

"...e la copertura a volta era di colore blu, di zaffiro, sulla quale si doveva vedere un miracolo dell'arte: il Sole, la Luna, e le Stelle, disposte dai costruttori, si muovevano in cielo con lo stesso ordine degli astri veri."

dal "Parsifal" dramma musicale di Richard Wagner (compositore)



Lithic Design



New Fundamentals



Lab. Morfologia Strutturale 2.0



Generelli SA

Questa pubblicazione è il risultato di una ricerca avviata dal Prof. G. Fallacara sin dal 2003 con la discussione della sua tesi di dottorato dal titolo "Il paradigma stereotomico nell'arte del costruire. Dalla natura sincretica della modellazione digitale alla progettazione/costruzione di elementi architettonici in pietra da taglio" (tutor: prof. C. D'Amato) e proseguita con la tesi, A.A. 2006/2007, dal titolo "Archi e volte oblique in pietra con apparecchiature stereotomiche dal XVI secolo all'epoca contemporanea: teoria ed applicazioni" (relatori Prof. C. D'Amato, G. Fallacara) sviluppata dall'Arch. V. Minenna. I risultati di questi studi sono stati alla base del modulo sulla costruzione in pietra del corso di Progettazione degli elementi costruttivi del corso di Laurea in Ingegneria edile -Architettura (Università Sapienza) del Prof. M. Ferrero tenutosi a Roma nell'A.A. 2014-2015, in cui si è incrementato il metodo attraverso l'utilizzo di specifici metodi di modellazione per il calcolo strutturale.

Si ringrazia Yuri Estrin e il MADA della Monash University di Melbourne (AU) per aver organizzato un Workshop sull'argomento.

Si ringrazia la Generelli SA per aver consentito la realizzazione del prototipo "Arco catenario a conci osteomorfi, precompresso tramite post tensione di cavi di acciaio estradossati".

*Giuseppe Fallacara
Marco Ferrero
Vincenzo Minenna*

Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione.



dicar.



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE EDILE E AMBIENTALE

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

M A D A

MONASH UNIVERSITY
ART DESIGN & ARCHITECTURE



MONASH University
Engineering

Colophon
© Giuseppe Fallacara, 2015
www.atelierfallacara.it
© Marco Ferrero, 2015
marco.ferrero@uniroma1.it
© Vincenzo Minenna, 2015
www.lithicdesign.it

Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione.

Autori/ Authors

Sofia Colabella (Federico II Napoli), Yuri Estrin (Monash University), Giuseppe Fallacara (Politecnico di Bari), Marco Ferrero (Sapienza Roma), Daniele Malomo (Sapienza Roma), Vincenzo Minenna (Politecnico di Bari), Nicola Nastasi-Armando Pellicchia, (Sapienza Roma), Tim Schork (Monash University), Fabrizio Vestroni (Sapienza Roma)

Collaboratori / Collaborators / Coworkers

Gruppo di tesi in Morfologia Strutturale II (Politecnico di Bari)

Aziende partner/ Partner companies

Main partners:

Generelli SA, Rivera Ticino (CH)

Tutte le immagini e le fotografie di cui non è specificato il copyright sono degli autori.

IV

Graphic design:

Vincenzo Minenna

Collaboratori:

Angelica Abascià, Paola Bianco, Antimo Farina, Giuseppe Gissi, Emanuele Saracino, Mariangela Urgesi

Typesetting:

Fedra Sans, Fedra Serif, Fedra Display

© Peter Biřak, 2001 - 2006

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage or retrieval system, without permission in writing from the publisher.

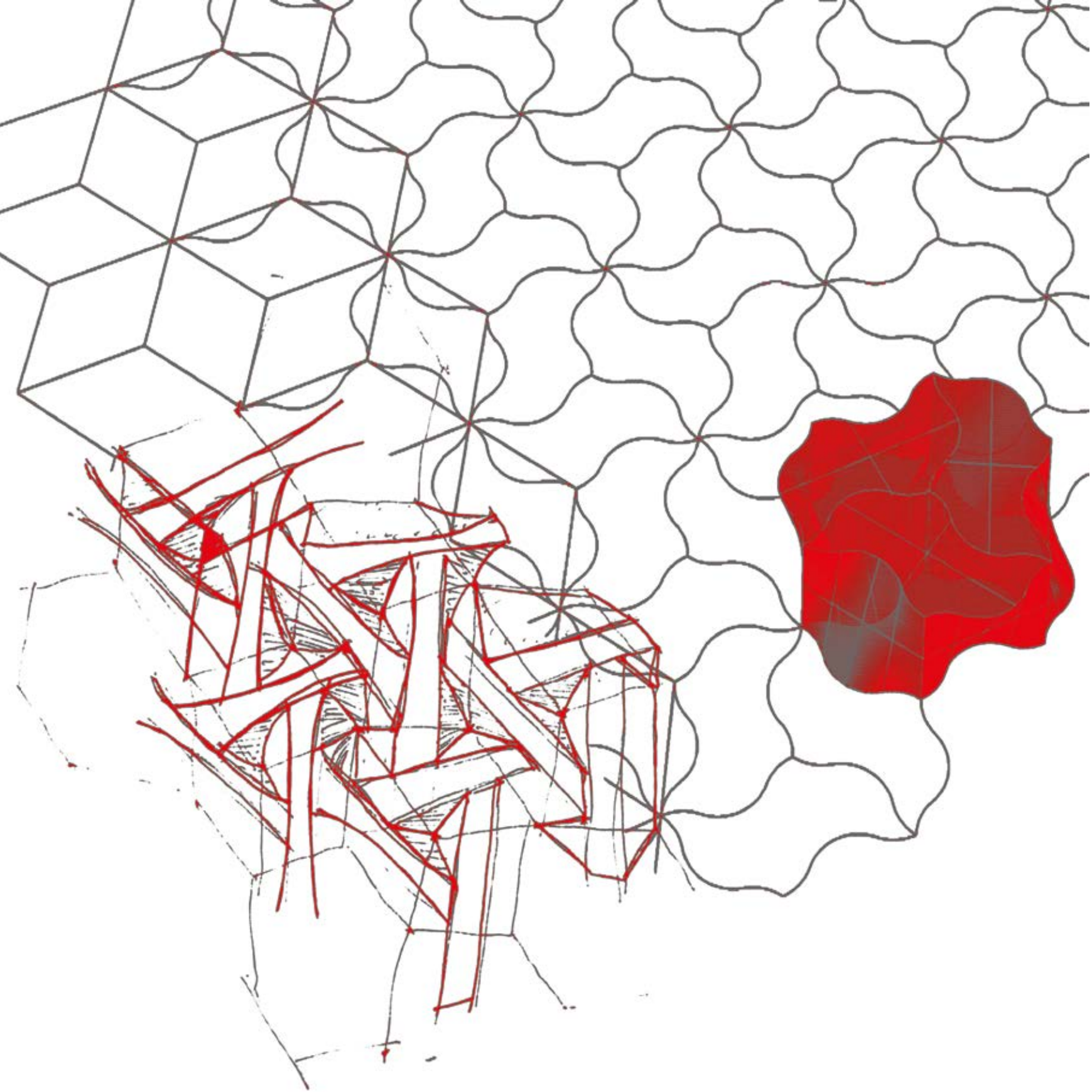
Unless otherwise stated, all illustrations are the property of the authors.

© 2015 ISBN 9788894022889

Edizioni Gioffreda Maglie (Le)

Copertina: design by Vincenzo Minenna

Immagine a destra: design by Giuseppe Fallacara



Index

Presentazioni

pag. IX	<i>Presentazione</i> Fabrizio Vestroni
pag. XI	<i>Topological Interlocking – a materials scientist's perspective</i> Yuri Estrin

Introduzione

pag. XVII	<i>Tre paradossi della stereotomia come risorsa di innovazione teorico/pratica per l'architettura odierna in pietra da taglio</i> Giuseppe Fallacara
-----------	---

Saggi

pag. 2	<i>Progettazione tecnica e calcolo statico dei sistemi voltati in pietra da taglio</i> Marco Ferrero, Federica Rosso
pag. 10	<i>Stereotomia e Topologia: un metodo universale per la progettazione di spazi voltati stereotomici</i> Giuseppe Fallacara
pag. 22	<i>Teorie e tecniche per la progettazione parametrica di spazi voltati complessi</i> Vincenzo Minenna
pag. 28	<i>Analisi e progetto di strutture stereotomiche lapidee</i> Daniele Malomo

Esperienze didattiche

I MODULO "PIETRA PORTANTE" ROMA I

pag. 34

Note sul seminario "Pietra Portante" tenuto dai Proff. G. Fallacara e V. Minenna nel corso di "Prog degli elementi costruttivi" del prof. M. Ferrero.

Nicola Nastasi, Armando Pellecchia

Schede progetto - Roma La Sapienza.

Corso di progettazione degli elementi costruttivi

II WORKSHOP MELBOURNE (AU)

pag. 100

New Stereotomic Vaulted Structures with Interlocking, Discrete and Reciprocal Frame Blocks

Giuseppe Fallacara, Tim Schork

Idee in legno e pietra prendono forma

Sofia Colabella

III WORKSHOP DI PROGETTAZIONE "PONTI DI PUGLIA" . RECUPERO E VALORIZZAZIONE DI UN PAESAGGIO" STAGE MONOPOLI (BARI)

pag. 114

REALIZZAZIONE DI VOLTA CATENARIA CON CONCI OSTEOMORFI DEL PROF. GIUSEPPE FALLACARA" STAGE RIVERA (TICINO, CH)

OsteoMorphing, Volte catenarie e colonne litiche precomprese a conci osteomorfi.

Note sullo stage presso la Generelli SA, Rivera (Svizzera)

Giuseppe Fallacara, Vincenzo Minenna, Lab. Laurea Morfologia Strutturale 2.o

Sponsor / Partner nella ricerca

Generelli SA: Leader della lavorazione della pietra naturale

Matteo Generelli con Giuseppe Fallacara e Vincenzo Minenna

pag. 126



PRESENTAZIONE

**Fabrizio Vestroni*

** Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni, Preside della Facoltà di Ingegneria – Sapienza Università di Roma*

Il presente lavoro è il primo risultato di un rapporto di collaborazione che si è sviluppato tra la Facoltà di Ingegneria dell'Università Sapienza di Roma e il Politecnico di Bari e, in particolare, tra i gruppi di ricerca guidati rispettivamente dal prof. Marco Ferrero e dal prof. Giuseppe Fallacara, autori della pubblicazione.

Entrambi i gruppi svolgono da anni studi nel settore delle costruzioni in pietra. I colleghi hanno infatti sviluppato, nelle rispettive sedi, attività didattiche e di ricerca aggregando studenti e colleghi interessati all'argomento.

Giuseppe Fallacara, professore associato in Progettazione Architettonica presso il DICAR del Politecnico di Bari, è un riconosciuto esperto internazionale nel campo dell'architettura in pietra da taglio secondo i criteri della stereotomia e ha all'attivo, oltre a molte pubblicazioni, numerosi prototipi realizzati ed esposti nelle più importanti manifestazioni del settore lapideo, a partire dalla Fiera Internazionale del Marmo Marmomacc di Verona.

È altresì Visiting Researcher in molte università italiane e straniere e ha vinto numerosi concorsi di architettura.

Del suo gruppo fa parte Vincenzo Minenna, architetto e Dottore di ricerca (PhD) in Progettazione architettonica, professore a contratto presso lo stesso Politecnico in Teoria e Tecnica della Progettazione Architettonica; anch'egli da molti anni è impegnato in sperimentazioni e attività di ricerca nei settori della progettazione e costruzione in pietra da taglio e morfologia strutturale.

Marco Ferrero, professore associato in Architettura Tecnica presso il DICEA di Roma Sapienza, da più di vent'anni svolge ricerche sul tema dell'architettura in pietra, pubblicandone i risultati tramite monografie, articoli e comunicazioni a convegni internazionali.

Ha istituito presso il corso di laurea in Ingegneria edile-architettura un insegnamento sulle costruzioni e i materiali lapidei; nell'ambito del laboratorio progettuale del corso sono stati sviluppati gli approfondimenti presentati nella seconda parte del volume. Molti degli studenti che hanno frequentato il laboratorio hanno poi svolto tesi di laurea e anche di Dottorato di Ricerca su queste tematiche sotto la guida dello stesso docente.

La collaborazione tra le due sedi ha permesso di far confluire le rispettive specifiche competenze, dando luogo a risultati originali che sono stati contestualmente verificati tramite l'attività degli studenti del laboratorio progettuale.

Le conclusioni del lavoro mostrano come i materiali lapidei possano avere un ruolo, nell'architettura contemporanea, che va oltre quello, ormai comune, delle finiture.

La combinazione delle tradizionali regole stereotomiche con gli attuali programmi di modellazione e calcolo strutturale consente alla pietra, opportunamente armata, di offrire nuove possibilità nella sua antica funzione portante.

Ritengo che l'esperienza condotta dagli autori presenti molti motivi di interesse e che il metodo sviluppato possa essere utile ai tecnici e agli studiosi interessati alle possibilità offerte da questo nuovo, e al tempo stesso antico, procedimento costruttivo.

IX

Fig. pagina precedente. Lezioni del Modulo "Pietra Portante" tenute nella Sala del consiglio della Presidenza presso l'Università Sapienza Roma, Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale, sede di San Pietro in Vincoli



Truchet_Osteomorphic Torsion Arch, Design by G.Fallacara, 2015

TOPOLOGICAL INTERLOCKING - A MATERIALS SCIENTIST'S PERSPECTIVE

Incastro topologico - Prospettiva di uno scienziato dei materiali

*Yuri Estrin

* Director Centre for Advanced Hybrid Materials, Department of Materials Engineering - Monash University, Clayton - Australia

Questo saggio differisce dal resto degli articoli presenti in questo libro per due ragioni: la prima, il seguente è scritto in Inglese; la seconda, l'articolo è scritto da uno scienziato dei materiali, piuttosto che da un architetto o un designer.

Il punto di vista qui espresso è personale, e il resoconto riflette il lavoro fatto nel contesto della geometria ispirata dal material design.

Quasi 15 anni fa, i miei colleghi e io pubblicavamo un articolo che introduceva un concetto di incastro topologico come un principio di design dei materiali [1]. L'idea di fondo era che la fragilità dell'ingegneria dei materiali, come ceramiche, compositi metallici e determinati polimeri, potesse essere diminuita dalla suddivisione in elementi costruttivi più piccoli.

L'ingegneria dei materiali fornisce intuitivamente questa soluzione chiara con un sostegno teorico: la cosiddetta statica Weibull ci dice che la probabilità di sopravvivenza di un elemento strutturale ad uno sforzo imposto dipende dal suo volume in maniera esponenziale. In definitiva la segmentazione è il modo per combattere la fragilità. Il segreto di essa è quello della ricerca di una geometria adatta e la disposizione dei componenti costruttivi elementari. In termini di fattibilità economica, sembra ovvio che i blocchi elementari in cui il materiale viene disposto per la segmentazione necessita di una divisione identica nei pezzi e nelle dimensioni. Nel lavoro citato siamo stati capaci di mostrare tutte le possibilità di produrre strutture piastriformi da blocchi identici di forma tetraedrica. I blocchi erano incastrati in virtù della loro geometria e della mutua disposizione che forniva vincoli cinematici a movimenti in ogni direzione, Fig. 1. Nessun legante o connettore era richiesto per posare i blocchi in opera.

Noi duplicammo questo concetto di incastro topologico, e il

This essay differs from the rest of the articles in this book in two ways: first, it is presented in English; second, it is written by a materials scientist, rather than an architect or designer. The perspective taken here is a personal one, and the narrative reflects the work done within the context of the geometry inspired materials design.

Nearly 15 years ago, my colleagues and I published a paper that introduced the concept of topological interlocking as a materials design principle [1]. The underlying idea was that brittleness of engineering materials, such as ceramics, intermetallics, and certain polymers, can be alleviated by segmenting them into smaller building blocks. Materials engineering provides this intuitively clear solution with a theoretical underpinning: the so called Weibull statistics tells us that the survival probability of a structural member at a given stress depends on its volume in an exponential way. Segmentation is definitely the way to go to combat brittleness. The art of it is to find a suitable geometry and arrangement of the elementary building blocks. In terms of economical manufacturability, it was obvious that the elementary blocks into which the material was to be segmented needed to be identical in shape in size. In the cited work we were able to show the possibility of producing plate-like structures from identical tetrahedron-shaped blocks. The blocks were interlocked by virtue of their geometry and mutual arrangement that provided kinematic constraints to movements in any direction, Fig. 1.

No binder or connectors were required to keep the blocks in place. We dubbed this concept topological interlocking, and the term was later adopted by other researchers in the field of materials [2,3]. The concept looked innovative, but to our surprise, we discovered later that a similar plate-like arrangement of truncated tetrahedra was earlier proposed for pavements. An even greater surprise was to discover through publications on the stereotomy-inspired work of architects, such as Oliver Tessmann [4], Giuseppe Fallacara [5], and Irina Miodragovic Vella, that our structure was akin to the medieval design of Abeille's vault. A picture of Abeille's vault is presented in the article by Giuseppe Fallacara in this volume.

Luckily, we did not know about the work of our forerunners and so were not discouraged from continuing our search for topologically interlocked structures. As the 'progenitor' of such structures, the tetrahedron, is one of the five platonic bodies, our search turned to the other four and, indeed, we were able to prove mathematically that topological interlocking can be realised with all of them (cube, octahedron, dodecahedron, and icosahedron) [6], as well as with their derivatives, including interlockable tubular elements. Figure

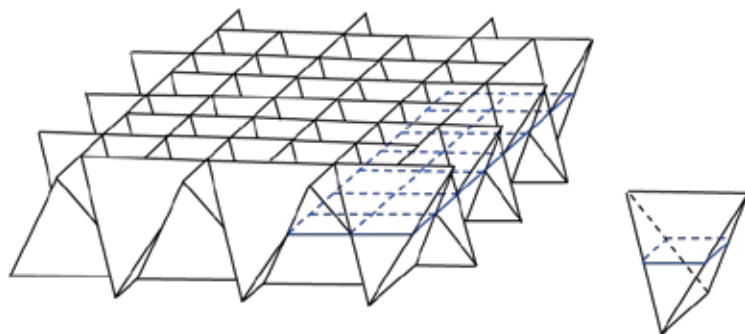


Fig. 1 A plate-like assembly of topologically interlocked tetrahedral.

termine fu adottato più tardi da altri ricercatori nel campo dello studio dei materiali [2,3]. Il concetto sembrò innovativo, ma per nostra sorpresa, scoprimmo più tardi che una disposizione piastriforme simile del tetraedro era stata proposta in precedenza per pavimenti. Un'altra grande sorpresa fu la scoperta attraverso pubblicazioni circa il lavoro riguardante temi di stereotomia di architetti, come Oliver Tessmann [4], Giuseppe Fallacara [5], e Irina Miodragovic Vella, che la nostra struttura fosse simile al design medievale della volta di Abeille. Un'immagine della volta di Abeille è introdotta da Giuseppe Fallacara in questo volume. Fortunatamente, noi non sapevamo del lavoro dei nostri precursori quindi non eravamo scoraggiati nel continuare la nostra ricerca sulle strutture ad incastro topologico. Come il 'progenitore' di queste strutture, il tetraedro, è uno dei cinque corpi platonici, la nostra ricerca si rivolse agli altri quattro e, infatti, fummo capaci di provare matematicamente che l'incastro topologico può essere realizzato con tutti questi (cubo, ottaedro, dodecaedro e icosaedro) [6], come d'altronde con tutti i loro derivati, inclusi gli elementi tubolari interbloccabili. La figura 2 mostra un assemblaggio di ottaedri topologicamente interconnessi come esempio. Sugeriamo anche un modo in cui pezzi topologicamente interbloccabili possono essere trovati in maniera sistematica [7].

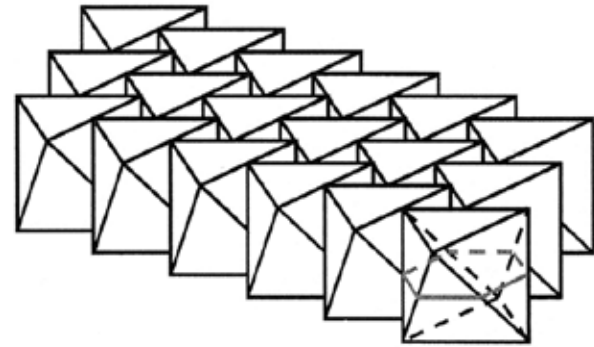


Fig. 2 Assembly of topologically interlocked octahedra [4].

2 shows an assembly of topologically interlocked octahedra as an example. We also suggested a way in which topologically interlockable shapes can be found mathematically in a systematic way [7] (Fig. 2).

As distinct from the polyhedra-based designs, the interlockable 'osteomorphic blocks' introduced in Ref. [8] are characterised by their concavo-convex matching surfaces. We called them so because of their semblance with a bone, cf. Fig. 3. Here the story repeats itself: while this kind of topological interlocking was developed entirely independently from any previous work, we found later that the ashlar of Truchet's vault [9] are similar to our osteomorphic blocks, cf. Fig 4.

This striking similarity of the ideas developed in stereotomy-inspired architecture on one hand and the materials design on the other hand suggests that both communities can benefit from closer collaboration. In particular, architects and civil engineers can use favourable properties of topological interlocking materials uncovered by materials scientists. Specifically, it was found that due to the presence of inner interfaces, such materials (and, by extension, larger engineering structures) possess high resistance to fracture propagation. Some of these structures, including assemblies of tetrahedra ('Abeille-like') and osteomorphic blocks ('Truchet-like'), are highly tolerant to local failures and can survive the loss of nearly a quarter of the constituent building blocks [10]. Not only are they superior to monolithic structures in terms of impact resistance, but they also possess substantially enhanced sound absorption and exhibit higher damping of vibrations [11]. This increase of damping due to segmentation into topologically interlocked blocks promises interesting applications in building industry in general and in construction in earthquake affected areas in particular.

An attractive feature of topological interlocking concept is that blocks from different, even entirely dissimilar, materials can be mixed in any desired proportion, thus enabling multifunctionality of

XII

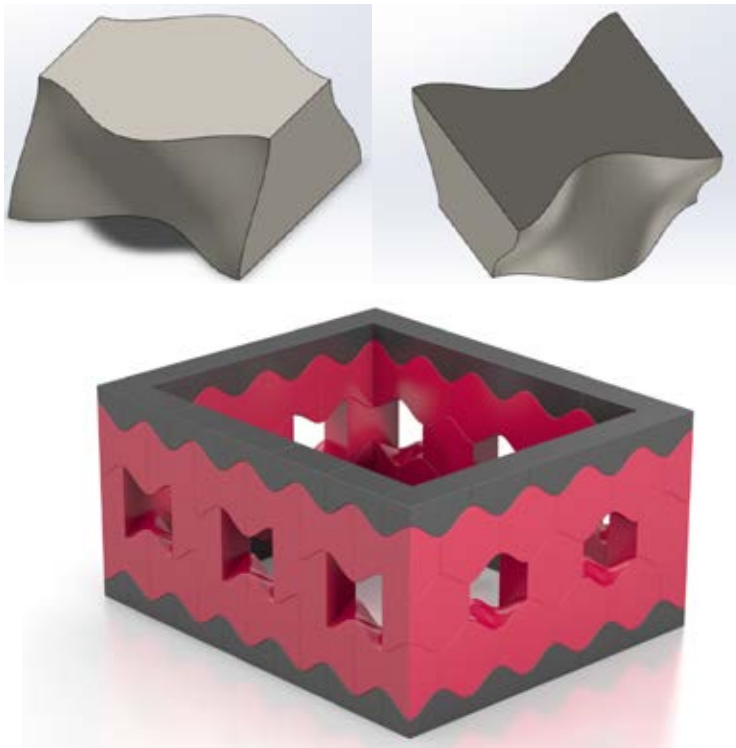
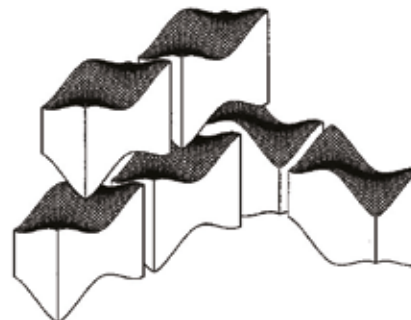
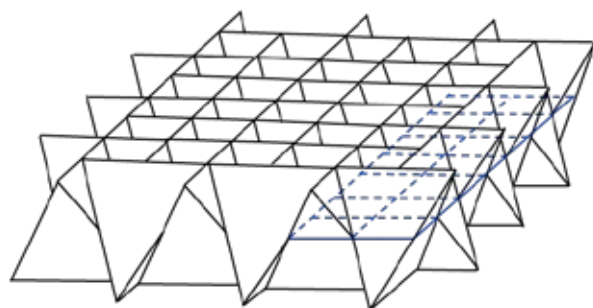
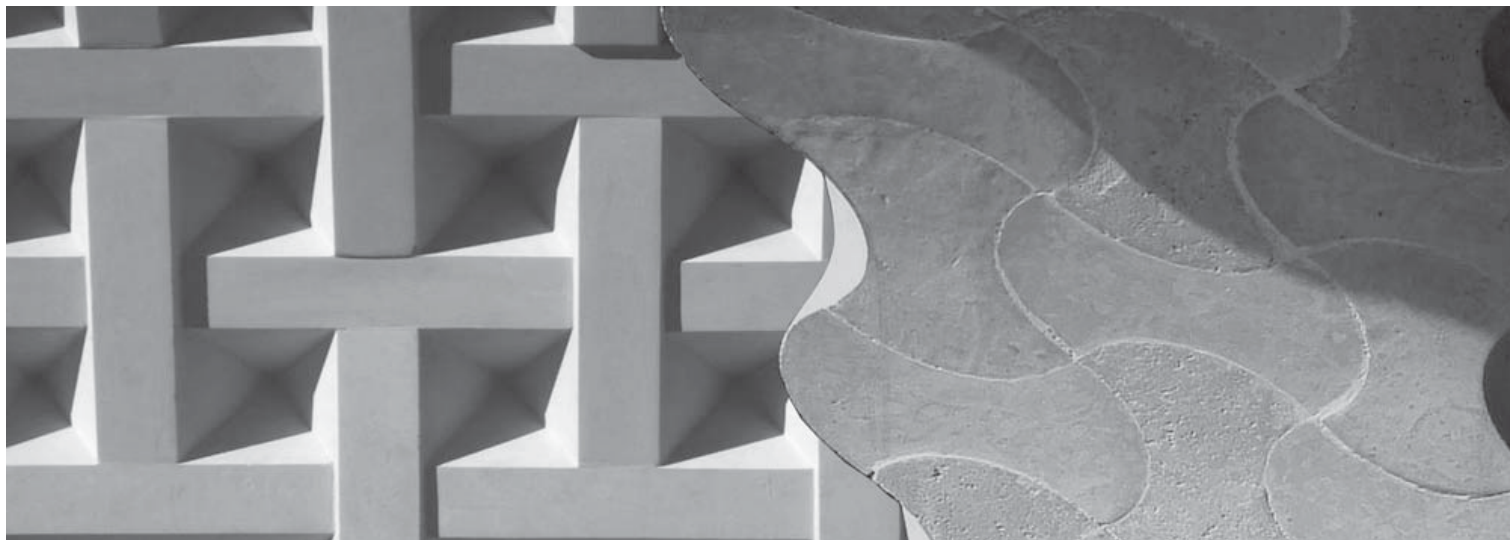


Fig. 3 Top and bottom views of an osteomorphic block (above) and an assembly of osteomorphic blocks to a toy building (below).



XIII

Come distinzione dal design basato su poliedri, i 'conci osteomorfi' interbloccabili introdotti nel riferimento [8] sono caratterizzati da superfici di contatto concave-convexe. Le abbiamo chiamate così a causa della loro somiglianza con un osso, cf. Fig. 3.

Qui la storia si ripete: mentre questo tipo di incastro topologico veniva sviluppato interamente in maniera indipendente da alcun lavoro precedente, troviamo più tardi che i conci della volta di Truchet sono simili ai nostri blocchi osteomorfi, cf. Fig. 4. Questa schiacciante somiglianza delle idee sviluppate nell'ambito dell'architettura stereotomia da un lato e il design dei materiali dall'altro suggerisce che entrambi gli ambiti di ricerca possano beneficiare di una collaborazione ravvicinata. In particolare, architetti e ingegneri civili possono avvalersi delle proprietà dei materiali ad incastro topologico scoperti dagli scienziati dei materiali.

Specificatamente, è stato provato che a causa della presenza di superfici interne, come materiali (e, come estensione, strutture ingegneristiche più grandi) possiedono grande resistenza alla propagazione di fratture. Alcune di queste strutture, incluso l'assemblaggio di conci tetraedrici (alla maniera di Abeille) e di conci osteomorfi (alla maniera di Truchet), sono altamente

Fig. 4 Abeille's and Truchet's vaults (above, left and right, respectively) and their topological interlocking analogs: assemblies of tetrahedra (left) and osteomorphic blocks (right).

the structure. The flexibility of the block arrangements offers further benefits for architectural design. Apart from enabling mortarless construction, topological interlocking structures (or materials) are attractive due to the ease of assembly and disassembly and nearly full recyclability of the blocks. The blocks can be massive or hollow, as required for a particular application. Hollow blocks can be filled with other substances to provide them with new functionalities. For instance, in smart home construction they can be filled with water or phase-change materials that absorb heat during the day and release it during the night [12]. By embedding in the structure actuating elements, e.g. metallic alloys or polymers with shape memory, its responsiveness to external stimuli, such as an electric current or heat, can be achieved [13].

tolleranti a cedimenti locali e possono sopravvivere alla perdita di quasi un quarto della costituzione dei blocchi da costruzione [10]. Non solo sono superiori rispetto alle strutture monolitiche in termini di resistenza agli urti, ma possiedono anche sostanzialmente un maggiore assorbimento sonoro e presentano un grande smorzamento delle vibrazioni [11]. Questo incremento dello smorzamento dovuto alla segmentazione in blocchi interconnessi topologicamente promette interessanti applicazioni nell'industria della costruzione in generale e nella costruzione in aree ad alto rischio sismico in particolare.

Un'interessante caratteristica del concetto dell'incastro topologico e che blocchi di materiale differente, se non interamente dissimile, possono essere mescolati in tutte le proporzioni desiderate, quindi permettendo la multifunzionalità delle strutture. La flessibilità della disposizione dei blocchi offre ulteriori benefici al design architettonico. Oltre che permettere la costruzione a secco, le strutture topologicamente interconnesse (o materiali) sono interessanti a causa della facilità di assemblaggio e smontaggio e della quasi totale riciclabilità dei blocchi. I conci possono essere massivi o cavi, come richiesto per particolari applicazioni. Conci cavi possono essere riempiti con altre sostanze per fornire nuove funzionalità. Per istanza, nella costruzione di case intelligenti possono essere riempiti con acqua o materiali a cambiamento di fase che assorbono il calore durante il giorno e lo rilasciano durante la notte [12]. Dall'incorporazione nella struttura di elementi attivi, e.g. leghe metalliche o polimeri con memoria di forma, la sua risposta agli stimoli esterni, come corrente elettrica o calore, può essere raggiunta [13].

Si può sperare che l'appello estetico delle strutture ad incastro topologico e i benefici menzionati dei design basati su questo concetto e possa essere apprezzato da architetti, ingegneri civili e designers e possa trovare più ampie applicazioni. Al contrario, i progetti di ispirazione stereotomica, alcuni dei quali presentati in questo libro, possono essere potenzialmente adottati per lo sviluppo di nuovi materiali.

Ringraziamenti

L'autore vorrebbe ringraziare il suo collega Alexei Kanel-Belov, Arcady Dyskin, Elena Pasternak, Andrey Molotnikov, George Simon, e Giuseppe Fallacara per aver condiviso le sue idee che hanno ispirato questo lavoro e Leonid Goldin per il lavoro grafico. Il supporto finanziario del Ministero Russo dell'Educazione e della Scienza (Grant #14.A12.31.0001) è molto apprezzato.

Riferimenti

- [1] A. Dyskin, Y. Estrin, A. Kanel-Belov and E. Pasternak, 'A new concept in design of materials: Assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements', *Scripta Materialia* 44: 2689-2694, 2001.
- [2] A. Autruffe, F. Pelloux, C. Brugger, P. Duval, Y. Brechet, M.

One can hope that the aesthetic appeal of topological interlocking structures and the mentioned benefits of the designs based on this concept will be appreciated by architects, civil engineers and designers and find broader application. Conversely, inventive stereotomic designs, some of which are presented in this book, can potentially be adopted for developing novel materials.

Acknowledgements

The author would like to thank his colleagues Alexei Kanel-Belov, Arcady Dyskin, Elena Pasternak, Andrey Molotnikov, George Simon, and Giuseppe Fallacara for sharing their ideas that inspired this work and Leonid Goldin for the artwork. Funding support from the Russian Ministry for Education and Science (Grant #14.A12.31.0001) is greatly appreciated.

References

- [1] A. Dyskin, Y. Estrin, A. Kanel-Belov and E. Pasternak, 'A new concept in design of materials: Assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements', *Scripta Materialia* 44: 2689-2694, 2001.
- [2] A. Autruffe, F. Pelloux, C. Brugger, P. Duval, Y. Brechet, M. Fivel, 'Indentation behaviour of interlocked structures made of ice: influence of the friction coefficient', *Advanced Engineering Materials* 9: 664-666, 2007.
- [3] A. Mather, R. Cipra, T. Siegmund, 'Structural integrity during remanufacture of a topologically interlocked material', *International Journal of Structural Integrity* 3: 61-78, 2012.
- [4] O. Tessmann, M. Becker, 'Extremely heavy and incredibly Light', *Open Systems: Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2013)*, O. Tessmann, R. Stouffs, P. Janssen, S. Roudavski, B. Tunçer (eds.), 469-478, 2013.
- [5] G. Fallacara, 'Digital Stereotomy and Topological Transformations: Reasoning about Shape Building', in: *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*, vol 1: 1075-1092, 2006.
- [6] A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov and E. Pasternak, 'Topological interlocking of platonic solids: A way to new materials and structures', *Phil. Mag. Lett.* 83: 197-203, 2003.
- [7] Y. Estrin, A.V. Dyskin and E. Pasternak, 'Topological interlocking as a materials design concept', *Materials Science & Engineering C*, 31: 1189-1194, 2011.
- [8] A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov and E. Pasternak, 'Toughening by fragmentation - how topology helps', *Advanced Engineering Materials*, 3: 885-888, 2001.
- [9] G. Fallacara, 'Toward a stereotomic design: Experimental constructions and didactic experiences', *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, Cottbus, May 2009: 553-559.
- [10] A. Molotnikov, Y. Estrin, A.V. Dyskin, E. Pasternak, A. Kanel-

Fivel, 'Indentation behaviour of interlocked structures made of ice: influence of the friction coefficient', *Advanced Engineering Materials* 9: 664-666, 2007.

[3] A. Mather, R. Cipra, T. Siegmund, 'Structural integrity during remanufacture of a topologically interlocked material', *International Journal of Structural Integrity* 3: 61-78, 2012.

[4] O. Tessmann, M. Becker, 'Extremely heavy and incredibly Light', *Open Systems: Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2013)*, O. Tessmann, R. Stouffs, P. Janssen, S. Roudavski, B. Tunçer (eds.), 469–478, 2013.

[5] G. Fallacara, 'Digital Stereotomy and Topological Transformations: Reasoning about Shape Building', in: *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*, vol 1: 1075–1092, 2006.

[6] A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov and E. Pasternak, 'Topological interlocking of platonic solids: A way to new materials and structures', *Phil. Mag. Lett.* 83: 197-203, 2003.

[7] Y. Estrin, A.V. Dyskin and E. Pasternak, 'Topological interlocking as a materials design concept', *Materials Science & Engineering C*, 31: 1189–1194, 2011.

[8] A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov and E. Pasternak, 'Toughening by fragmentation - how topology helps', *Advanced Engineering Materials*, 3: 885-888, 2001.

[9] G. Fallacara, 'Toward a stereotomic design: Experimental constructions and didactic experiences', *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, Cottbus, May 2009: 553-559.

[10] A. Molotnikov, Y. Estrin, A.V. Dyskin, E. Pasternak, A. Kanel-Belov, 'Percolation mechanism of failure of a planar assembly of interlocked osteomorphic elements', *Eng. Fract. Mech.*, 74: 1222-1232, 2007.

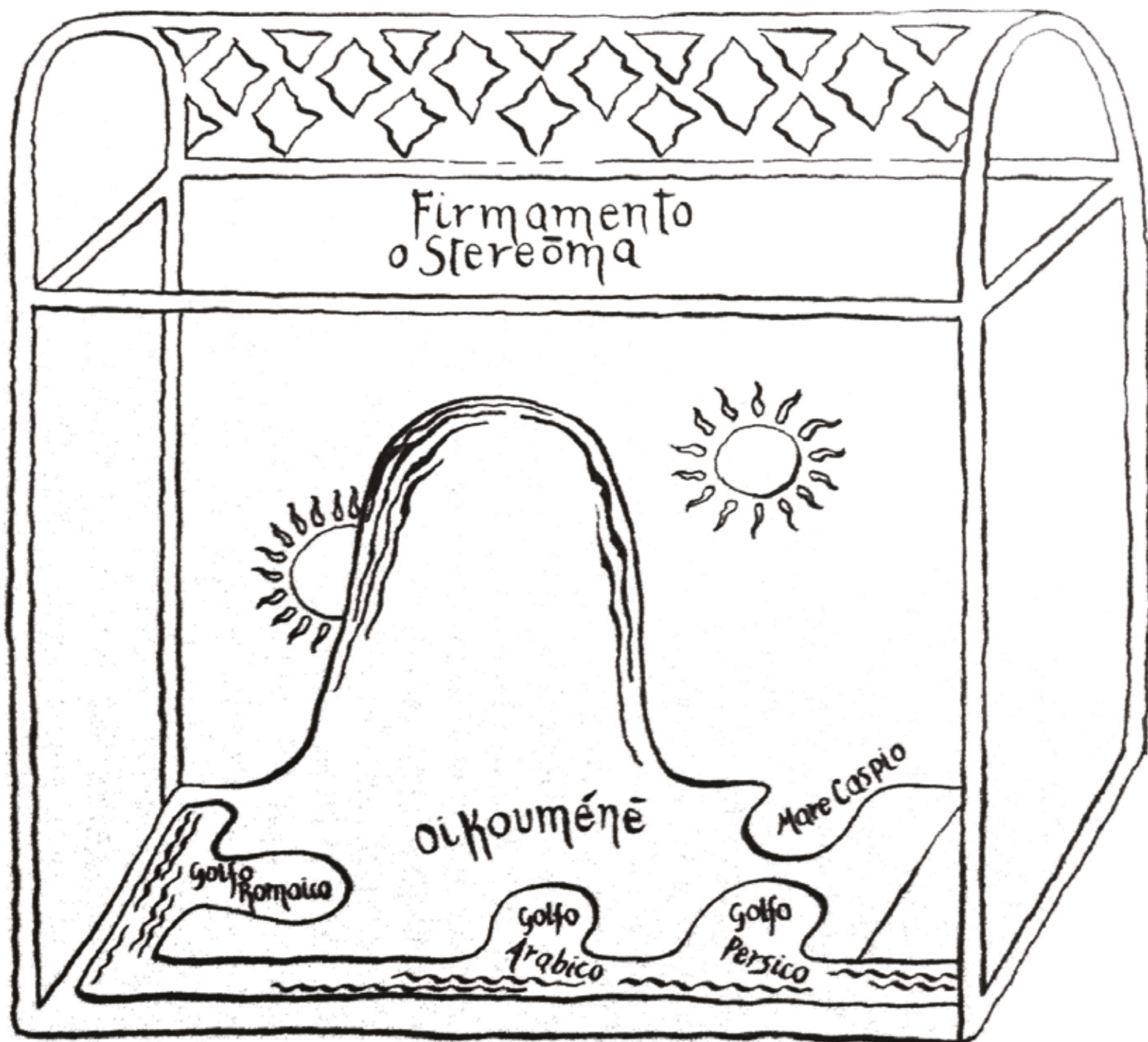
[11] M. Carlesso, A. Molotnikov, T. Krause, K. Tushtev, S. Kroll, K. Rezwan,, Y. Estrin, 'Enhancement of sound absorption properties using topologically interlocked elements', *Scripta Materialia* 66: 483–486, 2012.

[12] G. Simon, Y. Estrin, A. Molotnikov, A. Dyskin, E. Pasternak, 'Hollow recycled polymer blocks for human habitat'. Provisional Patent AU2012/902183, 28.5.2012.

Belov, 'Percolation mechanism of failure of a planar assembly of interlocked osteomorphic elements', *Eng. Fract. Mech.*, 74: 1222-1232, 2007.

[11] M. Carlesso, A. Molotnikov, T. Krause, K. Tushtev, S. Kroll, K. Rezwan,, Y. Estrin, 'Enhancement of sound absorption properties using topologically interlocked elements', *Scripta Materialia* 66: 483–486, 2012.

[12] G. Simon, Y. Estrin, A. Molotnikov, A. Dyskin, E. Pasternak, 'Hollow recycled polymer blocks for human habitat'. Provisional Patent AU2012/902183, 28.5.2012.



TRE PARADOSSI DELLA STEREOTOMIA COME RISORSA DI INNOVAZIONE TEORICO/PRATICA PER L'ARCHITETTURA ODIERNA IN PIETRA DA TAGLIO

**Giuseppe Fallacara*

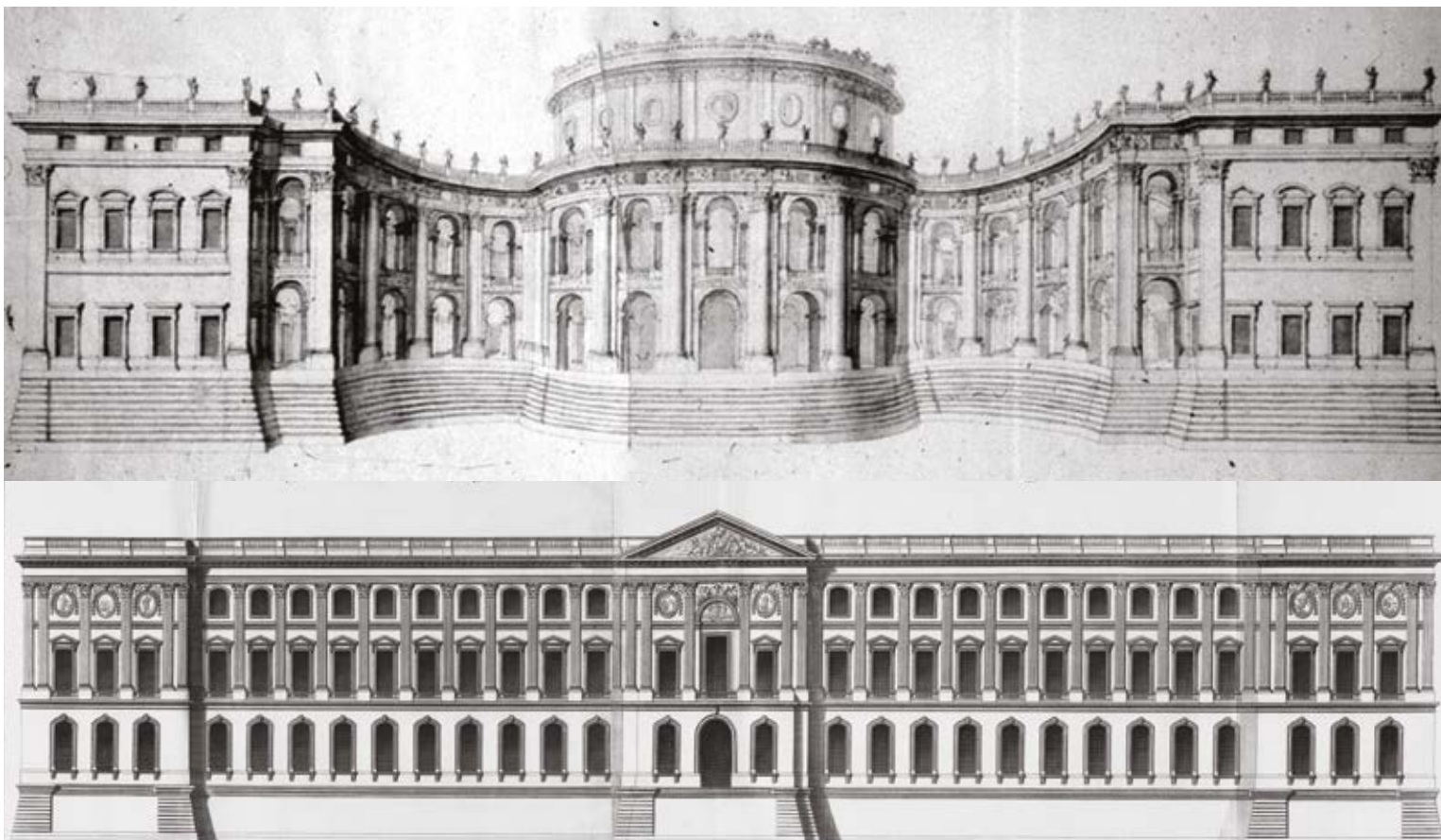
** Professore associato SSD ICAR 14, Dipartimento ICAR - Politecnico di Bari*

Risulta, ai più, oggi, alquanto "illogico" pensare di recuperare le tecniche e la prassi costruttiva tradizionale in pietra per l'architettura contemporanea. Le regole, le normative edilizie odierne pongono con evidenza da un lato i limiti del materiale dall'altro l'enorme difficoltà dell'adeguamento della tecnica agli standard odierni. Tutto ciò sarebbe comprensibile se non ci fosse un pensiero costante, degli architetti ed ingegneri, riferito alla durata di un manufatto che porterebbe irrimediabilmente sul podio, sempre e comunque, l'architettura in pietra contro le architetture costruite con tutti gli altri possibili materiali rinvenibili sulla terra e compatibili con l'edilizia. Contrariamente ai concetti di

P. precedente: Rappresentazione del tabernacolo di Cosma Indicopleuste

"temporaneità" "reversibilità" "riciclabilità" l'edificio in pietra resta, è testimone di se e del suo autore sfidando il tempo e segnando la storia: questo è uno dei valori assoluti della nostra attenzione nei confronti della pietra. Tra l'altro, paradossalmente, risulterebbe più agevole e logico "riciclare" e/o "riutilizzare" parti ed elementi di un edificio in pietra rispetto ad altri materiali, così come la storia ci ha insegnato attraverso le mirabili architetture di spoglio rinate dalle ceneri degli abbattimenti di edifici e monumenti antecedenti di cui è possibile ereditarne parti come un codice genetico sempre ringiovanito. Ecco appunto il volto umano della pietra che da "inerte" diventa "vivo" nel segno della ri-nascita seguendo ancora

Fig. 1 Disegni per la facciata del Louvre proposti da G. Bernini (in alto) e da C. Perrault (in basso)



una volta una logica paradossale.

