

# Strumenti digitali e sperimentazione di costruzioni realizzate con l'*active bending*

RICERCA E  
SPERIMENTAZIONE/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION

Sergio Pone,

Dipartimento di Architettura, Università degli Studi Napoli Federico II, Italia

pone@unina.it

**Abstract.** Questo contributo racconta l'esperienza della Research Unit dell'Università di Napoli Federico II che lavora da alcuni anni sul tema dell'*active bending* studiando le *gridshell* post-formate in legno: la creazione di una serie di tool informatici si è rivelata molto importante per il controllo degli aspetti formali e di quelli costruttivi di queste singolari strutture, leggere ed ecologiche, di cui la RU ha sperimentato la costruzione con più di 10 esemplari realizzati in scala reale. Il protocollo raccontato consente di progettare le *gridshell* a partire dalla loro forma riproponendo il rapporto (relativamente) lineare tra progetto e costruzione con un duplice risultato: liberare la creatività iniziale (consentendo però di controllare quasi immediatamente la costruibilità della struttura) e consentire la riproducibilità dell'esperimento progettuale ed eventualmente la sua implementazione.

**Parole chiave:** flessione attiva, *gridshell* in legno, progettazione parametrica, morfogenesi computazionale.

## Introduzione

Questo articolo tratta alcuni aspetti tecnologici e progettuali connessi all'ambito tematico delle "Tecnologie leggere" e, in particolare, alla progettazione delle strutture derivanti dall'*Active-Bending* (Flessione attiva) che sono fondate sulla creazione di costruzioni curvilinee realizzate con un sistema strutturale (pre-sollecitato) stabile: «Il vantaggio nell'usare elementi dritti o planari è che nella loro configurazione piana possono essere prodotti e trasportati più semplicemente» (Van Mele et al., 2013). A questo vantaggio corrispondono alcune conseguenze che rendono la progettazione più complessa rispetto alle strutture *unstrained* (sollecitate solo per il peso proprio). Qui il procedimento è simile a quello utilizzato per la progettazione delle strutture a reti di cavi: il mutuo contrasto tra i cavi che si intersecano, la tensione con la quale sono sollecitati e le caratteristiche di resistenza, sono gli elementi che "disegnano" la forma finale. Il progettista non "decide" una forma: la "cerca" e per questo il ruolo delle tecnologie esecutive e del processo costruttivo assume un particolare rilievo.

Digital tools and experimentations for structures realised with the active bending

**Abstract.** The research presented in this paper deals with the experience gained by a Research Unit from DiARC Naples on the topic of active bending structures, in the specific domain of timber post-formed *gridshells*. The design of specific digital tools aimed at controlling architectural and construction issues of such structures can be considered as one of the most important achievements to guarantee the buildability of these lightweight and ecological structures. So far, the research group experimented the design and construction of more than 10 among pavilions and full-scale prototypes of timber *gridshells*. This paper traces the method to design elastic *gridshells* starting from their form in a strict relationship with construction issues, with the aim at freeing the initial concept stage under the surveillance of buildability and allowing the implementation of the bespoke tools as well as of the construction methods.

Per rendere più agevole la progettazione delle tenso-strutture nasce nel 1965, per opera di J.R.H. Otter e A.S. Day, il metodo noto come "*dynamic relaxation*" (rilassamento dinamico).

Il Rilassamento Dinamico è un metodo numerico iterativo per trovare la soluzione di un sistema di equazioni non lineari (...) Fin dal 1970 il Rilassamento Dinamico è stato usato per molti problemi di calcolo strutturale: analisi non lineari di piastre e gusci ... ricerca di forma e analisi delle membrane e delle reti di cavi, ricerca di forma e analisi di strutture tensegrali, strutture pneumatiche, strutture reciproche (Nabaeia et al., 2013).

Il procedimento del Rilassamento Dinamico, diventato molto più rapido con l'avvento del digitale, si è esteso anche alle strutture derivanti dalla flessione attiva: tra tutte, le *gridshell* post-formate in legno, tipologia strutturale nata negli anni '70 dal genio congiunto di Frei Otto e di Ted Happold (Fig. 1) che gode di una nuova recente fortuna, soprattutto in realizzazioni medio/piccole perché la formatura in opera di elementi in legno di modeste dimensioni incontra la nuova sensibilità ecologica e il rinnovato interesse verso il coinvolgimento degli utenti nella costruzione dei manufatti.

Le *gridshell* post-formate nascono applicando uno stato di coazione a una griglia piana – composta da schiere di bacchette ortogonali tra loro, unite con cerniere cilindriche – fino a farle assumere la forma desiderata (Harris et al., 2003). Si tratta dunque di strutture derivate dalla flessione attiva: la loro particolarità è legata alla complessa connessione puntuale degli sforzi di flessione e torsione indotti nelle singole bacchette che producono la deformazione della geometria piana della griglia originaria (Chilton, Tang, 2016). Una deformazione che dipende direttamente dalle

**Keywords:** active flexion, wooden *gridshell*, parametric design, computational morphogenesis.

## Introduction

The research presented in this paper focuses on the topological and technological characteristics of structures designed by means of active bending process, characterised by curved components out of initially straight ones: «The advantage of using straight or planar elements is that they can be easily produced and transported in a compact, flat-packed configuration» (Van Mele et al., 2013). The design of these structures, if compared to that of unstrained ones whose only initial stress is self-weight, is far more complex. One cannot freely shape the components without taking into account its final configuration and stress, after the deformation. This procedure resembles

the one used to design cable net structures, in which the mutual contrast between interwoven cables, their strain and their resistance are the tools to design the final shape. The architect does not choose a free-form: he looks for the right shape.

