrivere il processo qui adottato è iterativo-ricorsivo, nel quale ogni iterazione può mettere in discussione la parte già realizzata in precedenza. Una ulteriore particolarità riguarda le forme di linguaggio utilizzate per la comunicazione fra i componenti del gruppo di lavoro. Si è, infatti, instaurato un fruttuoso ciclo digitale continuo di lavoro, composto di proposte, verifiche e modifiche in base ai feedback restituiti dai diversi processi. Una simile piattaforma, basata sui principi della progettazione parametrica, ha permesso un approccio sorprendentemente flessibile e modificabile in tempo reale anche nel corso delle fasi costruttive. L'intera geometria risulta infatti governata dalle medesime regole generative, e una qualsiasi sua modifica risulta a priori in accordo e congruente con ciò che è già stato realizzato. Una delle curiose conseguenze del processo digitale implementato è stata la totale superfluità di stampare su carta disegni architettonici e dettagli costruttivi, utilizzando invece un solo elaborato con la pianta di riferimento per il corretto posizionamento in cantiere dei componenti prefabbricati.

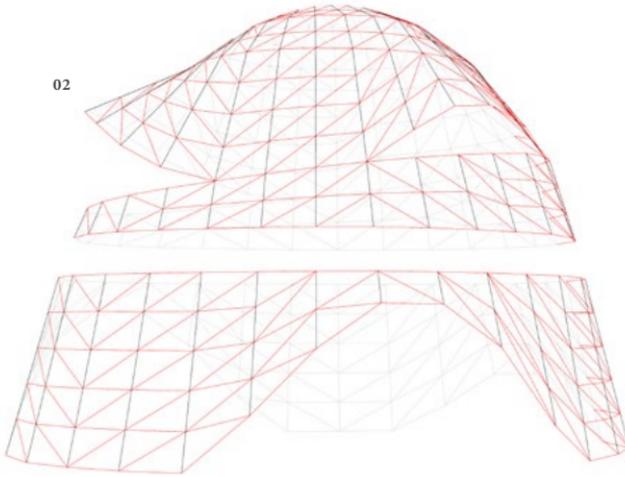
### **Impostazione dell'interfaccia progettuale**

La presenza contemporanea di più figure coinvolte nella progettazione richiede l'utilizzo di un linguaggio e di forme di comunicazione progettuali adeguate. Nel caso specifico, tali forme sono state elaborate in quello che abbiamo definito master-script, riconsiderando il concetto di master-model, ossia l'insieme crescente di configurazioni geometriche che si materializzano nell'evolversi del progetto. L'espressione di master script racchiude in sé l'insieme di operazioni fondamentali necessarie alla generazione di tali configurazioni.

I linguaggi utilizzati si suddividono in testuali come C#, Python e visuali come Grasshopper, mentre il framework .NET è stato scelto in quanto adatto a gestire complesse strutture di dati. La progettazione è iniziata con la creazione di routine in C# all'interno di Grasshopper e Rhinoceros, il quale ha costituito la piattaforma operativa comune per l'intero processo. Per ciascun aspetto della progettazione è stato creato un componente personalizzato di Grasshopper contenente al suo interno parametri, vincoli, script in C# e Python, in grado di elaborare gli input ricevuti e fornire output compatibili con la fase progettuale successiva. Sono stati così creati i componenti della generazione geometrica, della gestione del design, della verifica strutturale, del design del rivestimento e della fabbricazione. Riguardo la fase di fabbricazione robotica, è stato utilizzato il codice Rapid all'interno del software RobotStudio della ABB, partendo dalle istruzioni scritte in Python. Tale linguaggio offre soluzioni pratiche per l'interfaccia con numerosi utensili, caratteristica molto utile in fase di prototipazione. Mentre Grasshopper è servito anche come ambiente utile a testare nuove porzioni di codice senza inficiare il resto del lavoro.