Vogliamo quindi, in questo libro, disquisire sui "limiti" dell'utilizzo della pietra come una "risorsa di innovazione" per l'architettura contemporanea, fissando una logica paradossale che intercorre tra risorsa e innovazione all'interno della complessa e articolata parola "stereotomia" (arte del taglio delle pietre per la costruzione edilizia).

Parlerò ora di tre paradossi teorici, atti alla spinta speculativa di tipo progettuale riferita agli spazi voltati in pietra, derivanti dalla storia e dalle citazioni di uomini illustri del passato che hanno delineato questioni concettuali di altissimo valore speculativo.

Il primo paradosso della stereotomia viene descritto da Charles Perrault (1628-1703) in quella che ritengo essere la più bella definizione del significato intrinseco del termine: (...la stereotomia è l'arte... NDR) "...de se servir de la pesanteur de la pierre contre elle-même et de la faire souvenir en l'air par le même poids qui fait tomber..." Questa definizione si sintetizza come l'arte di servirsi della pesantezza della pietra per esaltarne la leggerezza delle forme, pertanto si afferma il binomio pesantezza contro leggerezza nello stesso elemento architettonico. Nella pratica costruttiva questo si evince quando si mette in opera un sistema voltato, il quale per potersi mantenere in equilibrio deve essere caratterizzato da un peso notevole dei blocchi lapidei che entrano in compressione assicurando l'equilibrio del sistema arcuato.

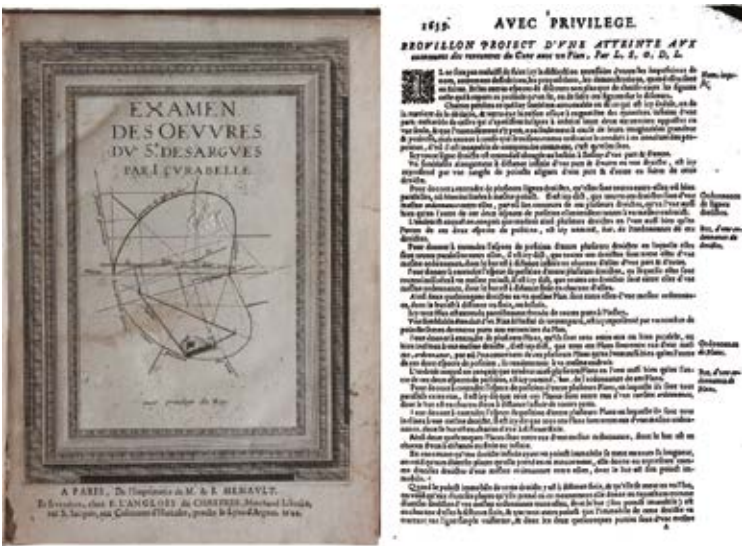
La lezione di questo assunto è relativa alla volontà di creare spazi voltati paradossalmente leggeri rispetto all'enorme ed intrinseco peso degli stessi. Una fantasia creativa suggerita agli architetti dallo stesso Charles Perrault autore delle più celebri favole di fantasia per bambini, da Cappuccetto rosso, La bella addormentata nel bosco, Cenerentola, ecc. Nel clima culturale della Francia seicentesca, desiderosa di affrancarsi dall'egemonia culturale italiana, una personalità di spicco nel mondo della teorizzazione dell'architettura e senza dubbio Claude Perrault (1613- 1688) fratello maggiore di Charles Perrault. Questi, medico di professione e architetto per diletto, passa alla storia, tra l'altro, per aver "vinto", nella gara per la realizzazione della facciata del Louvre contro il grande Cavalier Bernini: una rigida ed algida facciata razionale contro una barocca ed articolata facciata romana. Senza dubbio il progetto del Bernini, di gran lunga superiore, non avrebbe potuto affermarsi in un clima di premeditata affermazione della nascente superiorità francese. Durante il regno di Luigi XIV in Francia fu fondata l'Accademia Reale d'Architettura per razionalizzare l'intero processo di apprendimento e per codificare regole oggettive valide per tutti coloro che si affacciavano al mondo dell'architettura. L'invito di Bernini da parte di Luigi XIV, e lo spionaggio spasmodico delle sue attività quotidiane, rientrano in questo quadro generale dello studio per "razionalizzare" l'arte. Quello che però non si considerava era che l'Accademia potesse insegnare le regole dell'arte ma non le regole che ogni artista adottava personalmente nella creazione della propria ed unica opera, evidenziando la contrapposizione dell'oggettività dell'arte contro la soggettività a dell'opera artistica. Questo è confermato dalle parole di Gian Lorenzo Bernini riportate

nel journal personnel curato dalla sua guida personale ed indefessa Paul Fréart de Chantelou: "...Les grands hommes - dit le Bernin - se ils veulent, peuvent considérablement raccourcir le chemin de ceux qui commencent: le jeune, l'académie donnera les règles de l'art, mais rarement ou presque jamais l'artiste ..." "Les règles ... l'artiste les fait lui-même jamais ou rarement sont enseignées ..." "Nous devons suivre trois choses: voir, entendre les grands hommes et les pratiquer"... Questo conflitto di visioni fu visibile proprio quando, nel 1665 a Gian Lorenzo Bernini arrivato alla corte di Luigi XIV, fu respinta la proposta di realizzazione della facciata del Louvre perché non aderente alla visione accademica dell'arte. Si genera così il secondo paradosso alla base della stereotomia, ovvero "ogni progetto risponde ad una regola generale, ma ogni artista segue la propria regola che in seguito potrà influenzare i posteri". L'opera artistica/architettonica è quindi più un exemplum da tramandare che l'applicazione di una regola da rispettare. La tecnica o la regola potrà assurgere ad opera d'arte architettonica non unicamente in base alla meticolosa applicazione della stessa bensì dalla sua sublimazione unica e personale.

Il primo paradosso spinge la creatività verso la leggerezza formale, il secondo porta alla continua alternanza tra il rispetto della regola e la sua puntuale negazione in virtù di un superamento della stessa. Architetture paradossalmente leggere e paradossalmente uniche all'interno di regole codificate e stringenti dell'arte del costruire in pietra. Il terzo paradosso della stereotomia riguarda il tema dell'ispirazione formale degli spazi voltati ovvero da dove gli architetti hanno tratto o possono ancora trarre le idee per concepire le forme delle cupole e delle volte.

Questo delicato argomento è contenuto totalmente all'interno dell'etimo della parola "stereotomia" che, come è noto agli studiosi della disciplina, viene coniato ed appare per la prima volta nel trattato di Jacques Curabelle del 1644 dal titolo "Examen des

Fig. 2 Foto dei trattati di Jacques Curabelle (sn) e Girard Desargues (dx)



oeuvres de Sr. Desargues " in cui la corporazione dei Tailleurs des Pierres, da lui rappresentata, si scaglia contro l'opera magistrale e teorica di Girard Desargues. Vedendo intaccata la segretezza della propria arte, basata sul fare e sulla trasmissione orale del sapere, la congregazione degli scalpellini lo incarica di dare una risposta critica alla pubblicazione di Girard Desargues il quale dopo aver studiato i testi classici e l'opera di Philibert De L'Orme era arrivato alla codificazione della geometria proiettiva solo ed esclusivamente con il ragionamento eliminando di fatto il sapere corporativo e sdoganando la geometria universale. Nonostante Curabelle fosse un uomo di vasta cultura risulta comunque singolare il fatto che abbia coniato dal nulla un termine di etimologia greca come "Stereotomia" (formato da stereo - volume e tomia - divisione/taglio) fino ad allora noto come art du trait géométrique. La genesi di questa parola può essere ritrovata in antichi documenti cristiani a cui probabilmente Curabelle ha avuto accesso grazie ai suoi rapporti con la Chiesa Cattolica, tra cui il più significativo la rappresentazione del tabernacolo di Cosma Indicopleuste, che è una rappresentazione del mondo come spazio longitudinale la cui a botte contiene il cielo e le stelle fisse geometricamente ordinate, conosciuta come "firmamento" o "stereoma" (dal greco). Quindi quando Curabelle nomina la stereotomia prende in prestito il termine stereoma dalla tradizione Ebraico-Cristiana con un duplice intento: stabilire un saldo fondamento disciplinare per difendere la causa dei Tailleurs des Pierres e identificare il campo di applicazione della disciplina, ovvero lo spazio voltato terrestre come diretta proiezione dello spazio voltato celeste.

In questo senso la parola stereo assume il suo significato di spazio direttamente dalla parola aster, ovvero punto fisso che può essere sottoposto a taglio (tomia) tramite piani di sezione al fine di ricomporre in piano il disegno di volte spaziali. Quando Curabelle nomina la stereotomia, intende in senso lato la scomposizione della

Fig. 3 Rappresentazione del tabernacolo di Cosma Indicopleuste



volta celeste, dando nuovo significato a quella che è la struttura tipica di una chiesa a pianta longitudinale con volta a cassettonato, ovvero la rappresentazione fisica del tabernacolo di Cosma Indicopleuste. Da questa associazione nasce il terzo paradosso della stereotomia: l'ordine della costruzione stereotomica e più in generale dell'architettura degli spazi voltati deriva da un errore interpretativo, ovvero la visione del mondo in forma di tabernacolo sostenuta dalla Chiesa Cattolica dell'epoca. Detto in altri termini, grazie ad un errore interpretativo dell'universo e della volta celeste come luogo fisico/impalpabile ricurvo sopra la terra ferma si è materializzata nella mente degli architetti l'ispirazione più grande e feconda per la progettazione degli spazi ricurvi voltati di monumenti e chiese di tutti i tempi. Un vero paradosso che è stato alla base della proficua ispirazione di tutti gli stili architettonici messi a punto per costruire in terra una porzione di volta celeste. Un paradosso in quanto ha costituito in terra una verità tangibile di qualcosa di intangibile e mal interpretato come l'elaborazione del concetto "strutturale" della "volta" celeste o "cupola" del cielo.

Resta pur sempre vera la condizione di eterna ispirazione che l'uomo-architetto può e deve trarre dalle continue evoluzioni scientifiche relative alle "geometrie del cosmo" dagli impulsi forniti dalla ricerca teorica di Albert Einstein riguardo la struttura quadridimensionale dell'universo che giustifica le deformazioni topologiche dello spazio-tempo. La geometria topologica per investigare l'immensità delle forme dell'universo rientra nello spazio fisico umano e disegna nuove configurazioni spaziali dello spazio voltato cercando di innovare il patrimonio culturale e formale dell'architettura ricurva ovvero l'architettura litica fatta di forme in tensione strutturale sfruttando i limiti intrinseci del materiale al fine di generare un manufatto innovativo.

In conclusione i tre paradossi, la leggerezza, l'unicità e l'ispirazione celeste, possono rappresentare tre leve concettuali atte a spingere in avanti l'architettura in pietra (specificatamente le strutture voltate), relegata oggi in un ambito assolutamente non consono alla sua gloriosa storia. Questo libro vuole essere un piccolo contributo per la sua rinascita, attraverso la messa a punto di alcune linee guida procedurali atte a facilitare la progettazione il calcolo e la costruzione di innovativi sistemi voltati che possono rappresentare esempi da seguire anche nella prassi professionale. Vengono qui analizzate le ragioni, le tecniche di modellazione CAD tridimensionale, di tipo parametrico-variazionale, e le modalità di calcolo di sistemi strutturali voltati in pietra armata precompressa al fine di trasmetterne la concreta possibilità di realizzazione. Grazie a specifici stage pratici è sempre possibile cogliere la vera natura del cantiere litico odierno e toccare con mano il passaggio dalla speculazione teorica alla costruzione reale di un manufatto in pietra portante: momento fondamentale sia per i progettisti che per gli allievi delle scuole di ingegneria ed architettura. La ricerca, la progettazione, la speculazione e il trasferimento didattico delle esperienze diventano, così, un cerchio costante attorno ad un materiale nato con l'uomo per la materializzazione delle sue idee.

*"- Ma qual è la pietra che sostiene il ponte? - chiede Kublai Kan.
- Il ponte non è sostenuto da questa o da quella pietra, - risponde Marco,
- ma dalla linea dell'arco che esse formano.
Kublai Kan rimase silenzioso, riflettendo. Poi soggiunse:
- Perché mi parli delle pietre? È solo dell'arco che mi importa.
Polo risponde: - Senza pietre non c'è arco."*

dal libro "Le città invisibili" di Italo Calvino 1972

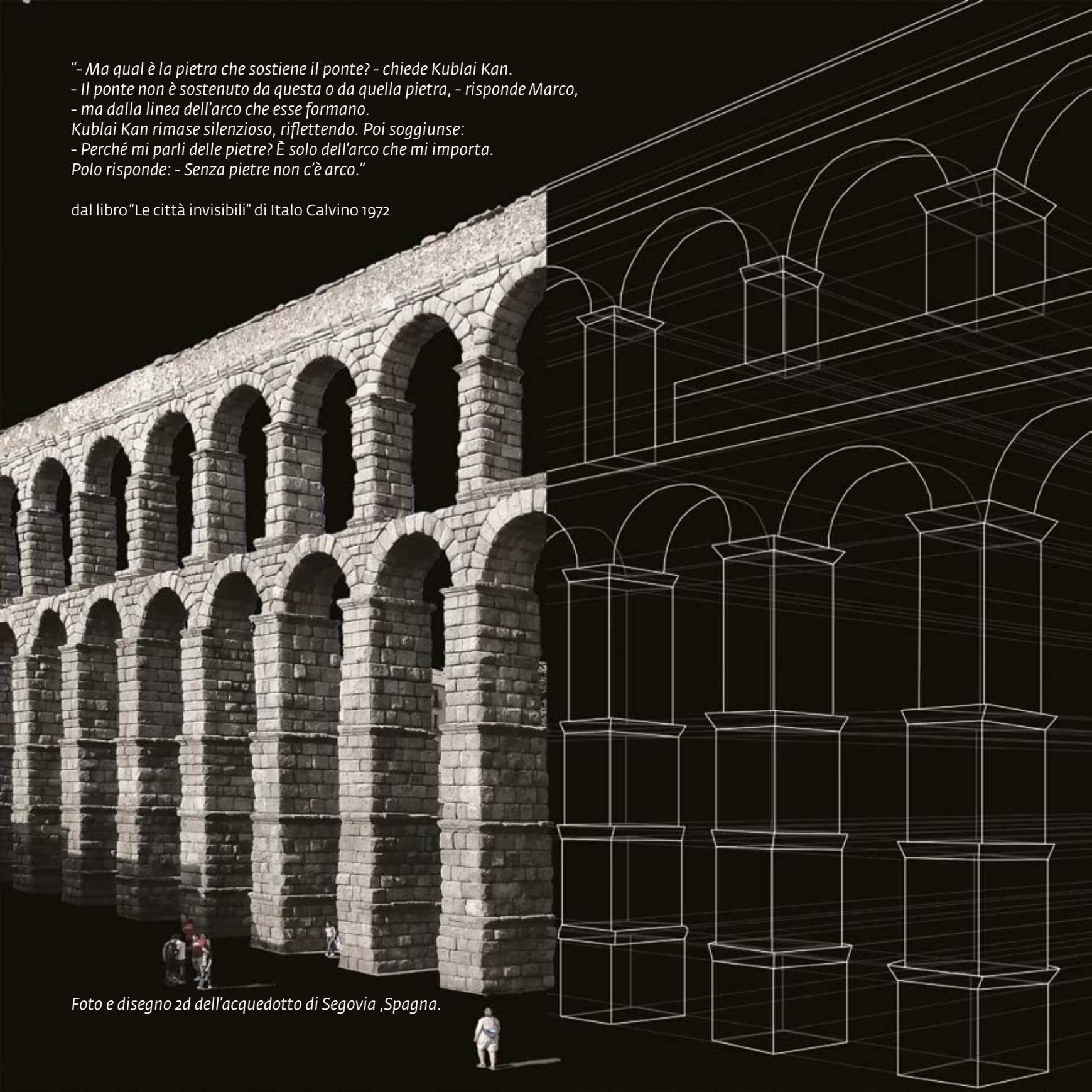


Foto e disegno 2d dell'acquedotto di Segovia ,Spagna.

PROGETTAZIONE TECNICA E CALCOLO STATICO DEI SISTEMI VOLTATI IN PIEDRA DA TAGLIO

*Marco Ferrero, **Federica Rosso

* Professore Associato, SSD ICAR 10, Dipartimento di Ingegneria civile, edile e ambientale .- Università di Roma Sapienza

** Dottoranda di ricerca in Ingegneria dell'architettura e dell'urbanistica presso il DICEA .- Università di Roma Sapienza

I sistemi voltati in pietra da taglio sono nati con l'architettura. Archi in pietra sono presenti già nell'antico Egitto: una celebre volta nella necropoli di Abydos è stata studiata dall'egittologo Auguste Mariette e fatta risalire a 2300 anni prima di Cristo; esempi del genere sono riscontrabili in tutte le civiltà più antiche nelle quali era sviluppata una pratica costruttiva evoluta.

Soltanto i Romani, tuttavia, fecero dell'arco la base del proprio lessico architettonico. La motivazione non è di carattere tecnico: precedenti civiltà conoscevano i sistemi voltati ma non avevano rivolto loro un particolare interesse in quanto questi comportavano uno stato tensionale che non si accordava con il carattere "monumentale" connaturato in genere con l'uso della pietra. Lo stesso Mariette scrive nel 1880 : *"in tutti i tempi gli Egizi hanno conosciuto la volta. Se essi non l'hanno più impiegata gli è perché essi sapevano che la volta porta in sé il suo germe di morte [...] che cosa ci resterebbe oggi delle tombe e dei templi dell'Egitto, se l'Egitto avesse adottato di preferenza la volta"*. Il "germe di morte" si ricollega alla convinzione che "l'arco non dorme mai" e indica che una struttura voltata, con il suo sistema costitutivo di spinte e contropinte, rappresenta emblematicamente un equilibrio dinamico molto lontano dal concetto inalterabile del divino. Un principio costruttivo che non poteva, quindi, integrarsi con l'aspirazione all'eternità delle costruzioni sacre egizie, né ovviamente con quelle greche o di molte

altre antiche culture.

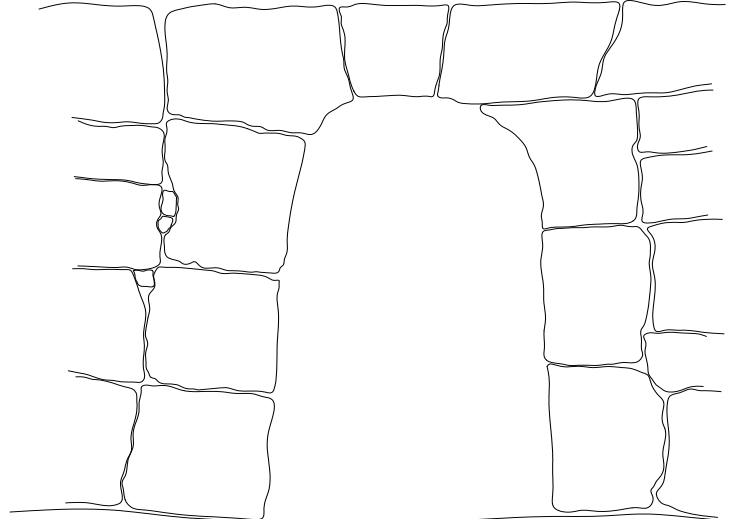
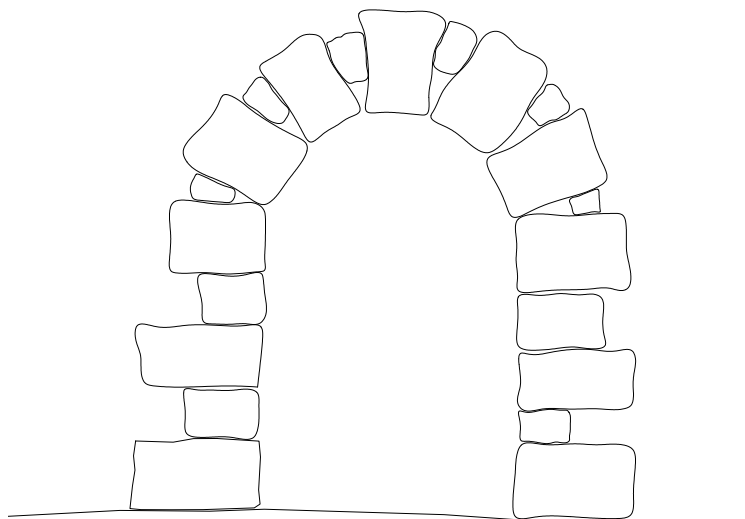
Lo stesso ragionamento si può estendere agli archi etruschi, testimoniati fin da tempi molto antichi (Veio, VII sec. A.C.). In questo caso, tuttavia, la limitata conoscenza di questa civiltà non consente conclusioni altrettanto certe. La sensibilità prettamente pragmatica dei Romani, dunque, li conduce a trascurare questa teorica preclusione concettuale e a impiegare diffusamente il principio dell'arco per realizzare le imponenti opere edilizie e infrastrutturali che tutti conoscono e che hanno caratterizzato sia l'architettura dell'epoca sia tutta l'evoluzione di quella successiva.

Questi risultati tecnici, tuttavia, non si basano su una precisa conoscenza del comportamento della materia; l'arte di costruire romana si sviluppa su codici di "buona pratica", tramandati dapprima oralmente e poi anche mediante trattati scritti, che tuttavia riguardavano le modalità esecutive, senz'altro i materiali da impiegare e, al massimo, qualche criterio empirico di dimensionamento. Le prescrizioni geometriche sono in gran parte legate a canoni estetici, sebbene questi a loro volta si fondino anche sull'esperienza accumulata con la pratica². Il più importante trattatista dell'epoca, Vitruvio, nell'introduzione del trattato *De Architectura* sottolinea l'importanza che l'architetto conosca sia la teoria che la pratica, perché la pratica dipende dalla teoria³. In quel caso, però, la teoria è quanto descritto nei codici di pratica, unito a una conoscenza generale di molte arti e discipline che si ritengono essenziali per poter esercitare un simile magistero.

Questa situazione resta sostanzialmente immutata per molto

Fig. 1 Arco della necropoli di Abydos (Mariette¹)

Fig. 2. Arco in tufo della tomba Campana a Veio



tempo e bisogna arrivare all'Ottocento per trovare i primi studi a carattere realmente scientifico sull'argomento.

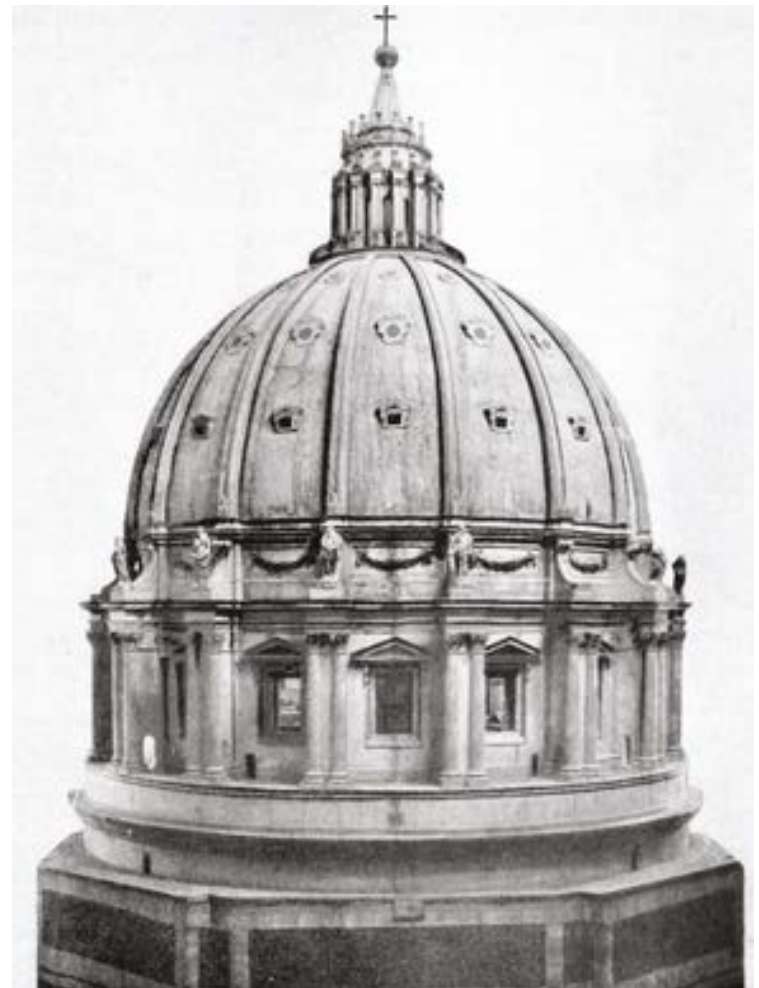
Per tutto il periodo intermedio, l'unica fonte di conoscenza per i costruttori è la tradizione e l'unica opportunità di sviluppo deriva dall'analisi dei dissesti e dei crolli. La tecnica delle costruzioni si è evoluta per millenni essenzialmente attraverso l'esperienza accumulata negli insuccessi. Dalla caduta dell'Impero Romano all'epoca delle grandi cattedrali gotiche passa più o meno lo stesso tempo che da queste ultime all'epoca attuale. Un periodo, dunque, molto lungo, nel quale inizialmente si perdono le risorse economiche per realizzare le grandi opere e, con esse, la conoscenza dei sistemi per realizzarle. Seguono lente e progressive conquiste che ricostruiscono poco per volta l'arte edificatoria dimenticata e, alla fine, vanno anche molto oltre, arrivando più avanti e – letteralmente – più in alto. Le spettacolari volte delle chiese gotiche resteranno insuperate e vengono edificate grazie alla sapienza tecnica dei costruttori dell'epoca, molti dei quali si succedono nella stessa opera, restando ignoti ingranaggi di un meccanismo che include molti settori della società e si sviluppa per decenni, quando non per secoli interi⁴. I trattatisti del Rinascimento studiano e riscoprono le tecniche antiche anche negli aspetti più teorici e sistematici. Non essendo questa la sede per una storia della scienza, basterà citare le due figure più importanti: Leon Battista Alberti e Leonardo da Vinci. Figure che, insieme a tante altre notissime, caratterizzano la "rinascita" culturale del quattrocento e del cinquecento.

In questo ambito si formano i grandi architetti dell'epoca, i quali maturano una formazione multidisciplinare e una conoscenza storica molto diversa da quella dei Maestri medievali. Tuttavia si tratta ancora di una sapienza a carattere empirico e non ancora propriamente scientifica. Ciò significa che essi conoscevano le opere già costruite e sapevano progettarne di simili ma, quando si addentravano in nuove sfide, non avevano altro supporto che la propria intuizione e genialità. Non sempre queste – per quanto grandi – erano sufficienti. Un caso emblematico è quello della Cupola di San Pietro, progettata da Michelangelo a partire dal 1535, interrotta nel 1552 dopo la costruzione del tamburo e ultimata in due anni nel 1590 da Giacomo Della Porta⁵. Michelangelo ideò la cupola come un insieme di travi curve meridiane, sulle quali si appoggiavano poi gli spicchi di tamponatura; dunque un sistema non precisamente "voltato". Per lo studio utilizzò un modello in legno: non si trattava di una novità assoluta in quanto anche i maestri medievali utilizzavano modelli di studio. La prefigurazione della spazialità e della tecnica realizzativa non poteva in ogni caso costituire un vero e proprio supporto scientifico alla realizzazione. In effetti, la cupola presentò quasi subito una serie di lesioni e per molto tempo queste vennero studiate, dando luogo a molti dibattiti sulla loro natura e sul modo di intervenire per risanarle.

Nel 1743, il papa Benedetto XIV affidò lo studio del problema a uno studioso e professore di Fisica, Giovanni Poleni. Al di là delle ipotesi

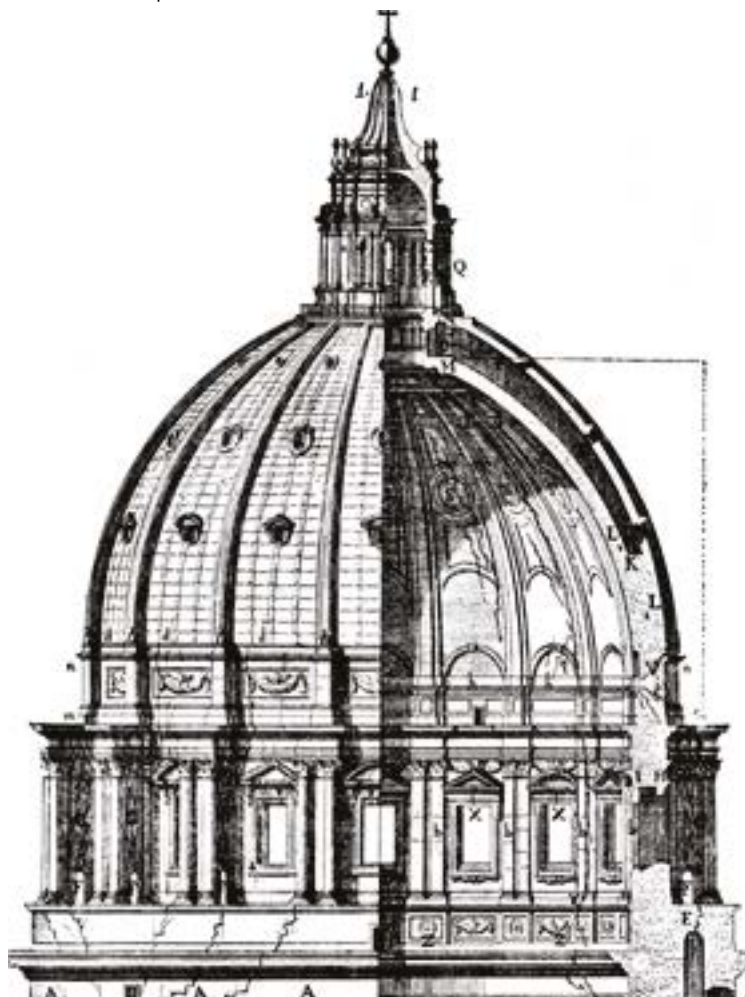
Fig. 3 Immagine del Codice di Madrid (riflessa specularmente) che mostra lo studio della statica dell'arco

Fig. 4 Il modello michelangiolesco in legno



specifiche formulate da quest'ultimo, che furono a loro volta seguite da contrapposte prese di posizione accademiche, fu questo il primo caso di applicazione alla costruzione di teorie a carattere realmente scientifico. Nelle accese discussioni furono infatti richiamati poligoni delle forze, principio dei lavori virtuali e perfino un'intuizione sullo scorrimento viscoso del ferro, mutuata per analogia dalla dilatazione termica⁶. La soluzione finale fu la cerchiatura della cupola stessa con armature di ferro poste a vari livelli. Oltre a questo provvedimento, comunque, si prescrivevano misure atte a risarcire le lesioni e ricostituire la continuità del materiale, ovvero operazioni pratiche che ancora oggi caratterizzano qualsiasi intervento di recupero e che derivano piuttosto da considerazioni empiriche che non da conoscenze scientifiche. Cento anni prima, in Francia, erano state poste le basi della stereotomia, la disciplina teorica sul taglio corretto della pietra portante. Come si è visto nel capitolo precedente, i presupposti di tale disciplina erano essenzialmente

Fig. 5 Sezione della cupola di San Pietro (Roma), con evidenziate le lesioni intervenute dopo la costruzione



legati a fattori geometrici; la stereotomia si basa sulla geometria descrittiva ma questa a sua volta era già presente – molto prima della sua sistematizzazione da parte di Monge nel 1847 – nell'opera di chi lavorava la pietra. Il presupposto – non del tutto esplicito – è che una struttura geometricamente congruente sia anche progettualmente corretta. Da questo punto di vista, le regole stereotomiche non sono molto differenti dai canoni dell'architettura classica antica in quanto, unite a un'esecuzione secondo buona pratica, si propongono di garantire l'esito positivo della costruzione. Raggiungere una disciplina scientifica del costruire significa poter prescindere da soluzioni precostituite e, da questo punto di vista, è ancora un traguardo ancora lontano. Il seicento e il settecento sono i secoli della grande Scienza. "In questo fortunoso periodo si compie in Europa [...] la costruzione di tutto l'edificio scientifico moderno, che avrà espressione nell'Enciclopedia, la Bibbia del secolo XVIII" (?). Anche in questo caso, basta citare i nomi di Galileo Galilei e di René Descartes (Cartesio) per rilevare il deciso cambiamento nell'approccio alla conoscenza. È in questo periodo, tra l'altro, che viene per la prima volta posto il problema della forma dell'arco in termini di efficienza statica. Il matematico scozzese James Stirling (1692-1770) dimostra la stabilità dell'arco in assenza di attrito mediante una costruzione di sfere lungo una catenaria rovesciata⁸. Il passaggio fondamentale è però quello dalle teorie dei corpi rigidi a quelle dei corpi elastici. Dallo studio della resistenza dei materiali, infatti, arriva la chiave per risolvere i problemi staticamente indeterminati o iperstatici: la deformabilità. Siamo intorno al 1820 in Francia, presso l'École Polytechnique e l'École Nazionale des Ponts et Chaussées. La figura più importante è quella di Louis Navier. Da questo punto in poi, la scienza delle costruzioni si sviluppa attorno allo studio delle strutture elastiche, prendendo come principale riferimento i sistemi in legno. Non si tratta di un caso e gli ambiti culturali nei quali si sviluppano gli studi sono proprio quelli dove questo materiale è ampiamente connaturato con la tradizione costruttiva. Per quanto riguarda gli archi in muratura, è in quest'epoca che si colloca lo studio – notissimo – di Édouard-Henry-François Méry (1805-1866). Il suo metodo di verifica⁹ si basa su una serie di approssimazioni e di ipotesi empiriche ma risulta tanto efficace da costituire sostanzialmente il principale strumento tecnico progettuale fino quasi alla fine del novecento. Il metodo parte dall'osservazione delle lesioni ricorrenti negli archi a tutto sesto e dalle considerazioni di Navier sull'andamento della linea delle pressioni e, attraverso una semplice costruzione grafica, consente di trovare le forze scambiate tra conci contigui e la spinta sui piedritti. Le ipotesi di partenza sono indispensabili per ridurre le incognite dovute all'iperstaticità del sistema. Gli archi progettati o verificati con questo sistema risultano sempre interamente compressi e si reggono per mutuo contrasto e per attrito tra i conci. Il limite è proprio nelle ipotesi semplificative e nel modo di funzionare – assolutamente standard – dell'arco. Non è previsto, per esempio, un funzionamento che preveda trazioni, come nelle volte sottili a guscio. Nel diciannovesimo secolo, il processo di industrializzazione mette a disposizione nuovi e interessanti materiali. I metalli, in

particolare, si armonizzano anche meglio del legno con le teorie della trave elastica e i relativi studi procedono di pari passo con le sempre più numerose applicazioni negli edifici. In questo processo, che porterà rapidamente all'acciaio e al cemento armato, la pietra rimane in disparte. Le strutture a conci mantengono caratteristiche difficilmente conciliabili con la meccanica del continuo e questo finisce per determinarne la crisi. La conseguenza è che i materiali supportati dall'evoluzione delle conoscenze scientifiche si fanno rapidamente strada, offrendo nuove possibilità per la quali la pietra non risulta più idonea. Inizialmente il persistere di un gusto accademico tiene a freno la creatività e confina le novità nell'anima resistente dei rassicuranti involucri lapidei. Ben presto, tuttavia, gli architetti comprendono la portata del cambiamento e liberano le ossature elastiche dal pesante fardello della storia. Il Movimento Moderno costruisce così un linguaggio architettonico che priva la pietra della sua funzione portante e la esilia tra pavimenti e rivestimenti; un ruolo – in ogni caso – non secondario, che tuttavia il nobile materiale non potrà mantenere a lungo. Infatti, la monumentalità delle architetture di pietra finisce per identificarsi con la retorica dei regimi autoritari che la impiegano in grande quantità. Dell'una e degli altri, la seconda guerra mondiale spazzerà via ogni traccia. Emblematico il caso del calcestruzzo armato. Nel 1824 Joseph Aspdin aveva brevettato il cemento Portland, il cui nome – riferito all'omonima pietra – aveva emblematicamente posto fin dall'inizio una rivalità tra la nuova "pietra artificiale" e quella naturale. La fortuna di questo materiale arriva quando si

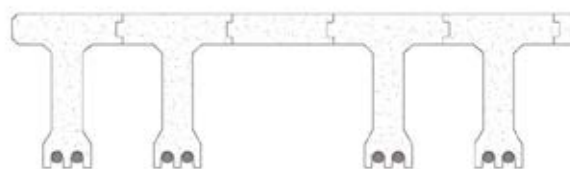
pensa di integrarne la resistenza a compressione con barre di acciaio che ne compensano la fragilità a trazione. Alle esperienze di Hennebique e Maillart segue quella di Freyssinet che un secolo più tardi, nel 1928, sperimenta la prima forma di precompressione del calcestruzzo. Le possibilità di questo sistema, inizialmente ridotte dalla scarsa qualità degli acciai disponibili, si potranno sfruttare appieno soltanto in seguito. Va rilevato che soltanto molti anni dopo si penserà di estendere alla pietra naturale gli stessi principi di compensazione della trazione che sono alla base del cemento armato e della precompressione. Una prima ragione di questo va sicuramente ricercata nella differente lavorabilità dei due materiali: la facilità di conformare il calcestruzzo nelle casseforme risulta sicuramente vincente sulle difficili e costose tecniche di taglio della pietra naturale. Tuttavia, un altro fattore determinante è sicuramente la possibilità di studiare il calcestruzzo in base ai risultati della scienza delle costruzioni, ciò che invece non è facile per le strutture lapidee in conci. Nel secondo dopoguerra, l'industria lapidea italiana si trova ad affrontare uno dei tanti ricorrenti periodi di crisi, in questo caso provocata – oltre che dai postumi della guerra – anche dalla reazione della produzione architettonica alla fine del Regime fascista, che sulla pietra aveva fondato gran parte della propria immagine. L'industria delle costruzioni, ancora in fase iniziale, suggerisce una possibile via d'uscita: estendere all'antico materiale la moderna tecnologia seriale e meccanizzata. Ne derivano alcuni esperimenti assolutamente innovativi, che precorrono molti dei temi di sviluppo dei decenni successivi.

5

Fig. 6 Facciata dell'abitazione in via Laveno a Milano



Fig. 7 La passerella in marmo armato precompresso, realizzata a Carrara nel 1965 e sezione di dettaglio.



Marcello Nizzoli realizza una parete intelaiata a curtain-wall con specchiature opache in pietra nell'edificio per gli uffici Olivetti in via Clerici a Milano. Carlo Aymonino realizza a Carrara la sede della Camera di Commercio (1957-61) con rivestimento e scale in elementi di marmo standardizzati. Enrico Mandolesi progetta un sistema di pannelli facciata in marmo e calcestruzzo (1965-66), destinati alla prefabbricazione pesante. Marco Zanuso inventa un sistema di facciata modulare prefabbricato per la Casa in via Laveno a Milano (1960-64). In questo ambito, matura quella che si può ritenere l'applicazione più interessante: la riscoperta della funzione portante della pietra, potenziata con l'ausilio della tecnologia del calcestruzzo armato. I primi esempi riguardano alcuni prototipi realizzati a Carrara nell'ambito delle Fiere del Marmo. La passerella pedonale in marmo (1965) presenta un impalcato in "pietra armata" di 8 m di luce; si tratta di sei travi a T in marmo (18 x 25 cm) dotate all'intradosso di scanalature per l'alloggiamento di barre d'acciaio d'armatura, la cui aderenza alla pietra è assicurata da resina epossidica. Ancora più avanzato è l'esperimento di una trave in marmo precompressa, che riesce a coprire una luce di 10 m sostenendo, oltre al peso proprio, anche un carico di 1000 chilogrammi appeso in mezz'aria, il tutto con una sezione alta soltanto 25 cm. Questo risultato è ottenuto mediante una sezione a pi greco cui è applicata una precompressione mediante post-tensione di nove fili d'acciaio. Ancora una volta, questi esperimenti si basano essenzialmente su prove empiriche unite a una rigorosa progettazione geometrica. Non a caso gli esperimenti sono condotti nell'ambito del polo produttivo apuano, ovvero in un contesto di operatori qualificati sotto il profilo tecnologico piuttosto che in ambito scientifico o accademico. Nello stesso ambito, quello della produzione e delle nuove tecniche di lavorazione del marmo, si colloca trent'anni più tardi la copertura a voltine della sede della IMM Carrara, di Angelo Mangiarotti. Le volte sono sottili gusci cilindrici che resistono per forma, realizzati con le nuove macchine sagomatici a filo. La sperimentazione statica (lo spessore sottile mette alla prova la stabilità basata sul controllo della linea delle pressioni) scaturisce dalle possibilità offerte dalle nuove macchine per il taglio a filo direttamente della sezione curva, senza spreco di materiale. Le foto del modello sottoposto alla prova di carico sono la più esplicita dimostrazione del carattere empirico di queste esperienze. Il culmine di questa fase empirico/sperimentale si può

Fig. 8 Prova di carico della volta di copertura della sede IMM Carrara

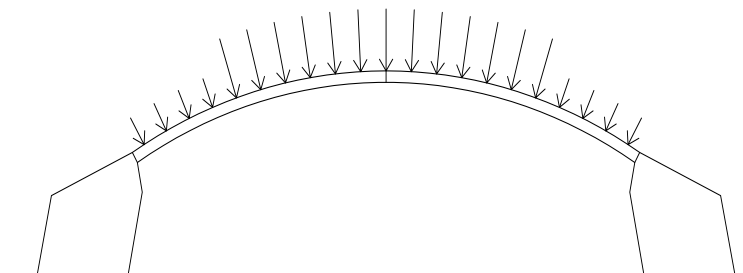


considerare il Santuario di Padre Pio a S. Giovanni Rotondo (1991-2004), nel quale Renzo Piano innalza archi precompressi in pietra di Apricena fino a 50 m di luce e 18 m di altezza. Il cambiamento rispetto alle realizzazioni precedenti è però netto e decisivo. L'obiettivo non è di indagare le possibilità espressive delle tecniche industriali ma, al contrario, di spingere l'industria ad assecondare l'intuizione tecnico-costruttiva dell'architetto: riproporre le arcate lapidee delle chiese gotiche, integrandole con l'aiuto della precompressione tramite cavi d'acciaio. Inoltre, questa volta, non si tratta di un prototipo ma di un'opera grande, importante e destinata a ospitare migliaia di persone. Non è più possibile, di conseguenza, affidarsi alle regole empiriche e sperimentali, anche perché le leggi e la commissione edilizia non lo consentono.

La strada che porta dal progetto alla costruzione passa per una stretta integrazione tra il procedimento da impiegare e il modello che lo rappresenta nel calcolo. Test prestazionali a ultrasuoni, strumenti laser per allineare i blocchi, macchinari speciali per la movimentazione e la posa¹⁰, consentono di dare vita a un continuo strutturale capace di comportarsi effettivamente in opera come ipotizzato nelle simulazioni. Non occorre in questa sede elencare le numerose esperienze che si sono succedute dopo l'opera di Piano. Ciò che conta è evidenziare l'indicazione metodologica che da quest'opera è derivata: la pietra può tornare a essere un materiale portante, a patto che si mettano a punto sistemi di modellazione che consentano le stesse verifiche di sicurezza richieste per qualsiasi altro procedimento costruttivo. Qui si ripresenta il problema già osservato all'inizio del secolo scorso: la pietra porta, per sua natura, a realizzazioni costituite di elementi discreti. Ovvi motivi di peso e lavorabilità limitano le dimensioni di conci e blocchi e confinano qualsiasi realizzazione nel campo dei procedimenti murari.

I metodi di calcolo che utilizzano modelli discreti, a causa dell'iperstaticità e dell'alto numero di parametri, non sono di solito accessibili alla normale pratica professionale e restano per lo più circoscritti alla ricerca in campo accademico. D'altra parte, la frammentarietà di qualsiasi opera muraria è proprio il suo principale punto debole, specialmente in presenza di azioni dinamiche (prima fra tutte – ma non unica – quella sismica). Pertanto, rendere una struttura discreta il più possibile assimilabile a una struttura continua, è un obiettivo comune sia alle esigenze di calcolo che al buon funzionamento in esercizio della struttura stessa.

Fig. 8.1 Schema delle forze agenti sul guscio



A ben vedere, non c'è nulla di nuovo; si tratta, come nel caso del Santuario di Piano, di mettere insieme un sistema costruttivo (la precompressione) che renda di fatto "continua" la struttura" con un metodo di calcolo che, a questo punto, può essere del tutto analogo a quello delle strutture elastiche. Le esperienze condotte da Giuseppe Fallacara presso il Politecnico di Bari hanno tuttavia dimostrato che questo non è sufficiente. Infatti, nonostante la "continuità" configuri un comportamento d'insieme assimilabile a quello di una struttura elastica, restano importanti effetti locali nell'ambito delle azioni reciproche tra i conci; trascurare questi effetti può portare a rapido degrado o anche a collasso in fase d'esercizio.

La soluzione di questo problema risiede nella disciplina della stereotomia. Rinviano alle altre parti del presente volume a ciò dedicate per gli approfondimenti sull'argomento, ci si limita a un cenno molto approssimativo. Conformare opportunamente sia i singoli elementi (conci o blocchi) sia – soprattutto – le rispettive zone di contatto (es.: giunti osteomorfi), può donare alla struttura l'unico elemento che ancora la rende dissimile dalle membrature effettivamente continue della teoria elastica: la deformabilità. Infatti, la fragilità della pietra non le consente di adattarsi agli spostamenti – seppure minimi – indotti dalle azioni dinamiche e consentiti dalla deformabilità dei cavi tesi. Opportune conformazioni di giunto possono quindi conferire quel grado di articolazione che – a ben vedere – era già stato intuito da Stirling nel settecento con il suo arco fatto di sfere.