In 1965 J.R.H. Otter and A.S. Day simplify the design of the tensile structures through their Dynamic Relaxation method. «Dynamic Relaxation (DR) is a numerical iterative method to find the solution of a system of nonlinear equations (...) Since 1970, DR has been exploited in many engineering problems: nonlinear analysis of plates and shells [9-13], buckling and post buckling analysis [14-16], membrane and cable net form-finding and analysis [17-19], form-finding and analysis of tensegrity structures [20], inflatable structure [21], reciprocal frame structures [22] and medical applications [23] among



logiche e dalle modalità di controllo del processo costruttivo: la forma risultante cambia in ragione dei punti di applicazione, della direzione e finanche degli strumenti utilizzati per esercitare le coazioni necessarie alla formatura. La progettazione parametrica e la morfogenesi computazionale rappresentano degli importanti strumenti per il controllo di questo complesso processo.

### Gli strumenti digitali per progettare le gridshell

Da alcuni anni la RU facente capo al DiARC (Dipartimento di Architettura) e al DiSt Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura) dell'Università di Napoli lavora sulle gridshell post-formate in legno<sup>1</sup>: obiettivo della ricerca è l'elaborazione di una metodologia progettuale capace di prefigurare correttamente la forma dei manufatti e di offrire utili indicazioni sul processo costruttivo da seguire per la loro realizzazione.

Muovendo da una strumentazione analogica, l'esperienza mette a punto un metodo per la progettazione digitale attraverso l'elaborazione di tre diversi *tool* informatici: i risultati delle simulazioni digitali sono stati sperimentati con la costruzione di prototipi in scala reale che hanno consentito di verificare l'esattezza

others» (Nabaeia et al., 2013).

The Dynamic Relaxation method has recently become a widespread and fast way to deal with complex design issues thanks to the power of digital tools; active bending structures, such as timber post-formed gridshells, belong to the domain of constructions that can be designed and calculated by means of digital dynamic relaxation; these structures, defined in the 70s by Frei Otto and Ted Happold (Fig. 1), are built from a planar grid of orthogonal wooden laths, joined together with cylindrical hinges, stressed until the desired shape is achieved (Harris et al., 2003).

These structures actually come from the active bending process, during which the correlated bending of the single laths, with the torsional phenomena that come from it, brings more complexity to the geometry of the initial grid (Chilton, Tang, 2016). Therefore, not

only it is of great importance the computational design that foresees the mutual relationships between the components of the structure, but also the construction process that is responsible not only for the shaping phase but also for the stability of the structure over time. These structures take advantage of both the behaviour of shells and grids; therefore, they resist applied compression as well as, to a certain extent, they resist bending stress. This issue boosts the research: if gridshell structures combine two different structural typologies, then the best gridshell construction will maximise their double nature.

Timber gridshells recently raised a good fortune, especially in the field of medium and small constructions, thanks to a renewed interest in getting users involved in the construction phase as well as to the ecological aspects embedded in the use of small wooden components.

dei risultati ottenuti.

I primi esperimenti partono dalla realizzazione di un plastico della gridshell composto da bacchette lignee intrecciate. La deformazione della griglia in scala ridotta offre alcune utili indicazioni su direzione e verso delle coazioni da imporre per la futura formatura in opera; ma la fase euristica del progetto non trova nel plastico lo strumento ideale perché il passaggio dall'idea alla sua simulazione è tutt'altro che immediato e la successiva fase di estrazione del modello 3D, necessario per mettere a punto il progetto esecutivo e il calcolo strutturale, implica una notevole mole di lavoro con risultati non sempre precisi. Inoltre appare chiaro come eventuali modifiche del progetto richiedano di ricominciare il processo dall'inizio.

Per questi motivi, già da qualche anno alcuni ricercatori hanno lavorato alla creazione di strumenti digitali per rendere più agevole il progetto e il disegno delle gridshell oppure per consentirne l'ottimizzazione strutturale (Adriaenssens 2013, 2014; D'Amico et al, 2014; De Peloux et al, 2013; Kuijvenhoven and Hoogenboom, 2012; Li and Knippers, 2011; Bouhaya et al., 2009).

In questo ambito, l'UR di Napoli ha creato nel 2013 un suo primo tool che utilizza gli strumenti della progettazione parametrica a matrice geometrico/fisica (Rhinoceros<sup>tm</sup>, Grasshopper<sup>tm</sup> e Kangaroo). Con *GFFT* (Gridshell Form Finding Tool) (Pone et al., 2013) si ha a disposizione una griglia piana di cui si può determinare il passo, la sagoma e le caratteristiche fisiche delle bacchette<sup>2</sup>; per far partire la simulazione, che deforma la griglia fino a farle assumere la forma finale, bisogna individuare una serie di linee che rappresentano i vincoli esterni della struttura, alle quali associare alcuni nodi perimetrali della griglia (Fig. 2); la simulazione riproduce il processo costruttivo della gridshell reale "for-