### **Strumenti e processo**

Lo strumento di design implementato è impostato sull'esempio di algoritmi genetici. Grazie ad esso, la configurazione della forma specifica della struttura è stata raggiunta come il risultato di diverse iterazioni di ottimizzazione. I parametri valutativi hanno preso in considerazione sia grandezze facilmente quantificabili, come il numero di elementi di cui la struttura si compone o il massimo sforzo cui i diversi elementi sono sottoposti, sia altre grandezze specificamente qualitative, come la bontà della disposizione di alcuni elementi chiave (accesso al secondo ambiente sopraelevato, aperture, ...). Il processo di design parte dall'input geometrico di curve e punti, dai quali sono state sviluppate le superfici. Successivamente il computational team ha raffinato tali risultati e discretizzato gli elementi geometrici generati, ordinandoli secondo le rispettive classi di appartenenza. A questo punto, entra in gioco lo structural team con l'introduzione e la valutazione di grandezze fisiche, fino a una vera e propria analisi agli elementi finiti. All'interno di tale processo risultano connessi i vincoli provenienti dalla fabbricazione robotica e dal design del rivestimento esterno, i quali regolano i dati in ingresso nell'analisi strutturale. Infine avviene la valutazione del risultato e, di conseguenza, l'impostazione della successiva iterazione.



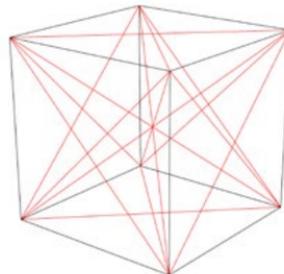
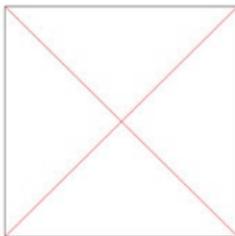
02

### Progettazione parametrica e struttura

La generazione parametrica della geometria ha permesso di considerare in maniera efficace e diretta le esigenze strutturali dell'opera. Le superfici verticali, interna ed esterna, che definiscono il perimetro e determinano lo spessore della struttura, sono state discretizzate in elementi lineari. Tali reticoli di elementi sono stati a loro volta collegati perpendicolarmente alle superfici generando una travatura reticolare spaziale [fig. 02]. L'elemento geometrico tridimensionale di base di tale struttura reticolare è costituito da un cubo avente spigoli e diagonali [fig. 03]. Grazie alle potenzialità offerte dal sistema progettuale parametrico implementato, è stato possibile monitorare il comportamento strutturale variando le distanze tra gli elementi verticali e orizzontali di tale cubo base. Inoltre è stato sviluppato uno strumento che ha agevolato la selezione delle diagonali del cubo appartenenti al piano delle superfici iniziali, mantenendo quelle orientate secondo gli sforzi di compressione. Tale strumento è servito anche nella scelta e gestione delle diagonali di collegamento tra le due superfici, le quali sono state orientate in modo da ottenere un miglior comportamento nei riguardi dei carichi orizzontali.

02  
Suddivisione della superficie in elementi lineari e orientamento delle diagonali dopo il processo di ottimizzazione

03  
Elemento di base della struttura reticolare formato da spigoli verticali e orizzontali in nero e diagonali in rosso



03

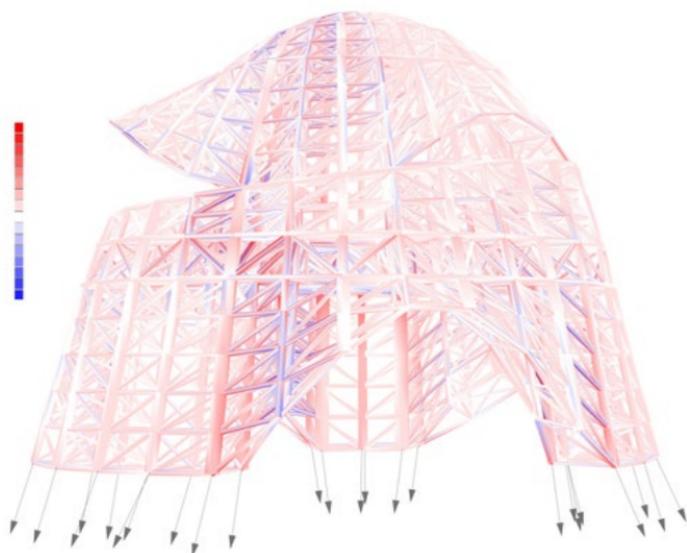
Un secondo esempio di gestione parametrica della struttura, maggiormente legato ad aspetti relativi all'assemblaggio, è identificabile nel sistema di aggregazione dei singoli cubi e quindi nel dimensionamento delle unità di struttura reticolare da prefabbricare. Tale sistema, sviluppato in base ai limiti dimensionali imposti tanto dal setup robotico quanto dalla successiva fase di assemblaggio in cantiere, è stato risolto nell'implementazione *ad hoc* di un'interfaccia grafica: una volta selezionate le componenti da raggruppare, il sistema alla base si occupa di restituire un valore per validare la fattibilità dell'insieme e, in caso affermativo, di elaborare tutti gli accorgimenti geometrici identificati in fase di design (come la gestione di elementi sovrapposti, o il raddoppio della sezione degli elementi da giuntare) [fig. 04].