7 Un'ultima considerazione riguarda la natura stessa del materiale lapideo. A differenza dei materiali sintetici, la pietra è naturale. Ciò significa che le caratteristiche meccaniche di ciascun litotipo e, all'interno di questo, di ogni singolo semilavorato impiegato nella costruzione, sono certamente differenti una dall'altra. Ne

Fig. 9 Foto degli archi in pietra di Apricena della Chiesa di San Pio a San Giovanni Rotondo (FG).



conseguenze che non tutte le pietre possono essere impiegate e non tutte quelle che possono esserlo sono – a loro volta – utilizzabili nello stesso modo. Riassumendo, l'evoluzione fin qui sintetizzata delle costruzioni in pietra portante è giunta oggi a un punto critico. Si è infatti aperta la possibilità di notevoli e interessanti sviluppi, a patto di mettere insieme risorse e conoscenze differenti, le quali – e questo è l'aspetto più stimolante – sono tutte già disponibili: gli insegnamenti della stereotomia, l'abbinamento con i nuovi materiali (principalmente – ma non esclusivamente – l'acciaio della precompressione), la modellazione strutturale e il relativo calcolo, la conoscenza della pietra stessa e delle modalità di lavorazione.

L'esperienza condotta all'interno del laboratorio progettuale di Costruzioni in pietra, riportata nella seconda parte del presente volume, è stata ideata e organizzata proprio per dimostrare che è possibile risolvere alcune strutture elementari di base mediante modellazione e successivo calcolo con software commerciale comune tra i professionisti. Gli studenti che hanno partecipato non avevano inizialmente particolari conoscenze oltre a quelle di base sulla tecnologia della pietra da costruzione. I lavori che hanno prodotto rappresentano dunque una discreta forma di validazione dei metodi proposti e applicati. In sostanza, si ritiene che per questa strada si possa arrivare a rendere relativamente facile risolvere un problema strutturale e costruttivo che nel passato era prerogativa di pochi espertissimi artigiani e che è sempre riuscito a sfuggire a una sistematizzazione metodologica che andasse oltre l'esperienza empirica.

Fig. 10 Foto delle voltine in marmo armato dell'edificio Esposizioni Marmi e Macchine a Carrara.



- [1] Mariette, Auguste. 1880. Catalogue général des monuments d'Abydos découverts pendant les fouilles de cette ville. Paris: L'imprimerie nationale – trad. Nicolosi in voce "Arco" Enciclopedia Italiana ed. 1929.
- [2] I canoni avevano ovviamente un significato molto differente da quelli dell'architettura greca; questi ultimi, come è noto, furono importati essenzialmente per quanto riguarda le regole compositive dei rivestimenti e in genere degli apparati di completamento e finitura
- [3] "Per che et in ogni cose et maxime in la architectura gli sono queste due cose: quello che è significato et che significa. La cosa proposita de la qual si dice se significa, ma la explicata demonstration con la ratione de le doctrine significa questa cosa. Per la qual cosa appare dover esser exercitato in l'una et l'altra colui che vol profittere se essere architecto. Et così quello bisogna essere ingenioso et docile a la disciplina; imperochè né lo ingenio senza la disciplina né la disciplina senza ingenio po efficere uno perfectio artifice" (De architectura Libro I, capo 1 - De la institutione de li architecti – traduzione di C. Cesariano, 1521).
- [4] In proposito si richiama la splendida ricostruzione storica romanzata da K. Follet nella celebre opera "I pilastri della terra" (1989).
- [5] La parte strutturale fu finita nel 1590; la calotta fu realizzata e ultimata nei tre anni successivi; Della Porta era coadiuvato da Domenico Fontana.
- [6] per una ricostruzione più completa della vicenda cfr. G. Croci – "Progettazione strutturale e consolidamento delle costruzioni" – Roma 1982, pag. 18 e segg.
- [7] C. Parvopassu "Visione storica della scienza e della tecnica delle costruzioni" – terza conferenza tenuta l'8 maggio 1953.
- [8] Lineae Tertii Ordinis Newtonianae, Oxford 1717.
- [9] Pubblicato nel 1840 negli Annales des ponts et chaussées con il titolo De l'équilibre des voûtes en berceau
- [10] Tra le varie difficoltà realizzative si cita il lancio dei cavi di post-tensionamento nei canali costituiti all'interno degli archi; infatti, i suddetti canali sono stati ottenuti allineando perfettamente i fori longitudinali eseguiti nei conci. Tuttavia questo non è stato sufficiente e sono stati necessari molti aggiustamenti per condurre i cavi a percorrere l'intero arco.
- [11] Si è indicata tra virgolette la parola "continua" per sottolineare che si tratta di un'approssimazione retorica per indicare lo stato di compressione indotto nel materiale lapideo dalla tensione dei cavi d'acciaio; la dizione è ovviamente impropria ma si ritiene possa essere accettabile, visto il carattere tecnico/pratico della trattazione.

"L'architettura comincia dove due pietre vengono sovrapposte accuratamente"

Ludwig Mies van der Rohe,
28 June 1959. New York Herald Tribune



STEREOTOMIA E TOPOLOGIA: UN METODO UNIVERSALE PER LA PROGETTAZIONE DI SPAZI VOLTATI STEREOTOMICI

**Giuseppe Fallacara*

** Professore associato SSD ICAR 14, Dipartimento ICAR - Politecnico di Bari*

Il presente saggio descrive un metodo teorico-pratico per la progettazione di sistemi voltati, di natura stereotomica e dalla grande complessità geometrica, utile a facilitare la fase di modellazione infografica tridimensionale e la prefigurazione spaziale del tutto e della parte in maniera parametrico-variazionale. Il metodo è stato messo a punto durante lo svolgimento della mia tesi di dottorato (XVI ciclo 2001-2004), successivamente pubblicato in numerosi articoli scientifici e libri, e utilizzato per la realizzazione di diversi prototipi di architettura lapidea durante manifestazioni, workshop e mostre didattiche¹.

Sono qui riportati gli scritti principali del metodo estratti dalle prime pubblicazioni editate a partire dal 2004.

Il metodo parte da una considerazione di base molto semplice ovvero dalla osservazione che gran parte dei sistemi voltati può essere immaginato, con le dovute semplificazioni e specificazioni, come un corpo discontinuo o parete muraria che è stata "piegata" e/o "deformata" (fig.1) al fine del raggiungimento della propria conformazione geometrica finale. Per esempio un muro di tufo può essere "piegato", teoricamente, per diventare una volta a botte di tufo e, ancora, quest'ultima può essere "piegata" per diventare una volta anulare e così procedendo questa può diventare una volta a botte elicoidale se si traslano verticalmente

i suoi estremi. Il metodo diventa molto interessante quando, al posto di singoli conci parallelepipedi di un sistema murario, si considerano conci molto complessi, dal punto di vista geometrico, che alla fine del procedimento di deformazione assumono conformazioni assolutamente impossibili da concepire attraverso una modellazione tridimensionale canonica. Le conformazioni geometriche complesse possono essere dovute sia ad un fatto decorativo, per esempio volte di pietra con intradosso decorato con basso o altorilievo, sia ad un fatto relativo all'ottimizzazione dell'incastro fra i conci di una volta per un miglioramento statico dell'insieme (fig. 2).

Il metodo utilizza la tecnica di "piegatura" grazie all'uso di software, oggi disponibili sul mercato, di modellazione tridimensionale, parametrico variazionale, che si basano sulla geometria topologica² e le sue funzioni di deformazione. Il concetto di "piegatura" è un tipico concetto topologico per cui un foglio di carta disteso ed uno arrotondato per formare una superficie cilindrica, dal punto di vista topologico, sono equivalenti. Si realizza, quindi, un omeomorfismo tra il rettangolo piano e il cilindro. Se procediamo piegando teoricamente il cilindro, otteniamo una superficie torica che è topologicamente equivalente al cilindro e, di conseguenza, al rettangolo di partenza. Si realizza quindi una corrispondenza

Fig. 1 Esempio di deformazione di un solido "piegato" in ambiente 3d Studio.

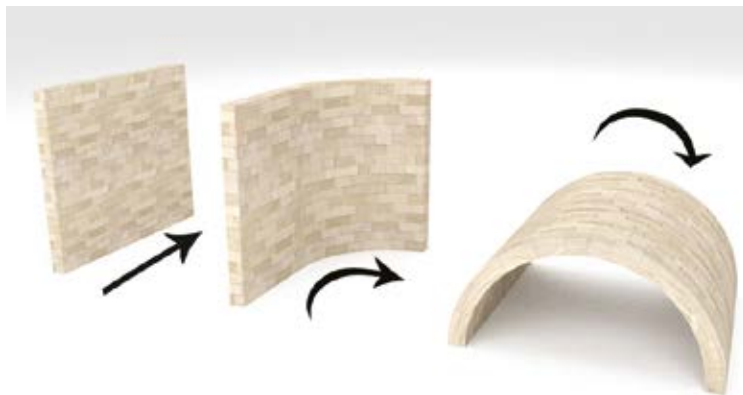


Fig. 2 Esempio di conformazioni geometriche complesse negli intradossi dovute ad ottimizzazione degli incastri



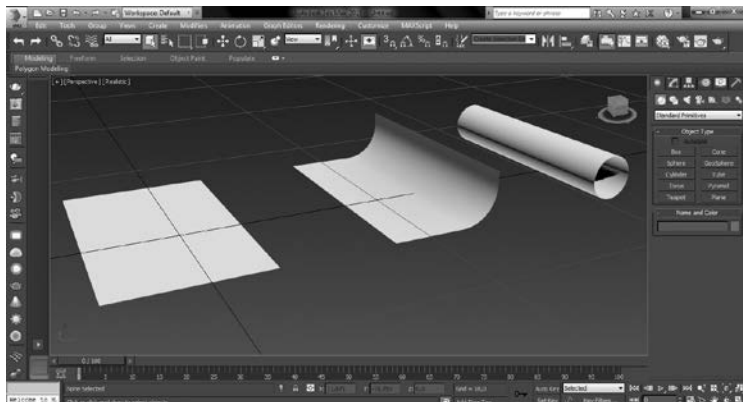


Fig. 3 Effetti del comando "piega" su un piano in ambiente 3d Studio.

biunivoca tra una superficie piana ed una spaziale. Una trasformazione topologica, o "omeomorfismo", di una figura A in un'altra A' è determinata da una corrispondenza $p-p'$ tra punti p di A e i punti p' di A' (biunivoca e continua). Se supponiamo che una figura sia costituita da un sottile foglio di gomma o disegnata su di esso, e che poi si deformi contorcendo il foglio in tutti i modi possibili, senza lacerarlo, lo stato finale della figura, sarà, allora, un'immagine topologica dell'originale. La topologia pone, quindi, l'equivalenza tra una figura geometrica euclidea e la stessa figura deformata (fig. 3).

La topologia o, per dirla alla Poincaré, la "geometria delle figure elastiche" o del "foglio di gomma"³, può concepirsi col senso del tatto: infatti, se immaginiamo il modello fisico di un oggetto topologico, possiamo scorrerlo con una mano senza incontrare soluzioni di continuità.

Il nostro interesse risiede nella possibilità di analizzare quantitativamente i "modificatori" che conducono alla deformazione di una "figura" (e quindi di creazione della forma), evitando di perdersi all'interno di quei processi arbitrari di deformazione formale (tipici di gran parte del blob architettonico contemporaneo) che sfuggono dalla possibilità di "ripetizione" dell'atto creativo. In altri termini, il "flusso" di azioni che conducono alla conformazione di uno spazio architettonico, per quanto complesso sia, deve poter essere descritto in maniera cristallina onde poterlo ripercorrere e quindi "ricostruire".

L'interesse, e in gran parte anche il valore, della topologia dipende dal fatto che i suoi problemi e le sue leggi principali rimandano ad un contenuto immediatamente intuitivo⁴. Essi, perciò, ci danno direttamente un'idea dello spazio, che si presenta in primo luogo come campo nel quale si svolgono dei processi continui di trasformazione della forma. Questi sono aspetti qualitativi propri di quelle figure che rimangono invarianti rispetto a particolari trasformazioni.

È utile sottolineare che, dal nostro punto di vista, l'analisi morfologica, finalizzata alle relazioni tra topologia e sistemi volti stereotomici, risiede nella comparazione di famiglie di forme

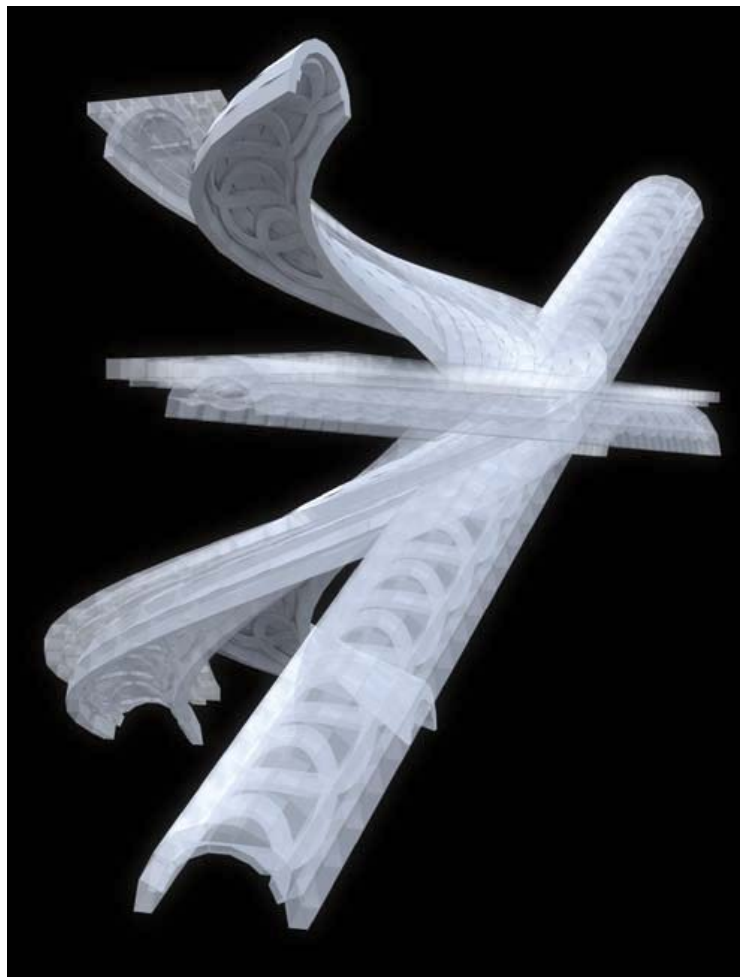


Fig. 4 Esempio di elementi strutturalmente diversi ma topologicamente e stereotomicamente affini: dal piano alla volta a botte elicoidale con intradosso decorato.

affini più che nella descrizione di singoli casi. Secondo questa chiave di lettura risultano elementi stereotomici affini, dal punto di vista topologico, quelle forme dovute ad opportune variazioni o deformazioni geometriche di altre forme: archi/archi obliqui/archi rampanti, volte piane/volte a botte/volte a botte toroidali/volte a botte elicoidali, volte a botte/volte coniche/trmpe... e così via. Va da sé che altri livelli di corrispondenza topologica nei sistemi stereotomici riguardano le volte decorate e le ammorsature spaziali dei conci litici (fig. 4).

Oggetto del presente metodo è il procedimento che consiste nella deformazione di un sistema stereotomico e nello studio della sua conseguente alterazione. Otteniamo un nuovo sistema stereotomico che rappresenta il risultato conseguito sottoponendo il precedente, che chiameremo primitivo, ad una deformazione omogenea, funzione di una specifica variazione. In altre parole,

riusciremo a comprendere la morfologia di un sistema stereotomico complesso immaginandolo come derivato da opportune variazioni di un sistema stereotomico semplice.

In questo contesto risultano evidenti i riferimenti concettuali all'opera di W. D'Arcy Thompson⁵, che, nel suo celebre libro *Crescita e Forma*, al capitolo "Teoria delle trasformazioni", fornisce una descrizione geometrica delle deformazioni che caratterizzano lo sviluppo morfologico degli esseri viventi. Queste deformazioni sono illustrate attraverso i famosi diagrammi delle trasformazioni basati sul sistema di coordinate cartesiane che ricalcano gli studi di Albrecht Dürer nel suo *Trattato delle Proporzioni*.

Si rende necessario, a tal proposito, sottolineare che gli ambiti entro cui lo studio risulta più efficace sono rappresentati da quei sistemi stereotomici in pietra e legno caratterizzati da una ricca trama decorativa coincidente con la trama strutturale.

Il sapere tecnico-costruttivo che permetteva siffatte costruzioni, tanto ostico quanto necessario al *tailleur de pierre*, può essere reso facilmente fruibile dagli studiosi della disciplina grazie all'evoluzione degli attuali software di modellazione tridimensionale che consentono di controllare il processo di generazione e costruzione della forma senza alcun tipo di ambiguità. Gli strumenti dell'analisi sono quindi unicamente informatici, perciò la forte affinità, concettuale e operativa, tra stereotomia e modellazione solida permette di trasformare i termini della dimostrazione da fisici a virtuali, restituendo singolari aggiornamenti alla speculazione disciplinare. Il processo di "smaterializzazione" delle peculiari azioni di costruzione stereotomica, slegandosi dai vincoli fisico-materici, permette maggiore libertà riflessiva sulle analisi riguardanti lo spazio, la forma, la composizione volumetrica, la scomposizione in parti, l'apparecchiatura, la decorazione, la costruzione, il montaggio, la statica e la meccanica di corpi rigidi.

Bisogna in ogni caso tener presente che nelle operazioni di deformazione informatica, a causa dell'enorme potenzialità strumentale, è sempre presente il rischio della perdita del controllo formale che può facilmente degenerare in generiche ed incontrollate operazioni di morphing o spropositate metamorfosi plastiche lontane dal pensiero costruttivo della forma, di cui si sottolinea qui la fondamentale importanza.

Lo studio della forma può essere di tipo semplicemente descrittivo o qualitativo e può divenire analitico o quantitativo. La matematica che abbandona l'astrazione dei numeri e si riappropria della figurazione geometrica diventa computer grafica o infografica.

Com'è ormai noto, la maggior parte dei software di computer grafica oggi utilizzati è stata creata per altri settori come l'industria automobilistica, quella aeronautica o il cinema d'animazione e, solo più tardi, è stata impiegata nella ricerca architettonica come ausilio allo studio e alla progettazione di modelli tridimensionali finalizzati alla qualità dello spazio.

Un modello infografico è una rappresentazione, formalizzata matematicamente, di un oggetto reale: è l'immagine matematica dell'oggetto reale. Tale immagine, in base alle specifiche esigenze d'analisi, può essere più o meno dettagliata e può presentare alti o bassi gradi di astrazione. Il tipo di formalizzazione matematica è

la causa diretta della giusta corrispondenza formale con l'oggetto reale di cui si sta creando il modello, pur sempre inteso come un'interpretazione ideale della realtà.

Esistono, quindi, per agevolare il discorso, matematiche che garantiscono una modellazione vicina alle richieste di giustezza rappresentativa di un oggetto reale e matematiche che approssimano in maniera più o meno esatta la realtà. Oggi le tecniche di modellazione fanno capo a due metodologie principali che possono essere distinte, in virtù della matematica utilizzata, in "entità discrete", ossia modelli poligonal, ed "entità continue", ossia modelli NURBS (Non uniform Rational Bézier-Spline). (fig. 5)

Occorre ricordare che la differenza sostanziale tra un modello poligonale e un modello NURBS è che il primo restituisce una geometria discreta dell'oggetto reale, mentre il secondo una geometria continua.

Al fine di ottimizzare e rendere compatibili le varie procedure di modellazione tridimensionale esiste la possibilità di convertire i modelli NURBS in modelli poligonal e viceversa (fig. 6-fig. 7).

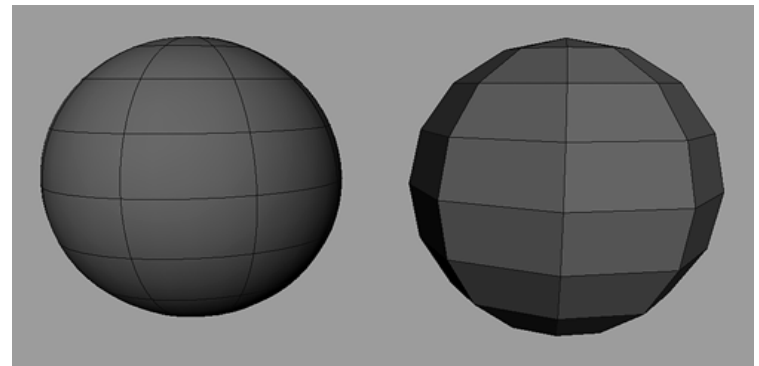


Fig. 5 Uno stesso modello 3d come NURBS (sinistra) e come modello poligonale (destra).

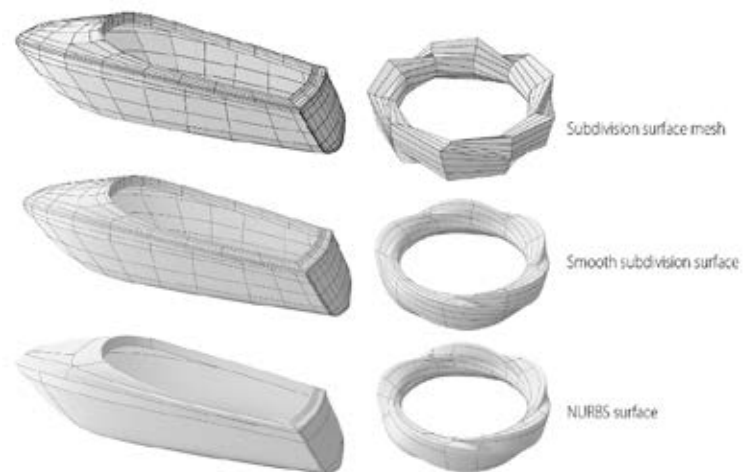


Fig. 6 e 7 Differenze tra modello 3d NURBS e mesh. (<http://www.tsplines.com/subdtonurbs>)

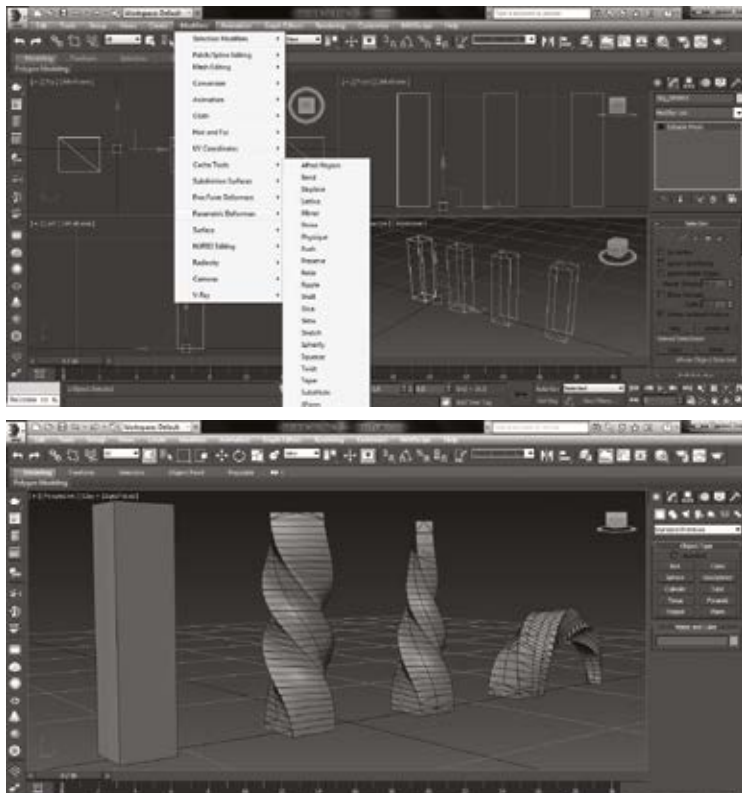


Fig. 8 Modificatori parametrici Taper, Bend, Twist in ambiente 3d Studio.

A parità di matematiche per la modellazione, risulta importante, ai fini del nostro studio, indagare un tipo di modellazione parametrica basata sulla teoria della modellazione con i modificatori, o "operatori di forma" (fig. 8). L'ipotesi metodologica è quella di mettere a confronto due tecniche di modellazione informatica finalizzate allo studio della forma stereotomica: modellazione "diretta" e modellazione "indiretta". Nel primo caso la forma nasce da processi consequenziali di protrusione e operazioni booleane di forme bidimensionali derivanti dai *trait géométriques* (disegni geometrici di base per costruire un elemento tridimensionale); nel secondo caso la forma nasce da processi di modellazione basati sui principi della topologia, ossia utilizzando strumenti di trasformazione e deformazione volumetriche della forma. In questo secondo caso l'idea è quella di considerare il processo di modellazione come una "scultura flessibile" dei dati digitali tridimensionali: si comincia con una forma semplice, magari un parallelepipedo o una sfera o un insieme di volumi solidi di base, e li si modifica, per mezzo di deformazioni topologiche parametriche, per raggiungere i gradi di complessità propri dell'oggetto finale. Questo sarà quindi raggiunto in modo indiretto, operando semplicemente attraverso le opportune deformazioni, e non in maniera diretta attraverso la modellazione canonica che, nel caso di oggetti molto complessi, comporterebbe grosse difficoltà di modellazione tridimensionale. La programmazione informatica ha, quindi, previsto l'introduzione

di un nuovo approccio alla modellazione infografica basato sugli strumenti di deformazione per dare forma all'oggetto digitale in maniera indiretta. Questi strumenti, veri e propri algoritmi matematici, si adattano perfettamente alle caratteristiche della modellazione parametrica per cui, esprimendo i valori numerici dei differenti parametri, risulta facile e razionale seguire i risultati della deformazione impressa.

I modificatori più importanti per la modellazione sono quelli che applicano all'oggetto, o ad una parte di esso, una deformazione semplice in base ad un asse direzionale. Il modificatore bend (o "piega"), ad esempio, crea delle deformazioni alla geometria dell'oggetto curvandone il proprio sviluppo rettilineo. Tali deformazioni sono possibili grazie alla distribuzione di segmenti configuranti i poligoni della tassellatura della superficie sulla superficie stessa: ogni intersezione fra i vertici si comporta come un giunto snodabile. Quindi, più segmenti abbiamo sulla superficie, più questa risulterà deformabile. Occorre notare che, contrariamente all'operazione fisica di piegatura di un qualsivoglia materiale, un'operazione di semplice o doppia piegatura infografica non produce lacerazioni o sovrapposizioni di materia, ma unicamente una trasformazione della geometria, che diventa l'oggetto di valutazione e di studio.

Una volta compresi intuitivamente i processi deformativi che hanno condotto alla configurazione finale di un sistema stereotomico, possiamo, a ritroso, cominciare a modellare un solido semplice ed appropriato e successivamente alterarlo o deformarlo in vari modi, assegnando anche più modificatori ad uno stesso oggetto.

Tra gli altri potenti modificatori, o "operatori di forma", ci sono: Rastrema, Allunga, Torsione, Scala Non Uniforme... e così via.

Tramite questo processo di propagazione delle modifiche, l'intero disegno (modello) si ri-configura assumendo nuove forme e dimensioni. Il sistema CAD parametrico rigenera autonomamente l'intero modello, ricostruendo la nuova geometria corrispondente a quanto richiesto dall'utente, ottenuta con processi di modellazione di gran lunga più semplici della canonica modellazione che, per casi spaziali molto complessi, può risultare improduttiva.

Dal disegno sul piano si ottiene il corrispettivo nello spazio attraverso una serie di semplici e coordinate trasformazioni formali.

Deformazione topologica della volta piana

Il sistema stereotomico noto col termine di *voute plate* rappresenta una delle più interessanti speculazioni tecnico-stilistiche dell'arte del taglio delle pietre applicate alla costruzione edilizia, che ha trovato nella storia rarissime realizzazioni. Come vedremo, questo sistema stereotomico ben si presta all'applicazione delle tematiche sin ora esposte. La volta piana rappresenta un ossimoro che coniuga due termini geometricamente contraddittori: la volta che per sua definizione è una superficie tridimensionale e il piano ovvero una superficie a due dimensioni.

Il problema storico posto è quello di trovare una soluzione costruttiva per coprire un vano con un solaio piano costituito di piccoli elementi discreti: detto in altri termini, costruire una volta in conci lapidei di freccia pari a zero o raggio infinito. Tale problematica, ovviamente, sfuggendo ad un condizionamento puramente funzionale, rientra nell'alveo della speculazione stereotomica di non pochi trattati francesi e spagnoli: Frézier, Rondelet, Douliot, Rovira e Rabassa.

Il principio statico, che è alla base di questo sistema coprente, presuppone che il percorso dei carichi sovrastanti la struttura si direzioni dalla verticale all'orizzontale, attraverso l'opportuna ammortatura dei singoli conci che garantisce la totale compressione del sistema coprente (volta piana).

Per similitudine dalla superficie al piano, lo stesso principio riguarda il funzionamento statico della piattabanda che può essere presa a modello di una delle possibili varianti della volta piana. La costruzione di tale sistema stereotomico può avvenire

concettualmente, quindi, sia come estrusione di una piattabanda, nel caso d'impianti quadrati o rettangolari (fig. 9), sia come rivoluzione, nel caso di impianti circolari (fig. 10).

In questa primissima suddivisione sono ovviamente contemplate tutte le possibili geometrie e apparecchiature della piattabanda. L'estensione nel piano della piattabanda produce, pertanto, una volta piana che presenta un numero variabile di conci differenti e simmetrici rispetto all'asse di simmetria della piattabanda stessa.

Per ovviare a questo inconveniente, e — quindi — per apparecchiare una volta piana con un unico concio lapideo opportunamente configurato, entra in gioco la vera speculazione teorico-geometrica che più interessa la nostra analisi. Il primo brevetto che contempla una siffatta soluzione costruttiva nasce da un'invenzione dell'ingegnere francese d'origine marsigliese: Joseph Abeille (1669–1752).

Fig. 9 Solaio quadrato a piattabanda

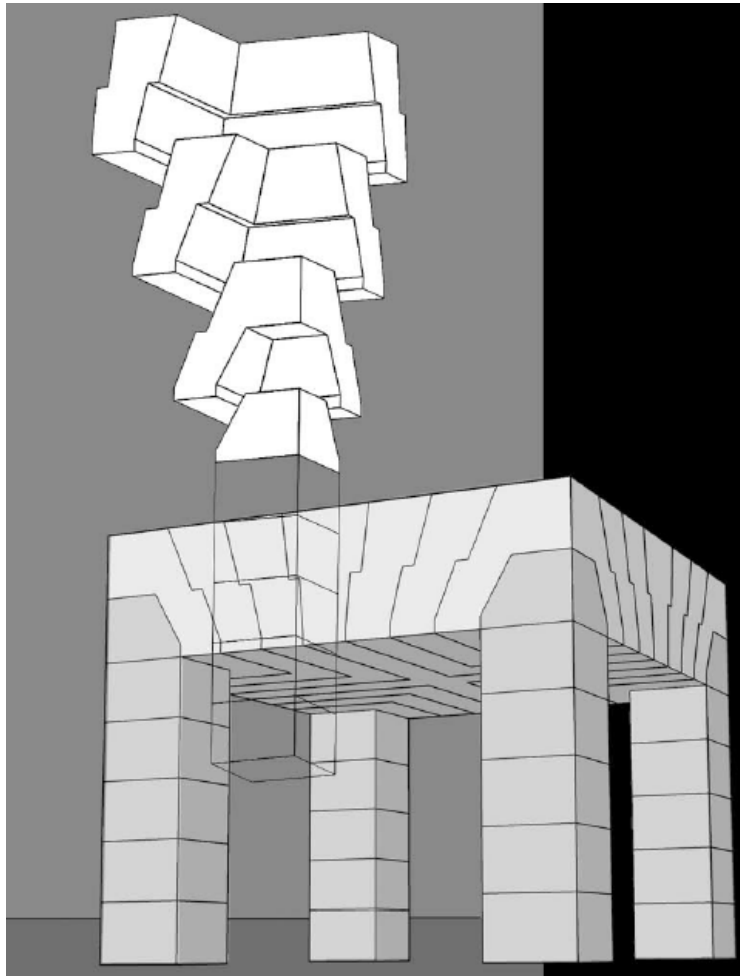
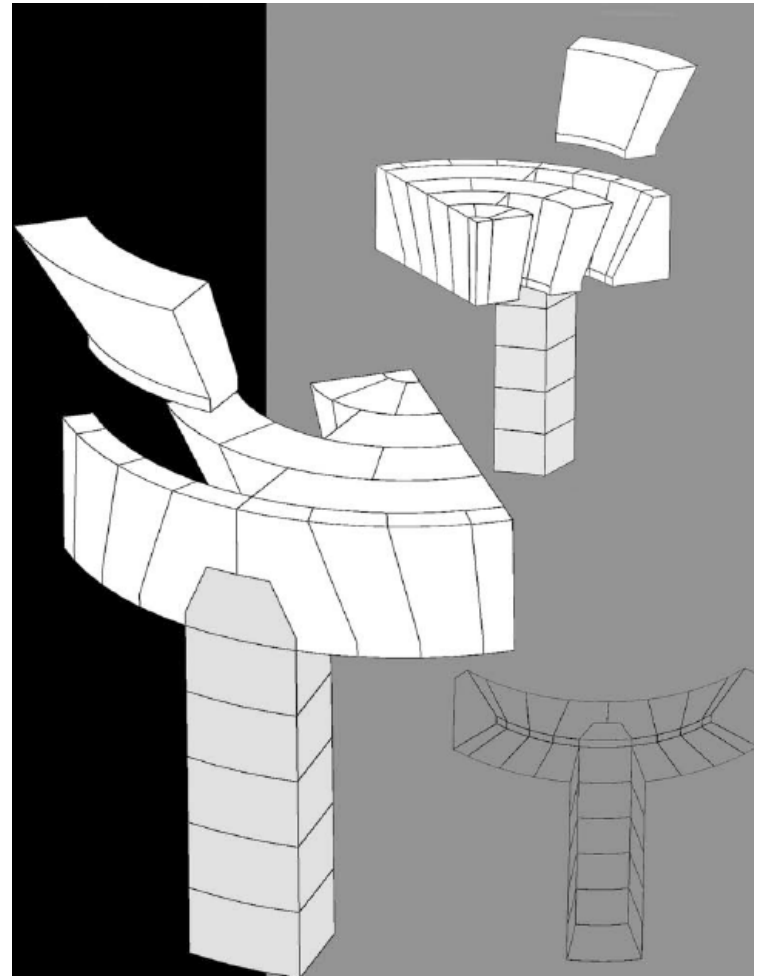


Fig. 10 Solaio circolare a piattabanda



1699.
No. 50.

VOUTE PLATE,

INVENTÉE

PAR M. ABEILLE.

CETTE Voute est de niveau, tant à son parement de douelle, qu'à celui de l'extrados; les claveaux qui la composent sont tous semblables, & n'ont que six faces ou panneaux, ainsi qu'un aube; ils forment des quarrés parfaits comme ABCD dans toute l'étendue du parement de douelle, & des rectangles EFGH au parement de l'extrados; les quarrés à la douelle sont d'alignement en tous sens, & les rectangles à l'extrados sont avec de petits carreaux entremêlés, un compartiment régulier, de sorte que cette voute forme tout ensemble, & un plafond ABIKL, pour l'étage inférieur, & un pavé EFMNO, pour l'étage supérieur.

Les quatre panneaux de joints de chaque claveau sont en coupe; il y en a deux qui sont inclinés en talus PP, deux qui sont en faillie depuis les côtés du quarré de douelle QQ.

Le quarré du parement de douelle des claveaux étant déterminé à une certaine grandeur, l'épaisseur de ces claveaux aura les trois quarts de la longueur du côté de ce quarré, & la coupe des panneaux des joints sera d'un tiers de cette épaisseur, soit aux panneaux en talus, soit aux panneaux en faillie; ce qui donnera des angles égaux pris les uns depuis le parement du quarré de douelle, & les autres depuis le parement d'extrados alternativement,

Fig. I. II.

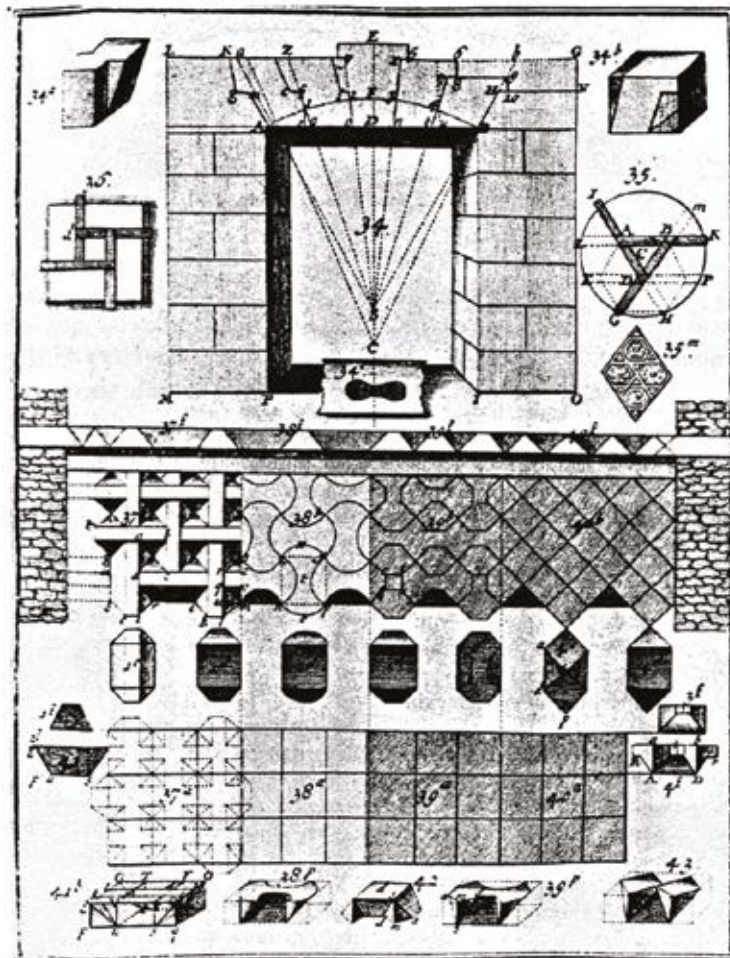


Fig. 12 Schema di volta piana messa a punto da A. F. Frézier.

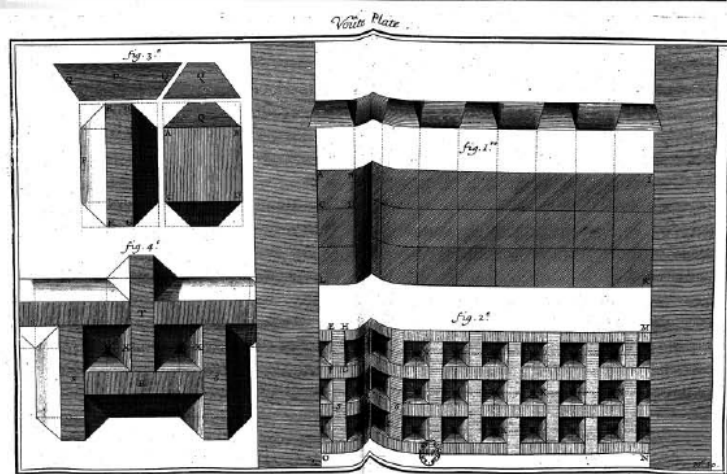


Fig. 11 Brevetto della volta piana di J. Abeille.

Il brevetto viene pubblicato nel 1699 in *Machines et inventions approuvées par l'Académie Royale des Sciences*. (fig. 11)

Il concio-tipo, reiterato in una matrice rettangolare per la realizzazione di questa volta piana, è un poliedro che presenta le due sezioni assiali, a forma di trapezio isoscele, orientate in direzioni opposte. Il funzionamento statico di questa soluzione è quello di una piastra piana bidirezionale che lavora identicamente nelle due direzioni: in essa ogni concio sostiene ed è sostenuto in maniera che la volta entra in funzione esclusivamente a montaggio completo.

La volta piana di Abeille non presenta grandi vantaggi pratici ma, rispetto ai sistemi precedentemente descritti in cui tutti i conci sono diversi, è ottimizzata proprio in base all'unica forma del concio-tipo. La sola conformazione geometrica di un concio garantisce il mutuo sostegno dei blocchi all'interno del sistema voltato.

La suddetta volta presenta due superfici visibili a montaggio avvenuto: una maglia quadrata omogenea e continua all'estradosso

e l'altra che richiama il motivo dell'intreccio tessile in virtù della presenza di fori piramidali all'intradosso.

Questa caratteristica intrinseca della struttura rende il sistema particolarmente adatto alla realizzazione di uno specifico solaio che mostra un distintivo "cassettonato strutturale" nel suo intradosso ed un piano di calpestio quadrato e regolare all'estradosso. La soluzione di continuità caratterizzata dalla presenza dei fori di forma piramidale, seppur di pregio ornamentale, può rappresentare un inconveniente di natura statica della soluzione elaborata da Abeille.

La planche 31 del trattato di Frézier è una mirabile sintesi della tematica relativa al sistema costruttivo della volta piana; in essa è possibile rinvenire le diverse configurazioni geometriche dei conci che realizzano le possibili varianti sul tema. La pagina riproduce in alto una piattabanda fiancheggiata da due schemi apparentemente estranei, relativi ai modi con cui è possibile coprire vani di forma quadrata e circolare con travi lignee disposte a svastica, di dimensione minore rispetto la luce dei vani stessi. In realtà questi schemi colgono perfettamente il principio statico sotteso al comportamento delle volte piane, secondo cui ogni concio, al pari di una trave lignea, sostiene ed è sostenuto.

Per Frézier⁶ è evidente che la proposta di Abeille si ispira ai celebri disegni dei solai di Sebastiano Serlio (già presenti nel manoscritto di Villard de Honnencourt) in cui si propone di coprire grandi luci con travi di piccole dimensioni. Il legame tra sistema litico delle volte piane e carpenterie lignee resta vivo, all'interno della speculazione costruttiva, sino al 1856 nelle soluzioni per solai bidirezionali contenute nel Trattato dell'arte del Carpentiere di A. R. Emy.

Al centro della pagina Frézier presenta una sezione verticale, due viste planimetriche (dal basso e dall'alto) e assonometrie di singoli conci di una volta piana apparecchiata con quattro conci differenti (fig. 12): una sorta d'inventario di "pattern tridimensionali" pronti per l'uso. Di queste quattro soluzioni tre presentano conci realizzati con poliedri a facce piane ed una il concio realizzato con l'involuppo di superfici piane e rigate. Quest'ultima è forse la configurazione più interessante dal punto di vista speculativo e rappresenta la raffinata soluzione elaborata nel 1704 dal carmelitano Jean Truchet, detto padre Sebastien (1657-1729), su cui ritorneremo nel prosieguo della trattazione, che consente di risolvere il problema dei fori piramidali presenti nella soluzione di Abeille. Il concio elaborato da Truchet (fig. 13) è un solido costituito da una base inferiore di forma quadrata e una base superiore di forma mistilinea (composta da quattro archi di cerchio identici disposti in coppia sui lati paralleli del quadrato in modo da formare curve concave e convesse) raccordati per mezzo di superfici rigate. Questa problematica è proposta da Frézier per mezzo di due varianti di conci che rappresentano una "rettificazione" ed una "canonizzazione" della soluzione di Truchet: nel primo caso, non più involuppo di superfici rigate bensì involuppo di facce piane opportunamente raccordate; nel secondo, le superfici rigate diventano superfici coniche-sviluppabili.

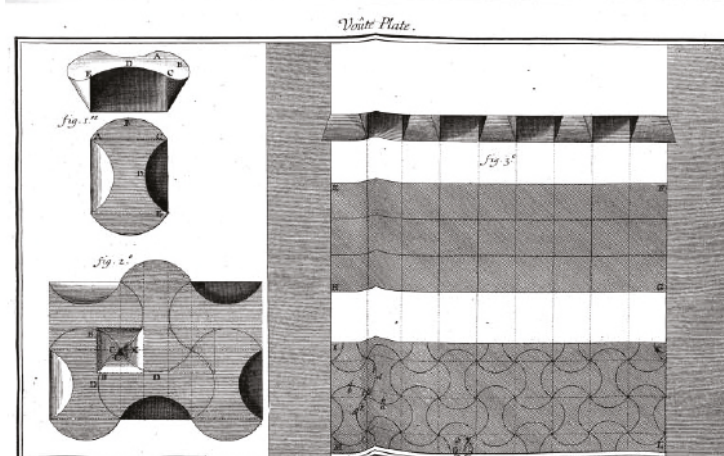
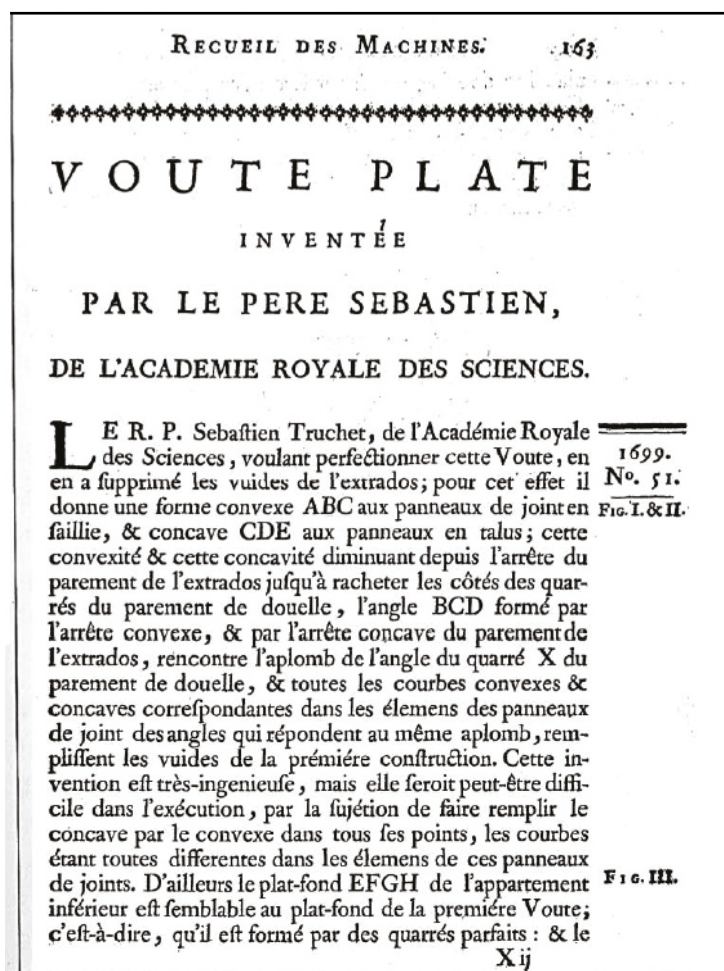


Fig. 13 Brevetto della volta piana di S. Truchet.