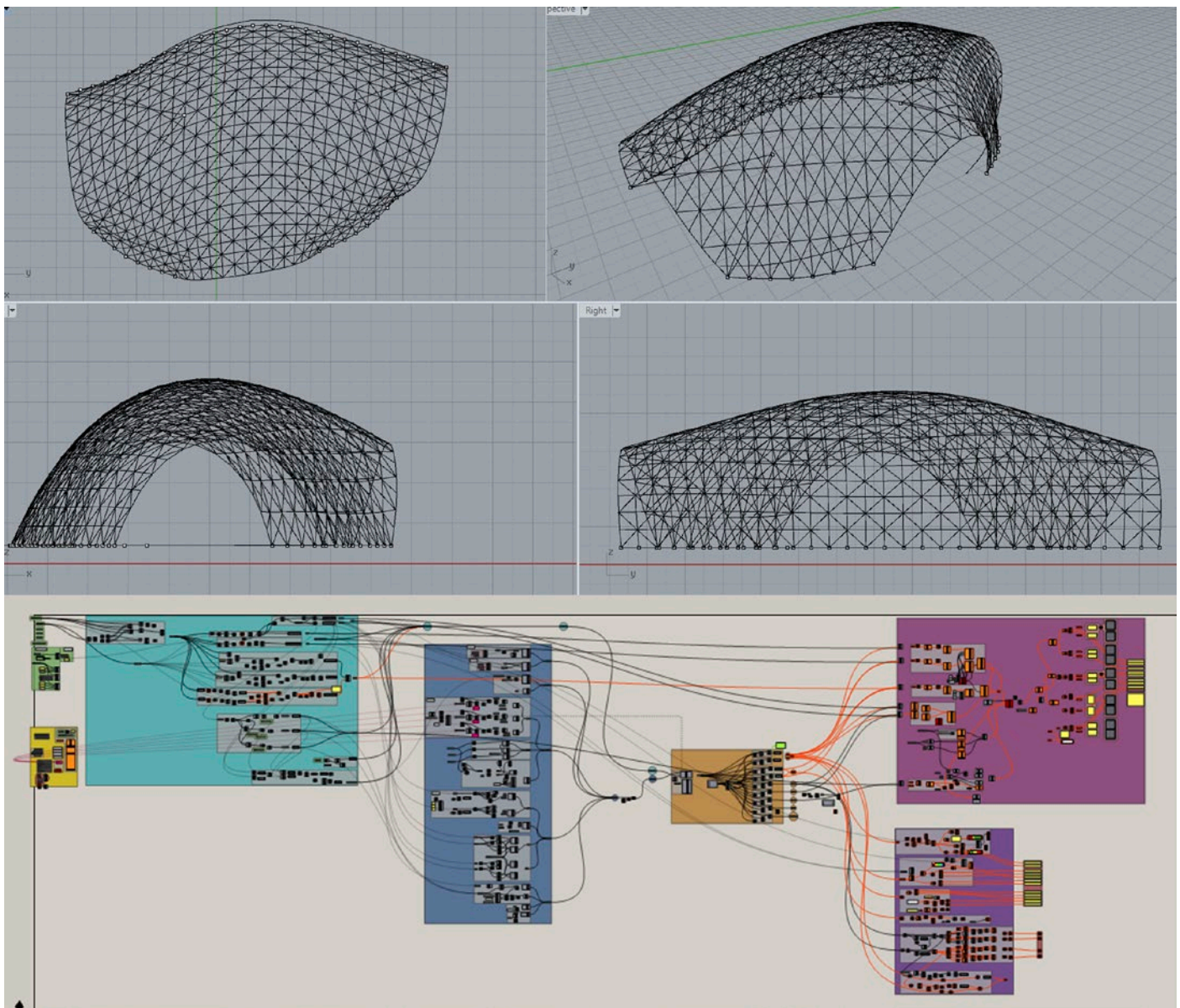
### Digital tools to design gridshells

It has been a few years since an interdisciplinary team of researchers of the DiArc (Department of Architecture) and the DiSt (Department of structures for Engineering and Architecture) both at the University of Naples "Federico II" began to study and experiment timber post-formed gridshells<sup>1</sup>. The team's goal is the development of a design method that can accurately predict the shape of the structures and to provide useful information on their unique construction process.

This research was initially launched in an analogical environment and then translated into the digital one through the development of three different digital tools. The distinctive trait of this process is that the results of the digital simulations have been tested during the construction and lifespan of full-scale prototypes, hel-

ping the validation of some theoretical statements.

The first explorations began with the construction of a scale model of the gridshell out of basswood laths, interwoven or mutually bound with hinge joints. The deformation phase of the small scale grid offered a few hints about the vectors of imposed displacements, in terms of direction and orientation, but the translation of the scaled model information into a 3D model was not enough accurate nor efficient. The scale model, indeed, is not an ideal tool for the heuristic phase of the project, because the path connecting the concept to its physical simulation is far from a direct line; moreover, the next phase concerning the 3D model, a required tool for the development stage and for the structural analysis, is a demanding but not precise device. Besides, even a tiny alteration of the project



02 | GFFT: la definizione e la struttura della Toledo Gridshell che prende forma  
*Definition and structure of Toledo Gridshell taking shape..*

requires to jump back into the process, almost from the beginning.