Un ultimo aspetto degno di nota è relativo alla distribuzione degli elementi meccanici di collegamento all'interno della struttura. Gli strumenti digitali utilizzati, e in particolare la corrispondenza fra gli elementi strutturali e le strutture di dati sviluppate al fine di contenerne le proprietà, hanno reso immediato un processo altrimenti virtualmente "doloroso": la definizione del piano di inserimento di ognuna delle circa 10.000 viti utilizzate, nonché le massime dimensioni accettabili (in termini di lunghezza e diametro) delle stesse. Potendo facilmente reperire la posizione e l'inclinazione delle superfici di contatto di ogni coppia di elementi, è stato possibile controllare e ottimizzare i valori dello sforzo di taglio e resistenza a sfilamento a cui le singole viti sono soggette, valutando tanto la resistenza meccanica delle stesse, quanto la direzione delle fibre del legno degli elementi da collegare. L'inserimento delle viti è avvenuto in maniera manuale con pre-foratura automatizzata.

04  
La suddivisione della struttura in singoli componenti



04



05

Tutte le procedure fino a qui descritte hanno consentito un minuzioso controllo, rapido e puntuale, di una geometria complessa caratterizzata da un comportamento strutturale di non immediata interpretazione [fig. 05].

Altre tipologie di connessione meccanica utilizzate vedono l'applicazione di piastre in alluminio tra gli elementi del solaio [fig. 06] e connessioni con bulloni per il collegamento delle singole parti di cui è costituita la struttura reticolare. L'attacco della struttura alle piastre di acciaio dei pali di fondazione è avvenuto con bulloni, mantenendo una certa distanza dal suolo, senza presenza di elementi scatolari che avrebbero favorito il ristagno di acqua piovana.

### Analisi e struttura

Come già accennato, parte delle *features* presenti nel sistema implementato riguardano il costante monitoraggio delle proprietà strutturali del manufatto, nel caso specifico a mezzo del *plug-in* FEM di Grasshopper, Karamba3D. Per la verifica dei valori restituiti si sono applicate le norme vigenti in Svizzera e relative agli edifici a uso residenziale. In particolare si sono verificati i carichi permanenti, semipermanenti e variabili (vento e neve).

La piattaforma parametrica sulla quale insiste l'intero progetto ha permesso di conoscere in ogni istante le diverse proprietà delle componenti del sistema, come sezione, utilizzazione del materiale, direzione dello stress (compressione e/o trazione) e sua distribuzione nella sezione, lunghezza dell'asse e inclinazione rispetto agli elementi a cui è connesso [fig. 07].

05  
Analisi agli  
elementi finiti  
dell'intera  
struttura nella  
quale viene  
mostrata  
l'utilizzazione dei  
singoli elementi



### Fabbricazione robotica

La fabbricazione è avvenuta utilizzando due robot industriali (ABB IRB 4600) montati su un asse lineare lungo 5 metri [fig. 08].

Agli estremi di questo asse sono stati installati da un lato la stazione di carico delle travi di lunghezza standard (5 metri) e dall'altro lato la piattaforma di lavoro utilizzata per la costruzione dei componenti strutturali. Accanto alla stazione di carico è stata anche installata una sega a controllo numerico a 3 assi. Sul lato della piattaforma è stato posizionato un tavolo per la scansione e il prelievo delle tegole durante la costruzione [fig. 09].

Il robot a sinistra in [fig. 09] ha eseguito le operazioni di prelievo, taglio e posizionamento delle travi in legno sulla piattaforma, mentre il robot a destra ha svolto le operazioni di scansione, prelievo e posizionamento delle tegole sulla struttura. L'applicazione delle tegole ha rivelato l'importanza di un sistema progettuale così organizzato. L'uso di tegole tagliate a mano e la loro non costante larghezza è stata l'unica fonte di parziale e voluta incertezza sull'effetto estetico finale della superficie esterna. Tale variabilità è stata gestita in tempo reale, scansionando attraverso un sensore ciascuna tegola e aggiornando lo script per il loro posizionamento in base alla larghezza della precedente già installata.