La soluzione di Truchet è descritta nelle Mémoire concernant les voutes plates, in "Recueil de l'Académie Royale des Sciences" del 1704.

Il nostro maggiore interesse nei confronti di questa soluzione risiede nella capacità d'infinita generalizzazione formale che il sistema costituito da semplici enti geometrici intrinsecamente possiede⁷.

Nel 1704, il padre domenicano Sébastien Truchet, che si interessava tanto di matematica che di arte, pubblicò un testo dove mostrava che una infinità di motivi potevano essere generati dal semplice assemblaggio (accostamento) di quadrati colorati a metà. In questo testo appariva infatti una primissima espressione dei principi della teoria combinatoria e della simmetria dei cristalli. Quindi questo testo di Truchet rappresentò l'origine di un lavoro di un altro domenicano di nome Douat, che pubblicò nel 1722 un libro contenente una grande quantità di disegni sovrapposti di motivi di base. Questo libro ha avuto una influenza su tutta l'arte decorativa europea del XVIII sec⁸.

È importante mettere in relazione il metodo elaborato per il "pavage de Truchet" con la soluzione del "concio-Truchet" della volta piana al fine di coglierne le reciproche peculiarità, ossia la capacità di creare molteplici pattern decorativi che coprono una superficie. Ne risulta che il "pavage de Truchet" può diventare tridimensionale se opportunamente coniugato alla tecnica di conformazione del concio costituente di una volta piana. I due brevetti possono essere correlati in modo tale da poter creare infinite variazioni ornamentali della volta piana, in cui ornato e struttura coincidono

totalmente.

La storia ci consegna, quindi, riflessioni e tecniche che consentono:
—di costruire un solaio spingente costituito da elementi lapidei tutti uguali opportunamente ammortati;
—di poter variare infinitamente la forma degli elementi lapidei e quindi l'intero ornato del solaio.

Se ci astraiamo dal solaio e valutiamo le due considerazioni ora espresse riferendoci ad un solido (parallelepipedo con lo spessore molto piccolo rispetto alle dimensioni di lunghezza ed altezza) costituito dall'assemblaggio di tanti blocchi opportunamente configurati che garantiscono un forte ancoraggio all'insieme, possiamo spingerci ad elaborare alcune fondamentali riflessioni sui principi della deformazione e trasformazione che legano la stereotomia alla topologia. Siamo quindi ritornati all'ipotesi di partenza del presente studio il cui interesse è quello di manipolare creativamente la forma, codificata storicamente, per giungere a nuove speculazioni sia d'analisi che di progetto.

La tecnica della deformazione per piegatura esposta in precedenza, per cui da un segmento rettilineo si ottiene un arco di circonferenza o da un piano un cilindro o una sfera, ci permette di formalizzare la nuova famiglia di volte stereotomiche apparecchiata con l'ammorsamento tipico dei conci della volta piana.

Questa speculazione tende a risolvere alcuni tra i nodi teorici più importanti connessi alla realizzazione di spazi voltati:

—migliorare il mutuo ancoraggio, e quindi l'attrito, dei conci di un sistema voltato;

Fig. 14 Trasformazione: volta a botte apparecchiata con concio di J. Abeille.

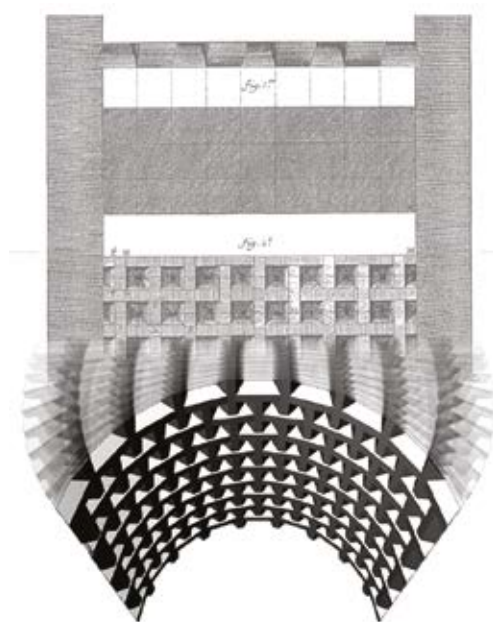
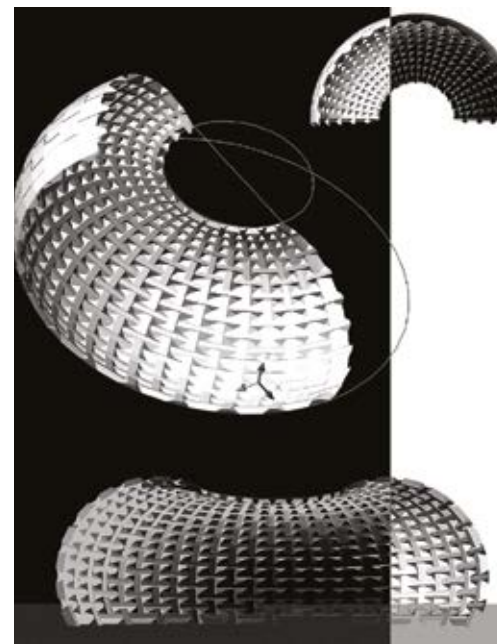


Fig. 15 Trasformazione: volta a botte apparecchiata con concio di S. Truchet.



Fig. 16 Trasformazione: cupola a doppia curvatura apparecchiata con il brevetto di J. Abeille.



- ridurre gli spessori murari;
- concepire l'apparecchiatura di una volta come sistema sia ornamentale sia strutturale;
- variare la forma dell'apparecchiatura in modo agevole e continuo;
- razionalizzare il numero di conci–tipo per la costruzione di un qualsiasi spazio voltato;
- ottenere automaticamente tutti i dati geometrici per il taglio sia manuale sia elettronico (CAD/CAM/CNC) dei singoli conci–tipo;
- fornire automaticamente tutti i dati numerici finalizzati al calcolo strutturale.

La sperimentazione è stata condotta sui brevetti della volta piana di Abeille e Truchet, i quali sono stati sottoposti ad una deformazione per piegatura che, trasformando il piano in semicilindro, ha consentito di ottenere una nuova conformazione dei singoli blocchi lapidei. Si è ipotizzato quindi di costruire una volta a botte, apparecchiata con i noti brevetti, al fine di assegnarle un nuovo valore estetico/statico.

Alcune delle immagini proposte (fig. 14-15-16) sono state concepite in modo da restituire l'effetto dinamico della variazione morfologica all'interno di un'immagine statica. Per questioni connesse alle dimensioni di questo studio si è pensato di presentare solamente le deformazioni per piegatura, ritenendo pleonastica la descrizione degli altri modificatori per cui valgono le stesse considerazioni generali connesse all'infinita possibilità di attuare variazioni e metamorfosi.

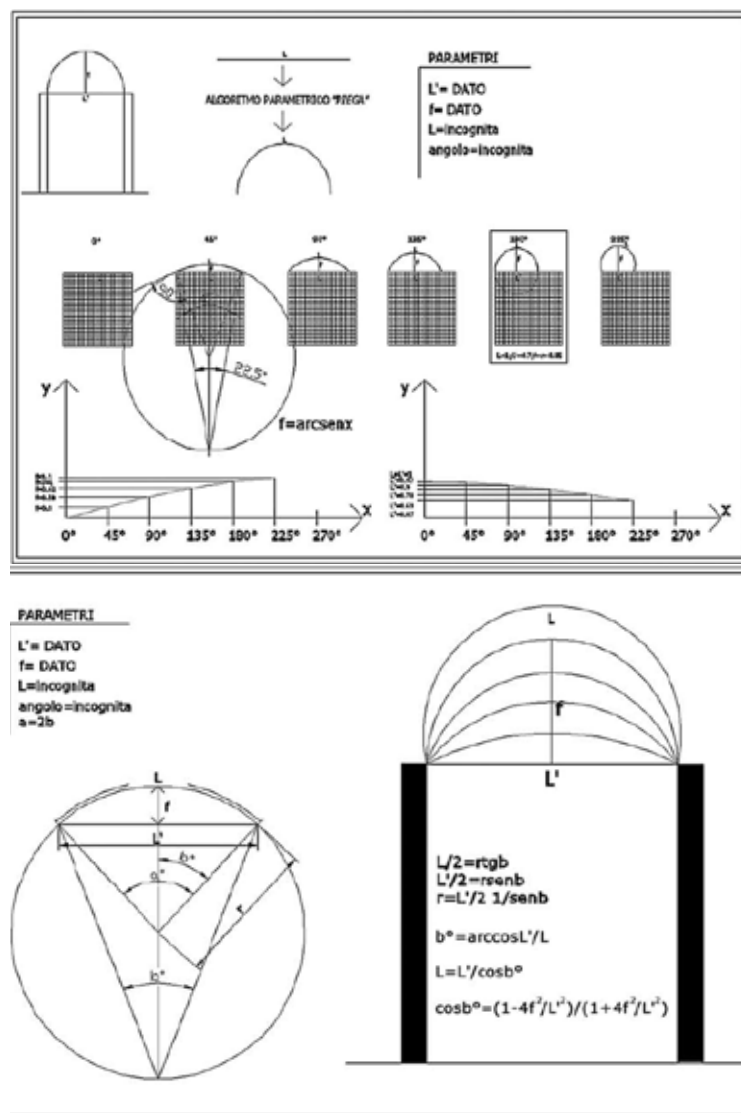
È interessante sottolineare che il termine "arco" (dal latino arcus) contiene in sé il termine "piegare" (dal latino pli-care) in virtù della identica radice sanscrita ar (ar-alas piegato). L'etimo della parola "piegare" trae origine dalla radice sanscrita park-prak-plak che esprime il senso del mischiare, collegare, intrecciare e che per traslato fa riferimento alla tessitura organica e alla ramificazione lignea. Una tessitura lignea, quindi, che idealmente si ricollega al concetto dell'arco.

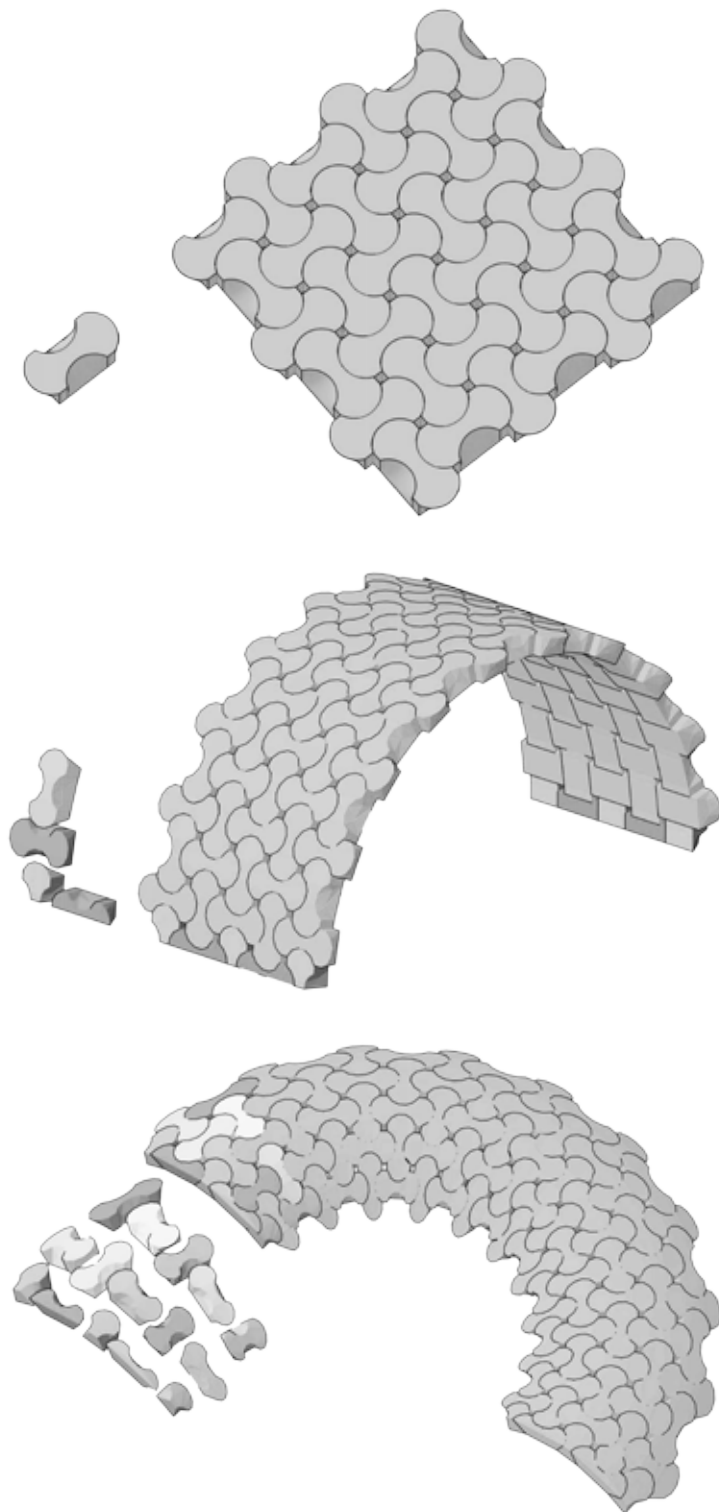
Per la trasformazione della volta piana in volta a botte si è proceduto all'individuazione di un campo di variabilità geometrico-formale della stessa, attraverso la definizione dei parametri di modificazione. Ad esempio, dalle figure 17 e 18, è possibile comprendere la natura dei parametri che entrano in gioco nella messa a punto del metodo: L' (la luce libera tra due muri su cui si imposta la nuova volta a botte) è un parametro dato o stabilito in fase progettuale; f (la freccia dell'arco) è anch'esso un parametro dato o di progetto che nella fattispecie assegna il valore formale più importante della volta (rialzata, ribassata, a tutto sesto,...); L (la dimensione dell'arco di circonferenza) è un parametro che dipende dai due precedenti e rappresenta una dimensione di sviluppo sul piano della volta (l'altra dimensione è connessa alla lunghezza del vano da coprire); Φ (l'angolo di piegatura) è il parametro da inserire nel modificatore "piega" che consente di trasformare il piano in superficie cilindrica deformando opportunamente il modello. Quest'ultimo parametro è calcolato come angolo compreso tra due rette normali alle tangenti prese all'estremità all'arco di circonferenza e può correlarsi alla freccia della stessa, per cui ad

esempio: per f uguale ad r si ottiene una semicirconferenza con Φ pari a 180° ; di contro, con Φ pari a 0 , l'arco si trasforma in un segmento rettilineo e così via.

Quindi, una volta stabiliti i parametri morfologici di sezione (L' e f), è possibile calcolare lo sviluppo della volta (L) e assegnare la dimensione in lunghezza del vano da coprire. Questi dati ci restituiranno la dimensione del rettangolo su cui si modellerà la volta piana tradizionale facendo attenzione ai dovuti spessori della stessa in luogo delle dimensioni del vano da coprire.

Fig. 17 e 18 Parametri per la deformazione per "piegatura" di una volta piana





Terminata questa fase e individuato l'angolo Φ della "piegatura", il modificatore infografico completerà l'opera trasformando il "rettangolo" in "semicilindro". Tutti i conci subiranno una deformazione continua passando dalla configurazione "piana" (fig. 19) alla relativa "spaziale" (fig. 20-21).

Assegnare un'unica curvatura al sistema voltato significa ottenere due conci-tipo per la realizzazione dell'intera volta, il cui numero aumenta all'aumentare del grado di curvatura del sistema voltato. Per concludere occorre sottolineare che la comprensione di tutte le possibili generalizzazioni formali a cui il sistema stereotomico può sottoporsi sia fondamentale al fine di ripensare progettualmente il valore estetico-statico-costruttivo di una geniale ed innovativa tecnica aedificandi, proiettata, forse, in un nuovo futuro.

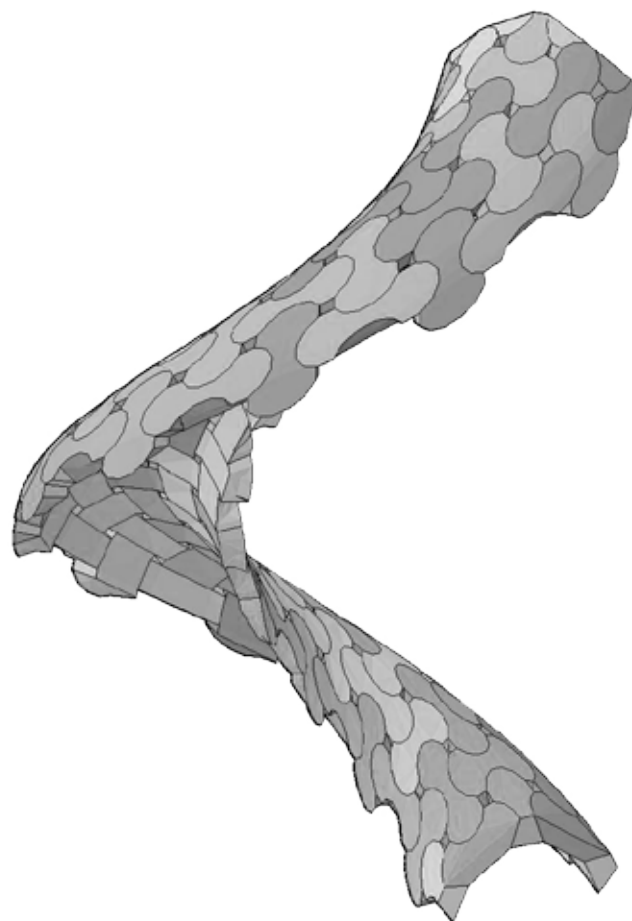


Fig. 19 Configurazione piana della volta

Fig. 20 Configurazione cilindrica della volta

Fig. 21 Configurazione torica della volta

Fig. 22 Configurazione elicoidale della volta

[1] Nell'alveo di queste ricerche si inseriscono tutte le pubblicazioni dello scrivente a partire dalla tesi di dottorato, discussa a Bari nel 2004, dal titolo *Il paradigma stereotomico nell'arte del costruire*. Dalla natura sincretica della modellazione digitale, alla progettazione/costruzione di elementi architettonici in pietra da taglio. Il nuovo possibile asse di ricerca, su cui da anni chi scrive dispiega il suo impegno didattico e di ricerca progettuale, riguarda una nuova strada sperimentale sull'aggiornamento e rinnovamento della stereotomia come disciplina fondante di un nuovo paradigma progettuale. I primi scritti: 2003, G. Fallacara, *The formal unity of aerial vault's texture: the "trompes"*. The role of traditional "trait géométrique" for trompes design in the perspective of the employ of modern CAD/CAM project/execution processes, in *First International Congress on Construction History*, Madrid; 2004, C. D'Amato e G. Fallacara *Procedimenti progettuali, stereotomia, e tecniche cad/cam: dal taglio "per sottrazione" al taglio "per addizione"*, in *Il Giornale dell'Architettura*. Nel settembre del 2005, all'interno del settore culturale del Marmomacc - Veronafiere a Verona, viene presentata la prima mostra italiana sulla stereotomia, a cura di C. D'Amato e G. Fallacara, dal titolo *L'arte della stereotomia*. I *compagnons du Devoir* e le meraviglie della costruzione in pietra con la pubblicazione omonima edita Librairie du Compagnon a Parigi. All'interno della mostra viene presentato il prototipo di una scala elicoidale autoportante in pietra da taglio precompressa (illustrata nel capitolo relativo ai prototipi) i cui calcoli strutturali vengono elaborati da Marc Vinches che a partire dalla tesi di dottorato del 1988 presso l'Ecole de Mines de Paris ha elaborato modelli di calcolo ad elementi discreti più consoni al comportamento meccanico di una struttura stereotomica. Nel 2006 viene pubblicata, a nome dello scrivente, la prima ricerca sul rapporto tra stereotomia e topologia con un saggio presentato al *Second International Congress on Construction History*, Cambridge UK dal titolo *Digital stereotomy and topological transformations: reasoning about shape building*. L'ipotesi teorica, sulla deformazione topologica del celebre brevetto del 1699 di Joseph Abeille sulla volta piana, contenuta nel saggio, diviene manifesto e opera costruita alla 10° Mostra Internazionale di Architettura La biennale di Venezia sotto forma di portale di ingresso in pietra leccese alla mostra dal titolo *Città di Pietra* curata da Claudio D'Amato. Questa suggestione architettonica è diventata l'oggetto delle ricerche ingegneristiche e computazionali della dottoranda Lucia Mondardini sotto la direzione di Maurizio Brocato nel Laboratorio GSA di Paris Malaquais.

L'enorme potenzialità progettuale ed operativa, messa a punto dalla formalizzazione geometrica che lega la topologia alla stereotomia, viene puntualmente descritta nel libro dello scrivente edito da Aracne, editrice di Roma, nel 2007 dal titolo *Verso una progettazione stereotomica*. Nozioni di stereotomia, stereotomia digitale e trasformazioni topologiche: ragionamenti intorno alla costruzione della forma. Il libro viene presentato per la prima volta a Madrid all'interno della Summer School dal titolo *El Arte de la Piedra: Teoría y Práctica de la Cantería* organizzata da Palacios Gonzalo José Carlos e all'interno della Facoltà di Architettura dell'Universidad San Pablo, Madrid 2009. Nel 2009 vengono pubblicati gli atti della summer school dal titolo omonimo a cura di Sanjurjo Álvarez Alberto. Nel 2008 viene pubblicato, per le edizioni Aracne di Roma, il libro *Plaited Stereotomy – Stone Vaults for the Modern World* a nome di Richard Etlin, distinguished university professor alla Maryland University, lo scrivente, e Luc Tamborero, *compagnon du devoir tailleur des pierres*. Il libro, presentato al Marmomacc 2008 in contemporanea alla mostra omonima, indaga la possibilità di paragonare l'apparecchiatura lapidea dei sistemi voltati agli intrecci tessili leggeri e flessibili. La contaminazione dialettica tra pesantezza del materiale lapideo e la leggerezza delle forme tessili rappresenta la principale leva di ricerca da parte dello scrivente che ormai da anni indaga sulle potenzialità morfologiche insite in tale assunto concettuale come fondamento per l'aggiornamento della stereotomia.

Le immagini presentate in questo saggio sono il frutto della ricerca progettuale da un lato e della didattica dall'altro che mutuamente si rispecchiano e fronteggiano in maniera dialettica.

[2] La topologia, il cui etimo deriva dalla parola greca *topos* (luogo) è anche conosciuta come *Analysis Situ*, analisi della posizione. Tale denominazione proviene dal titolo del volume *Analysis Situ*, scritto dal matematico Francese Jules-Henri Poincaré e pubblicato nel 1895, con il quale viene riconosciuta la nascita ufficiale di quel ramo della matematica chiamato in seguito topologia. Il termine topologia fu usato per la prima volta nel 1847 da Listing nel titolo del suo libro *Vorstudien zur Topologie* (studi introduttivi alla topologia).

[3] La topologia è anche nota come "la geometria del foglio di gomma" poiché esemplifica metaforicamente la possibilità di poter trasformare una figura disegnata su di un supporto malleabile e di poter operare su di esso alterazioni a piacere senza strapparla o lacerarla.

[4] Si vedano, a tal proposito, gli studi sullo spazio topologico del celebre psicologo svizzero: J. PIAGET, *La rappresentazione dello spazio nel bambino*, Giunti Barbera, Firenze 1976.

[5] W. D'ARCY THOMPSON, *Crescita e forma*, (edizione originale: Cambridge 1917) Boringhieri, Torino 1992.

[6] A.F. FREZIER, *Éléments de stéréotomie à l'usage de l'architecture pour la coupe des pierres*, cit. (nota 5 cap. I), Il tomo, p. 77.

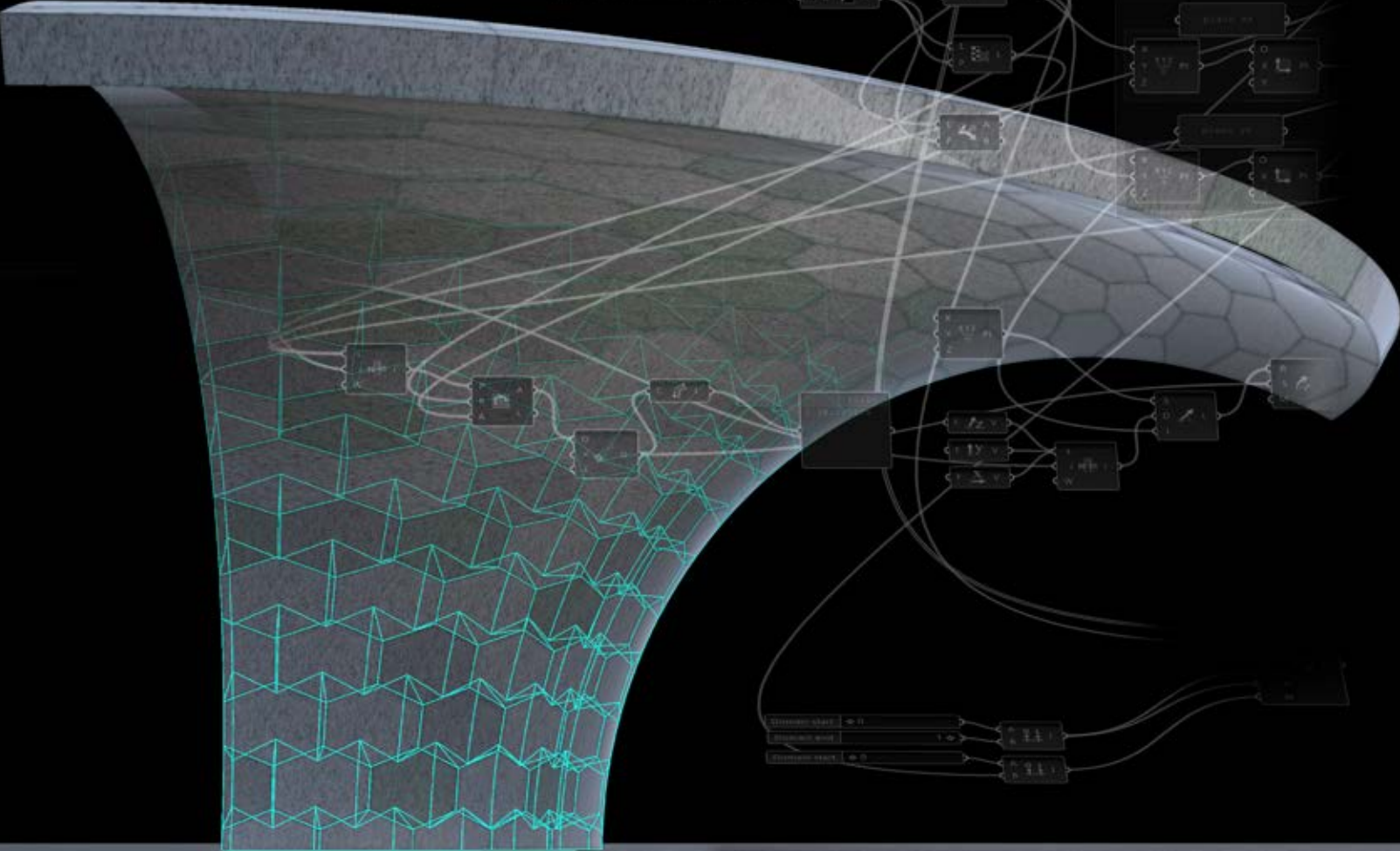
[7] A tal proposito bisogna sottolineare che padre Sébastien Truchet è un matematico e il suo nome è principalmente legato al "pavage de Truchet", pur essendo ricordato come specialista e inventore di un numero incredibile di brevetti (dal punto tipografico al celebre carattere tipografico noto come *Romain du roi*, al *Paraboloide* di Truchet). Nel suo *pavage* (pavimentazione), Truchet studia il modo attraverso cui è possibile combinare semplici forme, ad esempio il quadrato bicromo bianco-nero diviso dalla diagonale, al fine di produrre disegni ornamentali mutevoli e, nel 1704, pubblica i risultati delle sue ricerche in *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*. Questo concetto connesso al *tiling system*, sicuramente d'ispirazione per il concio della volta piana, non era nuovo, dato che ritroviamo lo stesso tipo di problema in *Curiosités géométriques* di Emile Fourrey, ma Truchet fu il primo a pubblicare studi dettagliati di tutte le combinazioni del *tiling system*.

Quest'ultimo, dal punto di vista concettuale, è una superficie-tipo creata dall'accostamento di elementi di base senza fori e senza sovrapposizioni, usando un numero minimo di diversi elementi. Per mezzo di questo principio fondamentale è possibile creare elaborati pattern decorativi, specialmente quando i diversi elementi di base sono complessi e di diverso colore: l'esercizio fa riferimento ad un concorso organizzato dalla associazione Gutenberg. Il problema è stato scoperto, proposto e inizialmente studiato da Philippe Esperet, professore di matematica presso il Lycée Henri iv di Parigi, nel 1995.

[8] S. SMITH, *The Tiling Patterns of Sebastien Truchet and the Topology of Structural Hierarchy* in *Leonardo* 4, vol. 20, 1987, pp. 373–385.

"L'architettura è l'adattarsi delle forme a forze contrarie".

John Ruskin



TEORIE E TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE PARAMETRICA DI SPAZI VOLTATI COMPLESSI

**Vincenzo Minenna*

* Dottore di ricerca, Docente a contratto SSD ICAR 14, Dipartimento ICAR - Politecnico di Bari

Premessa

Con questo saggio si vogliono illustrare l'evoluzione e gli ultimi sviluppi della ricerca nel campo della progettazione generativa applicata a sistemi volati di natura stereotomica. Innanzitutto è necessaria una premessa sui principali metodi di progettazione generativa. A riguardo verranno proposti esempi progettuali che rappresentano l'applicazione di processi e tecniche parametrici.

Introduzione al metodo

Bisogna considerare che gli attuali metodi della progettazione architettonica si basano sulla modellazione digitale CAD/CAM; nello specifico la progettazione parametrica elimina molti dei limiti tecnici dovuti all'utilizzo di software di modellazione tradizionale, fornendo nuovi strumenti a disposizione del progettista. L'aspetto "parametrico" ¹ è quello che ha maggiormente influenzato la prassi progettuale negli ultimi anni, entrando a far parte dei processi fondamentali di modellazione e verifica del progetto architettonico.

La possibilità di modificare alcuni parametri dimensionali quali raggi, angoli e distanze, porta a una corrispondente variazione dell'entità geometrica, cosicché il software varia autonomamente la geometria secondo quanto richiesto dall'utente (Fig. 1-2).

Questo approccio prende il nome di processo parametrico-variazionale e subisce continue influenze provenienti da discipline come la matematica, che inducono la ricerca di nuovi “modelli” di riferimento a monte del processo ideativo.

Si può perciò definire un differente approccio, che prende il nome di processo parametrico-generativo. Quest'ultimo ha come caratteristica operativa quella di creare geometrie partendo da formule matematiche espresse tramite codici.

Il processo parametrico-variazionale

Il processo variazionale permette di controllare la qualità e la fattibilità di un progetto inteso come sistema dinamico non lineare ² garantendo una facile e coerente propagazione delle modifiche a tutte le parti del modello 3D ³: il software ricostruisce tutto il modello autonomamente in base alla variazione di un parametro da parte dell'utente.

Per comprendere questo processo bisogna introdurre il concetto di "algoritmo parametrico"⁴. Operativamente si imposta una serie di

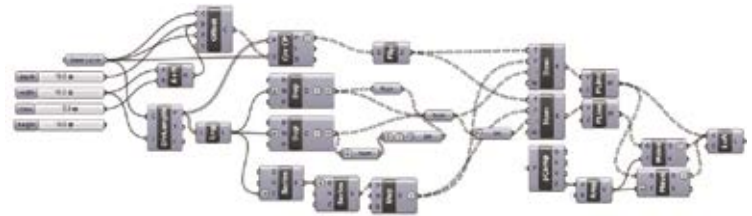


Fig.1 Codice parametrico grasshopper per la modifica del pattern in figura 2

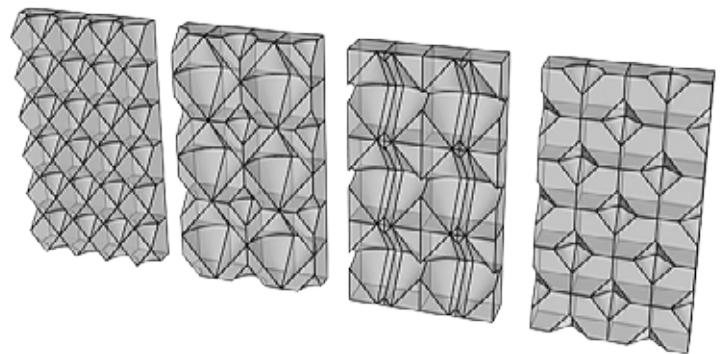


Fig. 2 Possibili effetti della variazione del pattern 3d al variare di un parametro.

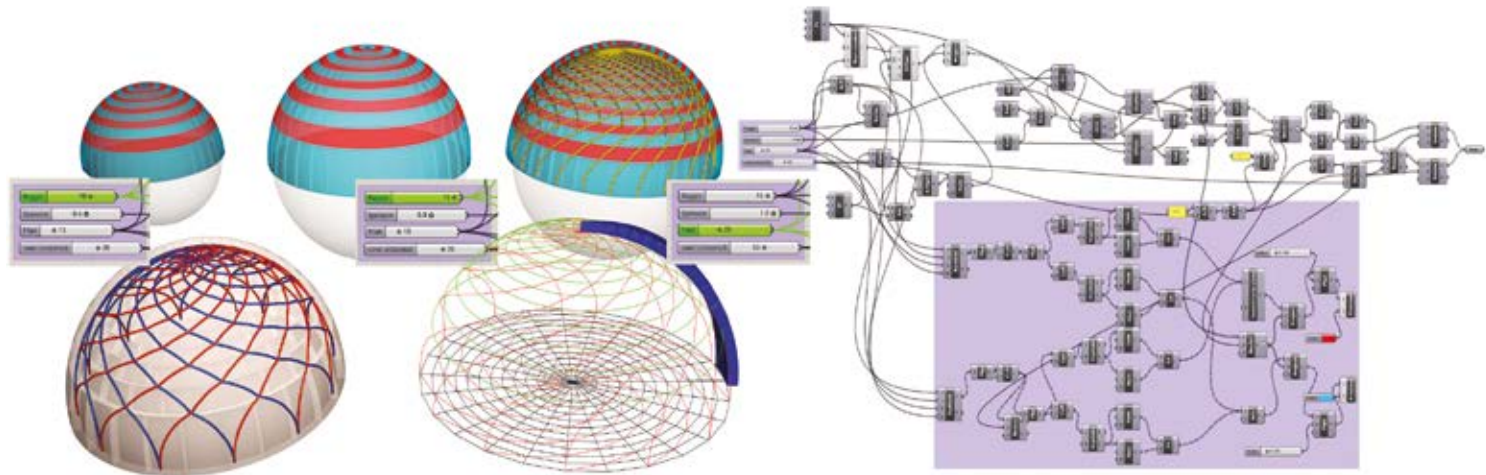


Fig. 3 Processo parametrico-variazionale applicato ad una semi-sfera per mezzo del software Grasshopper.

fattori di base (dimensione, forma, etc) ed alcune semplici regole (geometria, statica, etc) che ne gestiscono il rapporto reciproco (Fig. 3).

A queste logiche di base possono essere integrati fattori secondari più complessi come quelli di fattibilità di produzione e montaggio o variabili parametriche, come condizioni ambientali o particolari sollecitazioni statiche, giungendo quindi ad una migliore strategia progettuale.

I modelli tridimensionali così generati sono utilizzabili nella produzione industriale dalle macchine a controllo numerico e dai robot, in modo da produrre oggetti unici con costi paragonabili a quelli prodotti in massa.

Il metodo variazionale: Esempio

Di seguito viene illustrato come il metodo parametrico variazionale abbia influenzato il processo di progettazione fin dalla fase ideativa. L'esempio scelto è quello della modellazione parametrica una superficie assimilabile a una volta catenaria (Fig. 4).

I dati di partenza prevedono: 1) una volta piana composta da conci stereotomici; 2) una curva direttrice che nel nostro caso è una curva catenaria (Fig. 5); 3) una curva generatrice, ovvero l'effettiva lunghezza della successiva superficie (Fig. 6).

Immessi questi dati di partenza all'interno di moduli ⁵ (Fig. 7), è stato elaborato un codice algoritmico attraverso l'utilizzo di un software generativo ⁶.

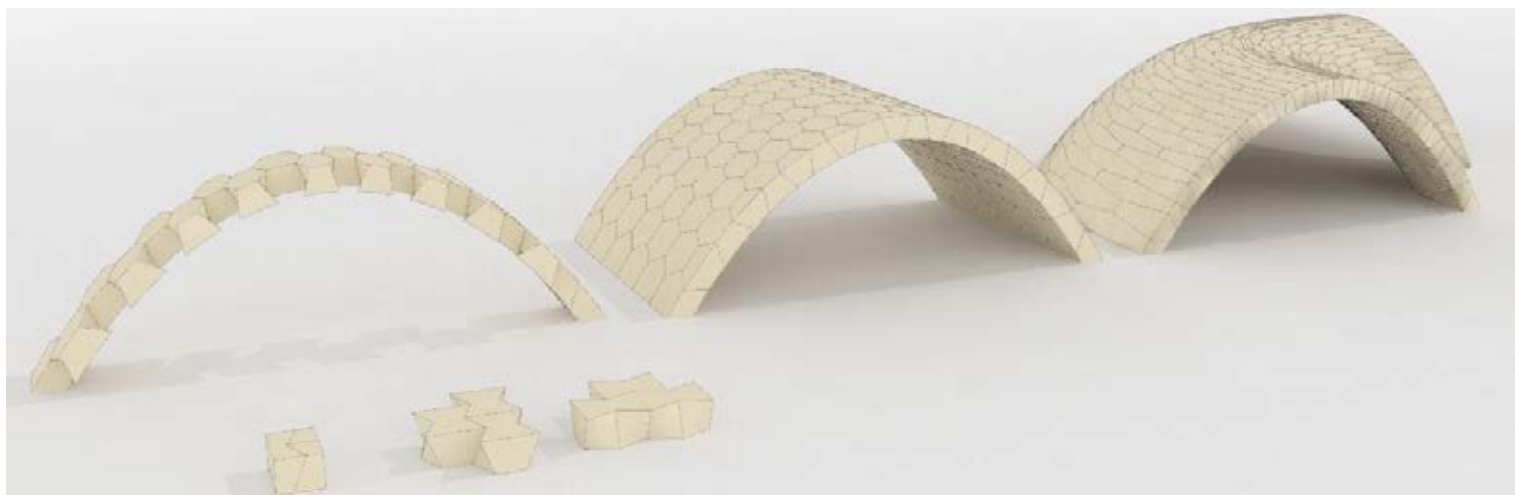


Fig. 4 Modelli 3d di un arco, una volta a botte ed una sezione di volta anulare che seguono una curva catenaria, modellazione in ambiente rhinoceros.

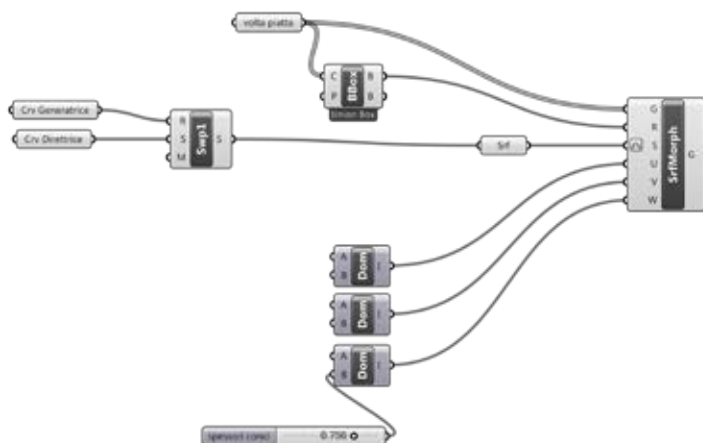
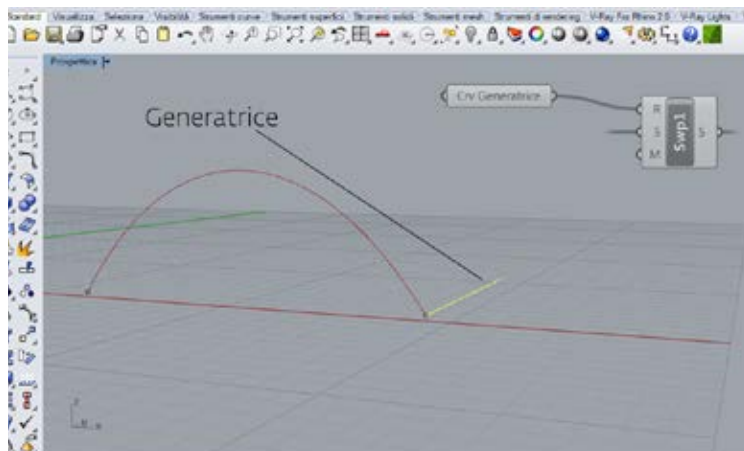
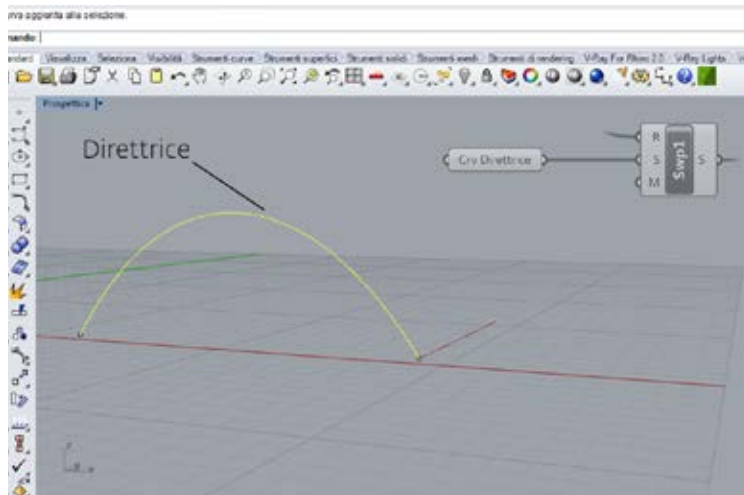


Fig. 5 Curva catenaria direttrice della superficie della volta.

Fig. 6 Curva generatrice della volta.

Fig.7 Codice per la modellazione parametrica della volta in grasshopper.

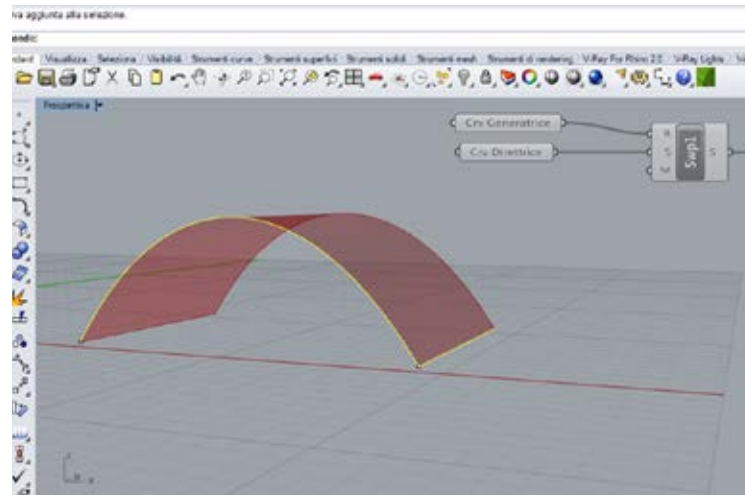


Fig. 8 Superficie catenaria generata tramite grasshopper.

In particolare i moduli sono riferiti alle curve, alla geometria di riferimento e allo spessore del modello.

Le due curve di partenza generano una superficie tramite il comando "Sweep" (Fig. 8); alla geometria di partenza ovvero la volta piana viene associato il "Bounding Box" (Fig. 9); lo spessore viene definito lungo l'asse z da uno "Slider".

La superficie ottenuta viene connessa ad un "Surface Morph", che permette di trasformare i dati iniziali nella definizione finale ovvero una volta catenaria.

Questo metodo offre la possibilità di controllare anche geometrie molto complesse, come si verificherebbe nel caso di una volta stereotomica ad intradosso decorato.

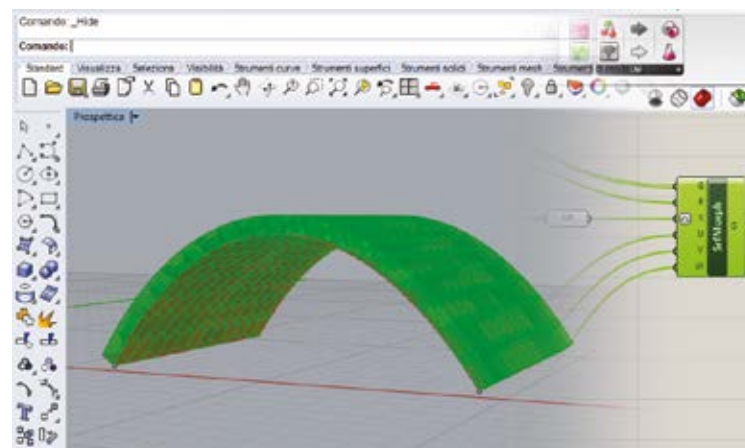


Fig. 9 Utilizzo del codice grasshopper per la generazione dei conci.