For these reasons, it has been a few years since different researchers worked on the construction of digital tools suitable for a simplification of gridshells design or for their structural optimisation and calculation (Adriaenssens 2013, 2014; D'Amico et al, 2014; De Peloux et al, 2013; Kuijvenhoven and Hoogenboom, 2012; Li and Knippers, 2011; Bouhaya et al., 2009).

The research team from DiArc designed its first tool – GFFT, *Gridshell Form Finding Tool* – in 2013 (Pone et al., 2013); it uses parametric design tools and live Physics engine for interactive simulation (Rhinoceros™, Grasshopper™ and Kangaroo).

With GFFT you can determine the nodes span, the geometry of the planar

grid and the physical features of the laths<sup>2</sup>; given a vector of imposed displacements and the external constraints of the structure, the simulator can relax the planar grid up to its final shape (Fig. 2). The simulation mirrors the construction process of the gridshell, pushing the boundaries until they get the pre-set position, bending the laths and mutually rotating the initially orthogonal lines.

Once the first shape is achieved, it is possible to perform a live interaction to correct it, changing the initial parameters: it is possible to increase or decrease the dimensions of the initial grid, to change the shape and the position of the external constraints or even stress some knots. During the digital design process, the lines, representing the barcentre axes of the laths, are coloured

in real time according to the bending degree.

GFFT has been created thanks to the practical experience of the research team during the construction of four full-scale prototypes and it aims to reproduce a forth and back process between the designer's creativity, the nature of the material, the construction issues following the formal decisions, if the resistance thresholds are not crossed (Fig. 3). An important outcome of this process is that the interaction with the tool itself produces a particular knowledge (similar to a construction experience) and over time the outcomes become closer to reality or, at least, buildable, also because the simulation has got a high level of reliability compared to the real process (Colabella et al. 2015).

The main limitation of this tool is the necessity to input the initial planar grid as first data: that means starting from a physical model or avoiding complex geometries, whose relative planar grid and constraints are very difficult to predict. Ultimately, GFFT is a tool for the executive phase of the design.

Aiming at letting designers' creativity run wilder, a second tool was created at the roots of the previous one, to allow the prediction of a planar grid even from a very complex geometry. Gridmaker<sup>3</sup> (Pone et al., 2016) is a Grasshopper™ tool, with some codes written with Python™; unlike GFFT, it only uses geometrical tools and its input is a very complex NURBS surface (Fig. 4).

The first goal of GridMaker is the construction of a grid of equidistant

zando” i nodi perimetrali a raggiungere la posizione prestabilita e innescando le due trasformazioni che consentono alla griglia piana di assumere la forma curvilinea: la flessione delle bacchette e la rotazione tra le schiere, originariamente perpendicolari, che trasforma localmente i quadrati in rombi. A questo punto è possibile interagire con il tool per correggere la forma ottenuta attraverso la manipolazione dei parametri immessi in partenza: aumentare o diminuire l'estensione della griglia originaria, modificare forma e posizione dei vincoli esterni o anche inserire un sistema di sollecitazioni sui nodi interni, che consentano di modificare la forma ottenuta. Durante la fase di “formatura digitale” il tool evidenzia il grado di curvatura, in modo che sia visibile l'eventuale attribuzione di curvatures eccessive o troppo blande. *GFFT* nasce dall'esperienza pratica maturata dal gruppo di ricerca durante la costruzione di alcuni prototipi in scala reale e punta a riprodurre il dialogo che si genera tra la creatività del progettista e la natura del materiale che asseconda le scelte formali, ma solo fino a che queste non superano i suoi limiti di resistenza (Fig. 3). Un significativo vantaggio di questa procedura è che l'operatore, chiamato a interagire con lo strumento, aumenta a ogni esperienza la sua abilità (quasi come se avesse realmente costruito la struttura) e riesce a ottenere risultati sempre più vicini alle proprie aspettative e alla possibile realtà, anche perché il simulatore di processo ha dimostrato un altissimo livello di affidabilità rispetto ai risultati del corrispondente processo reale (Colabella et al., 2015). Il principale limite di questo strumento è la sua necessità di avere come input la sagoma della maglia piana di partenza: questo non consente l'elaborazione di geometrie particolarmente complesse perché è molto difficile prevedere la forma esatta della griglia piana e i vincoli da attribuirle per la formatura

che corrispondano esattamente alla forma pensata. In definitiva *GFFT* è uno strumento per una progettazione già avanzata. Per arricchire la “cassetta degli attrezzi digitali” del progettista di gridshell è stato creato un secondo software che nel processo progettuale si pone a monte del precedente e consente di prefigurare la griglia piana anche a partire da una geometria molto complessa. *GridMaker*<sup>3</sup> (Pone et al., 2016) è una “definizione” di Grasshopper™ con parti scritte in Python™ ma, al contrario di *GFFT*, usa solo gli strumenti della geometria e utilizza come input una superficie NURBS anche molto complessa che può essere prodotta a partire dai soli dati architettonici (Fig. 4). Il primo obiettivo di *GridMaker* è quello di costruire una griglia a passo costante appartenente alla superficie data. Questa operazione viene condotta implementando il *Netfish Method* creato da Klaus Linkwitz per la Mannheim Multihalle Gridshell di Otto & Happold e già reso digitale prima da Toussaint (2007), poi con il nome di “Sphere Packing Algorithm” da Basso et al, (2009). Il *Netfish Method* implementato con *GridMaker* consta dell'individuazione di un sistema di 4 semi-assi – ortogonali tra loro e appartenenti al piano X,Y – proiettato sulla superficie in modo da dividerla in 4 quadranti. Si procede poi alla costruzione di una sfera, dal raggio pari al passo che s'intende attribuire alla griglia, con il centro nell'intersezione dei semi-assi in modo da individuare la sua traccia sulla superficie. Quest'ultima curva chiusa interseca i semi assi in 4 punti che diventano i centri di altre 4 sfere; l'iterazione di questa operazione consente di disegnare la griglia su tutta la superficie. Questo metodo presenta due criticità: la prima è che all'approssimarsi ai bordi della superficie la costruzione geometrica non trova più intersezioni valide e quindi la griglia non riesce a raggiungere il perimetro originario; la seconda è che, nel caso in