### Conclusioni

Il caso studio qui presentato costituisce un precedente di rilievo sulle potenzialità della prefabbricazione “non-standard” a opera di utensili robotizzati nelle tecniche di fabbricazione additiva e, più in generale, sull'utilizzo di robot in architettura. Senza ombra di dubbio l'esperienza mostra gli evidenti vantaggi del disegno parametrico e dei positivi effetti che comporta nel corso, non neces-

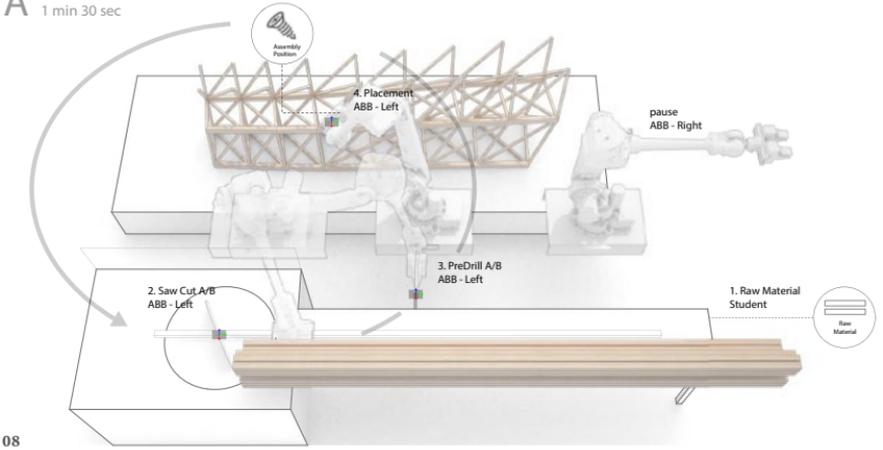


07

07  
Immagine  
dell'interno della  
struttura a livello  
del piano primo

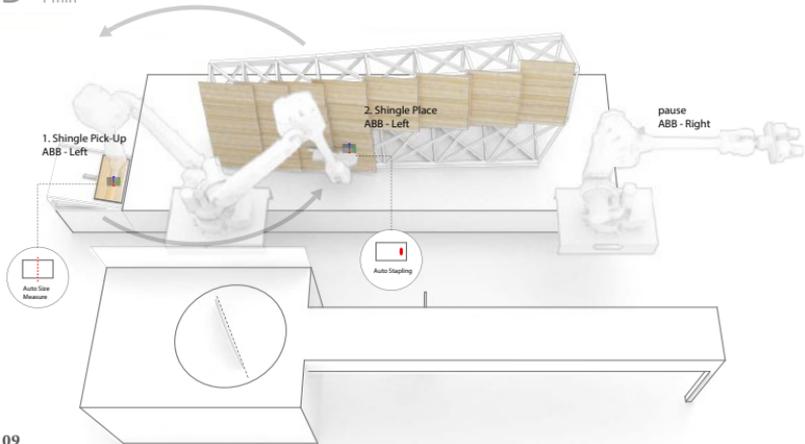
06  
Immagine  
della struttura  
di copertura del  
piano terra prima  
dell'applicazione  
del pavimento  
in legno

**A** Time/ Member  
1 min 30 sec



08

**B** Time/ Shingle  
1 min



09

**09**  
Setup robotico con le operazioni  
attuata dal robot adibito  
all'applicazione delle tegole in legno

**08**  
Setup robotico con le operazioni  
attuata dal robot adibito alla  
costruzione



10

sariamente lineare, dell'intero processo progettuale. Tali conseguenze si esplicitano in un maggior controllo della vasta gamma di parametri di cui un progetto si compone; controllo che a sua volta consente una maggiore libertà di espressione architettonica, affievolendo il rischio di perdersi all'interno della stessa complessità che si vuole implementare. La complessità risulta infatti gestibile e governabile, e l'architettura si traduce in una vasta mole di dati la cui gestione è affidata a raffinati strumenti di progettazione; a concludere la cornice, il setup robotico si incarica di restituire in forma tangibile gli stessi dati, permettendone la concretizzazione in maniera tanto accurata da potersi assumere esatta.