25

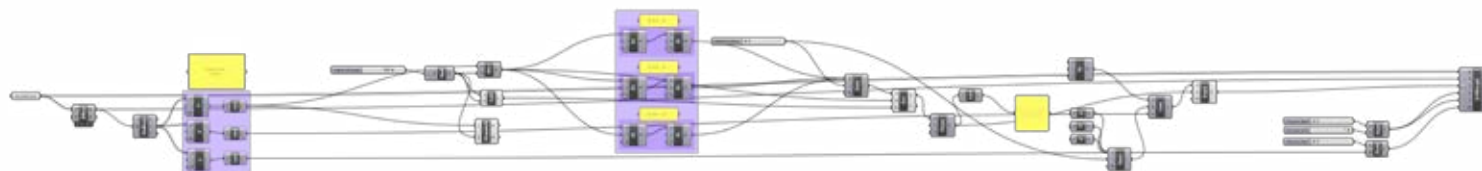
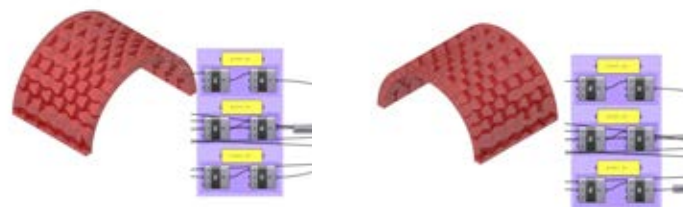
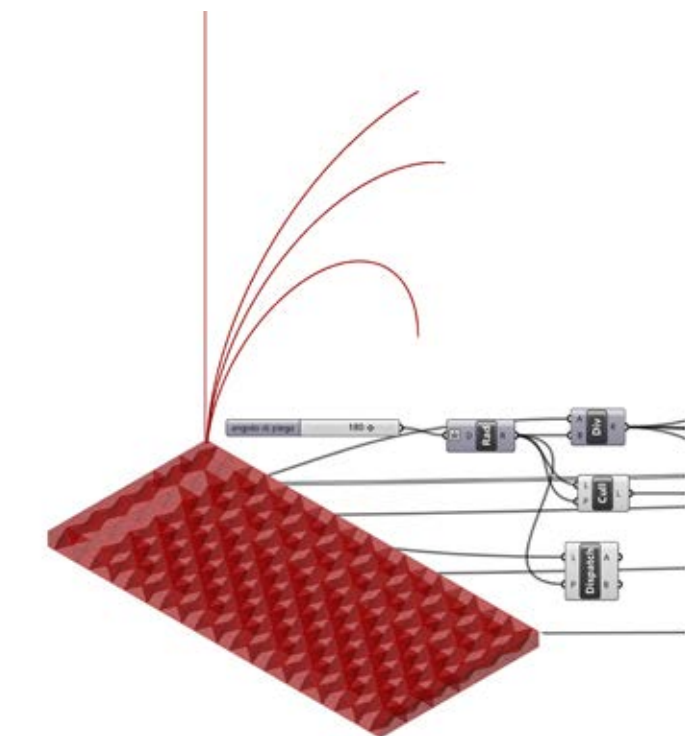


Fig. 10 Utilizzo del codice grasshopper per la deformazione di curve

[1] L'uso dell'elemento "parametro" all'interno del calcolo computazionale avviene durante gli anni '70, con il nascente metodo di descrivere delle curve attraverso equazioni parametriche, tramite il lavoro embrionale di Steve Coons (1967) riguardante lo studio di forme complesse e delle equazioni alla base della loro generazione. A riguardo una breve descrizione di Valerio Perna sulla storia della "progettazione parametrica"

"In campo architettonico il primo a parlare della possibilità di un approccio parametrico alla progettazione architettonica fu Gross (1990), il quale affermò le grandi potenzialità dei "parametri" nell'elaborazione di forme complesse applicabili ad edifici. Poco dopo, precisamente nel 1993, Serrano fu il primo a dare un'esplicita definizione alle implicazioni che si generavano in ambito progettuale dalle procedure "parametriche", portando a sostegno della sua tesi le sue idee per il completamento della "Sagrada Familia" di Gaudí mediante l'uso di modelli computerizzati basati sull'uso di superficie controllate digitalmente. Ma fu solamente dieci anni dopo che le possibilità della "progettazione architettonica parametrica" furono ampiamente documentate ed analizzate nell'ambito di una tesi di dottorato al MIT. Questo evento segnò una presa di coscienza riguardo le nuove possibilità riguardanti le forme, riconoscendo i "parametri" come le variabili alla base della modellazione di componenti strutturali. Inoltre, Dennis Shelden, capo del settore informatico nello studio di Gehry, nella sua tesi di dottorato (2002) al MIT, espose i processi di elaborazione utilizzati da lui per i suoi edifici, basati sulla progettazione parametrica" [...] "A partire da questi primi embrionali studi, l'"Architettura Parametrica" ha pian piano trovato la propria completa manifestazione nelle forme e nei processi generativi messi a punto dai maggiori architetti dell'ultima decade, i quali hanno concentrato i loro studi e le loro energie proprio su un sistema fondato su parametri e relazioni".

Tratto da <http://valerioperna.blogspot.it/>

[2] "Questa metodologia progettuale gestisce la complessità contemporanea del costruito operando attraverso sequenze logiche progressive. L'obiettivo è sia il pieno soddisfacimento delle richieste del cliente che il raggiungimento di un'identità professionale del progettista ampliando la propria specifica esperienza culturale, tecnologica e di costruibilità. La progettazione generativa costruisce il progetto come struttura operativa logica, attraverso codici di trasformazione dell'esistente verso un possibile che soddisfi la qualità cercata. Operativamente viene costruito un insieme strutturato di "modi progettuali" e di paradigmi di controllo che permettono il controllo in progress della complessità e la generazione di una molteplicità di scenari, di risultati possibili, ognuno differente ma tutti capaci di rappresentare un possibile esito della stessa idea. La produzione di scenari multipli consente, nella professione, di soddisfare le richieste, anche inesprese, del cliente senza operare modifiche progettuali ma chiedendo al cliente solo di scegliere."

Tratto da <http://www.generative.design.com/>

[3] "Lo scopo non è scoprire una forma, ma ricercare nuovi modi di progettare gli elementi architettonici attraverso soluzioni che offrano maggiore libertà nella creazione della forma. La progettazione inizia essenzialmente con la selezione di una singola linea di condotta. L'idea non è automatizzare la progettazione. Non si tratta di affidare la soluzione al modello a un software. Lo scopo è chiarire aspetti del processo che fin ora restavano indeterminati e che richiedevano notevoli varianti per comprenderne le complessità". http://issuu.com/chupa.group/docs/progettazione_generativa

[4] "L'algoritmo è un procedimento (indipendente dall'uso del computer) che consente di calcolare un risultato desiderato a partire da dati in input attraverso una sequenza finita e logica di istruzioni elementari."

Tratto da <http://www.arturotedeschi.com/>

[5] I moduli del software Grasshopper sono l'unità minima per la costruzione di codici. Ve ne sono di tre tipo: 1) parametri, associati a valori numerici ed entità geometriche; 2) componenti, che eseguono una azione specifica; 3) utilità, che eseguono particolari funzioni di raccolta e modifica rapida dei dati.

[6] "[...] Grasshopper, – plug-in di Rhinoceros (McNeel) – consiste nell'aver tradotto la sintassi della programmazione in un'interfaccia visuale, introducendo un'esperienza inedita di interazione con il software. Con Grasshopper, per la prima volta, il sistema dei legami parametrici che organizza le differenziazioni di un modello tridimensionale può essere configurato e manipolato esclusivamente attraverso un diagramma." [...] "Inoltre, come diretta conseguenza della logica associativa è possibile creare legami concettuali ed effettivi tra i diversi livelli di approfondimento progettuale. In altri termini, la modifica di un parametro a scala più ampia è in grado di generare una propagazione di modifiche tale da giungere alla congruente ridefinizione di dettagli a piccola scala: è possibile ipotizzare un link diretto tra i parametri relativi alla forma generale di una superficie complessa e le caratteristiche geometriche di un nodo strutturale, il tutto guidato da logiche di relazione definite dal designer all'interno della sequenza algoritmica. Razionalizzazione della forma, scomposizioni, sviluppo di superfici complesse in elementi piani, cessano di essere operazioni "a posteriori" ma vengono integrate nel medesimo processo di definizione formale".

Tratto da <http://www.arturotedeschi.com/>

[7] A riguardo si vedano i prototipi presentati nel capitolo "OsteoMorphing, Volte catenarie e colonne litiche precomprese a concii osteomorfi" (pag. 115), progettati attraverso un codice parametrico che permette non solo la progettazione della "volta catenaria" ma anche la possibilità di modificare il singolo concio.

"...gli architetti passano un'intera vita con questa strana idea di battersi contro la legge di gravità..."

Renzo Piano, *Lectio* tenuta nell'Aula Magna di Palazzo Bo all'Università di Padova. 15 Marzo 2014



ANALISI E PROGETTO DI STRUTTURE STEREOTOMICHE LAPIDEE

**Daniele Malomo*

** Dottore in Ingegneria Edile-Architettura*

L'architettura voltata rappresenta una risorsa culturale fondamentale che contraddistingue gli edifici dell'intera area mediterranea sin dall'antichità e costituisce l'emblema identitario dei popoli e delle civiltà che lo hanno abitato nel corso della storia. Le strutture presenti nel territorio italiano sono profondamente influenzate da questa architettura. L'architettura del territorio è pregna di esempi di questo sistema costruttivo con innumerevoli declinazioni tecniche ed artistiche peculiari. Oggigiorno la nuova interpretazione dell'architettura voltata in pietra si basa su una ricerca formale capace di integrarsi con le influenze estetiche proprie del nostro tempo, proiettandosi così in una nuova dimensione: tali aspetti sono in parte agevolati dal grande sviluppo tecnologico del settore lapideo relativo all'ottimizzazione dei processi e delle tecniche di taglio stereotomico, che aprono nuove soluzioni morfologiche; queste ultime scaturiscono in molti casi da suggestioni derivanti dall'influenza espressiva contemporanea che ha indotto l'uso del calcestruzzo armato (materia plasmabile che nell'ultimo mezzo secolo è stata oggetto di infinite declinazioni topologiche). Da un punto di vista nozionistico, l'analisi di strutture in calcestruzzo armato richiede delle competenze scientifiche integrabili a più livelli ed in molteplici modalità data l'enorme bibliografia a disposizione scaturita dal suo diffuso impiego; da un punto di vista meccanico potremmo dire che le semplificazioni a livello fisico e statico che caratterizzano lo studio delle strutture in conglomerato cementizio consentono al progettista un approccio agevolato al calcolo. Per convenzione accettiamo un comportamento elasto-plastico, consideriamo l'intero elemento come un continuo tridimensionale ed omogeneo, imponiamo che il conglomerato abbia resistenza a trazione nulla. Un'altra semplificazione importante basata sulla teoria dell'elasticità ed utile alla determinazione degli effetti delle sollecitazioni è quella di assumere, solo nell'ipotesi di sezioni trasversali non fessurate, diagramma lineare tensioni-deformazioni dei materiali, e inoltre considerando un valore del modulo elastico medio: un comportamento meccanico elastico-lineare. In effetti l'interpretazione teorica che consideriamo in queste analisi ben si sposa con i reali meccanismi statici di molte strutture in calcestruzzo armato e le disposizioni cautelative imposte dalle norme riducono ulteriormente il margine di errore. Tali speculazioni inducono la ricerca di una soluzione comune nel confronto tra il comportamento statico delle architetture lapidee e quelle a matrice cementizia, assumendo opportune condizioni al contorno e con l'ausilio di ipotesi generative. La formulazione di tali ipotesi ha come obiettivo la possibilità di intraprendere uno studio meccanico

agli elementi finiti (F.E.M. Finite Analysis Method,) che caratterizza le analisi dei continui geometrici (come le opere in calcestruzzo armato) anche per elementi intrinsecamente discreti (ovvero i sistemi voltati in conci). La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (mesh), composta da primitive (elementi finiti) di forma codificata a matrice triangolare o esaedrica. Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma (shape functions). Nella sua forma originaria e tuttora più diffusa, il metodo agli elementi finiti viene utilizzato per risolvere problemi poggianti su leggi costitutive di tipo lineare; questo rappresenta il nodo di convergenza tra lo studio dei due sistemi costruttivi. A tal proposito è importante definire alcuni aspetti salienti che caratterizzano il materiale lapideo e le sue declinazioni architettoniche:

- 1) La volta in pietra è una struttura discontinua;
- 2) In generale il rapporto tra spessore e dimensioni della superficie è maggiore di quello caratteristico di una struttura in calcestruzzo armato;
- 3) La pietra è un materiale dotato di un modulo elastico piuttosto elevato.

Questi dati, assunti come postulati di base, consentono di evidenziare i seguenti concetti: il primo punto potrebbe portare a escludere calcoli basati su modelli continui, tuttavia se si induce una sollecitazione sufficiente a eliminare completamente la presenza di trazioni nei giunti tra un concio e l'altro è lecito pensare all'intera volta come fosse un guscio continuo. Il secondo e il terzo aspetto comportano la presenza di una notevole rigidità flessionale.

Tali considerazioni, al fine di ottenere risultati più realistici, consentono di sostituire il modello di guscio membranale con un più ricco modello di guscio, in cui sia prevista anche la presenza di coppie flettenti. In questo caso l'induzione di una sollecitazione diviene ancora più importante perché è chiamata ad annullare sia le tensioni di trazione generate dalle risultanti membranali, sia quelle generate dalle coppie flettenti. Dunque si può procedere all'elaborazione delle ipotesi di calcolo e per ricercarle si è trovata una risposta soddisfacente con l'ausilio dello studio della disciplina stereotomica, che discerne e seleziona attraverso tre invarianti le architetture lapidee e propone: un primo invariante detto prefigurativo, o tecnico-geometrico, basato sulla definizione puntuale dell'elemento concio (tecnica proiettiva); un secondo invariante detto meccanico-costruttivo, basato sulla suddivisione dell'architettura in opportune parti (apparecchiatura)¹, ed un terzo

invariante, quello statico, che determina l'equilibrio statico del sistema strutturale. Le ipotesi elaborate declinano ed assorbono tali concetti: la prima rielabora i concetti propri della geometria proiettiva con l'ausilio delle nuove tecnologie, che consentono un'ottimizzazione multi-livello dell'elemento concio, che inizia con il disegno virtuale con metodi CAD/CAM² e finisce con il taglio meccanico a controllo numerico del materiale lapideo. Questo processo di ottimizzazione è trasversale interessando infatti tutto il processo di realizzazione dalla concezione formale dell'elemento discreto concio, fino al taglio reale dello stesso poiché le macchine robotizzate si basano proprio su questi modelli virtuali. Riducendo il margine di errore tra modello reale e virtuale si ottengono due risultati importanti: il primo consiste nella possibilità di migliorare il disegno del concio rendendolo attivo nel comportamento strutturale mediante il meccanismo di attrito che impedisce lo scorrimento relativo³, rendendo nulla (a livello puramente teorico) la componente dinamica e cinematica dello stato di interazione tra le parti; il secondo risultato è quello

dell'ottimizzazione della superficie di contatto, che consente la predisposizione di un'apparecchiatura a secco o con giunti attivi (ad esempio a profilo sinusoidale) che evita l'uso della malta che costituisce in molti casi di analisi strutturale un elemento di discontinuità meccanica importante⁴. A tal proposito è stata elaborata una dimostrazione, fig.2, che si basa sulla definizione di una funzione che segue le regole della meccanica e della reologia, che evidenzia questi dati e li riporta in un diagramma μ - Ω : al crescere dell'angolo Ω di inclinazione del giunto, cresce il parametro μ relativo al coefficiente d'attrito ovvero la componente che tende a minimizzare i cinatismi tra le parti. La seconda ipotesi si basa sull'introduzione di uno stato di post-sollecitazione sulla struttura, utile ad eliminare gli sforzi di trazione. Pur essendo le strutture voltate da sempre impiegate per le loro virtù statiche, poiché caratterizzate da una ottima risposta agli sforzi di compressione lungo la quasi totalità dello sviluppo nel piano di appartenenza, nella maggior parte dei casi la realtà è un'altra: ogni qualvolta ci si discosta dal profilo della catenaria,

29

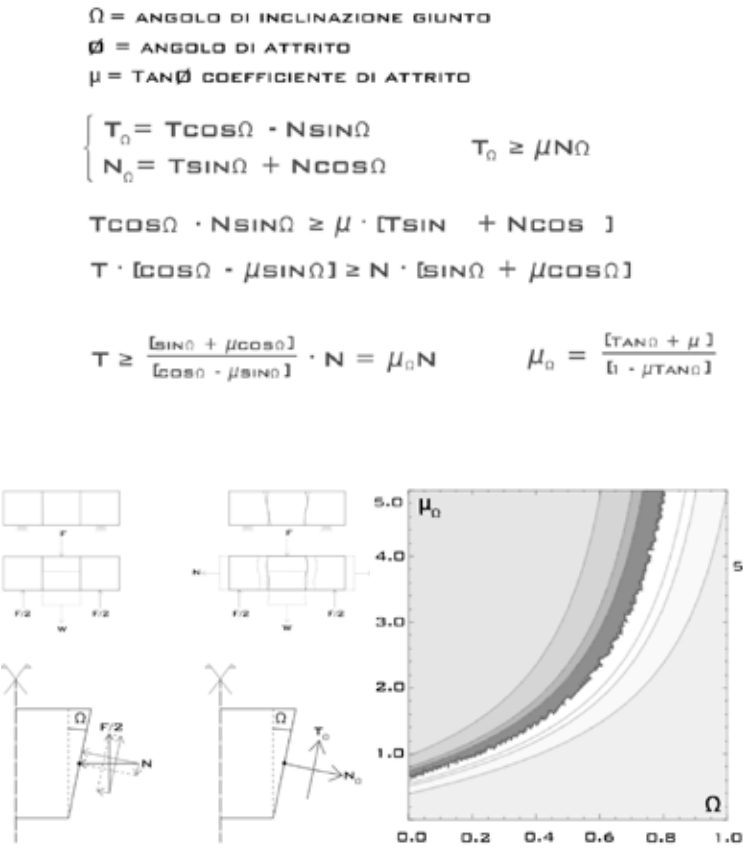


Fig. 2 Elaborazione della funzione reologica

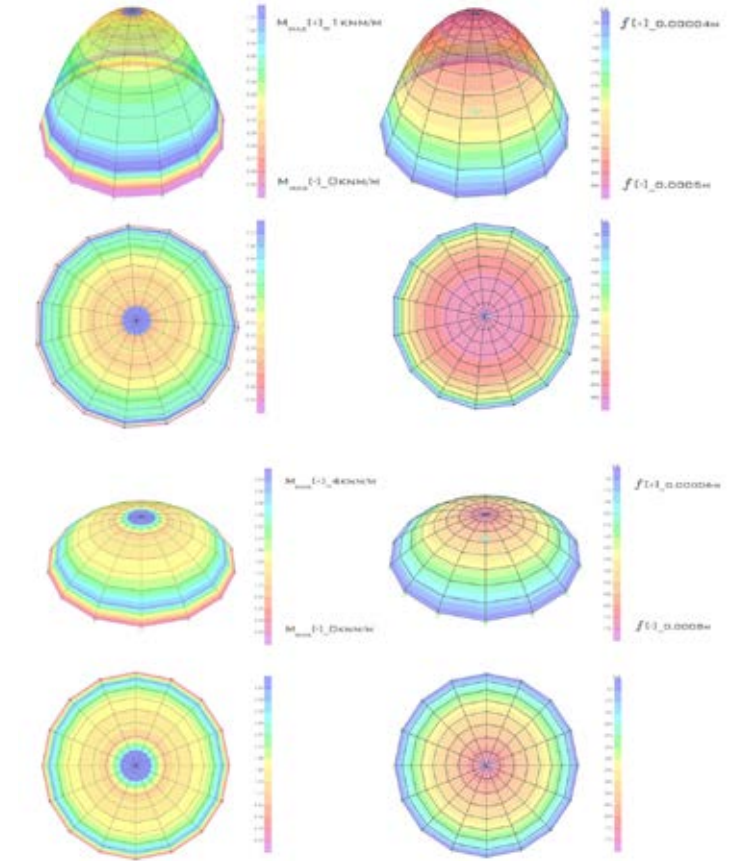


Fig. 3.1-3.2, Influenza del profilo rispetto a freccia di abbassamento e momenti nel piano

o fune inversa, che gode della proprietà di sforzi di "compressione uniforme" (S. Musmeci, Ponte sul Basento, «L'Industria Italiana del Cemento», 2, 1977, pp. 77-98), si sviluppano delle tensioni di trazioni che possono indurre il materiale ad un comportamento a cui risponde con una rottura fragile (o fessurazione)⁵.

Tale stati di sforzo vanificano le ipotesi di comportamento lineare e sussistono in quasi tutte le tipologie di archi e volte, naturalmente in misura diversa: in Figg. 3.1-3.2 è presente un confronto, puramente indicativo, tra freccia di abbassamento e momento massimo di interpolazione in kNm/m di una cupola a profilo parabolico ed uno a sesto ribassato aventi stesso raggio di base e stessi carichi: quest'ultima evidenzia una coppia/m circa quattro volte superiore, e sarebbe subito evidente, applicando l'equazione di Navier, che le tensioni di trazione all'imposta sarebbero altrettanto impari.

L'introduzione di armature in acciaio, in trefoli o barre, rappresenta un metodo efficace che consente anche di massimizzare l'effetto dell'attrito e di avvalorare quindi ancor di più la prima ipotesi.

Gli esempi di riferimenti in questo caso sono rappresentati

dall'opera di R. Piano per la chiesa di S. Giovanni Rotondo, e dalla struttura per l'expo di Siviglia del 1992 di P. Rice. La pietra armata ha attirato attenzione anche in tempi meno recenti, ad esempio con le sperimentazioni di V. Le Duc, ed offre la possibilità di realizzare strutture fino ad ora immaginate solo in calcestruzzo armato. I problemi tecnici derivanti dall'induzione di uno stato di post-sollecitazione sono i medesimi del cls, al netto della non facile determinazione delle perdite viscosi del materiale lapideo (comunque minime e dipendenti dal litotipo) che non forniscono dati sperimentali sufficienti per essere determinati in modo soddisfacente. La terza ipotesi si basa sull'introduzione nel modello di elementi tecnologici ausiliari, come i giunti in neoprene, le reti di rinforzo in fibra di basalto, o i tessuti strutturali in CFRP e GRFP. Questi metodi, solo recentemente usati nell'ambito di restauri e risanamenti di vario genere, trovano applicazione soprattutto a livello sperimentale, ma possono offrire grandi benefici: riguardo ai giunti in neoprene e polimerici consentono di mantenere costanti gli spessori tra i conci e rappresentano anche un valido



Fig. 4 Paraboloido iperbolico litico all'ingresso della sede SNBR, Troyes
Fig. 4.1 Foto dell'esterno della sede SNBR Troyes con travi di imposta della "vela" di ingresso (costruzione prevista fine 2015).

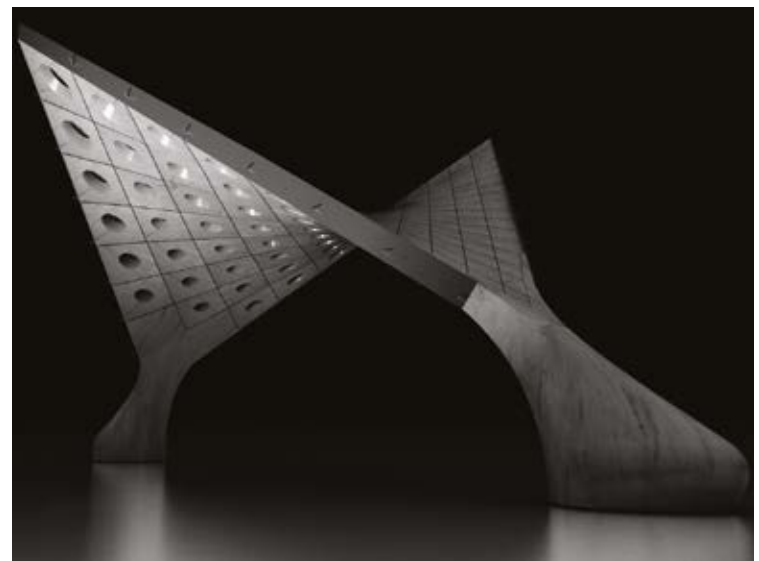
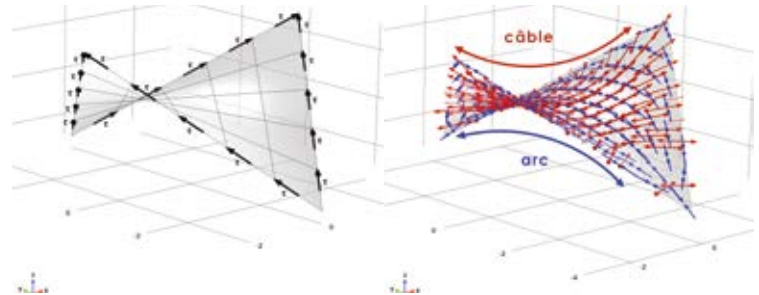


Fig. 4.2 - 4.4 Rappresentazione grafica dell'andamento delle forze mediante i vettori e render di VELITHIC

contribuito contro le azioni sismiche, immagazzinando energia di deformazione al posto del concio, mentre le fibre a base di carbonio o fibra di vetro/basalto permettono di esaltare le caratteristiche meccaniche della struttura rendendola resistente anche a flessione, con moduli elastici nell'ordine di Gpa.

Naturalmente l'uso dei tessuti fibrorinforzati deve essere estremamente ragionato, poiché intervenendo sulla distribuzione delle rigidità all'interno dell'organismo architettonico si innescano una serie di processi meccanici che soprattutto in caso di sisma possono risultare deleteri; è comunque indubbio che l'uso di questi dispositivi ausiliari concorrono unitamente a rafforzare l'ipotesi di mezzo continuo⁶. Alcuni esempi applicativi interessanti sono, rispettivamente, la sede della società SNBR Troyes (fig.4) e il progetto Archiflex del Politecnico di Bari, G. Fallacara. (fig.5)

I dati e le analisi precedentemente esposti, elaborati nell'ambito della tesi magistrale in Ingegneria Edile Architettura UE presso l'Università di Roma "La Sapienza", hanno trovato un riscontro anche pratico nel progetto strutturale del portale litico a paraboloide iperbolico per l'ingresso dell'edificio della società SNBR a Troyes (figg. 4.1, 4.4), sono quindi dimostrati da risultati concreti (seppur di carattere sperimentale), e sono alla base delle considerazioni meccaniche intraprese nello studio svolto dagli studenti del Corso di Progettazione degli Elementi Costruttivi in Pietra e del metodo.



Fig.5 Progetto ArchiFlex

31

Durante il seminario "Pietra Portante" tenuto dai Proff. Arch. G. Fallacara e V. Minenna e con la collaborazione del tutor D. Malomo, sono state elaborate dagli studenti dell'Università Sapienza di Roma, due schede che hanno l'obiettivo di fornire le basi per comprendere i procedimenti applicativi che sono conseguenti alle analisi teoriche proposte, rendendo immediatamente fruibile ed implementabile il lavoro di modellazione nelle specifiche ipotesi impostate, e rappresentano schematicamente i procedimenti tecnici ed informatici utilizzati anche negli approfondimenti degli studenti.

FASE PRELIMINARE

Per impostare la simulazione strutturale deve essere nota la geometria della volta, modellata con un software di Computer Aided Design, e deve essere costituito un modello tridimensionale continuo. La divisione in conci in questa fase è necessaria, poiché i solidi 3d sono funzionali all'individuazione degli elementi shell 2d riconoscibili dal solutore F.E.M. Nel nostro caso l'utilizzo di Autocad permette di creare superfici denominate "3d face", interpretate da SAP2000 come elementi shell. Questo processo può essere definito come un lavoro di "meshing", come rappresentato in Fig.A, dove si definiscono gli elementi finiti utili per l'analisi in campo elastico⁷.

FASE A-C

Le prime tre fasi in Fig.B, a seguito di quella preliminare consistono nell'importazione della mesh, sotto forma di file DXF o IGES file, nel programma di calcolo. Questo punto permette al codice di

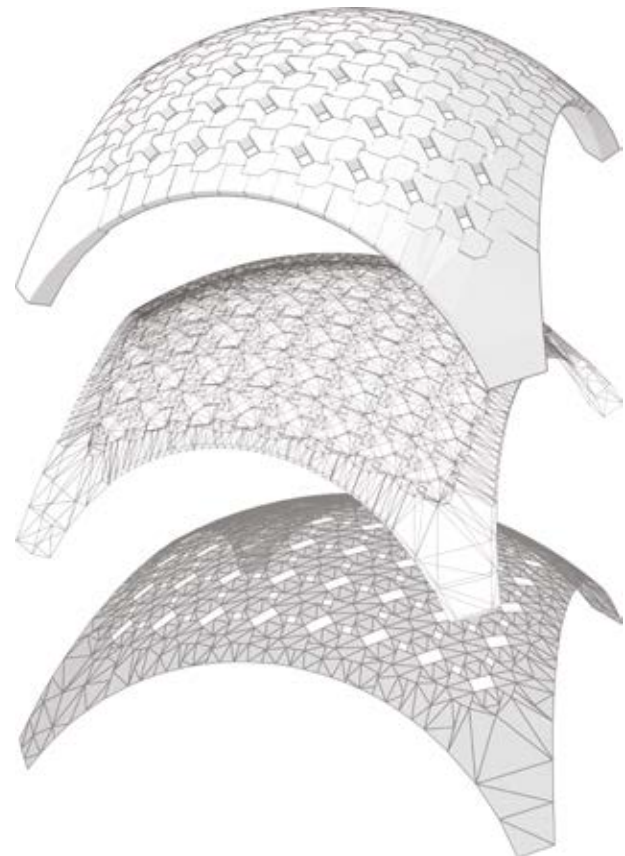


Fig.A _ Processo di meshing - dal CAD al solutore

impostare i vincoli di interfaccia dei singoli conci: di default verrà descritto un vincolo di continuità. Nei casi proposti la scelta del software coincide con le ipotesi elaborate.

FASE D-F

Successivamente si rende necessaria una verifica per quanto riguarda le proprietà spaziali e geometriche dei conci: il codice deve riconoscerli come entità fisiche separate, dotate di assi locali. In SAP2000 questo è possibile tramite il comando "mostra assi locali" nel menu "visualizza". Questa fase è propedeutica all'impostazione dello spessore della volta, e alla definizione del modello di calcolo da utilizzare: secondo le ipotesi proposte la superficie voltata è stata interpretata come una "shell thick". La teoria di riferimento in questi termini è quella della piastra di Mindlin-Reissner. Dopo aver verificato che lo spessore dei conci è quello corretto mediante la visualizzazione "extruded", è possibile costituire le basi dell'analisi numerica, esposta nel dettaglio a livello operativo nei lavori degli studenti.

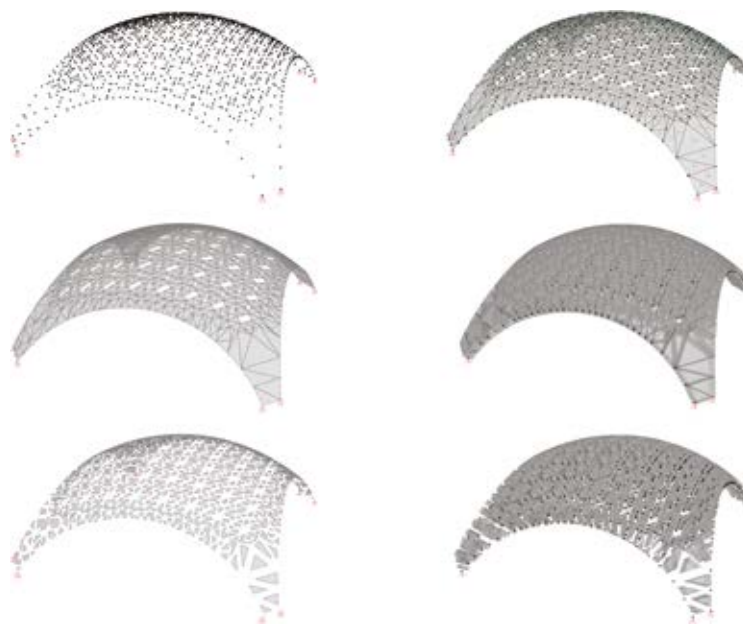
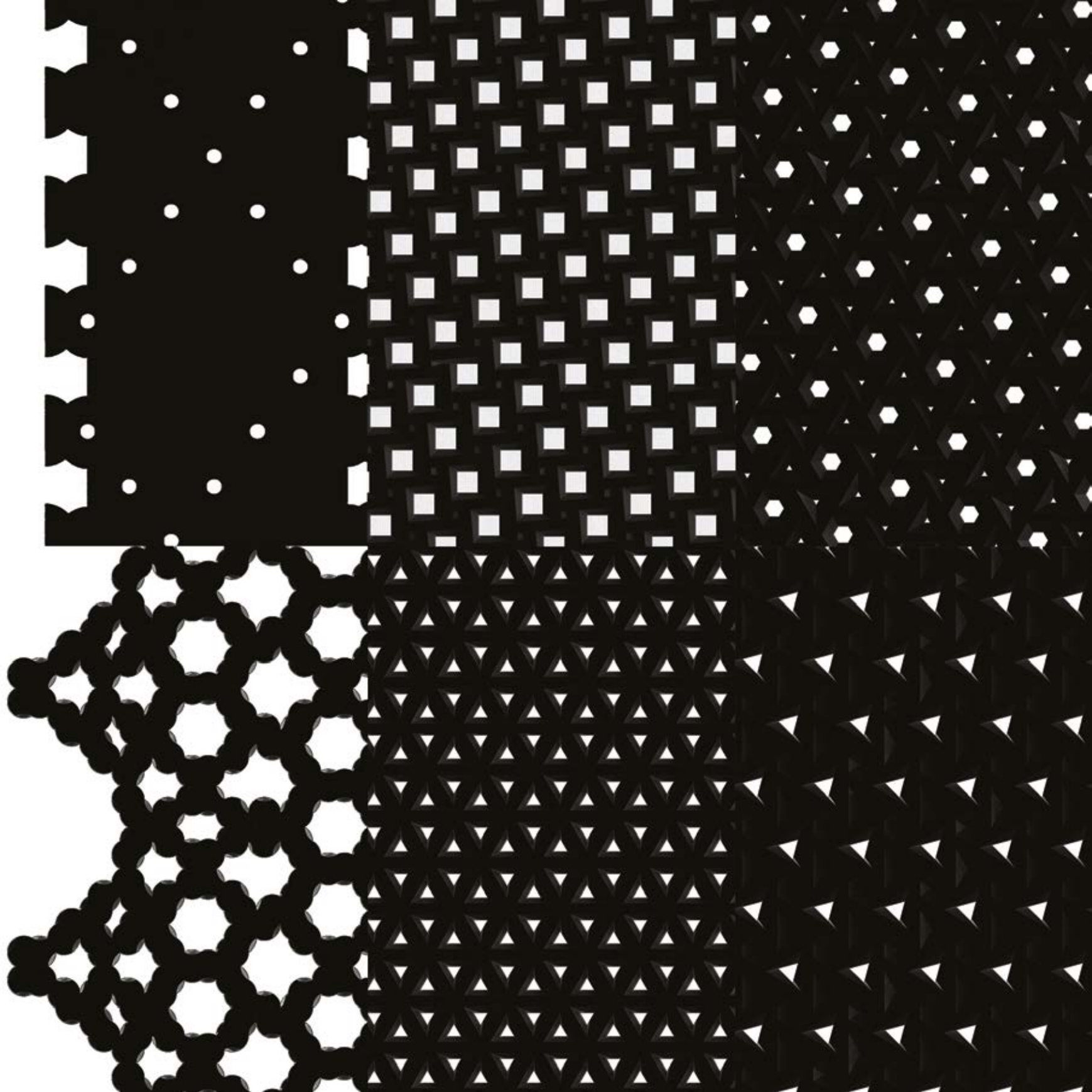


Fig.B _ Analisi FEM - Fasi delle elaborazioni del solutore

Bibliografia

- [1] Riguardo l'influenza dal punto di vista meccanico le principali ipotesi sono state elaborate secondo gli studi proposti da A. Romano e E. Grande "Masonry barrel vaults: influence of the pattern" 14th "World Conference on Earthquake Engineering" October 12-17, (2008). Beijing, China
- [2] L'interazione tra modellazione e studio strutturale delle architetture discrete segue l'approccio di Augenti N. and Romano A. Preliminary experimental results for advanced modelling of tuff masonry structures. (2007). ReLUIS
- [3] Gli studi di A. Giuffrè, proposti nelle Letture sulla meccanica delle murature storiche, (1998). Protagon Editori Toscani, evidenziano come l'efficacia dei meccanismi di attrito nelle opere murarie contribuisca in modo attivo anche alla resistenza rispetto le sollecitazioni orizzontali influenzando i cosiddetti "modi" cinematico-deformativi
- [4] Riguardo la "discontinuità strutturale" legata alle architetture in muratura le analisi condotte da Cattari S., Resemini S. and Lagomarsino S. Modelling of vaults as equivalent diaphragms in 3D seismic analysis of masonry buildings. (2008) Proceedings of Structural Analysis of Historic, mostrano come, attraverso la modellazione numerica a piastra equivalente, sia di rilevanza assoluta la presenza e la qualità della malta nel comportamento deformativo, pregiudicando fortemente i cinematismi rispetto alle azioni orizzontali.
- [5] Nella celebre opera The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture. (1997) Jacques Heyman, Cambridge, Inghilterra Pegon P, Anthoine A. Numerical strategies for solving continuum damage problems with softening: application to the homogenization of masonry. Computers and Structures 1997; 64(1-4):623-642. Jacques Heyman indaga le problematiche relative alle curve delle pressioni in strutture voltate ed archi proponendo un metodo grafico innovativo basato sulla scomposizione delle forze e sulla costituzione di cerniere plastiche. Le possibilità computazionali offerte del "Safe Theorem" sono state in questa sede recepite e poste a confronto con i moderni solutori agli elementi finiti.
- [6] La possibilità di studiare l'elemento voltato in muratura come mezzo continuo è solo una delle teorie proposte, valido solo in precise condizioni al contorno. In molti casi è necessario prevedere una modellazione ad elementi distinti (D.E.M. Discrete Element Method), soprattutto nelle analisi di tipo sismico; a questi e ad altri approfondimenti si rimanda agli studi di Lemos JV. Discrete element modeling of masonry structures. (2007) International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration; 1(2):190-213.
- [7] L'approccio di analisi in campo elastico per determinare l'effetto forma di una struttura voltata è efficacemente descritto da Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., (2006), TREMURI Program: Seismic Analysis Program for 3D Masonry Buildings, University of Genoa. Nel caso specifico in questo studio viene indagato il contributo in termini di rigidezza dei sistemi voltati al variare della morfologia.





Esperienze didattiche

Modulo "Pietra Portante" Roma

Nel corso di progettazione degli elementi architettonici A.A. 2014/15

Prof. Marco Ferrero

Modulo Pietra Portante/spazi Voltati Proff. G. Fallacara, V. Minenna

Tutor: Dott. Ing. Daniele Malomo

Collaboratori tutoraggio: Nicola Nastasi, Armando Pellecchia

Studenti:

Matteo Bianchi

Flavio Buzzelli

Vincenzo Caiani

Simone Colantonio

Erika D'ancona

Anna Maria De Lio

Martina Di Bona

Nino Di Nicola

Michele Di Donato

Adriano Massimo Fortuna

Susanna Giancristoforo

Pierluigi Giardino

Paola Ielapi

Costanza Livadiotti

Christopher Mento

Valeria Montemari

Emanuele Seno



NOTE SUL SEMINARIO “PIETRA PORTANTE” TENUTO DAI PROFF. G. FALLACARA E V. MINENNA NEL CORSO DI “PROG. DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI” DEL PROF. M. FERRERO

**Nicola Nastasi, **Armando Pellecchia*

** Dottore in Ingegneria Edile-Architettura, ** Laureando di Ingegneria Edile-Architettura*

1 - SEMINARIO PIETRA: FASI PROGETTUALI E OBIETTIVI

Nell'ambito del corso di “Progettazione degli elementi costruttivi” del Prof. M. Ferrero, corso opzionale appartenente all'offerta formativa del quinto anno del corso di laurea in Ingegneria Edile-Architettura, il seminario “Pietra Portante” rappresenta una possibilità per gli studenti di avvicinarsi alla progettazione lapidea. Il seguente seminario mira ad approfondire in ambito universitario le applicazioni di un materiale cercando di suscitare nello studente l'interesse nel concepire nuove soluzioni tecniche, partecipando attivamente al processo di “rinnovamento” del materiale lapideo attraverso l'analisi ingegneristica di tipo economico (con le dovute considerazioni dei costi di materiali e lavorazioni), statico (con analisi strutturali e valutazioni del comportamento del progetto), compositivo (cercando di realizzare una forma architettonica di qualità), tecnico (utilizzando al meglio tecniche e soluzioni costruttive adatte a ogni singolarità all'interno del progetto), nell'Anno Accademico 2014-2015. Il modulo è stato strutturato dai Proff. G. Fallacara e V. Minenna (DICAR/Politecnico di Bari) sulla base delle metodologie espresse nei capitoli precedenti del presente libro.

Per quanto riguarda l'aspetto legato alla didattica e alla formazione degli studenti, i tutor responsabili dello sviluppo del corso e gli scriventi coordinati da Daniele Malomo, hanno assicurato una presenza continua al lavoro svolto dagli studenti in gruppi di due o tre. Dunque il seminario “Pietra Portante” è stato suddiviso e organizzato nelle seguenti fasi:

- Accertamento delle conoscenze pregresse e propedeutiche per la determinazione degli obiettivi da raggiungere
- Definizione della struttura voltata
- Definizione dell'apparecchiatura (pattern)
- Verifica statica del progetto

- Nella fase iniziale del corso sono stati spiegati agli studenti i principi cardine del materiale lapideo, attraverso lezioni mirate sia sul materiale pietra e sia sulle nuove concezioni architettoniche legate ad esso.
- Gli studenti, suddivisi in gruppi di 2 o 3 elementi, hanno scelto di approfondire e studiare una particolare tipologia di superficie voltata comprendendone i pregi e i difetti.
- Nella definizione geometrica delle superfici voltate, si è pensato di caratterizzare tale superficie con un pattern con una matrice

ripetitiva, con determinate caratteristiche autoportanti e bloccanti in maniera da poter considerare l'ipotesi di incastri perfetti tra essi e quindi di superficie continua.

d) A seguito di una corretta progettazione geometrico-statica si è verificato lo stato sollecitativo della superficie voltata. Tale calcolo è stato realizzato attraverso l'utilizzo di un programma di calcolo SAP2000, un programma FEM (Finite Element Method), programma agli elementi finiti con cui è possibile studiare lo stato sollecitativo dell'intero progetto.

2. - INTERESSE E DIFFICOLTA' NELL'APPROCCIO AL MATERIALE LAPIDEO

Per quanto il materiale lapideo sia stato utilizzato largamente nelle architettura del passato, sono in realtà pochi gli utilizzi attuali di questo materiale. Il nuovo modo di fare architettura e la nuova concezione di tecniche costruttive innovative ha sicuramente dirottato l'attenzione dei progettisti moderni, che solitamente si trovano a studiare tale materiale nell'analisi di architetture storiche. Nella scuola di Ingegneria lo studio dei materiali da costruzione ha portato gli studenti ad approfondire spesso calcestruzzo armato, acciaio, legno e muratura ma raramente la pietra se non nell'ultimo anno di corso di studi. Questo iniziale

Fig. 1 - Foto della sede storica della Facoltà di Ingegneria dell'Università Sapienza di Roma.



disinteressamento della tematica ha fatto sì che nel ruolo di tutor ma anche di ingegneri nascesse la curiosità e l'esigenza di una maggiore conoscenza della pietra. L'approccio didattico parte sicuramente dall'analisi e conoscenza delle caratteristiche tradizionali del materiale, ma poi si protrae in una chiave tecnologica moderna. Tale recupero e riutilizzo del materiale pietra nell'ambito strutturale ha una notevole accelerazione alla fine degli anni 60, periodo in cui, utilizzando i principi della precompressione e del collaggio dei vari elementi con compositi di sintesi chimica, si incominciò a realizzare strutture miste pietra-acciaio. Principio che prende spunto dalle costruzioni in calcestruzzo armato in cui avviene una settorializzazione nell'ambito strutturale in base alla propensione dei due materiali a resistere agli sforzi di compressione (calcestruzzo – pietra) e agli sforzi di trazione (acciaio).

3 – COMPATIBILITA' DEI PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI RISPETTO AL MODELLO REALE

Dipendenti ormai dalle nuove tecnologie, ci siamo posti l'interrogativo di come poter studiare la fattibilità costruttiva e statica dei progetti realizzati dagli studenti. Nella progettazione strutturale odierna, risultano obsoleti l'utilizzo di metodi di calcolo manuali e soprattutto la normativa impone di considerare una vasta gamma di parametri che non possono prescindere dell'aiuto della macchina virtuale. Seppur nelle nostre ipotesi esemplificative si è pensato di assimilare il principio costruttivo della pietra-acciaio al quello del calcestruzzo armato, ovviamente non prima di aver fatto alcune necessarie considerazioni:

Deformazioni termiche: Se nel sistema costruttivo del calcestruzzo armato avevamo il mantenimento della congruenza cinematica anche nelle deformazioni dovute a variazioni di temperature, nella pietra e acciaio questo non avviene. L'acciaio infatti è un materiale conduttore, deformabile e duttile, mentre la pietra a causa della sua elevata inerzia termica modifica lentamente la sua temperatura. Per quanto riguarda le caratteristiche del materiale, la pietra è un materiale fragile, quindi giunge a rottura dopo una piccola deformazione.

Deformazioni temporali: Nella progettazione del calcestruzzo eravamo abituati a considerare fenomeni a breve e lungo termine come il ritiro e la viscosità, o come la perdita di capacità portante del calcestruzzo nel tempo. Nella pietra invece non si riscontrano fenomeni di questo genere, e tantomeno perdite di capacità portante evidenti come nel calcestruzzo.

Fenomeno di attrito: A causa delle caratteristiche di entrambi i materiali, le componenti di attrito tra le barre e la pietra (o calcestruzzo) determina una consistente perdita di tensione nell'acciaio e quindi una continua manutenzione dovuta alla tesatura dei cavi di acciaio.

Fenomeno dell'aderenza: Se nel calcestruzzo si poteva considerare l'ottima aderenza con le armature (causata anche da irregolarità

geometriche delle barre) grazie a cui tra i due materiali si creò un meccanismo resistente a flessione, nella pietra e acciaio non si può considerare l'aderenza poiché il passaggio dei ferri è dovuto alla sottrazione di materiale lapideo e non dall'indurimento di esso intorno alla barra.