nodes overlapping the given shape. It takes advantage of the *Netfish Method* by Klaus Linkwitz for Frei Otto & Ted Happold's Mannheim Multihalle Gridshell, digitalised by Toussaint (2007) and by Basso et al (2009), and named “Sphere Packing Algorithm”. The *Netfish Method* developed within *GridMaker* consists of a system of 4 orthogonal semi-axes belonging to the X,Y plane, that, projected on the surface, divides it in 4 quarters. Then, a sphere is constructed; its radius is equal to the step of the grid, its centre is the intersection of the semi-axes. The curve resulting from the intersection between the sphere and the surface intersects the semi-axes in 4 points, which are the centres of other 4 spheres; iterating this operation, a regular grid can be drawn all over the surface. Changing the axes and the position of the origin, the grid will be more or less

regular, with the single cells being more or less similar to a square. This method has got two drawbacks: on one hand, moving closer to the boundaries of the surface, the geometrical construction does not find useful intersections, therefore the grid cannot reach the initial perimeter. On the other hand, if some curves parallel to the semi-axes are shorter than them, the operation stops and it creates unmapped areas. The solution to the first problem is extending the domain of the initial NURBS that will be trimmed using the initial perimeter, once the grid is constructed. The solution to the second problem is rotating the system of the initial Cartesian axes, until the right orientation, without blind spots, is found. This procedure is too complex to use the *trial and error* method and for this reason *GridMaker* uses the tools of the



03 | Toledo Gridshell: Tesi di Laurea di A. Fiore e D. Lancia, tutor S. Pone, co-tutor F. Portioli, S. Colabella, B. Parenti, B. D'Amico.  
Toledo gridshell: thesis by A. D. Fiore and Lancia Degree, tutor S. Pone, co-tutor F. Portioli, S. Colabella, B. Parenti, B. D'Amico.

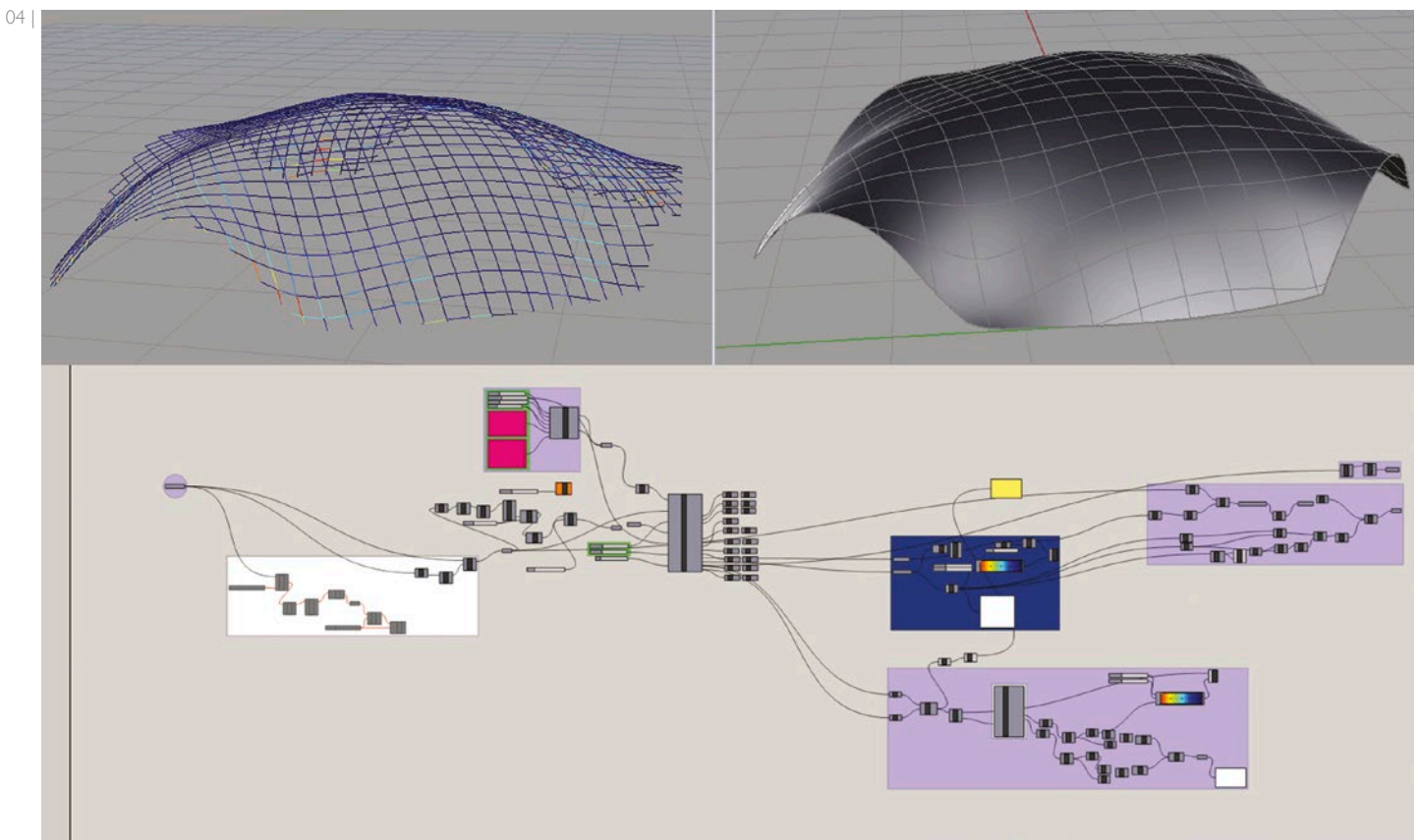
cui alcune curve parallele ai semi-assi risultino più corte di questi, il procedimento si arresta e crea zone non mappate. Alla prima questione si ovvia procedendo a un'estensione del dominio della NURBS originaria che, a griglia costruita, si ri-taglierà usando il perimetro di partenza; alla seconda, facendo ruotare il sistema di assi cartesiani originari finché non si individua una giacitura che non presenti "zone d'ombra".