Si è inoltre dimostrata l'importanza di figure professionali con competenze ad ampio spettro, non più confinabili ai singoli ambiti di architettura e ingegneria, ma in grado di abbracciarle entrambe e, nel contempo, estendersi all'informatica e all'elettronica. Il diaframma esplicitamente dischiuso nel XVIII secolo dall'istituzione della "École nationale des ponts et chaussées" sembra in procinto di rimarginarsi nell'integrazione interdisciplinare del sapere necessario alla comprensione e al pieno utilizzo delle potenzialità offerte dagli innovativi strumenti in questa sede presentati.

10  
Vista lato est  
della struttura



11

In conclusione, il *framework* implementato risulta condizione indispensabile per la realizzabilità di nuove forme architettoniche in grado di prescindere dal paradigma della *Standardizzazione* e, nel contempo, di non sfociare in un eccessivo aumento dei costi e dei tempi di fabbricazione: si consideri che l'organico degli addetti ai lavori per il progetto presentato è limitato al numero di otto, e che le fasi di fabbricazione e assemblaggio dell'intero manufatto si sono svolte nel corso di cinque settimane [fig. 10] [fig. 11].

11  
Vista lato sud-est  
della struttura  
e del sito

## NOTE

[1] Il progetto descritto è stato realizzato nel contesto del “Master of Advanced Studies in Architecture and Digital Fabrication” presso l’ETH di Zurigo, dagli studenti Jay Chenault, Alessandro Dell’Endice, Matthias Helmreich, Nicholas Hoban, Jesus Medina, Pietro Odaglia, Federico Salvaliao e Stavroula Tsafou.

Il progetto è stato supervisionato dai professori Fabio Gramazio e Matthias Kohler e diretto da Philipp Eversmann. Il progetto è stato supportato dall’NCCR Digital Fabrication e finanziato dalla Swiss National Science Foundation. Si ringraziano per il loro contributo al progetto le aziende: Schilliger Holz AG, Rothoblaas, Krinner AG, ABB e BAWO Befestigungstechnik AG. Si ringraziano inoltre Michael Lyrenmann e Philippe Fleischmann per il loro costante aiuto nella realizzazione del setup robotizzato.

## REFERENCES

Dörfler Kathrin, Rist Florian, Rust Romana. “Interlacing: an experimental approach to integrating digital and physical design methods”, pp. 82-91, in Brell-Cokcan Sigrid, Braumann Johannes (a cura di), *Rob|Arch 2012: Robotic fabrication in architecture, art and industrial design*, Vienna, Springer, **2013**, pp. 320.

Robeller, Christopher, Seyed Sina Nabaei, Yves Weinand, “Design and Fabrication of Robot-Manufactured Joints for a Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT”, pp. 67-81, in Wes McGee, Monica Ponce de Leon, *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Vienna, Springer, **2014**, pp. 407.

Robeller, Christopher, Andrea Stitic, Paul Mayencourt, and Yves Weinand. “Interlocking Folded Plate. Integrated Mechanical Attachment for Structural Timber Panels”, pp. 281-294, *Advances in Architectural Geometry*, vol. 4, **2014**, pp. 385.

Robeller, Christopher, Seyed Sina Nabaei, and Yves Weinand. “Design and Fabrication of Robot-Manufactured Joints for a Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT”, pp. 67-81, *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, **2014**, pp. 407.

Asbjørn, Søndergaard, Amir Oded, Eversmann Phillip, Piskorec Luka, Stan Florin, Gramazio Fabio, and Kohler Matthias, “Topology Optimization and Robotic Fabrication of Advanced Timber Space-Frame Structures”, pp. 190-203, *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, **2016**, pp. 474.

FEM-software: Karamba [www.karamba3d.com](http://www.karamba3d.com) [Novembre **2016**]

Helm, Volker, Michael Knauss, Thomas Kohlhammer, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, “Additive Robotic Fabrication of Complex Timber Structures”, in Achim Menges et al. (a cura di), *Advancing Wood Architecture*, London, Routledge, **2017**, pp. 232.

Parascho, Stefana, Augusto Gandria, Ammar Mirjan, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, “Cooperative Fabrication of Spatial Metal Structures”, pp. 24-29, in Menges Achim, Sheil Bob, Glynn Ruairi, Skavara Marilena, *Fabricate 2017*, London, UCL Press, **2017**, pp. 260.