Data la complessità dello studio del tema in esame, le approssimazioni da noi apportate sono il frutto di considerazioni e studi fatti sia dal punto di vista teorico, quindi sulla letteratura strutturale tradizionale, e sia dal punto di vista pratico, quindi attraverso nuovi studi e nuove sperimentazioni.

4 – MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE

Dopo una prima fase progettuale attraverso l'utilizzo dei mezzi tradizionali quali matita e foglio, si è passati alla fase della "digitalizzazione" del progetto, fase che permette di configurare l'idea progettuale in maniera più precisa e dettagliata, quindi creando un oggetto utile ad una migliore lettura critica.

Per la modellazione computerizzata gli studenti hanno potuto scegliere tra due differenti strade per metodologia ma equipollenti per qualità di risultato:

a) Modellazione con 3ds Max (vd. articolo di G. Fallacara a pag.23)

b) Modellazione con Rhinoceros e Grasshopper, plugin di Rhino (vd. articolo di V. Minenna a pag.35)

Nonostante la presenza di innumerevoli programmi di modellazione all'interno del panorama internazionale di software, abbiamo ritenuto di scegliere taluni programmi rispetto ad altri per due principali motivazioni:

1) I programmi utilizzati sono quelli statisticamente più utilizzati all'interno del percorso accademico nel corso di laurea di Ingegneria Edile Architettura e quindi già conosciuti dagli studenti.

2) La loro reperibilità con la licenza "Educational Version" è garantita attraverso i servizi integrati della Sapienza.

Dato l'utilizzo costante nell'arco di 5 anni di università del programma CAD Autocad, il processo di modellazione inizia proprio con questo software nel quale si è definito un concio tipo, che ripetuto in una determinata sequenza, riproducesse un pattern strutturale (apparecchiatura).

È stata dunque definita la geometria del pattern e scelta la superficie voltata. Il file dwg di Autocad è stato importato in 3ds Max o Rhino.

a) Modellazione con 3ds Max

Utilizzando i "Parametric Deformers" (comandi con cui si possono imporre varie deformazioni topologiche), abbiamo ottenuto una prima configurazione del progetto. Dopo una prima modellazione della superficie voltata, gli studenti hanno definito anche la parte basamentale con la presenza di spalle, dimensionate affinché non si creino problemi di portanza, snellezza e instabilità strutturale.



Verificata la parte progettuale-compositiva , si è discretizzata la superficie voltata in una mesh poligonale formata da triangoli, mesh che poi è stata importata nel programma di calcolo Sap2000 per un adeguato studio strutturale al netto delle considerazioni e approssimazioni spiegate in precedenza.

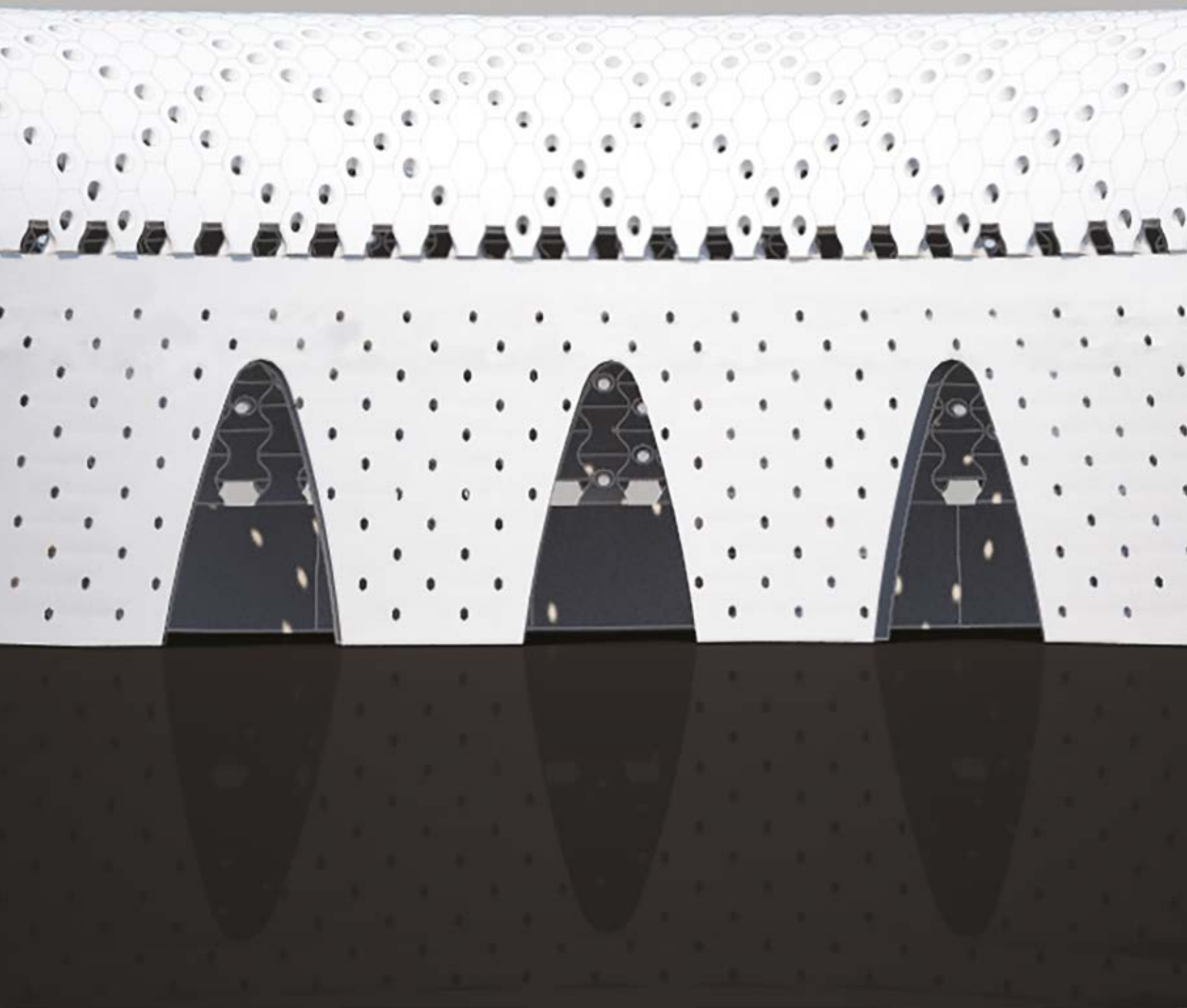
b) Modellazione con Rhinoceros e Grasshopper

La logica di base di Rhino differisce per alcune procedure da 3ds max. Se infatti in 3ds max, si creava una superficie piana con pattern da deformare in modo da renderla simile alla superficie voltata di riferimento , invece in Rhino si procede diversamente. Nello stesso file nel quale è presente il pattern precedentemente importato da Autocad, attraverso gli strumenti di modellazione necessari, si crea la superficie voltata scelta. Attraverso un plugin di Rhino, di nome Grasshopper, e l'utilizzo di codici di calcolo , si può creare un sistema definito in cui si assegna direttamente il pattern alla superficie voltata. Successivamente si è passato alla progettazione delle spalle (come già descritto nella punto precedente) e anche qui, si è creata una mesh poligonale formata da triangoli necessaria ad una analisi strutturale in SAP2000 come precedentemente spiegato nell'articolo di D. Malomo.

5 – BILANCI E CONCLUSIONI

Nonostante le difficoltà relative alla conoscenza del materiale lapideo (oggi in ombra rispetto i più convenienti materiali quali calcestruzzo e acciaio) e quelle legate all'approccio totalmente innovativo dell'utilizzo del materiale, gli studenti hanno mostrato inizialmente perplessità riguardo le proposte da noi offerte. In una seconda fase di studio del materiale e delle tecniche, hanno superato questo primo "ostacolo" generando una serie di proposte fattibili che nelle successive analisi hanno verificato.

Fig. 2-3 Foto del seminario di approfondimento sulla modellazione di strutture lapidee.



L'oggetto progettato è una volta a semi toro: un solido di rotazione, ottenuto attraverso lo sviluppo di una volta a botte, con profilo a tutto sesto, piegata, secondo la direzione dell'asse x, di 120 gradi. Le spalle, anch'esse curve, sono costituite da elementi a parallelepipedo che presentano articolazioni differenti sui due lati: quello con il raggio minore costituito da un'alternanza di archi con profilo a sesto acuto ed elementi murari forati ad oculo, quello con il maggiore da una parete continua. La differenza di trattamento è stata voluta affinché l'osservatore potesse aver visione dello spazio interno non soltanto nell'attraversamento, ma anche da una posizione esterna, che ne permetta una vista completa ed immediata. Tale dualità crea un contrasto pieno-vuoto, ad espressione del materiale utilizzato; il peso e la compattezza rappresentati dalla monoliticità, la modellabilità dall'accostamento delle parti, e l'ideale leggerezza dalla sottrazione.

Un'analisi dettagliata della geometria evidenzia il pregio di questo tipo forma in relazione al rapporto materia/resistenza, si constata che un utilizzo in quantità ridotte del materiale non compromette la resistenza della struttura.

La forma così generata è stata frutto dell'utilizzo di diversi programmi di progettazione; dapprima si è scelto di disegnare la pianta e il relativo sviluppo tridimensionale attraverso AutoCAD, per poter controllare i parametri dimensionali nella maniera più precisa possibile; si è operato tracciando sul piano xy le linee direttrici della botte, sviluppate per una lunghezza di 20 m, così da poter impostare lo sviluppo delle spalle; in seguito è stato disegnato il profilo dell'arco, con un diametro e un'altezza pari a 5,25 m, sullo stesso piano e ruotato secondo l'asse z per portarlo sul piano xz, da qui si è estruso, per una lunghezza pari alle direttrici, e si è creata la superficie della volta. Successivamente sono stati disegnati gli spessori delle spalle, rastremati, e quindi raffiguranti un trapezio, con base maggiore di 50 m e base minore di 45 m, ed estrusi anch'essi secondo le stesse direttrici. Create le superfici e i solidi, si è riportato il disegno in Rhinoceros per poter effettuare la curvatura, secondo i parametri descritti al punto 1. In tal modo si è

ottenuta la superficie descrittiva del solido.

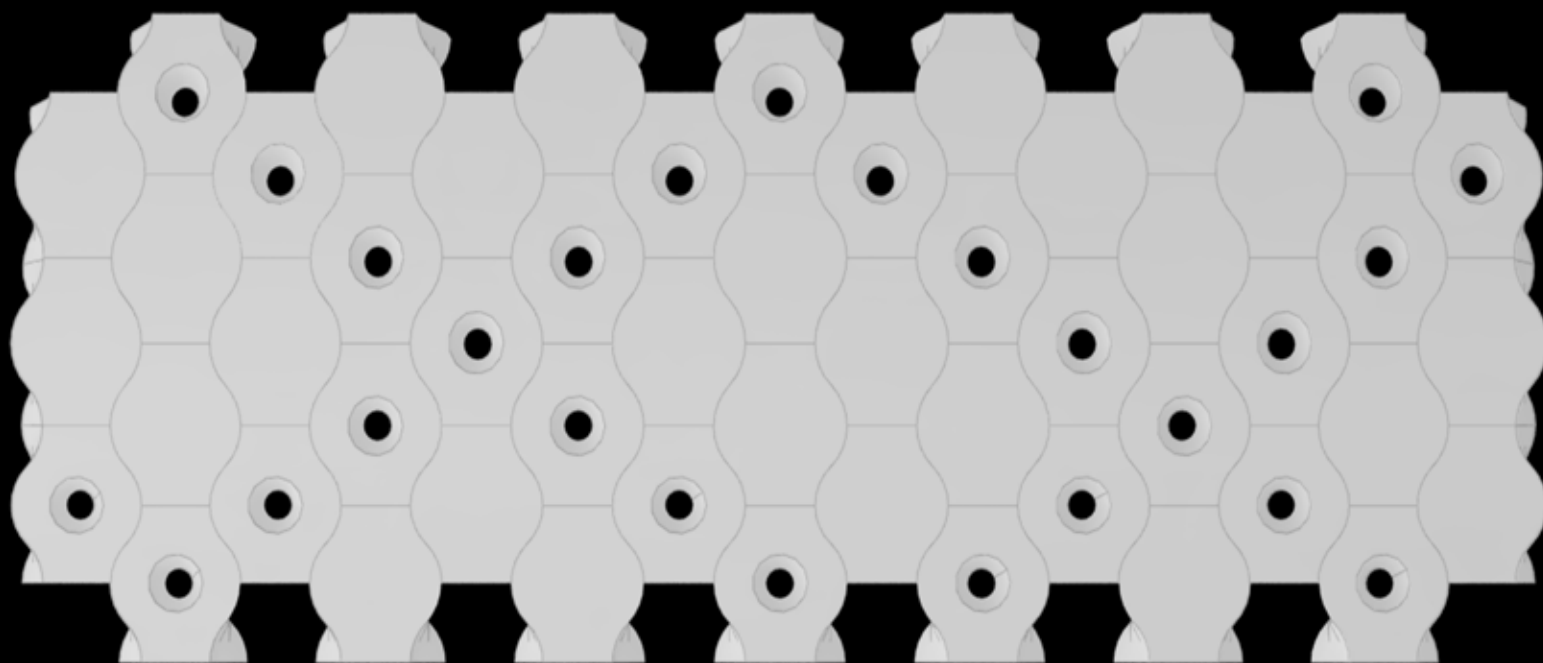
Per la progettazione del pattern le linee guida seguite sono state quelle della semplicità, della rappresentazione della fluidità, e della permeabilità alla luce, nel rispetto delle indicazioni dateci riguardo il taglio della pietra e i suoi limiti di impiego relazionato alle varie forme geometriche. Preso come riferimento il progetto elaborato dal Professor Yuri Estrin della Monash University, vi è stata una rielaborazione di tale concio; si è partiti dal plasmare un parallelepipedo, comprimendo i punti ai due terzi dell'estremo di ogni lato lungo, così da creare un rigonfiamento centrale, elemento di contatto tra le varie parti. In tale maniera si è ottenuta una deformazione che ha trasformato le linee rette dei lati in curve a doppia "s", facendo percepire l'idea del movimento. L'accostamento dei vari conci, ha creato una maglia sfalsata, sulla quale si è deciso di praticare delle aperture, ottenute intersecando due coni a base circolare, con la volontà di creare un'alternanza tra allargamento e restrizione, in modo tale che la luce subisse una riflessione controllata. L'effetto finale è quello dell'intreccio, visibile sia all'estradosso che all'intradosso.

Il programma scelto per l'applicazione del pattern è stato un plugin di Rhinoceros, Grasshopper; con tale strumento abbiamo potuto ottenere dalla superficie elaborata, un oggetto tridimensionale grazie alla trasposizione del disegno su questa. L'area che conteneva il pattern è stata piegata sulla forma precedentemente ottenuta, così da modellarsi in perfetta eguaglianza alla volta, e diventare lo sviluppo tridimensionale di questa; ne sono stati controllati i parametri dimensionali, mantenendo lo spessore su un valore di 0,20 m, e le distorsioni dei vari conci.

Il materiale scelto per la realizzazione del progetto è una pietra calcarea, detta Pietra di Apricena, nella varietà del Bronzetto; la finitura è realizzata mediante scalpellatura, una delle più antiche lavorazioni ad urto, eseguita a mano, seguendo metodologie tradizionali. Il colore di fondo predominante è di tono caldo, giallo-paglierino, passante talora al marrone chiaro; esso è ravvivato da bande serpeggianti, messe in evidenza da un'accentuazione dei toni della colorazione fondamentale.

La composizione chimico-mineralogica evidenzia la presenza delle seguenti componenti con relative percentuali: 98,1 % di CaCO_3 , 0,5% di MgCO_3 , 0,03% di Fe_2O_3 , ed 1% di altri ossidi (SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , P_2O_5 , SO_3); un residuo insolubile dell'0,3% (illite dominante, caolinite abbondante, montmorillonite scarsa); e come fase mineralogica presente, calcinite.

Le caratteristiche sedimentologiche-petrografiche evidenziano calcare intrapelbiosparitico, con intraclasti, pellets e bioclasti (foraminiferi, gasteropodi, lamellibranchi), e cemento sparitico. Dalle caratteristiche meccaniche, si evidenziano valori di resistenza a compressione ottimali, rispetto in particolare agli altri tipi di pietre calcaree, arrivando fino a 1.780 Kg/cm²; tra le una buona lavorabilità e durabilità.



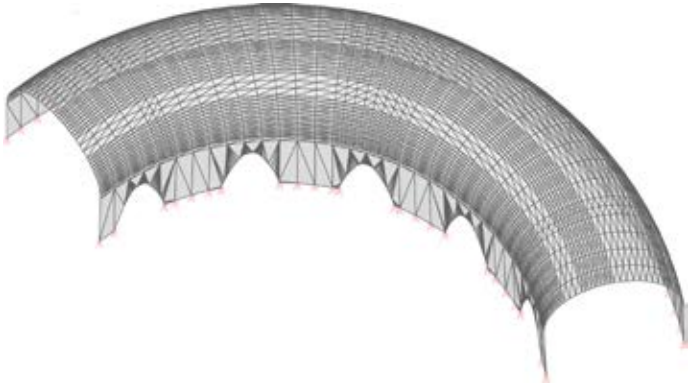
Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Apricena - Poggio Imperiale	Pietra di Apricena - Bronzetto di Apricena	2710	2670	35	438000	0.2	Beige tendente al bronzo

L'armatura scelta è costituita da funi in acciaio zincato ad 8 trefoli, con anima a trefoli paralleli; il cavo conta 303 fili, 8X25 FW, più anima metallica parallela crociata destra e crociata sinistra. Vengono posizionate all'estradosso della struttura: interne al concio per tre quarti della loro sezione totale ed esterne per il restante; il passo seguito è quello costituito dalle aperture ad arco lungo la parete interna; ne vengono posizionate una ad ogni base del piedritto, così da averne un numero pari a 10.

Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura minimo (KN)	Carico rottura massimo (Kg)
303 fili 8X25 FW - acciaio zincato ad 8 trefoli -anima a trefoli paralleli	2160	22.0	1.17	2.22	484.0	49360

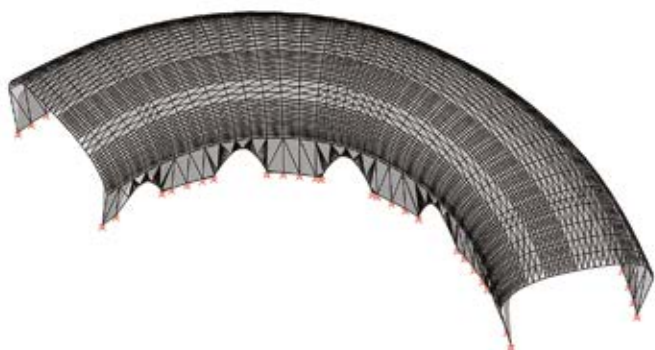
Il modello ottenuto è stato convertito nelle sue proprietà geometriche affinché se ne potesse studiare la risposta meccanica in condizioni di carico; l'analisi e la verifica sono state effettuate attraverso l'utilizzo di un programma di calcolo, SAP2000. La necessità di conversione delle caratteristiche geometriche dell'oggetto, da solido a mesh attraverso Rhinoceros, e da mesh a 3Dface mediante Autocad, è stata dovuta da un problema inerente la lettura della geometria da parte del programma di calcolo strutturale. Prima di analizzare le condizioni di carico e di risposta della struttura, è stato necessario porre dei vincoli esterni con il terreno, affinché fossero impediti gli spostamenti assoluti. Come tipo di vincolo è stato scelto la cerniera, le cui caratteristiche sono costituite da una grado di libertà pari ad uno, consistente nella possibilità di sola rotazione; sono state posizionate agli estremi della struttura e ai piedi di ogni piedritto degli archi. La struttura è stata modificata in Shell, attraverso i comandi Define >Area section, ovvero le proprietà dimensionali, in relazione allo spessore, sono state limitate entro una soglia di 0,2 m, affinché il comportamento assunto fosse quello di una piastra. In seguito è stata applicata una deformazione a taglio per poter studiare il comportamento flessionale, Bending, e quello membranale, Membrane.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

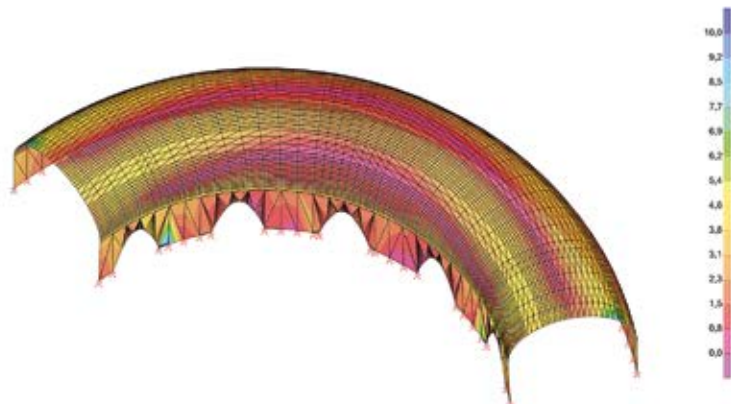


1. Mesh

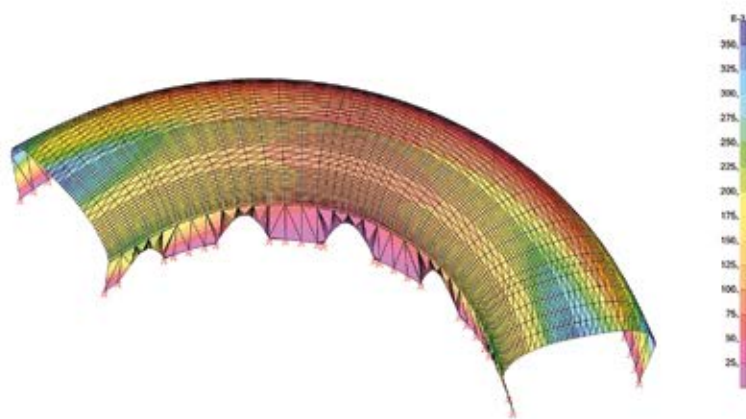
Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	31
Appoggio 2	37
Appoggio 3	43
Appoggio 4	56
Appoggio 5	31
Appoggio 6	37
Appoggio 7	43



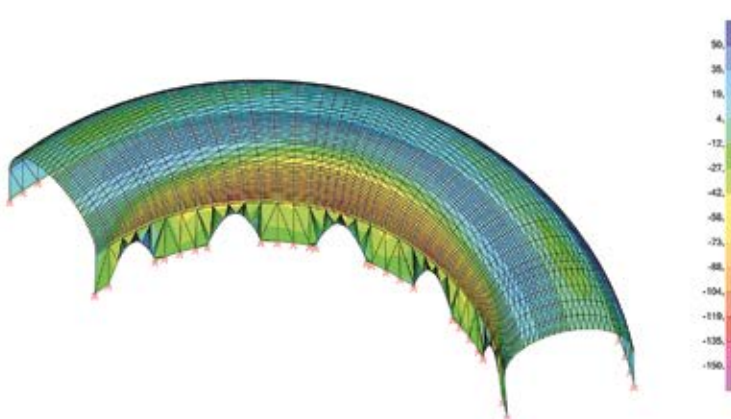
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



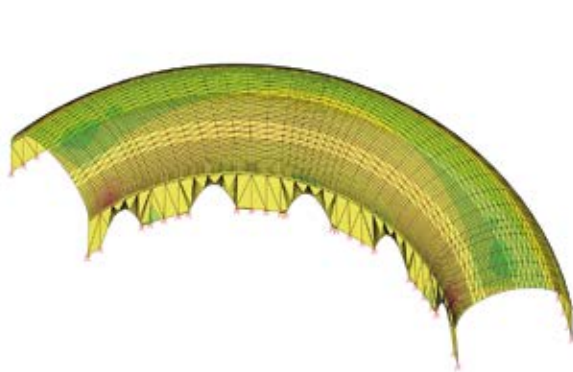
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



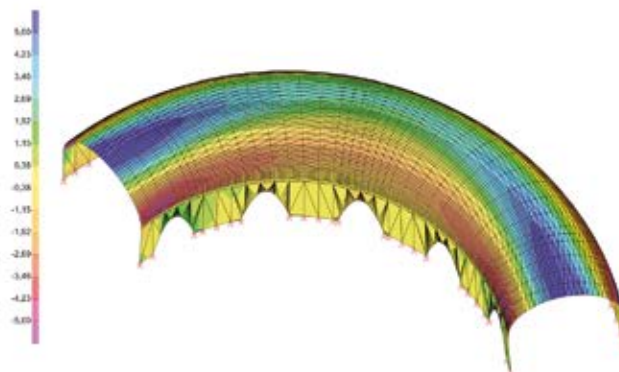
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN\m)



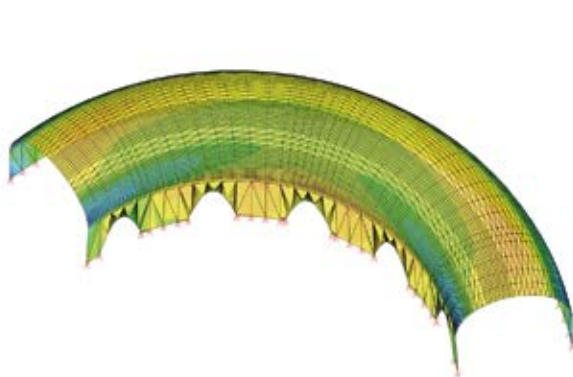
5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN\m)



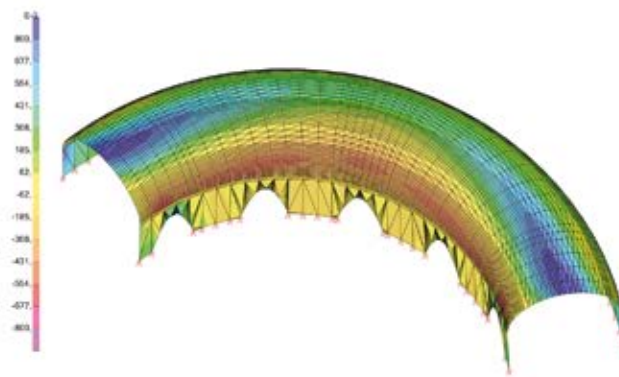
6. Momento flettente locale _ componente x (KNm/m)



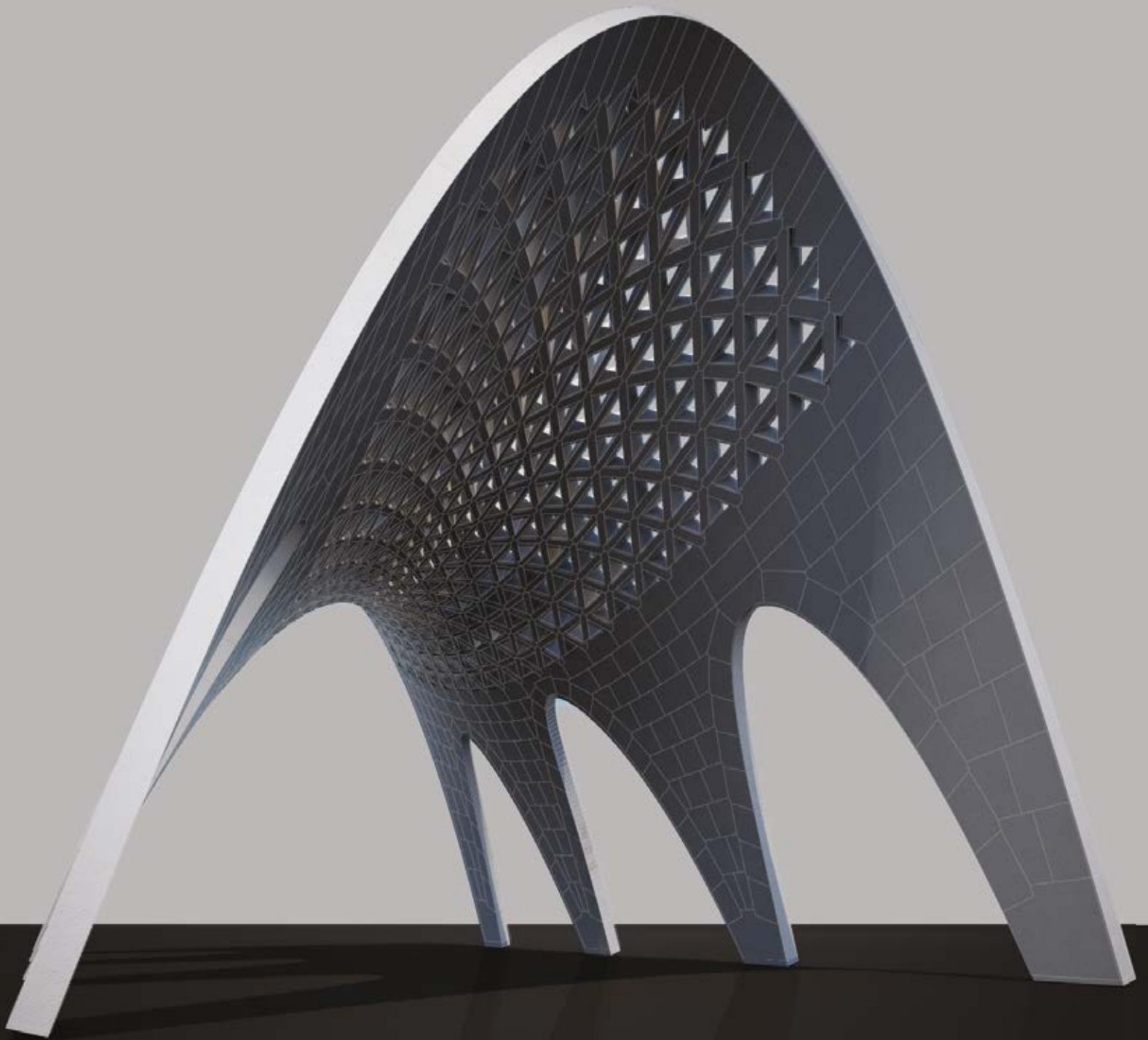
7. Momento flettente locale _ componente y (KNm/m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N/mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N/mm²)



Studenti
Anna Maria De Lio
Susanna Giancristoforo
Paola Ielapi

Lo studio delle caratteristiche meccaniche del materiale lapideo, unito allo sviluppo tecnologico e all'innovazione che hanno caratterizzato, in questi ultimi anni, il settore della pietra, ha aperto al progettista nuove possibilità legate all'uso di questo materiale. La precisione, ormai quasi matematica, dei processi di taglio ha abbassato il margine di errore tra modello reale e modello virtuale; la possibilità di inserire armature post-tese che collaborano con il materiale lapideo ha permesso di poter inserire quest'ultimo in un campo di utilizzo che fino ad ora apparteneva ai sistemi in cemento armato.

Il progetto proposto è quello di un padiglione che presenta la geometria di una sella. La forma è originata essenzialmente da una serie di archi parabolici replicati lungo una direttrice: due arconi (della stessa dimensione) agli estremi ed archi la cui altezza diminuisce degradando verso il centro, tutto ciò per conferire alla forma la sella centrale.

Dal punto di vista analitico-strutturale la geometria adottata presenta un aspetto di grande rilevanza: il paraboloide iperbolico è una superficie parametrica che, dunque, si presta facilmente all'analisi. Alcuni software (cui si accennerà successivamente) permettono di modellare questo tipo di superfici e di calcolarne il comportamento strutturale.

Il paraboloide iperbolico è una superficie molto nota e utilizzata in ambito strutturale per vari motivi: è una superficie a doppia curvatura, in particolare si tratta di una superficie anticlastica, cioè caratterizzata da una curvatura gaussiana negativa. Questo comporta che, sezionata con due piani mutuamente ortogonali, presenta una curvatura positiva (verso l'alto) e una negativa (verso il basso). Inoltre il paraboloide iperbolico è una delle più note superfici rigate: può essere generato, infatti, come luogo geometrico di due famiglie di rette chiamate generatrici. Questa caratteristica è particolarmente importante nel nostro caso perché permette una più facile suddivisione in moduli di pietra e, soprattutto, consente di realizzare la post-sollecitazione attraverso delle barre d'acciaio rettilinee, disposte lungo le generatrici. In ambito strutturale

il paraboloide iperbolico è stato variamente realizzato con strutture costituite da solette in calcestruzzo armato, classificato solitamente tra le cosiddette strutture resistenti per forma.

La volta in pietra è costituita da una serie di conci, opportunamente giustapposti, essa risulta dunque una struttura discontinua: è la precompressione introdotta sulla pietra attraverso l'armatura che permette di pensare all'intera struttura come una superficie continua.

Si è proceduto inizialmente alla definizione della forma di base, la sella, successivamente si è passati a studiare il pattern compositivo della volta. A tal proposito si è fatto riferimento alle opere dell'architetto spagnolo Felix Candela, grande utilizzatore del cemento armato per la creazione di ampi spazi e coperture sottili, che conferiscono una particolare leggerezza a costruzioni anche di notevoli dimensioni. Si è pensato di ottenere lo stesso risultato sostituendo al cemento la pietra, armando quest'ultima.

Le opere prese a riferimento sono la Capillia de Palmira (Cuernavaca, Messico) e Los Manantiales Restaurant (Xochimilco, Messico). I conci base del pattern sono tre: presentano ciascuno la forma volumetrica trapezoidale, poi arricchita e modellata più attentamente per dar luogo ad una trama interessante sia all'intradosso che all'estradosso della volta.

Da una parte la percezione è infatti quella di una serie di "y" accostate l'una all'altra; dall'altra parte invece si è dato risalto (creando dei "denti" su uno dei bordi di ciascun concio) ai vuoti triangolari, che risultano come incorniciati da altri triangoli risaltati sulla superficie di ogni concio.

Si è modellata la superficie continua della volta con il supporto del software "Rhinoceros", mentre la modellazione del pattern a conci è avvenuta su "Autocad". La superficie creata in "Rhinoceros" è stata "distesa" per riportarla ad una superficie piana, su quest'ultima si è proceduto a collocare sia i conci del pattern che quelli costituenti le spalle laterali della sella.

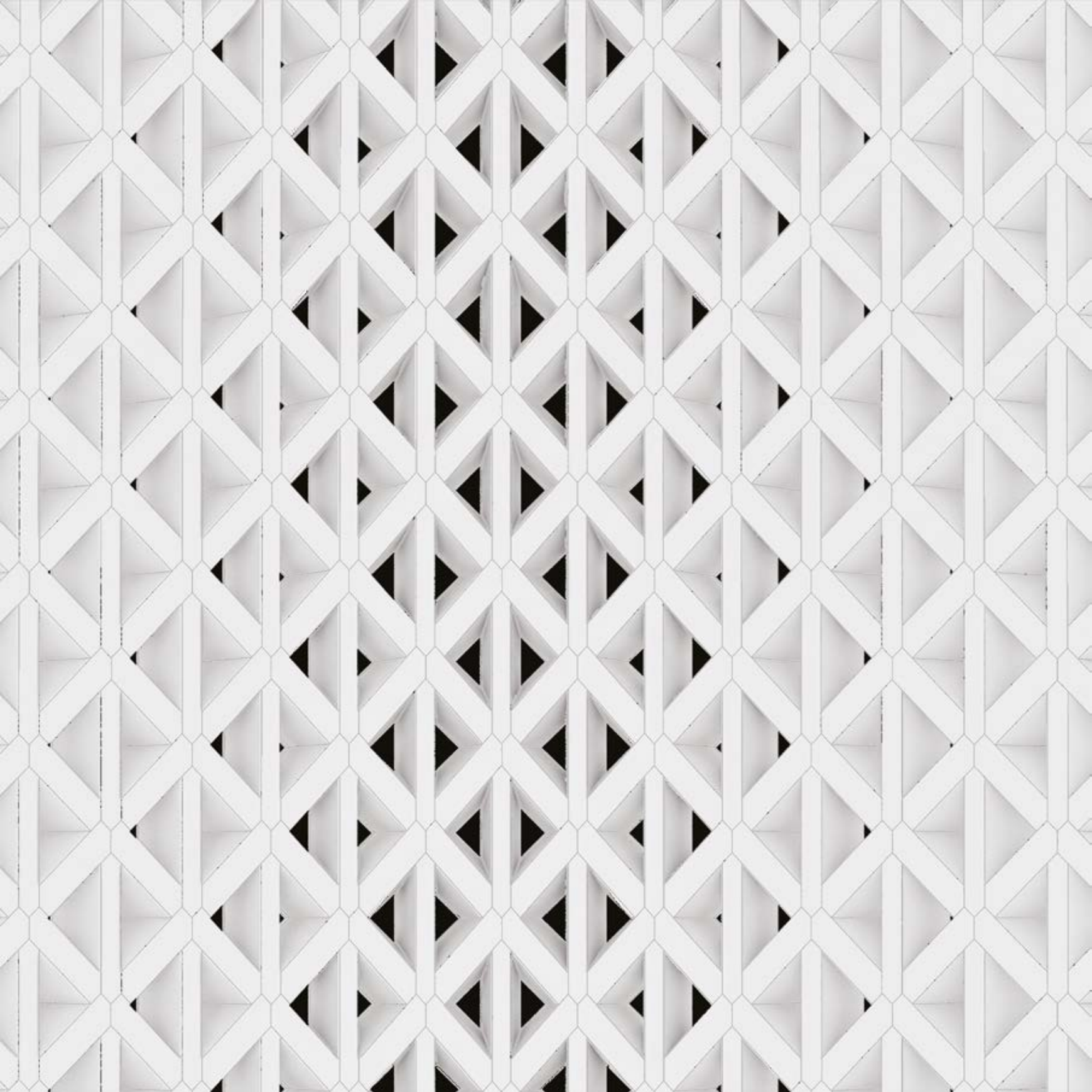
Una volta ottenuto il volumetrico in piano, con l'ausilio del plug-in "Grasshopper", si è modellato il volumetrico piano sulla volta 3D precedentemente generata in "Rhinoceros". Si è così arrivati alla volumetria finale del progetto.

Il materiale scelto è la pietra di Saint Maximin: un'arenaria di 40 milioni di anni di colore grigio-crema chiaro che si estrae nella Francia settentrionale presso Chantilly, tra il paese di Saint-Maximin e la riva sinistra dell'Oise 25 km a nord di Parigi, dove si trovano anche alcune antiche cave in galleria romane.

Napoleone III nel suo ambizioso piano di riordinamento cittadino incaricò il barone Georges Eugene Haussmann della razionalizzazione dei tracciati nel centro urbano.

Con la pietra di Saint Maximin si realizzò il 90 % di queste opere che danno alla capitale francese il suo stile uniforme e il suo colore elusivo dal bianco al giallo scuro.

Le Carrieres de La Plaine de Caen, Saint Pierre Aigle, comunicano i principali dati tecnici di una di queste varietà che ha una massa di solo 1750 Kg/m³, porosità al 35,4 % e resistenza alla compressione di 124 Kg/cm² sempre secondo quanto dichiarato dalla cava.



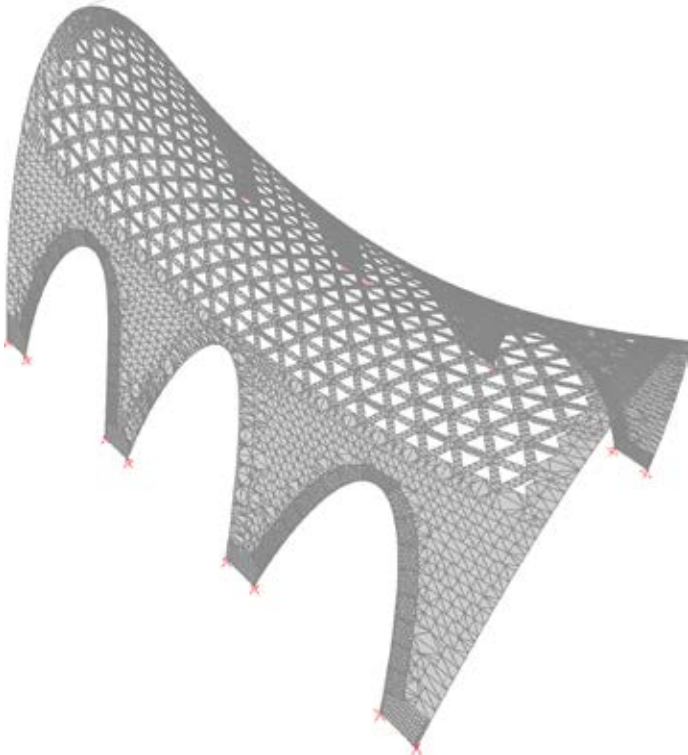
Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Cava Saint Maximin Liais - FR	Pietra calcarea di Saint Maximin Liais	2480	2550	40	642600	0.35	Grigio crema chiaro

La disposizione dell'armatura è stata prevista interna al concio, al fine di limitarne l'impatto visivo. Le caratteristiche tecniche dell'armatura sono di seguito riportate in tabella:

Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura minimo (KN)	Carico rottura massimo (Kg)
403 fili - 9x31 WSRP - anima metallica parallela - trefoli compattati - crociata destra - crociata sinistra	2160	36	1.73	6.080	1180.0	120400

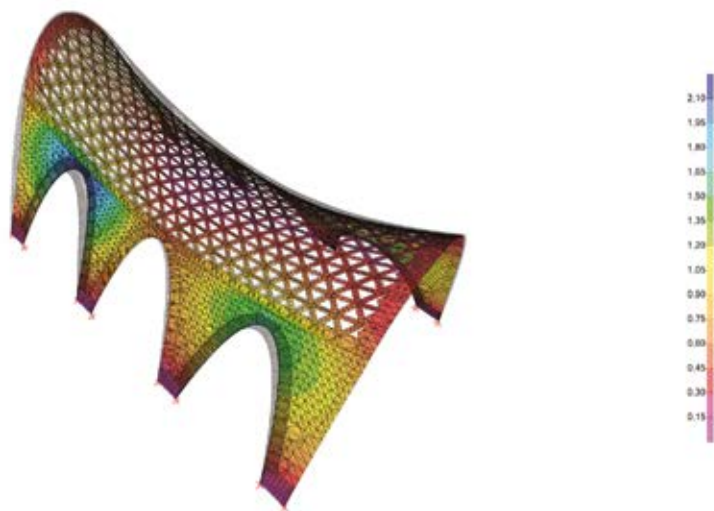
Al fine di poter analizzare la risposta della struttura alle sollecitazioni si è effettuata la suddivisione della volta in triangoli piani tramite una serie di passaggi eseguiti su "Rhinceros". Si è estratta la superficie all'estradosso dal modello 3d volumetrico, su quest'ultima si è creata la mesh da superficie ed infine si è effettuata la sua triangolazione. Il modello utilizzato per il calcolo è il guscio membranale, nel quale tutte le tensioni vivono nel piano tangente alla superficie. In maniera abbastanza semplificata si può assumere che un guscio abbia un comportamento membranale quando: lo spessore è molto sottile rispetto alle altre dimensioni in gioco, gli elementi di bordo assicurano la rigidità globale della superficie. Con riferimento alle osservazioni sopra esposte sono stati eseguiti dei calcoli preliminari con un modello realizzato in SAP2000 importando direttamente una geometria CAD e utilizzando l'elemento finito guscio che prevede l'accoppiamento di comportamento flessionale e membranale. Il modello così costituito per il calcolo presuppone la determinazione dei carichi agenti sulla struttura, sia orizzontali che verticali, essi possono essere suddivisi in due macro-gruppi: carichi permanenti (G) e carichi accidentali o variabili (Q). Le combinazioni di carico che è possibile ottenere e quindi analizzare in SAP2000, in linea con le prescrizioni delle Norme Tecniche Italiane (NTC2008), comprendono i termini del carico permanente strutturale (G1), del carico permanente non strutturale (G2) e dei carichi variabili di neve (q1) e vento (q2), opportunamente maggiorati mediante dei coefficienti correttivi Gamma. Nel modello di calcolo i punti di appoggio della sella sono stati vincolati con cerniere cilindriche, vincoli che eliminano tutti i gradi di libertà del nodo escluso uno, la componente rotazionale attorno all'asse x. Mediante il suddetto studio è possibile dunque ottenere il carico Fd [kN/m2] agente sulla struttura, le reazioni vincolari agli appoggi, le tensioni ed i momenti massimi generati, in modo da avere una completa analisi tecnico-strutturale e di risposta alle sollecitazioni della sella progettata.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

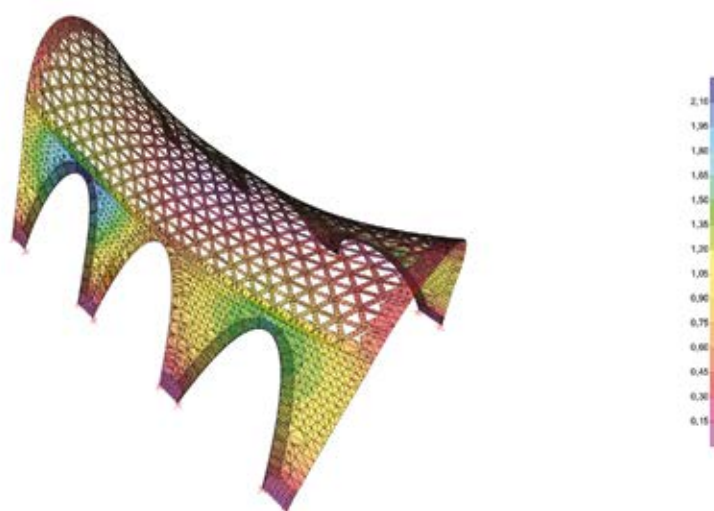


1. Mesh

Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	116
Appoggio 2	137
Appoggio 3	137
Appoggio 4	116



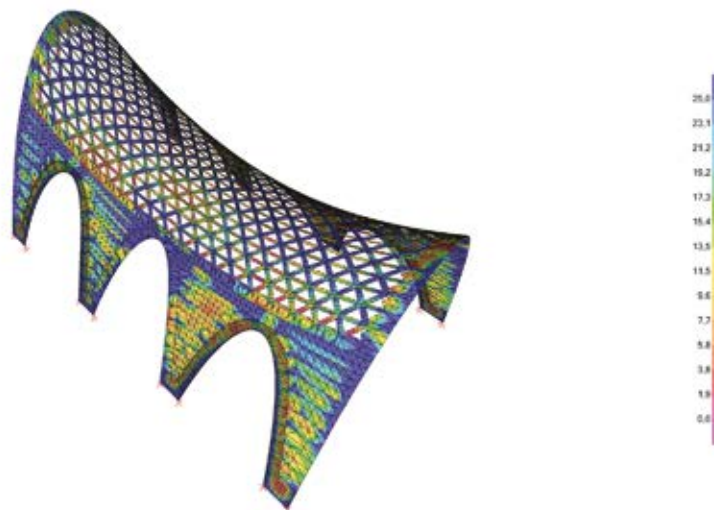
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