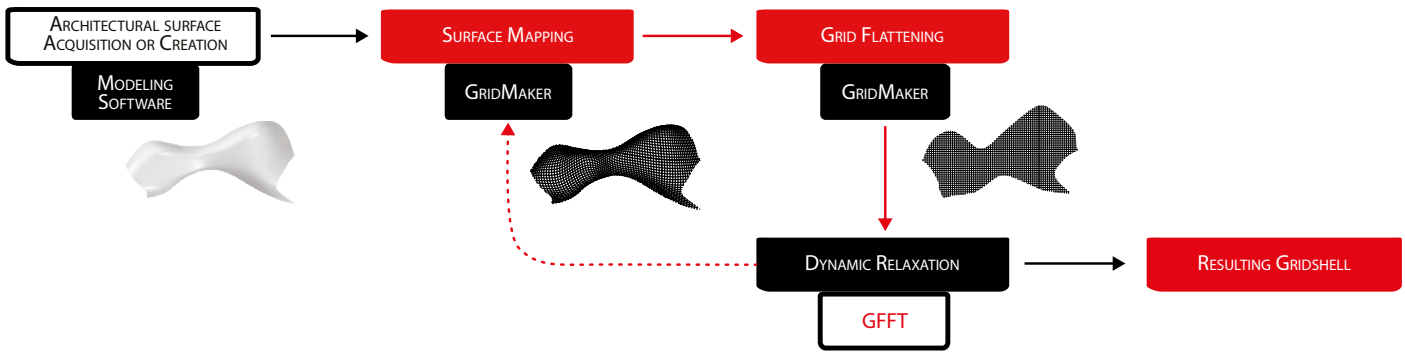
Un procedimento troppo complesso perché si possa usare il metodo *trial and error*: e allora, attraverso *GridMaker*, si fa ricorso agli strumenti della morfogenesi computazionale. Il tool è organizzato con dati (*inputs*), variabili (*genoma*) e funzione obiettivo (*fitness*). I dati sono le informazioni di base che non variano all'interno del procedimento che riguarda una particolare struttura: ad esempio la geometria della NURBS di partenza. L'insieme delle variabili costituisce il genoma del tool, formato in questo caso dalla posizione dell'origine degli assi, dalla direzione di questi, dal modo in cui gli assi si trasformano in curve (B-spline) sul piano X,Y, prima di essere proiettate sulla superficie. La fitness consiste nella minimizzazione della differenza tra l'area totale della superficie e la somma delle aree dei singoli quadrilateri che il *netfish*

*method* crea. A questo obiettivo si è ritenuto di aggiungerne un secondo che tenga conto della rotazione relativa tra le due schiere di bacchette all'inizio ortogonali. Con la sperimentazione effettuata su 10 gridshell si è rilevato che la formatura era più semplice e la struttura finita più resistente quando i rombi erano più prossimi al quadrato: il tool seleziona così le soluzioni che presentano anche il minimo del materiale utilizzato. Ottenuta la griglia "adagiata" sulla superficie data, *GridMaker* sviluppa la corrispondente maglia piana e questa, insieme al sistema di vincoli esterni, diventa l'input per *GFFT*, che partendo dalla griglia piana ormai ottimizzata, può generare una forma del tutto sovrapponibile con quella ricercata oppure una in parte diversa (Fig. 5).

Un attendibile test condotto sulla gridshell Toledo 2.0, costruita a Napoli nella corte del Dipartimento di Architettura nel 2014 (Fig. 6), la stessa sulla quale era stata provata la corrispondenza tra *GFFT* e la realtà. Il progetto è stato rifatto usando la nuova filiera e la griglia proposta da *GridMaker* si è rivelata già del tutto sovrapponibile a quella della gridshell costruita.

Per affrontare il secondo caso, il gruppo di ricerca ha messo a punto il terzo tool: *Informer*. Come *GFFT*, *Informer* considera dati ge-





05 | Diagramma di flusso che descrive il processo di form-finding da GridMaker a GFFT.

Flowchart describing the form-finding process from GridMaker to GFFT

06 | Gridshell Toledo 2, Napoli, di S. Pone, S. Colabella, B. Parenti, D. Lancia, O. Mammana, B. D'Amico, foto di D. Lancia.

Gridshell Toledo 2, Naples, by S. Pone, S. Colabella, B. Parenti, D. Lancia, O. Mammana, B. D'Amico, photo by D. Lancia.

ometrici e dati fisici e integra Grasshopper<sup>tm</sup> con Karamba, e con un algoritmo scritto in Phyton<sup>tm</sup>. Gli input di *Informer* sono le due gridshell prodotte da *GridMaker* e da *GFFT*, il genoma è costituito da tutte le possibili combinazioni di vettori capaci di far coincidere i nodi delle due strutture, mentre la fitness è la minimizzazione del numero di questi vettori. La funzione obiettivo privilegia i casi in cui il numero dei tiranti, naturalmente più stabili, risulta maggiore di quello dei puntoni, tecnologicamente più complessi.

## Conclusion

Gli strumenti della progettazione parametrica e della morfogenesi computazionale si rivelano molto utili nello studio e nella realizzazione di strutture derivanti dall'*active bending*: lo dimostra tra l'altro il notevole interesse della comunità scientifica internazionale (vedi le references) nei confronti della progettazione digitale delle gridshell. La filiera di tools prodotta dalla RU di

computational morphogenesis consisting of inputs, a genoma and a fitness. Basic information is the constant that never varies, such as the geometry of the initial NURBS, the span between nodes and the number of control points that manage the bending of the four semi-axes. The domain of variables (genoma) are the position of the origin of the axes, their orientation, the transformation of the axes in curves (B-splines) on the X,Y plane before they are projected on the surface. The fitness represents the minimisation of the difference between the total area of the surface and the sum of the areas of the parallelograms created by the *netfish method*.

A second goal, that manages the relative rotation between the two sets of laths, initially orthogonal, is added to the first one. The construction of the 10 full-scale gridshells provided the design team many information about the

construction of the digital tool, such as, during the shaping phase, the way in which two angles of a rhombus become too acute and the other two too obtuse, determine a strong resistance to deformation along the direction of the bisector of the acute angles and a weak one in the orthogonal direction; the result being a more complex shaping phase followed by a less resistant structure. The tool allows to pick those solutions where the rotation of the sets of laths is at its minimum and the basic cell is more similar to a square, in every area of the gridshell. Therefore, the second fitness tends to minimise the sum of the differences between the right angle and the smallest of the angles of the rhombuses; in this way, the less deformed structures are chosen, thus a positive side-effect of the optimisation process is the minimisation of the material needed for the construction.



Once the grid is "laid" on the initial surface, GridMaker develops the corresponding optimised planar grid, to be used as input in GFFT, together with the external constraints deduced from the concept stage. GFFT can either create a shape equal to the desired one or a partly different one. The first scenario has been tested for the Toledo 2.0 gridshell, built in 2014 in Naples in the courtyard of the Department of Architecture: here the GFFT model and the real one were the same. For the second case, the research team has created a third tool: *Informer*.

As well as GFFT, *Informer* takes into account geometrical and physical data and it completes Grasshopper<sup>tm</sup> with *Karamba*, a parametric structural engineering tool, plus an algorithm written in Phyton<sup>tm</sup>. The inputs of *Informer* are the two gridshells created by GridMaker and GFFT: they are compared

through the association of different positions of the structural joints and then jointed with pushing or pulling vectors, able to bring the knots of the second gridshell within a 10-cm-diameter sphere (an acceptable tolerance), built in the barycentre of the corresponding knot of the gridshell designed through GridMaker. Once again the computational morphogenesis is used: the inputs are the two gridshells, the genoma consists of all the possible combinations of vectors that can bring to a satisfying result, the fitness is the minimisation of the number of these vectors. The fitness includes another important condition developed from the practical experience: in order to move a structural knot of a gridshell from a position to another, it is necessary to apply the load in the direction of the line that goes from the actual position of the point to the desired one.

Napoli (*GridMaker-GFFT-Informer*) può candidarsi a essere l'ossatura portante di questo processo, naturalmente interdisciplinare, offrendo utili indicazioni sulla forma dei manufatti, sul processo di formatura e sulla resistenza strutturale. La verifica sperimentale del processo è oggi quasi conclusa: il programma della RU del DiARC si completerà testando il funzionamento dell'ultimo passaggio costituito dalle "correzioni" che *Informer* apporta ai risultati ottenuti con gli altri due tools.

#### NOTE

<sup>1</sup> La RU è coordinata da S. Pone ed è formato dalle PhD arch. S. Colabella e B. Parenti e dall'arch. D. Lancia per la Tecnologia e dal prof. ing. F. Portioli e dal PhD ing. O. Mammana per le strutture. Il gruppo è spesso integrato dal PhD arch. B. D'Amico della Napier University di Edimburgo.

<sup>2</sup> Il tool *GFFT* nasce dalla Ricerca "Gridshell post-formate in legno" coordinata da S. Pone e finanziata con contributo erogato dalla Brancaccio Spa per il periodo 2012-2013.