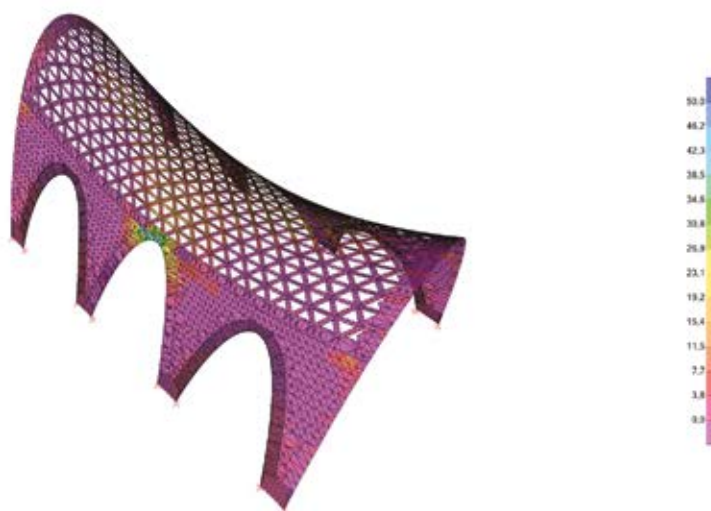
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN/m)



5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN/m)



6. Momento flettente locale _ componente x (KNm/m)



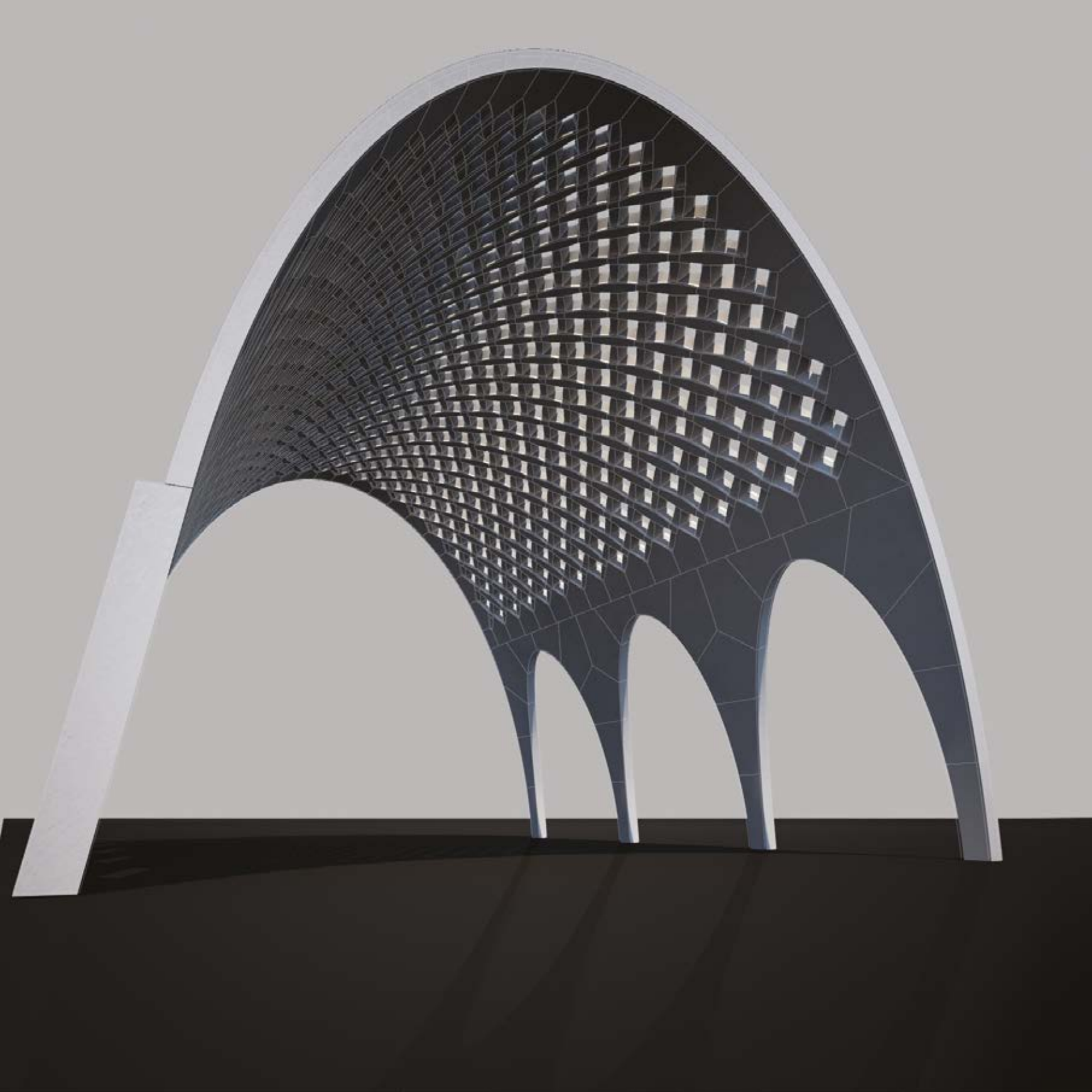
7. Momento flettente locale _ componente y (KNm/m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N/mm²)

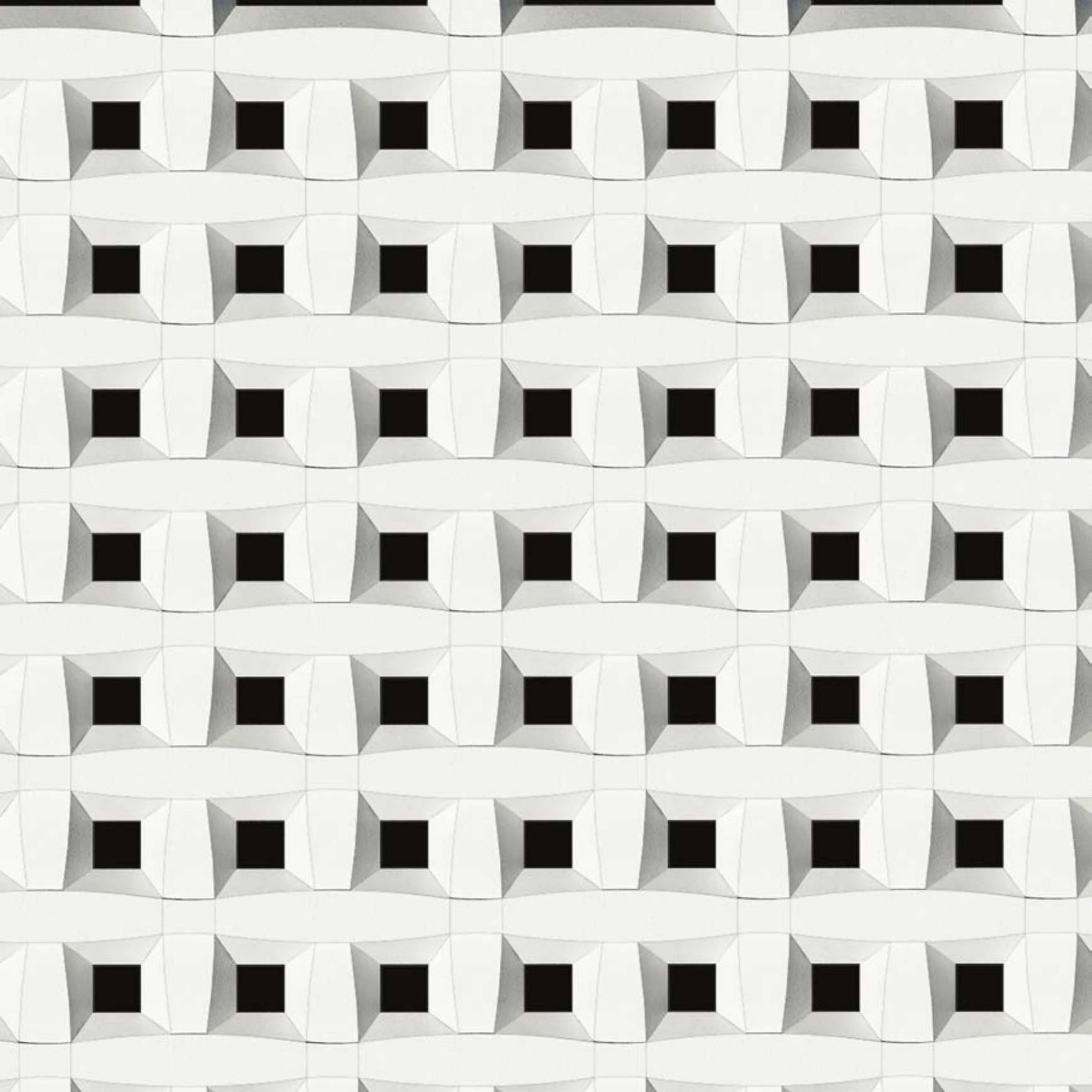


9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N/mm²)



La figura geometrica di riferimento utilizzata nel progetto è un'ellisse, una curva che si ottiene tagliando un cono circolare retto od obliquo con un piano non parallelo ad alcuna generatrice; detta anche conica a centro, in quanto possiede un centro di simmetria nel quale si intersecano due assi di simmetria di diversa lunghezza (asse maggiore e asse minore), l'ellisse è il luogo dei punti in cui è costante la somma delle distanze da due punti detti fuochi, giacenti sull'asse maggiore ed equidistanti dal centro. Essendo l'ellisse una figura nota, possiamo descrivere la curva analiticamente come superficie parametrica, calcolando tramite alcuni software le grandezze che ne caratterizzano il comportamento statico strutturale. Negli anni la figura dell'ellisse ha sempre fornito numerosi spunti di particolare rilevanza nell'architettura, soprattutto italiana; nella storia, infatti, è stata più volte ripresa come distribuzione planimetrica o come schema in alzato. Avendo preso di riferimento la figura ellittica e volendo progettare uno spazio voltato, si è pensato di utilizzare solo una porzione della conica originaria, tranciando dunque la figura iniziale secondo la direzione dell'asse minore, ottenendo così una semiellisse. Nelle opere più recenti, infatti, si è riscontrata una maggiore duttilità, rispetto a quella semicircolare, della forma semiellittica per gli archi e le volte, che consente di avere grandi luci senza alzare eccessivamente la chiave di volta. Ispirandoci quindi alle forme del periodo Gotico e Neogotico, si è scelto di privilegiare la direzione verticale per dare all'opera una forma più slanciata. L'ideazione del pattern deriva da un'analisi storica sulle coperture cassettonate che hanno caratterizzato il nostro territorio e che continuano ad essere un'importante fonte di ispirazione per le nuove architetture. Tra gli esempi, la copertura del Pantheon, la Basilica di Massenzio, le cupole rinascimentali e barocche per arrivare infine alla lettura in chiave moderna delle opere in calcestruzzo precompresso di Pier Luigi Nervi al quale ci si è ispirati nel trattamento delle nervature della volta. La modellazione del pattern è stata dunque finalizzata alla creazione di nervature inclinate di 45° che evidenziassero una tessitura a maglia quadrata. Per la creazione del concio si è

partiti dalla sovrapposizione in pianta di due figure rettangolari di differenti dimensioni (60x30cm e 70x10cm) fino a creare, attraverso la modellazione tridimensionale, un prisma dello spessore di 10cm con superfici non perpendicolari tra loro che agevolasse l'accostamento in serie dei vari elementi. Al fine di migliorare ulteriormente l'aderenza tra i singoli conci gli spigoli della faccia superiore sono descritti da porzioni di ellisse; in questo modo ad una superficie concava corrisponde sempre una superficie convessa. Le nervature così ottenute presenteranno un andamento sinuoso che caratterizza la trama dell'intradosso della volta. Per rafforzare visivamente il concetto delle nervature si è scelto di trattare in maniera differente una delle due direzioni, dandole maggior rilievo aumentandone lo spessore di 3cm; questo ha creato, in aggiunta all'alternanza di pieni e vuoti, un gioco di ombre tra le diverse direzioni. All'estradosso invece si è scelto di definire una geometria più omogenea estrudendo le facce dei singoli conci con una stessa figura prismatica a base triangolare spessa 5cm, per dare, seppur in modo diverso rispetto all'intradosso, tridimensionalità alla trama. Data la geometria del pattern è stato necessario inserire dei conci speciali che presentassero una conformazione tale da adattarsi da un lato agli elementi già presenti e dall'altro definire in maniera lineare i lati e gli angoli della volta; lo stesso trattamento è stato applicato ai conci in prossimità delle aperture del lato lungo. Infine la spalletta che sostiene l'arco zoppo è stata forata riprendendo la trama della volta, rafforzando il concetto della figura quadrata, ma presenta uno spessore raddoppiato (36cm), data la sua funzione di sostegno. Il file è stato importato sul programma di modellazione tridimensionale Rhinoceros. Per creare una superficie curva in modo parametrico è stato utilizzato il plug-in Grasshopper attraverso la creazione di un codice che identificasse gli input iniziali delle curve generatrice (arco semiellittico) e direttrice (lunghezza della volta). Avendo, a questo punto, una superficie che seguisse la curva ipotizzata inizialmente è stata applicata la geometria dei conci importati da AutoCAD ai quali è stato dato lo spessore da progetto. In ultimo, alla volta così ottenuta, è stata collegata la spalletta in CLS che invece non presenta deformazioni essendo perpendicolare al piano orizzontale avendo la sostanziale funzione di assorbire le tensioni della volta. Il materiale scelto per il progetto è il Travertino Romano, una roccia sedimentaria calcarea di tipo chimico, molto utilizzata in edilizia in particolar modo a Roma; in Italia, infatti, i principali giacimenti sono situati nel Lazio (Tivoli e Guidonia quelle commercialmente più attive). La scelta del travertino è data, senza dubbio, dalla vicina posizione geografica dei siti d'estrazione, ma soprattutto il suo utilizzo vuole rievocare quella storia architettonica, sia antica che moderna, caratterizzante la città di Roma.



Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Tivoli	Travertino romano	2565	2491	35	635000	0,22	Beige

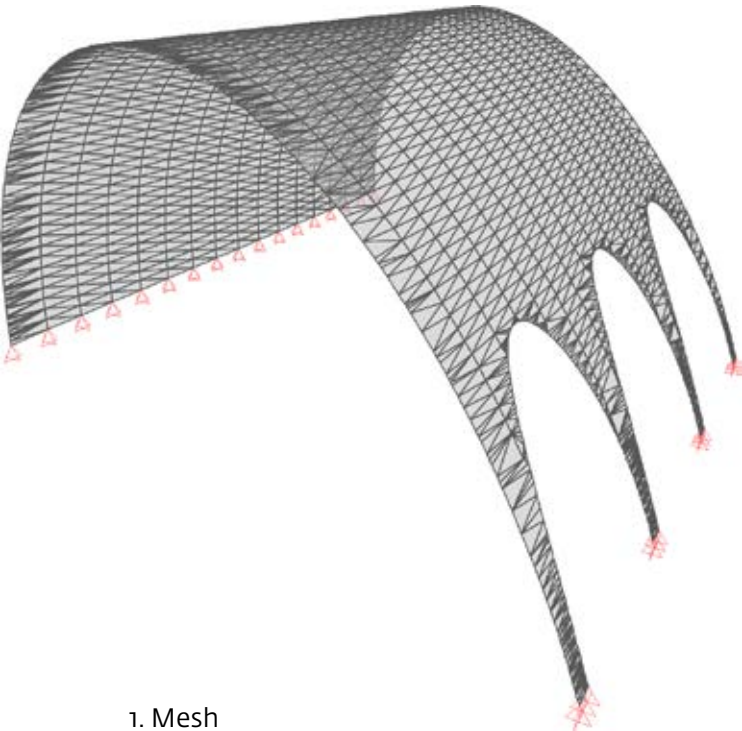
Per mantenere l'equilibrio della struttura in uno stato di concrezione, è stato impiegato un sistema di armatura in cavi d'acciaio post-tesi inseriti all'interno dei conci (dovuta alla geometria del concio stesso). La volta risulta quindi attraversata, seguendo la curvatura della sezione ellittica, da funi di acciaio a 8 trefoli e 399 fili (8WIS zincata) di Ø 32mm che permettono un carico a rottura molto elevato (1009 KN). Questi cavi, nel momento in cui la volta viene tirata su completamente, vengono tesi nelle loro estremità in modo da comprimere l'intera struttura apportando ad essa ulteriore rigidità e staticità.

Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura minimo (KN)	Carico rottura massimo (Kg)
8 trefoli e 399 fili (8WIS zincata)	2160	32	1.73	6.080	1180.0	120400

Dovendo effettuare un'analisi strutturale non discreta, bensì dell'intera volta utilizzando il software di calcolo degli elementi finiti SAP2000, si è resa necessaria la creazione di una superficie reticolare che fosse suddivisa in forme triangolari. Per ottenere questo risultato la volta, costituita dai singoli conci, è stata considerata come un unico solido piano. Questo solido è stato importato in Rhinoceros ed esploso nelle singole facce, in modo da ottenere un'immagine proiettata della volta su un piano che fosse una superficie unica e poi suddivisa in rettangolari, considerando una grandezza approssimata a quella dei conci. Reiterando il procedimento descritto prima con Grasshopper la superficie è stata modellata secondo gli imput generatori della volta, per poi essere trasformata in una mesh successivamente triangolata. La mesh, importata in AutoCAD, è stata esplosa in modo tale da ottenere delle facce triangolari, unico modello supportato da SAP2000 per l'analisi strutturale.

La superficie composta dalle facce 3d è stata quindi importata in SAP2000 in formato DXF. I punti di contatto con la spalletta in CLS e con il terreno sono stati considerati come delle cerniere, con le relative caratteristiche di vincolo. La scelta del vincolo di cerniera dipende dal fatto che la struttura lapidea portata a post compressione con strumenti di rinforzo, necessita di una libertà di rotazione per poter assimilare le piccole variazioni termiche e strutturali, mantenendo comunque nulli gli spostamenti assoluti. Alla superficie SHELL così vincolata è stato dato quindi uno spessore THICK di 20 cm, relativo all'altezza dei conci, per permettere una più realistica analisi delle sollecitazioni, considerando la figura in SAP2000 come un solido tridimensionale.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

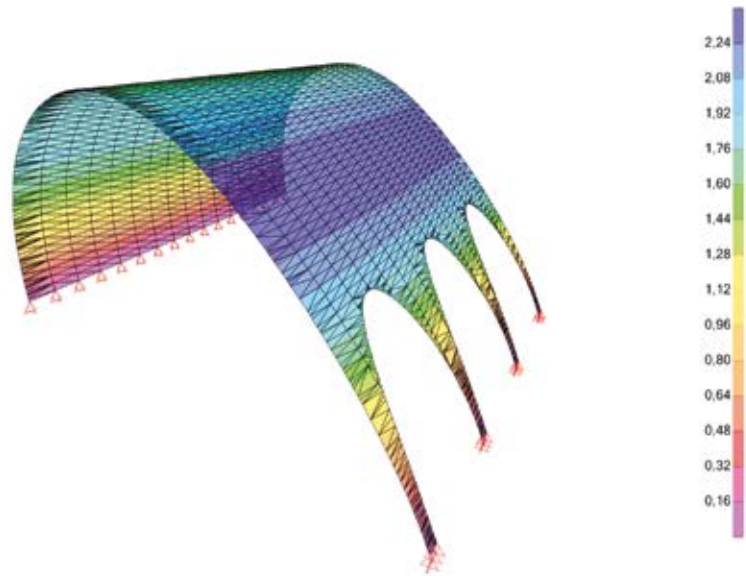


1. Mesh

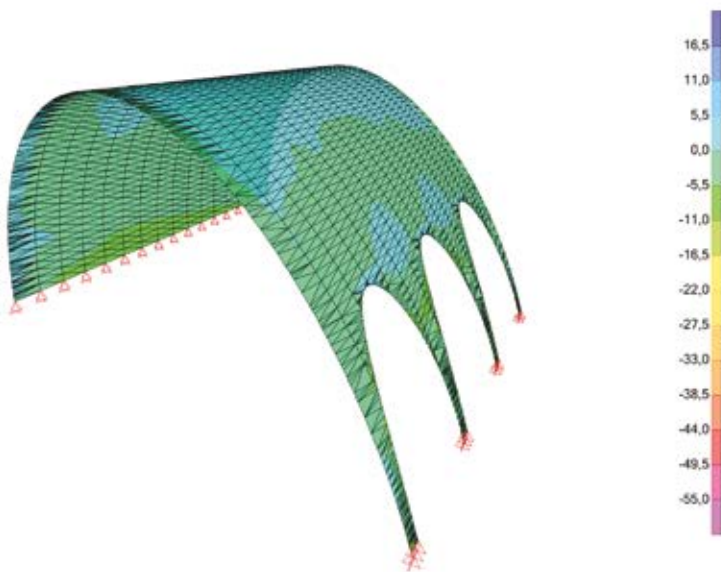
Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	96
Appoggio 2	123
Appoggio 3	123
Appoggio 4	96



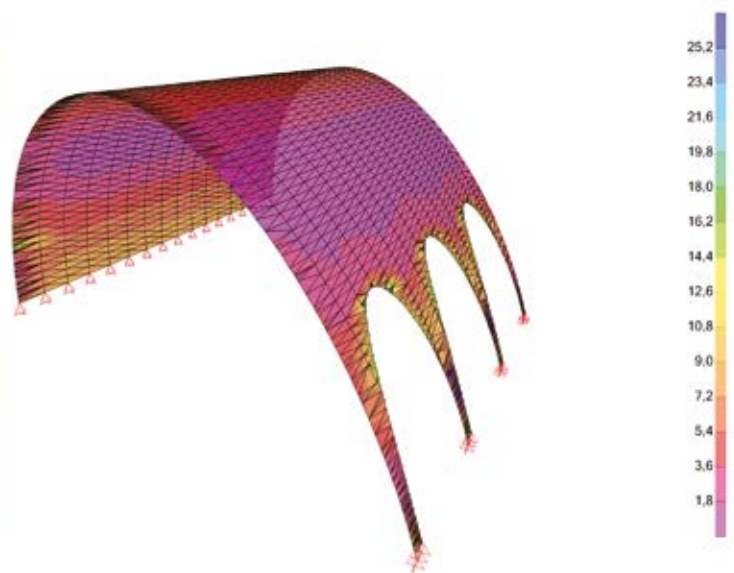
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



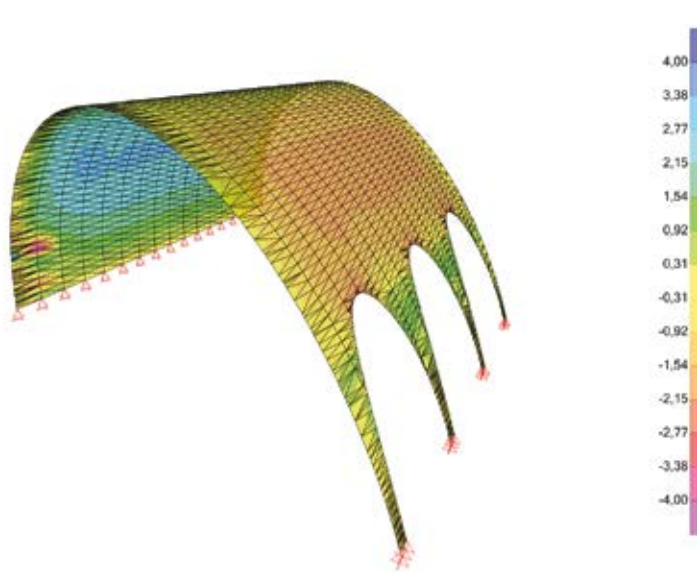
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



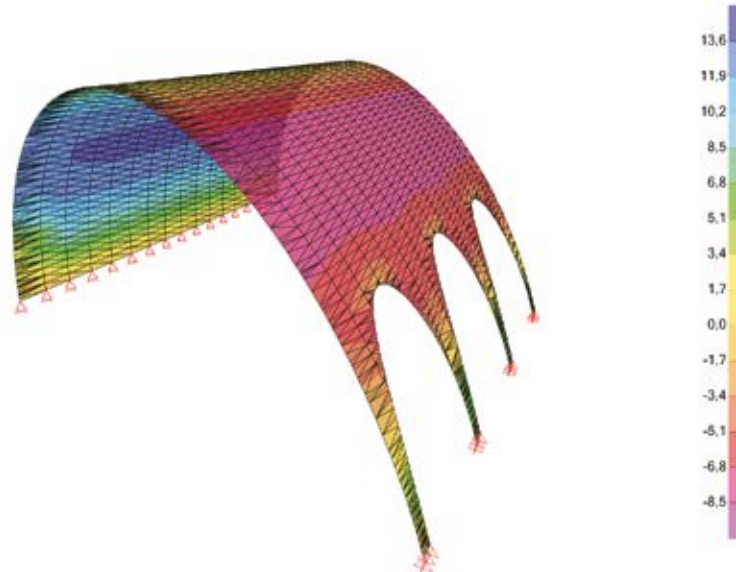
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN/m)



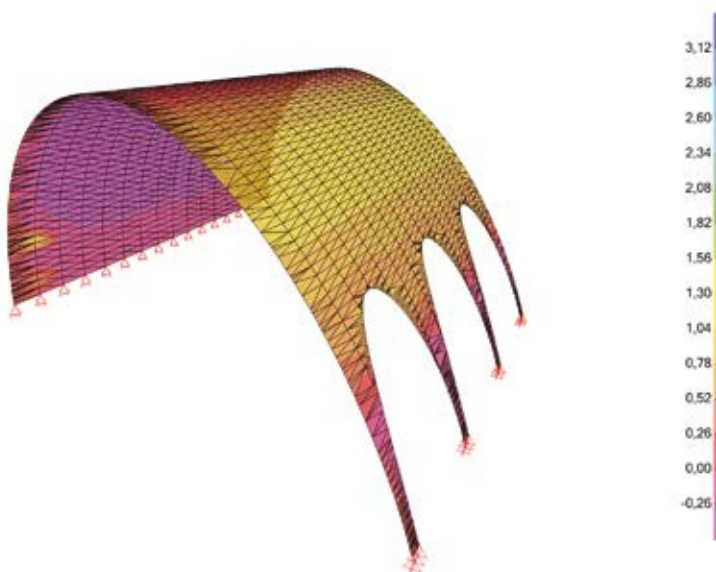
5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN/m)



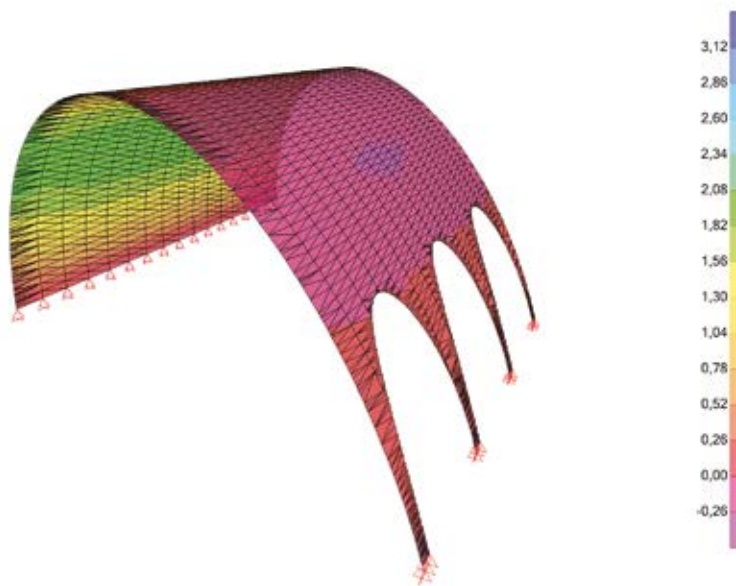
6. Momento flettente locale _ componente x (KNm/m)



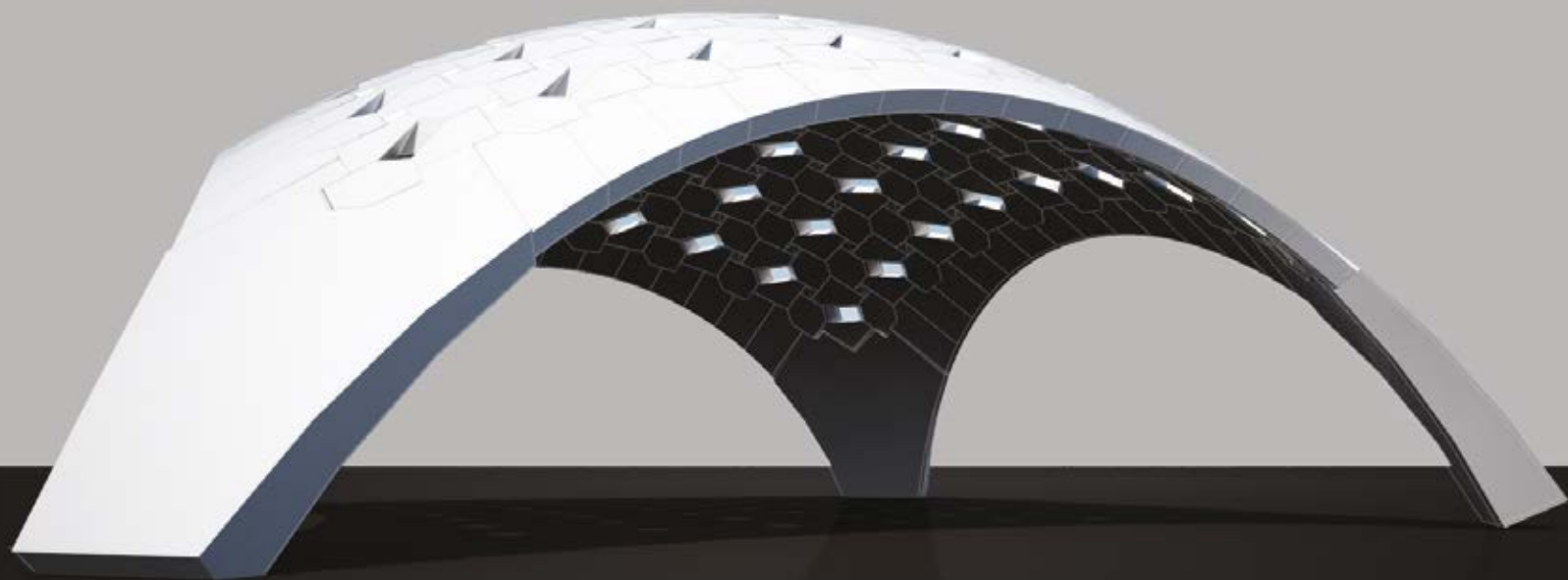
7. Momento flettente locale _ componente y (KNm/m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N/mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N/mm²)



L'evoluzione tecnologica nell'ambito del settore lapideo consente al progettista un nuovo approccio compositivo, basato sul ritorno all'architettura voltata. La pietra come materiale costruttivo è alla base della storia dell'architettura e le recenti ricerche ne hanno ampliato la possibilità di impiego grazie alle moderne tecnologie di lavorazione ed ai moderni software applicativi. Lo studio nel taglio di lastre sempre più sottili permette risparmio di risorse e ottimizzazione del lavoro, nonché la possibilità di conferire "snellezza" attraverso tagli di grande precisione. Inoltre oggi si possono superare le limitazioni meccaniche della pietra, come la mancanza di resistenza a trazione, grazie a strutture post-tese che consentono di raggiungere risultati innovativi.

I risultati attualmente ottenuti ci consentono di paragonarli a quelli ottenibili fino ad oggi esclusivamente con il calcestruzzo.

L'oggetto di analisi di questo progetto è la volta a vela: una struttura emisferica sezionata da piani verticali, passanti per i muri o i pilastri di sostegno, su cui poggiano gli archi che delimitano la volta. Se si sezionasse con un piano orizzontale tangente agli archi, la volta verrebbe divisa in una calotta e in quattro pennacchi sferici. Nel corso della progettazione la forma canonica è stata modificata abbassando la chiave della volta, per ottenere uno spazio coperto più ampio. Ciò ha reso necessario pensare a degli appoggi in grado di sostenere l'intero peso della struttura: ne è stato quindi aumentato lo spessore così da creare un piedritto dal quale dipartono, a due a due, gli archi che costituiscono il profilo della volta.

Il primo approccio alla modellazione verteva su un pattern che creasse un disegno complesso e intricato basato Escher e sulla tassellazione, definita come "configurazione costituita da poligoni che ricoprono l'intero piano, senza sovrapporsi a due a due". Il risultato era una superficie voltata chiusa e compatta, mentre l'intenzione era di ottenere una volta a vela ricca di bucatore. Ciò ha portato all'ideazione di un concio che grazie alla sua forma e alla disposizione nello spazio, creasse diversi bassorilievi e dei fori di varia geometria.

L'obiettivo era quello di ottenere una struttura autoportante

attraverso la ripetizione di filari composti dallo stesso concio ribaltato su sé stesso alternativamente.

La progettazione del concio inizialmente non teneva conto delle regole per ottenere un corretto risultato: la sua forma appariva eccessivamente complessa e presentava spigoli acuti.

Nella seconda fase, è stata corretta la geometria del concio, ma risultavano insufficienti le superfici di contatto tra i pezzi, necessarie affinché la volta risultasse autoportante.

La ricerca è ripartita, arrivando alla volta basata su un concio dalle forme più snelle e semplici. Il disegno finale è stato ottenuto partendo da un quadrato di lato 60 cm e spesso 20 cm, le cui basi traslano fra di loro, in modo da ottenere un pattern ben disposto.

La scelta definitiva è stata quella di utilizzare non uno, ma quattro conci differenti così da avere, al centro di essi, un motivo sempre diverso.

Per ciò che riguarda le spalle della volta, è stato affrontato il problema della spinta causata dal peso proprio: per far sì che questa rientrasse all'interno del terzo medio, sono stati infatti ingranditi i quattro appoggi.

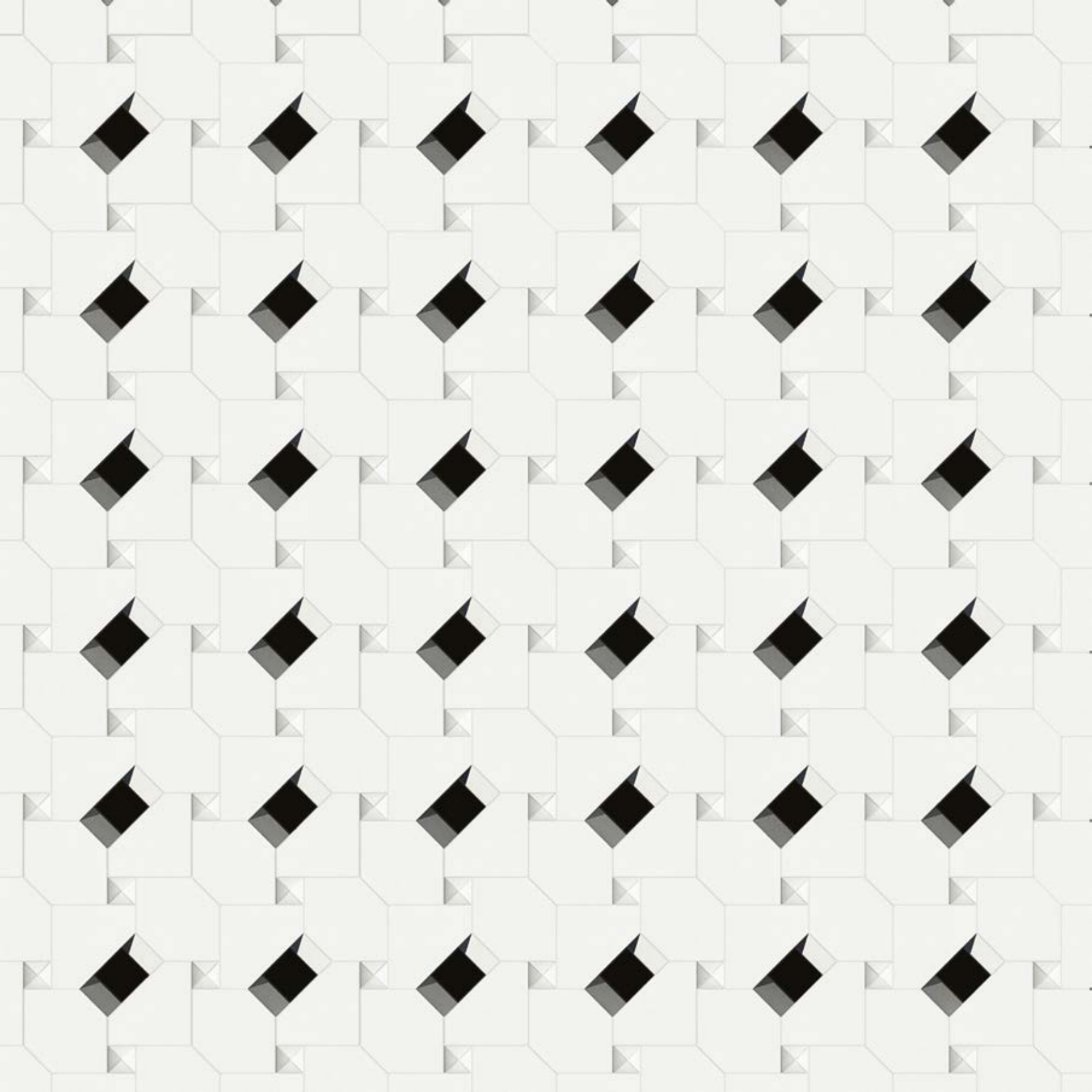
Attraverso i programmi di modellazione, il lavoro è stato diviso in due fasi. La prima prevedeva la disposizione piana della volta, per regolare l'impianto della superficie, lavorando su una matrice quadrata. Tuttavia si è riscontrato che questa geometria non era indicata. Perciò è stata scelta una forma piana molto simile a quella di un quadrato, ma con i lati leggermente concavi verso l'interno della figura.

La seconda fase consisteva nello sviluppo parametrico delle superfici attraverso sistemi tecnologici con cui è possibile visualizzare all'istante come un corpo bidimensionale si possa modificare nello spazio tridimensionale. Il tutto è stato lavorato grazie ad un programma di modellazione parametrica e CAD.

Nello specifico sono stati eseguiti i seguenti comandi: il primo è il "Bend", funzione che permette la piegatura della volta secondo un asse di orientamento definito.

Questo parametro è stato utilizzato due volte per ottenere la forma propria della volta a vela e i gradi inseriti di curvatura sono 100 per il primo piegamento e 90 per il secondo. Il secondo comando è chiamato "Stretch" e prevede l'allungamento o l'accorciamento di una data geometria lungo un asse predefinito. È stato utilizzato per correggere la deformazione dovuta alla seconda curvatura, il numero impostato è 0.095 seguendo lo stesso asse del secondo "Bend".

Il materiale scelto per questa struttura architettonica è il Semond Dore, una pregiata varietà di pietra calcarea proveniente dalla Borgogna. Si tratta di un calcare con venature carbonatiche, formatosi in ambiente marino profondo, poco ossigenato e ricco di sostanze organiche, che conferiscono il colore nero, mentre le striature dorate si devono alla dolomitizzazione parziale della sostanza organica ossidata.



Nella tabella sono riportate le principali caratteristiche tecniche.

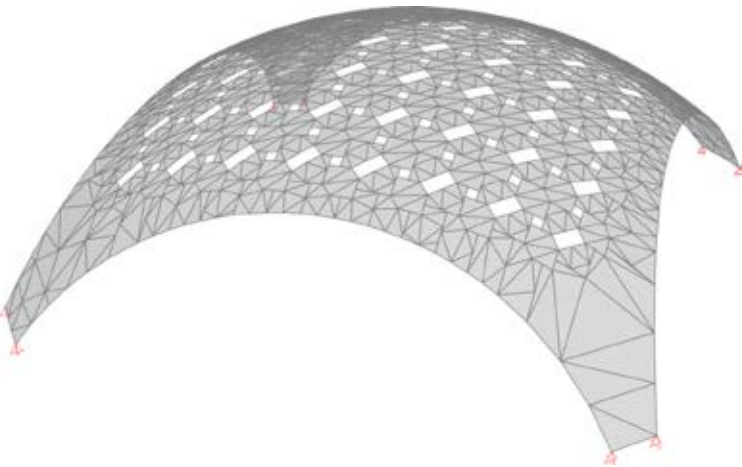
Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Borgogna	Semond dore	2354	2150	37	452225	0,23	Paglierino

La struttura prevede l'utilizzo di armature post-tese, il cui posizionamento è stato studiato per garantire la resistenza alle massime sollecitazioni di trazione che si verificano in corrispondenza delle diagonali. E' stata scelta la "Complast 9" (zincata) di 358 fili 9x26 WSRP e un'anima metallica parallela con trefoli compattati, crociata destra, crociata sinistra e Resistenza di 2160 N/mmq. I parametri sono: diametro 26mm, diametro fili esterni 1,43mm, peso per metro 2,982mm, carico di rottura di 618 kN. Nelle immagini sottostanti vengono esplicitati posizionamenti in sezione e in pianta.