<sup>3</sup> Il tool *GridMaker* deriva dalla Ricerca "Tecnologia delle Gridshell post-formate in legno" coordinata da S. Pone e finanziata nel 2013 con il contributo di Forest Legnami Srl e di G.R. Sistemi Srl che ha prodotto anche i due prototipi di studio costruiti nella corte del DiARC di Napoli.

#### REFERENCES

Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D. and Williams, C. (2014), *Shell structures for architecture: form finding and optimisation*, Routledge, London.

Basso, P., Del Grosso, A., Pugnale, A. and Sassone, M. (2009), "Computational Morphogenesis in Architecture: Cost Optimization of Free-Form Grid Shells", *IASS Journal*, Vol. 50, No. 3.

Bouhaya, L., Baverell, O. and Caron, J.F. (2009), "Mapping two-way continuous elastic grid on an imposed surface", *Proceedings of the Symposium of IASS*, Valencia.

On the construction site – where of course there will be just one gridshell to correct – this line will be traced starting from the only real point, the knot, and the second point, connected to the ground, is given by the tool. This will be the position of the telescopic support (if pushing is needed) or of the rope (if pulling is needed). *Informer* selects the best solution minimising the number of knots, but it would rather choose the cases where there are more tie-rods than brace ties. This happens because tie-rods are steadier and they feature a less complex technology: even ropes can be used to pull, stretched with manual winches.

#### Conclusion

As proved by the considerable amount of interest shown in these last years by a part of the international scientific community towards the digital

design of the gridshells, the tools of parametric design and computational morphogenesis are particularly useful in the study and the realisation of structures created with the *active bending* process. The sequence of digital tools *GridMaker-GFFT-Informer* can represent the framework (featuring interdisciplinary inputs) of the designing process of post-formed gridshells and can provide useful directions, not only for the shape of the structures, but also for their shaping process and structural strength. As of February 2017, the experimental test of the process is 80 percent complete: the agenda of the research unit foresees the completion of this process, especially testing the proper functioning of the last phase, in which *Informer* corrects the outcomes of the other two tools.

Chilton, J., Tang, G. (2016), *Timber Gridshell. Architecture, Structure and Craft*, Routledge, London.

Colabella, S., Lancia, D., Memmolo, R., Repola, L. and Pone, S. (2015), "A monitoring system for wooden post-formed gridshells", *Future Visions, Proceedings of the Symposium of IASS*, August 17-20, 2015, Amsterdam.

D'Amico, B., Kermani, A., Zhang, H., Pugnale, A., Colabella, S., Pone, S. (2015), "Timber Gridshells: Numerical Simulation, Design and Construction of a Full-Scale Structure", *Structures*, London, June 2015.

Harris, R., Romer, J., Kelly, O. and Johnson, S. (2003), "Design and construction of the Downland Gridshell", *Building Research & Information*, Vol. 31, N. 6.

Kuijvenhoven, M., Hoogenboom, P. (2012), "Particle-spring method for form finding gridshell structures consisting of flexible members", *IASS Journal*, Vol. 53.

Nabaeia, S.S., Baverell, O. and Weinanda, Y. (2013), "Mechanical Form-Finding of the Timber Fabric Structures with Dynamic Relaxation Method Seyed", *International journal of Space Structures*, Vol. 28, N. 3-4.

Pone, S. (2012), *Gridshell. I gusci a graticcio in legno tra innovazione e sperimentazione*, Alinea, Firenze.

Pone, S., Colabella, S., D'Amico, B., Fiore, A., Lancia, D. and Parenti, B. (2013), "Timber post formed grid shell: digital form finding / drawing and building tool", *Beyond the Limits of Man, Proceeding of the Symposium of IASS*, September 23-27, 2013, Wroclaw.

Pone, S., Mirra, G., Pignatelli, E., Colabella, S. and Lancia, D. (2016), "Specialised algorithms for different project stages in a post-formed timber gridshell design" *Proceedings of International Conference Structures and Architecture*, June 12-15, 2016, Guimares.

Toussaint, M.H. (2007), *A Design Tool for Timber Gridshells*, PhD Thesis, University of Technology, Delft.

Van Mele, T., De Laet, L., Veenendaal, D., Mollaert, M. and Block, P. (2013), "Shaping Tension Structures with Actively Bent Linear Elements", *International journal of Space Structures*, Vol. 28, N. 3-4.

#### NOTES

<sup>1</sup> The Research Unit on the "Technology of timber post-formed gridshells" is coordinated by Sergio Pone and it is formed by PhD arch. Sofia Colabella and Bianca Parenti, arch. Daniele Lancia for Technology, prof. eng. Francesco Portioli and PhD eng. Oreste Mammana for structures. The team often collaborated with PhD arch. Bernardino D'Amico of Napier University of Edimburgh.

<sup>2</sup> The *GFFT* tool was created within the Research named "Timber post-formed gridshells", coordinated by Sergio Pone and financed by Brancaccio Costruzioni Spa in 2012-2013.

<sup>3</sup> The *GridMaker* tool was developed within the research "Technology of timber post-formed gridshells", financed in 2013 by Forest Legnami Srl and G.R. Sistemi Holzindustrie Srl, that also produced the two prototypes built in the courtyard of the DiARC of Naples.