Armatura	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura (kN)
"Complast 9" (zincata) -358 fili 9x26 WSRP -anima metallica parallela -trefoli compattati crociata destra, crociata sinistra	2160	26	1.43	2.982	618

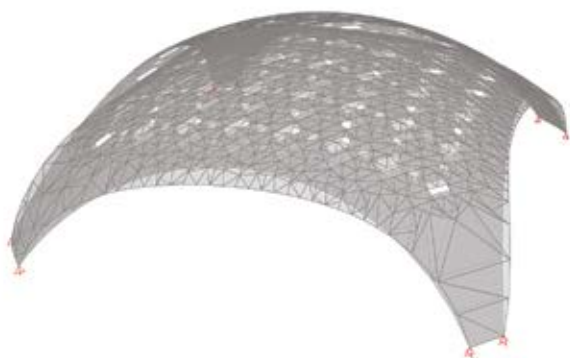
Per poter studiare le reazioni agenti nella struttura sollecitata da differenti condizioni di carico, è stato necessario trasformare il modello finale della volta in una configurazione di tipo bidimensionale. Con questa struttura in 2D sono state effettuate le stesse trasformazioni nel programma CAD, attraverso le operazioni spiegate nel paragrafo 4. Una volta trasformata, la superficie 3D è stata importata in "SAP2000". Innanzitutto sono stati inseriti dei vincoli esterni, che ancorano la struttura al suolo. In questo caso sono state utilizzate delle cerniere, in modo da consentire unicamente la rotazione. Ne sono state inserite otto, nei punti che corrispondono ai vertici che poggiano a terra. Dopo aver inserito i vincoli, sono state definite le caratteristiche geometriche della volta. Nello specifico, è stato stabilito che la struttura fosse spessa 0,2mt, che corrisponde allo spessore del concio. Sono stati attribuiti i parametri distintivi del materiale di cui è fatta la vela, inserendo dei valori molto simili a quelli della pietra. Sono state attribuito al materiale chiamato "Pietra" le seguenti caratteristiche: un modulo di elasticità $E=70000$; un coefficiente di Poisson $U=0,2$; Peso specifico per unità di Volume pari a $2,5 \times 10^5$. Infine sono stati definiti i casi di carico. E' stato ipotizzato infatti che la struttura fosse gravata dal peso proprio, caso chiamato DEAD, e da dei carichi accidentali, che sono stati denominati NEVE. Una volta stabiliti i casi di carico, sono stati combinati e assegnati alla struttura, dando un coefficiente di moltiplicazione di 0,48 sull'asse Z.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

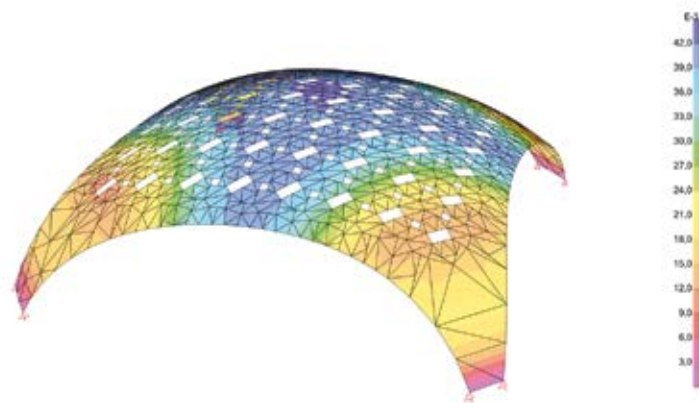


1. Mesh

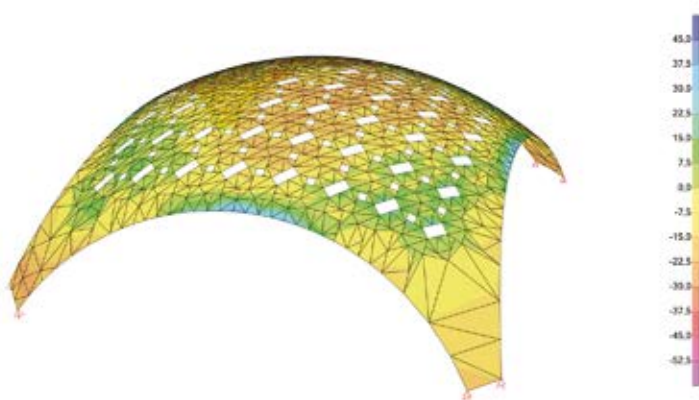
Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	32



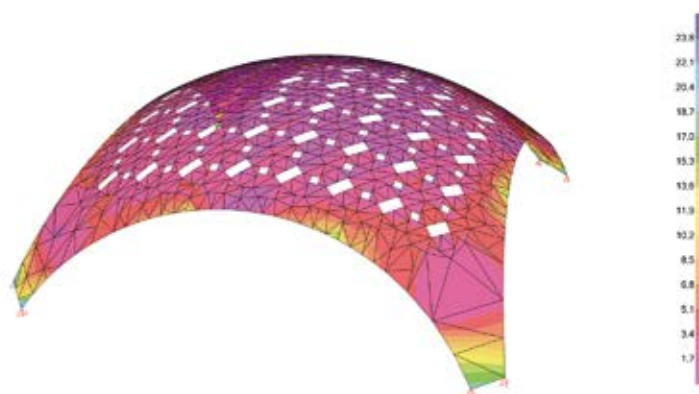
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



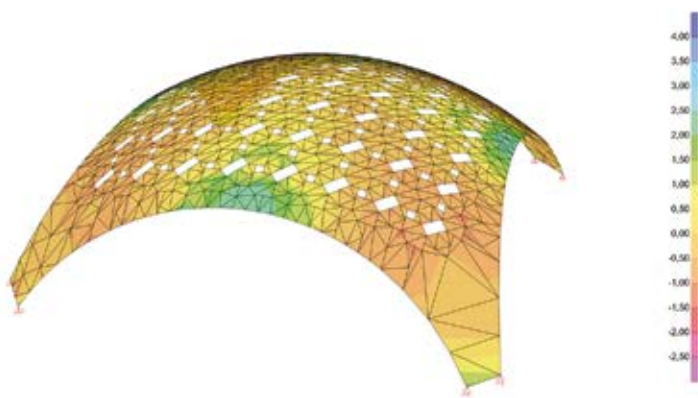
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



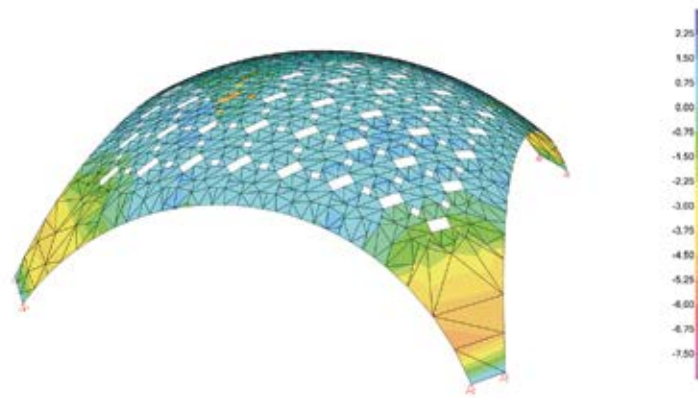
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN\m)



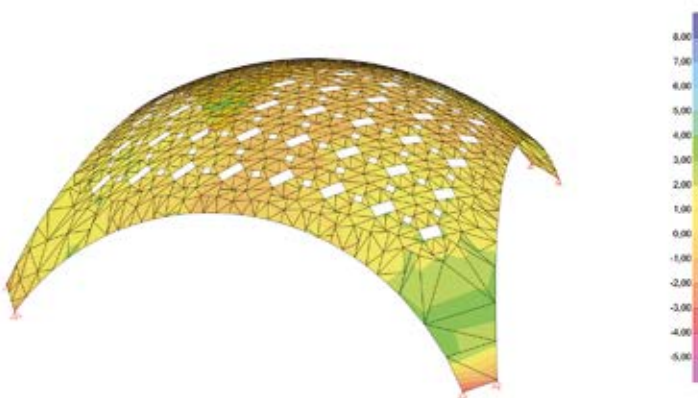
5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN\m)



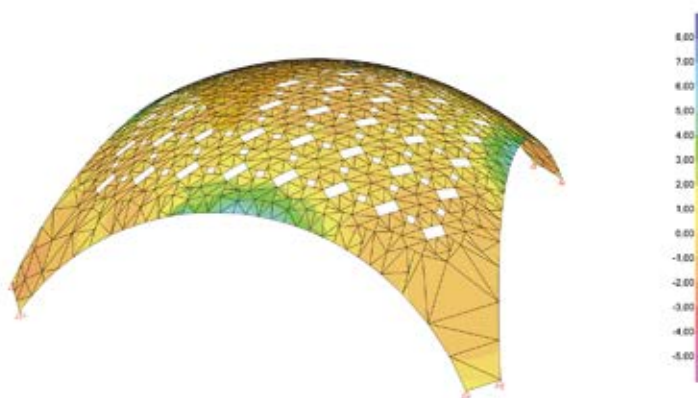
6. Momento flettente locale _ componente x (KNm\m)



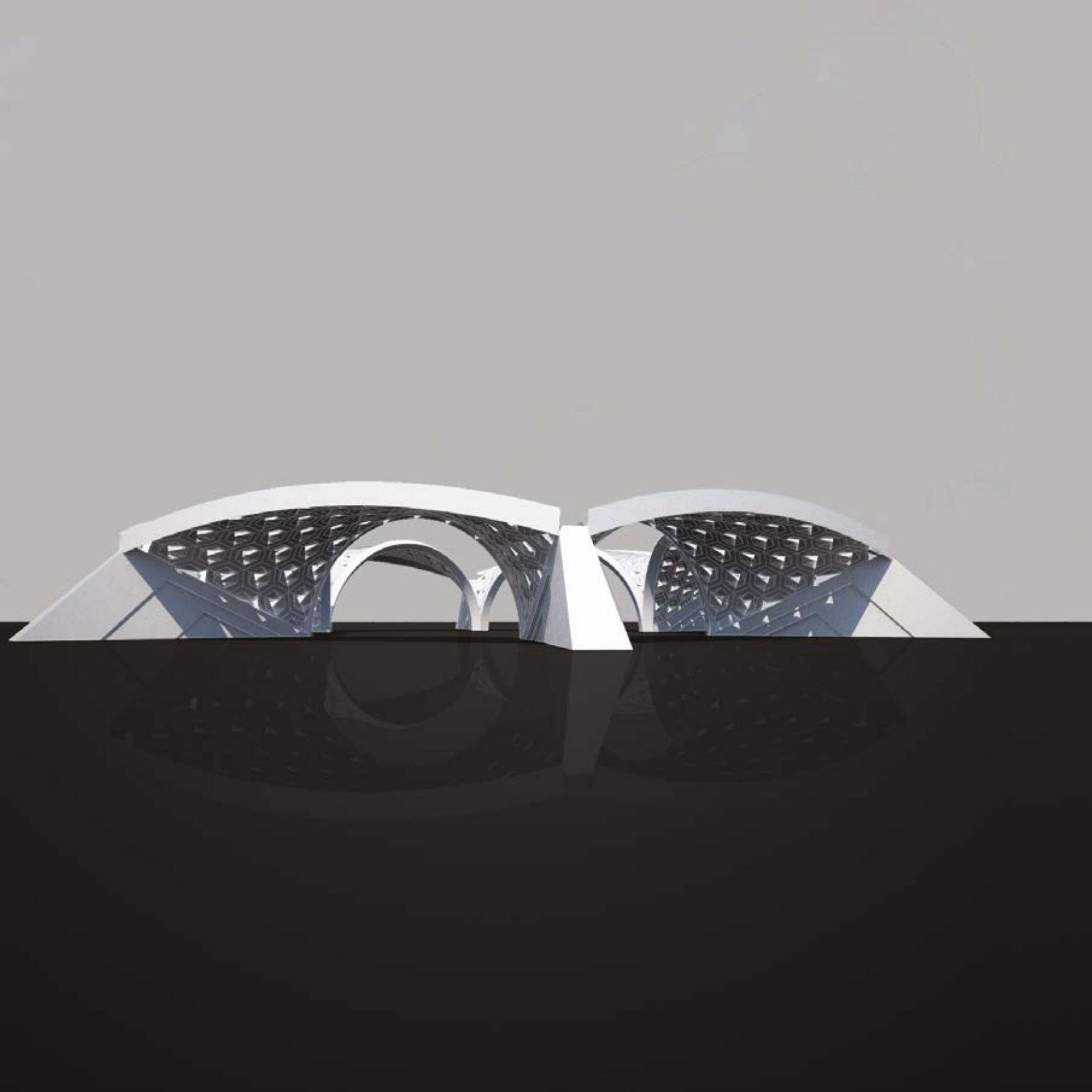
7. Momento flettente locale _ componente y (KNm\m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N\mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N\mm²)



L'idea di partenza è stata quella di un impianto a simmetria radiale: 6 archi a tutto sesto racchiudono un chiostro centrale; da questi si sviluppano poi altrettante volte a botte rastremata e rampante a pianta trapezoidale, che vanno a formare un esagono esterno concentrico al primo.

Nel progetto originario le volte dovevano sostenere un solaio praticabile per poi trasmettere il carico a 6 costoloni a sbalzo (armati) disposti secondo le diagonali: la struttura a sbalzo avrebbe però comportato complicazioni aggiuntive, in particolar modo nella disposizione e nella messa in opera dell'armatura, perciò i costoloni armati sono stati sostituiti da setti triangolari con funzione di spalla.

L'iter progettuale motiva dunque la particolare modellazione delle volte: una botte a pianta trapezoidale implica una linea di colmo inclinata tra l'arco maggiore e quello minore.

Dovendo idealmente sostenere un piano praticabile, le volte avrebbero funzionato meglio con un colmo orizzontale; il concio in chiave dell'arco esterno (maggiore) doveva quindi trovarsi alla stessa quota del concio in chiave dell'arco interno (minore).

Essendo sostenute dai setti triangolari, il piano di imposta delle volte è inclinato ed è per questo che si è dovuto estendere sensibilmente il raggio dell'arco esterno, per poi considerarne solo la sezione centrale, prossima al colmo, di corda pari al lato dell'esagono. La geometria è generata quindi da archi a tutto sesto di raggio crescente, procedendo dall'interno verso l'esterno, allineati sul colmo della volta e poi tagliati secondo i piani verticali per le diagonali dell'esagono in pianta.

Si è poi passati a studiare la texture materica da dare alla volta definitiva.

Anche in questo caso la progettazione si è articolata in due stadi: a partire dal concio cuneiforme di Trouchet per la volta piana, lo si è modellato inizialmente per torsione tra le facce inferiore e superiore, ottenendo una maglia basata sul triangolo alternato a geometrie a stella con tratti curvilinei molto suggestivi. Tuttavia il concio presentava diverse facce rigate e degli spigoli

eccessivamente sottili per la lavorazione e per la resistenza del materiale.

Si è allora passati a un concio più semplice, basato su una maglia esagonale. Il concio di Trouchet è sostanzialmente costituito dall'unione di due facce rettangolari, superiore e inferiore, disposte ortogonalmente su due piani paralleli mediante facce trapezoidali disposte su piani inclinati. Disponendo le facce superiore e inferiore secondo un angolo di 120° si ottiene, componendo i vari conci, un pattern esagonale.

A partire da questo schema, si è pensato di aggiungere alla faccia inferiore del concio un braccio parallelo a quella superiore in modo da formare nell'intradosso un cassettonato esagonale: la faccia inferiore di ogni concio forma due lati di un esagono. L'estradosso risultante è un pattern di triangoli aperti e piccole piramidi esagonali (in negativo, cioè scavate nello spessore della volta).

Nell'intradosso, al centro di ogni esagono si forma quindi un'apertura triangolare, generata per rotazione tra i vertici del triangolo e quelli dell'esagono. La particolare forma pensata per il concio determina un effetto a spirale intorno alle aperture della volta traforata, conferendo tridimensionalità alle stesse e dando luogo a un effetto di rifrazione della luce tra le molteplici facce dei conci disposte secondo diverse giaciture.

Lo spazio coperto dalle volte è quindi illuminato sia in modo diretto, attraverso i numerosi triangoli di luce, sia in modo indiretto, grazie alla rifrazione tra le facce dei conci.

Una volta ottenuta la superficie su Rhinoceros è stato applicato il pattern, preparato precedentemente su AutoCAD e poi adeguatamente importato. Si è iniziato con il digitare Grasshopper dalla riga di comando e, una volta avviato il programma, è stato poi aperto il codice "Tassellazione semplice per superfici".

Vi sono 3 parametri da definire per ottenere l'applicazione del pattern alla superficie: Il primo è GEO, nel quale si è andati a selezionare la tassellazione importata, appunto per definire la geometria da applicare;

il secondo è SFR, che permette di selezionare la superficie sulla quale verrà applicato il pattern;

il terzo, infine, è lo SPESSORE da dare alla tassellazione.

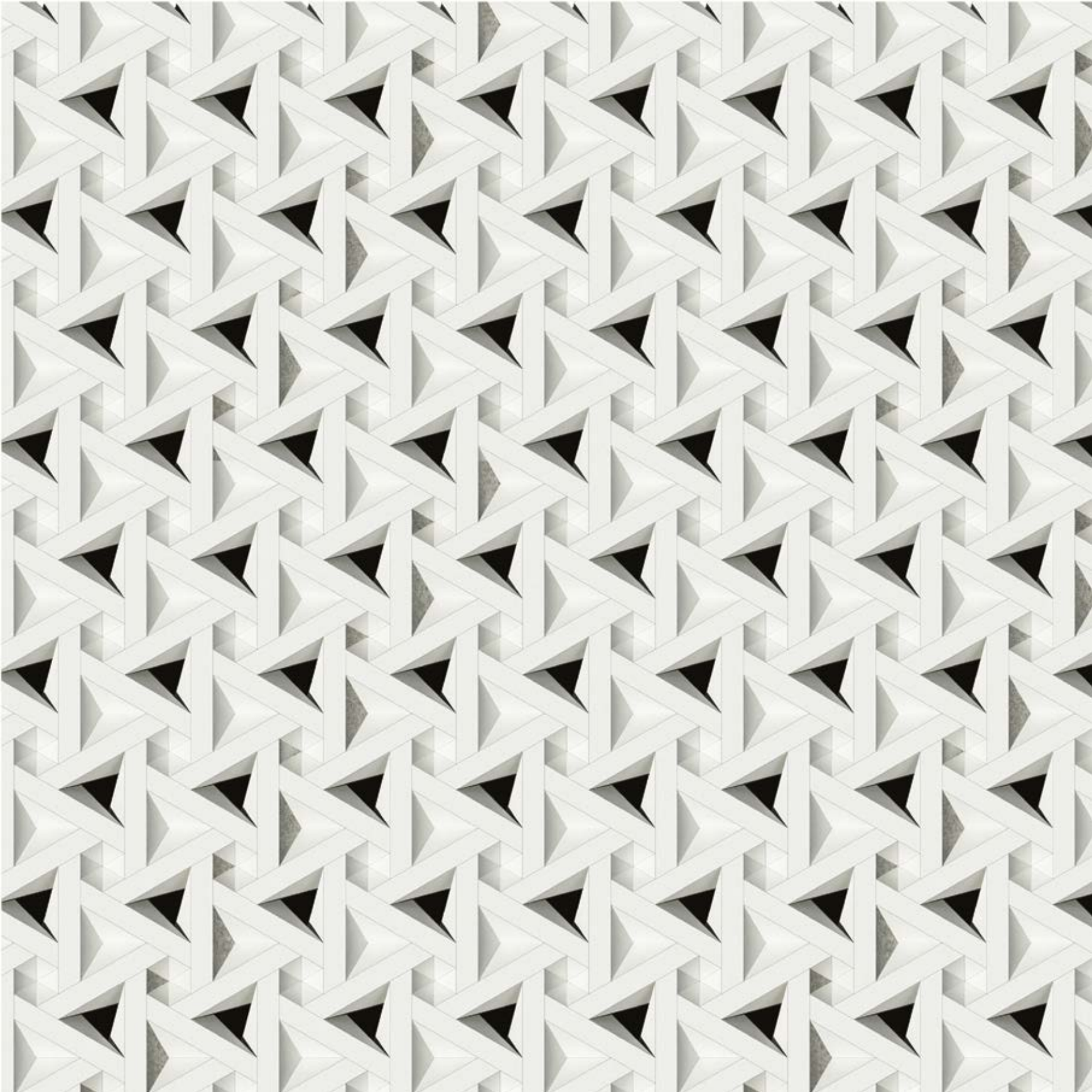
Il corretto inserimento dei parametri è confermato dall'illuminazione in verde di tutti gli interruttori.

A questo punto, non restava che spostarsi sull'interruttore finale e, premendo con il tasto destro, si è andati a selezionare "BAKE", il quale avrebbe restituito la superficie con la trama dei conci applicata.

Il pattern piano dei conci viene cioè disposto sulla superficie selezionata.

Ottenuta la mesh della superficie da Rhinoceros, opportunamente divisa in rettangoli, è stata importata su AutoCAD.

Con il comando 3DFACCIA si è proceduto a suddividere le porzioni ottenute in triangoli, così da ottenere la trama che sarebbe servita per la fase successiva in SAP.



I conci sono realizzati in Pietra di Borgogna, un calcare naturale francese le cui proprietà meccaniche sono riportate in tabella:

Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Francia	Pietra di Borgogna	2574	2500	45	800000	0.4	Beige/ Giallo

L'armatura è costituita da funi di acciaio a 8 trefoli, di diametro F = 18 mm, che attraversano la volta parallelamente al lato dell'esagono a distanza di 1 metro l'uno dall'altro. Questo comporterà ovviamente la loro inevitabile comparsa in alcune delle aperture della volta, Le funi si vanno ad ancorare poi nei setti di sostegno, che si prevedono realizzati in calcestruzzo armato.

Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura minimo (KN)	Carico rottura massimo (Kg)
Funi di acciaio a 8 trefoli	2160	18	0.92	2.018	1180	120400

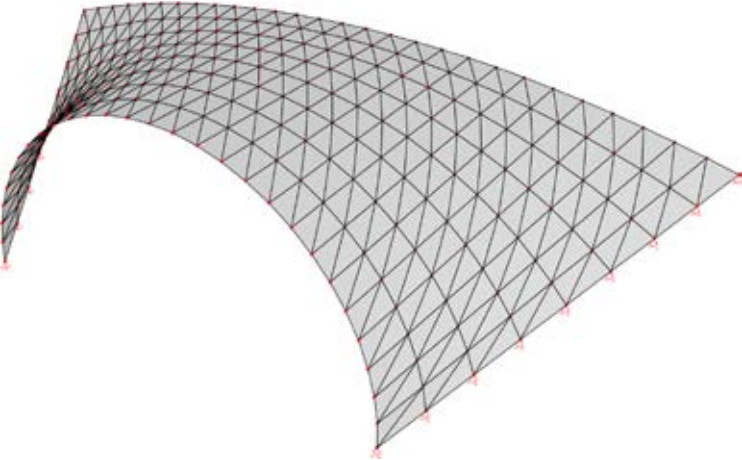
Una volta in SAP si è impostato KN/mm come unità di misura. Il file è stato conseguentemente importato con la trama creata con 3DFACCIA e si è poi passati a definire il materiale che sarebbe stato oggetto d'analisi.

Tramite DEFINE, si è così andati su MATERIALS ed è stato creato PIETRA, determinando come unità di misura N/mm, E=70000 e Yp= 25KN/m³ = 25x10⁻⁶ N/mm³, per poi tornare nuovamente al modello; sempre su DEFINE e, una volta ottenuto l'accesso al menù AREA SECTION, qui è stata aggiunta una nuova sezione tramite il comando ADD NEW SECTION, chiamata VOLTA.

A questo punto è stato impostato lo SHELL THICK, assegnando il materiale PIETRA creato in precedenza e settando la THICKNESS a 200mm=BENDING: sempre tramite il comando DEFINE, il pattern è stato caricato con LOAD PATTERN NAME. Dopo aver stabilito di denominarlo NEVE e, una volta impostato SELF WEIGHT MULTIPLIER a 0,5, è stato quindi selezionato MODIFY LOAD PATTERN, lasciando così in sospeso solo la definizione dei CASES. Su LOAD CASE NAME si è aggiunto COMB1 settando NEVE su "Load Name".

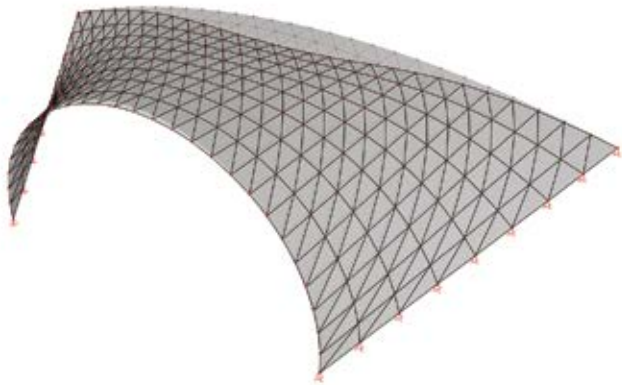
E così si è quasi giunti alla fine del processo; l'esigenza era poi quella di mettere in relazione tutto ciò che era stato determinato fino a quel momento. Selezionando l'intero modello e selezionando ASSIGN -> AREA -> SECTION, è stato impostato Volta; riselezionando tutto, sempre tramite ASSIGN -> ARELA LOADS ->UNIFORM SHELL, nelle tendine è stata scelta l'impostazione NEVE con 0,48 (trovando tutte le coordinate dei triangoli della nostra struttura). Una volta salvato si è andati sul tasto RUN ANALYSIS per lanciare l'analisi dei carichi della struttura, così da poter analizzare i grafici e trarre le dovute conclusioni.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

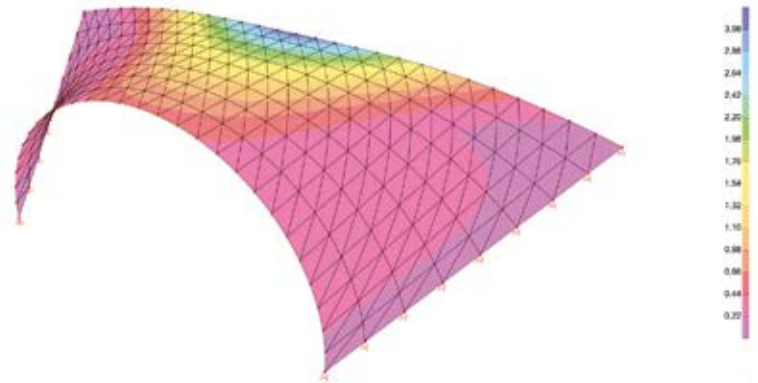


1. Mesh

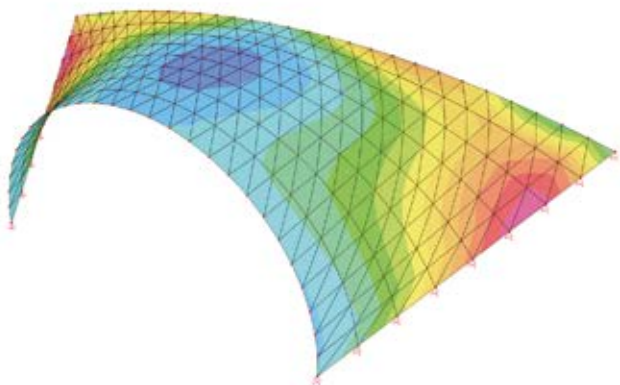
Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	134
Appoggio 2	147
Appoggio 3	123
Appoggio 4	157



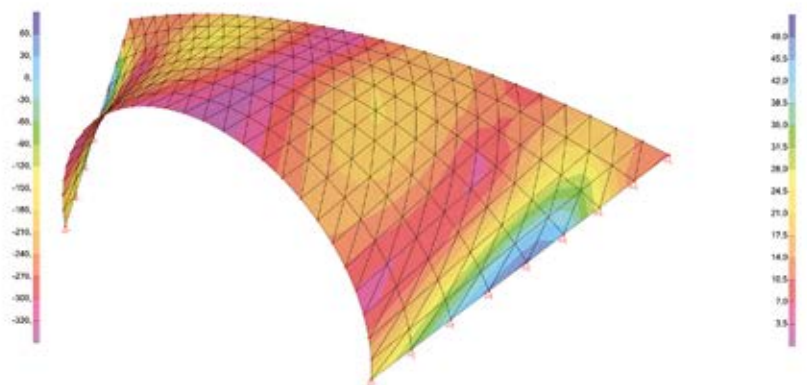
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



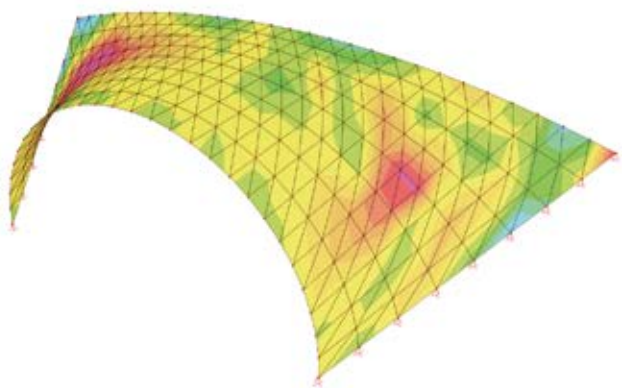
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



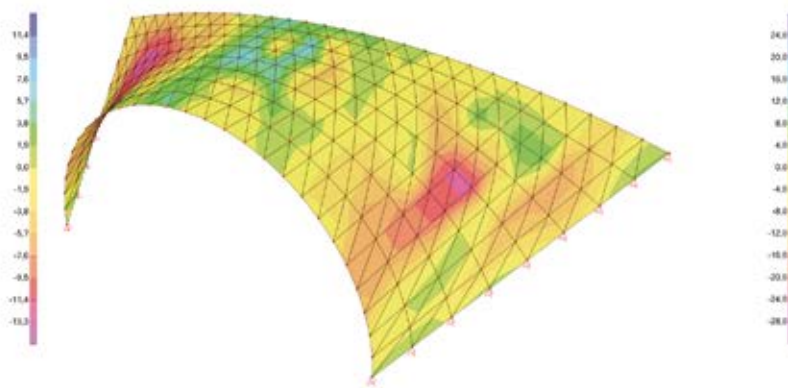
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN\m)



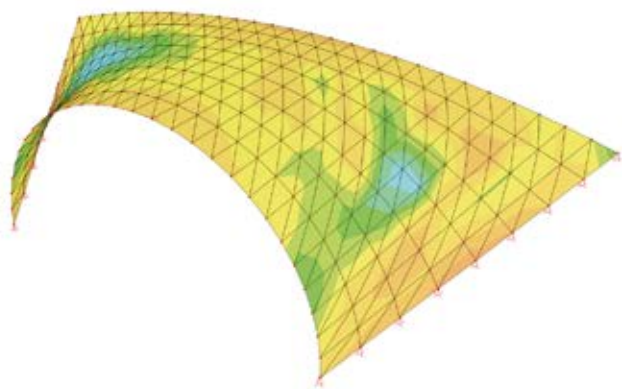
5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN\m)



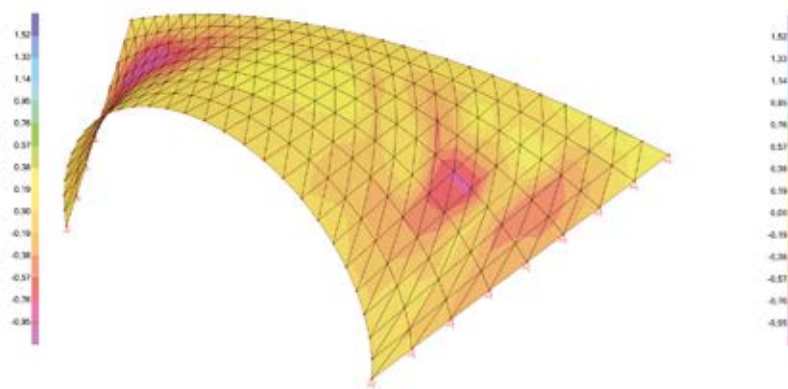
6. Momento flettente locale _ componente x (KNm\m)



7. Momento flettente locale _ componente y (KNm\m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N\mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N\mm²)



L'innovativo approccio dell'utilizzo dei materiali lapidei associati alle armature in acciaio scaturisce dalla necessità di ovviare al problema della durabilità del calcestruzzo; Cause principali di tale problematica sono la disattenzione nella fase progettuale, errori concettuali, mancanza di approfondimento delle caratteristiche ambientali, mancanza di conoscenza del comportamento dei materiali nel tempo e del dettaglio costruttivo; inoltre il problema della durabilità è da imputarsi alla cattiva esecuzione o alla mancanza di manutenzione. La necessità di disintossicarsi dal cemento armato, unita all'evoluzione nell'utilizzo della tecnologia lapidea, consente un approccio innovativo nella genesi delle forme e degli spazi, finora realizzabili soltanto con l'ausilio del cemento armato.

L'innovazione prende spunto dai sistemi voltati romani, trapuntati da numerose cupole: una forma suggerita dalle sue generatrici, forti quel tanto da lasciare impressa la forma finale emisferica, ma tanto leggere da non poter dominare lo spazio che vanno a creare, in quella che ci è piaciuto definire una Cupola dischiusa; nell'impianto infatti, non sono costoloni e nervature a disegnarne il profilo, ma gradienti e spazi in negativo, disposti, in ultima analisi, ad accogliere dinamicamente pattern e coperture. Partendo da una pianta circolare, l'impianto si genera disegnando i raggi della circonferenza di base, fino a dividerla in sedici parti. La più naturale genesi nello spazio della nostra circonferenza è quella di una cupola a tutto sesto, nata dall'intersezione di due famiglie di archi laterali di differenti altezze, i quali trovano la propria imposta sul perimetro della figura generatrice, lì dove questa si interseca con i raggi disegnati in prima battuta, sezionando così idealmente la nostra cupola. Queste famiglie di archi, di altezze differenti, disegnano in sezione il profilo emicircolare della cupola, che si chiude in sommità. Abbiamo visto, quindi, che nel nostro impianto la cupola è generata da due famiglie di archi intersecati; dal punto di vista meccanico l'arco è un elemento in grado di incanalare, con la sua traiettoria curvilinea, le sollecitazioni prodotte dai carichi

trasformandole in forze prevalentemente di compressione; la sollecitazione di compressione rappresenta –quindi– in pratica l'unica sollecitazione cui la pietra e la muratura sono in grado di resistere.

La spiegazione dell'Alberti sul funzionamento degli archi a tutto sesto è la prima a comparire nella trattatistica architettonica: "... non si vede in che modo esso (arco) possa sconnettersi per conto proprio; salvoché l'un concio spinga fuori l'altro; quand'anche fossero disposti a tentare di scalzarsi a vicenda, la presenza stessa dei pesi ... basta ad impedirlo; il concio posto in cima ... non si vede come possa trovare la forza di spingere in fuori i conci che lo fiancheggiano; ... quelli che fanno seguito ad essi, occupando i fianchi dell'arco, verranno tenuti agevolmente ... dall'equilibrarsi dei pesi; infine, i conci posti alle due estremità inferiori, non si comprende come possano spostarsi una volta che gli altri, posti sopra di essi, restino fermi al loro posto. Pertanto gli archi interi non abbisognano di corda poiché essi sono in grado di mantenersi da se."

L'impalcatura muraria viene, nel nostro caso, reinterpretata in chiave litica seguendo i principi della stereotomia. I conci costituenti gli archi sono stati creati sezionando l'arco inizialmente monolitico con il procedimento della geometria piana: il solido di partenza è stato intersecato con piani curvilinei e successivamente sezionato. La sezione degli archi è di forma triangolare con angoli smussati. In seguito sono stati modellati i piedritti: la base di questi ultimi richiama la forma dell'impianto, sono, infatti, di forma poligonale, ed ottenuti con un Loft secondo la superficie ricurva degli archi in prospetto.

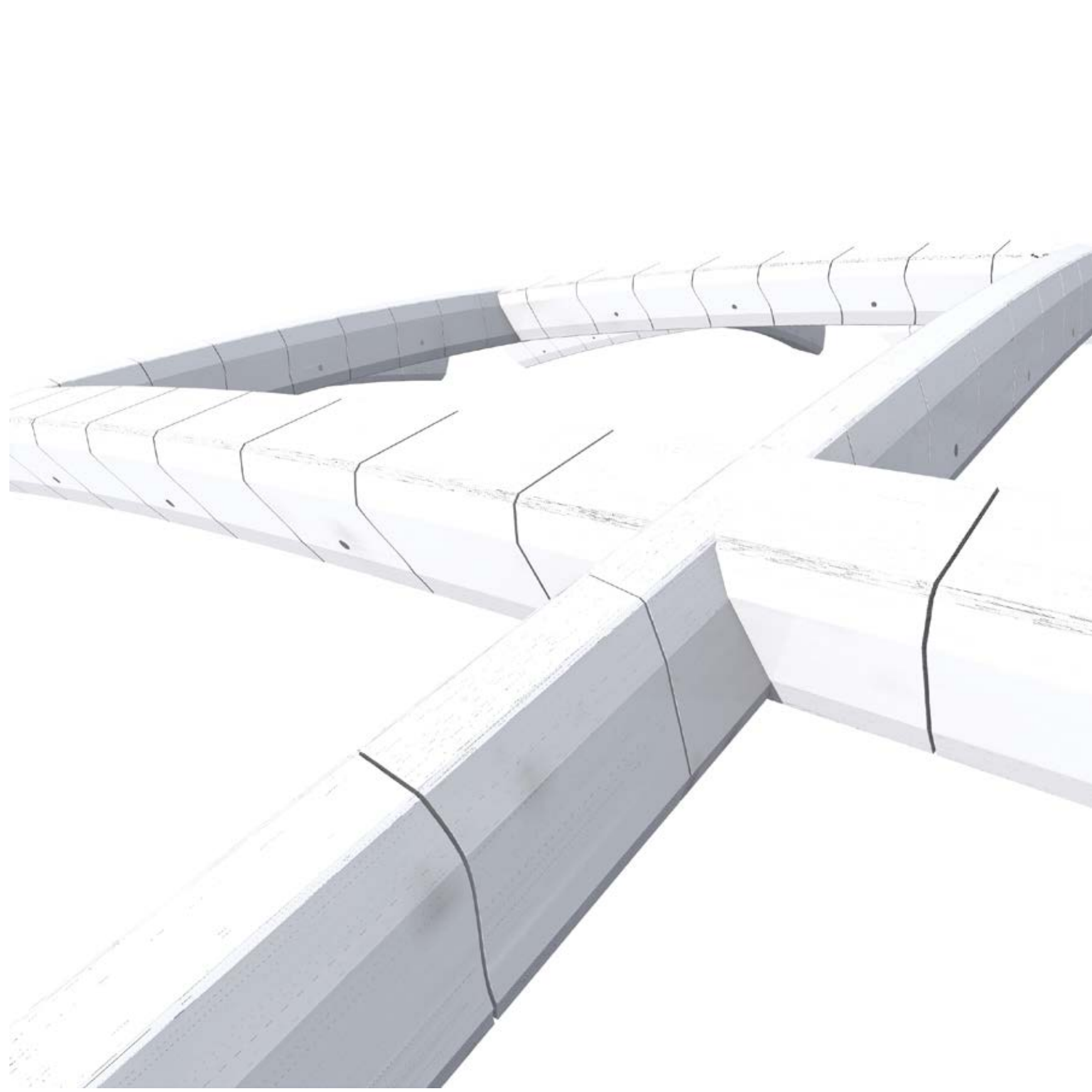
Il modello preso a riferimento è stato il Duomo di Torino, con particolare riguardo alla cappella della Sacra Sindone, per opera dell'architetto e matematico Guarino Guarini.

Sulla base delle precedenti considerazioni sono stati eseguiti dei calcoli preliminari con un modello realizzato con il software SAP2000: questo 3d è stato realizzato creando delle spezzate in luogo di elementi curvilinei, disegnando quindi una sottostruttura dal modello CAD che unisce i punti dell'arco con una polilinea, con un valore di segmentazione molto elevato. La costituzione del modello di calcolo presuppone la determinazione dei carichi orizzontali e verticali agenti sulla struttura, che possono essere concettualmente divisi in due macro-gruppi: carichi permanenti (G) e carichi accidentali o variabili (Q).

Le combinazioni di carico ottenibili, in linea con le prescrizioni delle Norme Tecniche Italiane (NTC 2008), comprendendo i termini del carico permanente strutturale (G_1), del carico permanente non strutturale (G_2) e dei carichi variabili di neve (Q_1) e vento (Q_2), opportunamente maggiorati mediante dei coefficienti correttivi Gamma.

Mediante il suddetto studio è possibile dunque ottenere il carico F_d [kN/m^2] agente sulla struttura, che rappresenta una maggiorazione normata della forza di gravità agente sulla Cupola (cfr figura)

Nel modello di carico i piedritti sono stati vincolati a terra con



delle cerniere, lasciando libera la rotazione, in modo tale che il software potesse calcolare i carichi distribuiti sull'intera struttura.

Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Zecevo (HR)	Kota brown	2356	2650	32	358540	0.21	Grigio/Marrone

Per il materiale dei nostri conci la scelta è ricaduta sulla Kota brown, materiale grigio o marrone , sano e resistente anche a temperature molto basse.

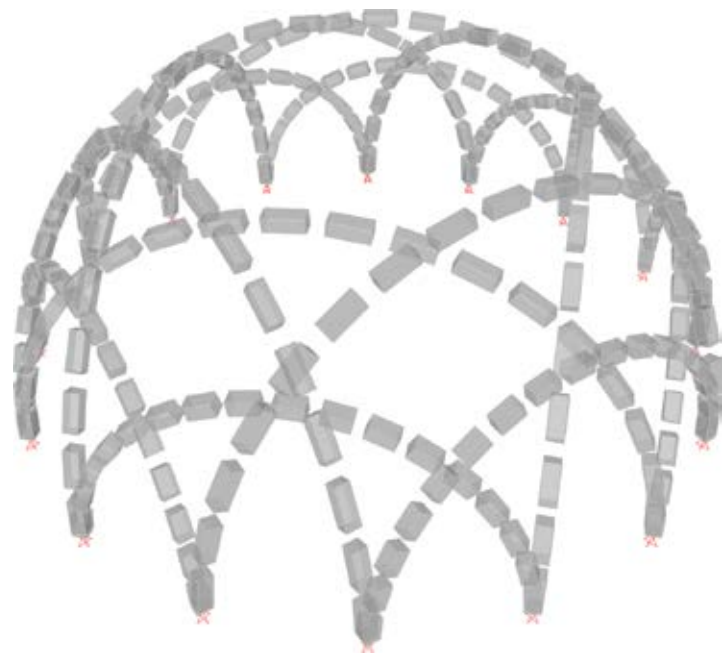
E' ottimo in tutte le sue principali lavorazioni: lucido, levigato e spazzolato. Il Kota brown è disponibile in blocchi e in lastre.

Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura minimo (kN)	Carico rottura massimo (Kg)
2 trefoli e 112 fili (8 W15 zincata)	2160	26	1.43	5.125	2.982	618

Per quanto riguarda le armature abbiamo inserito nel concio due file di trefoli, posizionati in modo che le barre di armatura non si incrocino nei punti di incontro degli archi.

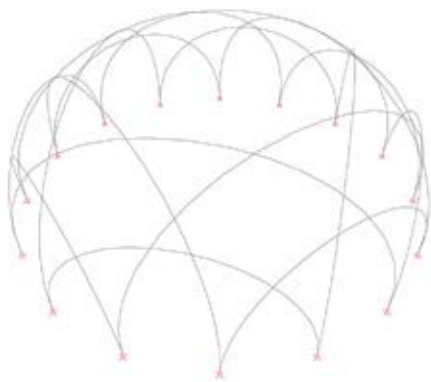
La scelta dei trefoli deriva delle caratteristiche di dopo stabilizzazione, il basso rilassamento dei trefoli garantisce che non si verifichi nel tempo una perdita di tensione.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000



1. Mesh

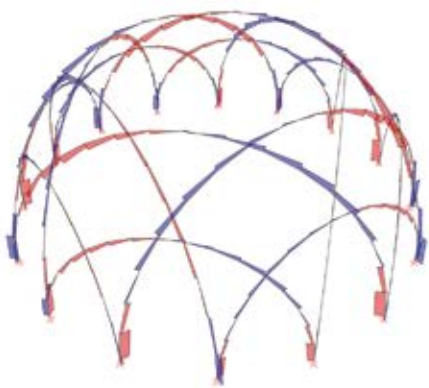
Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	376



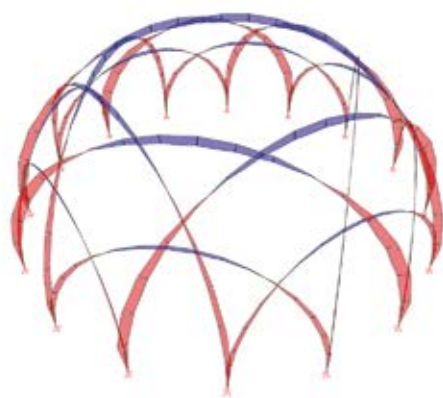
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



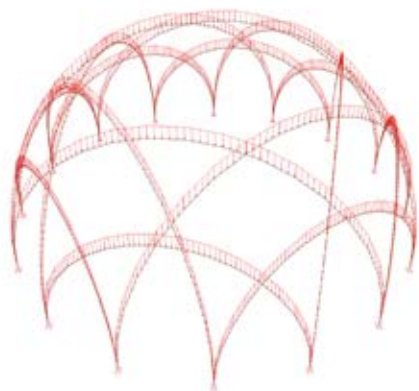
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



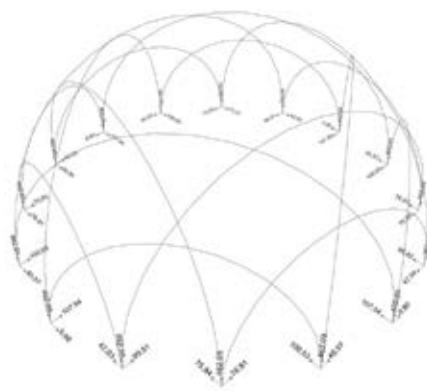
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN/m)



5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN/m)



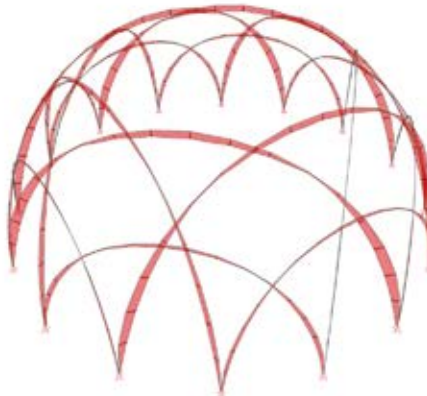
6. Momento flettente locale _ componente x (KNm/m)



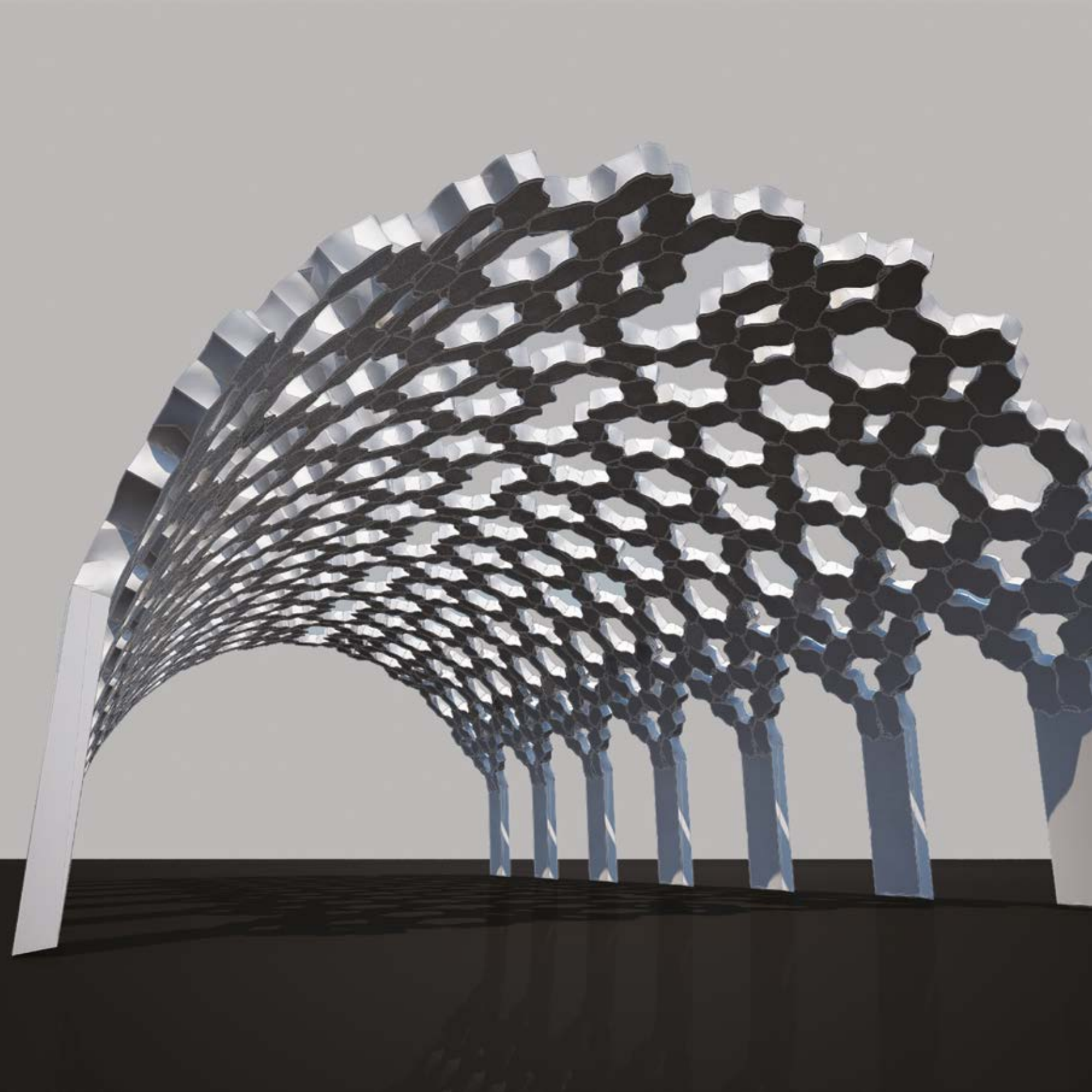
7. Momento flettente locale _ componente y (KNm/m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N/mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N/mm²)



La volta a botte è uno tra i sistemi più semplici e diffusi di copertura non piana, tipica dell'architettura mediterranea, utilizzata per coprire spazi più o meno ampi, di forma genericamente rettangolare. La volta a botte, che rientra nella grande categoria delle volte semplici, costituite cioè da superfici appartenenti ad un unico solido, a differenza delle volte complesse che sono costituite da superfici appartenenti a corpi solidi diversi, è un elemento tridimensionale ottenuto geometricamente dallo sviluppo di una superficie nello spazio, più precisamente dalla traslazione o rotazione di una curva direttrice (profilo dell'arco) lungo una retta generatrice.

In linea generale la volta a botte, che rientra nelle superfici coniche, nasce, come tutte le strutture voltate, per coprire edifici con struttura portante in muratura o pietra, pertanto essa stessa ne assume il medesimo impianto strutturale.

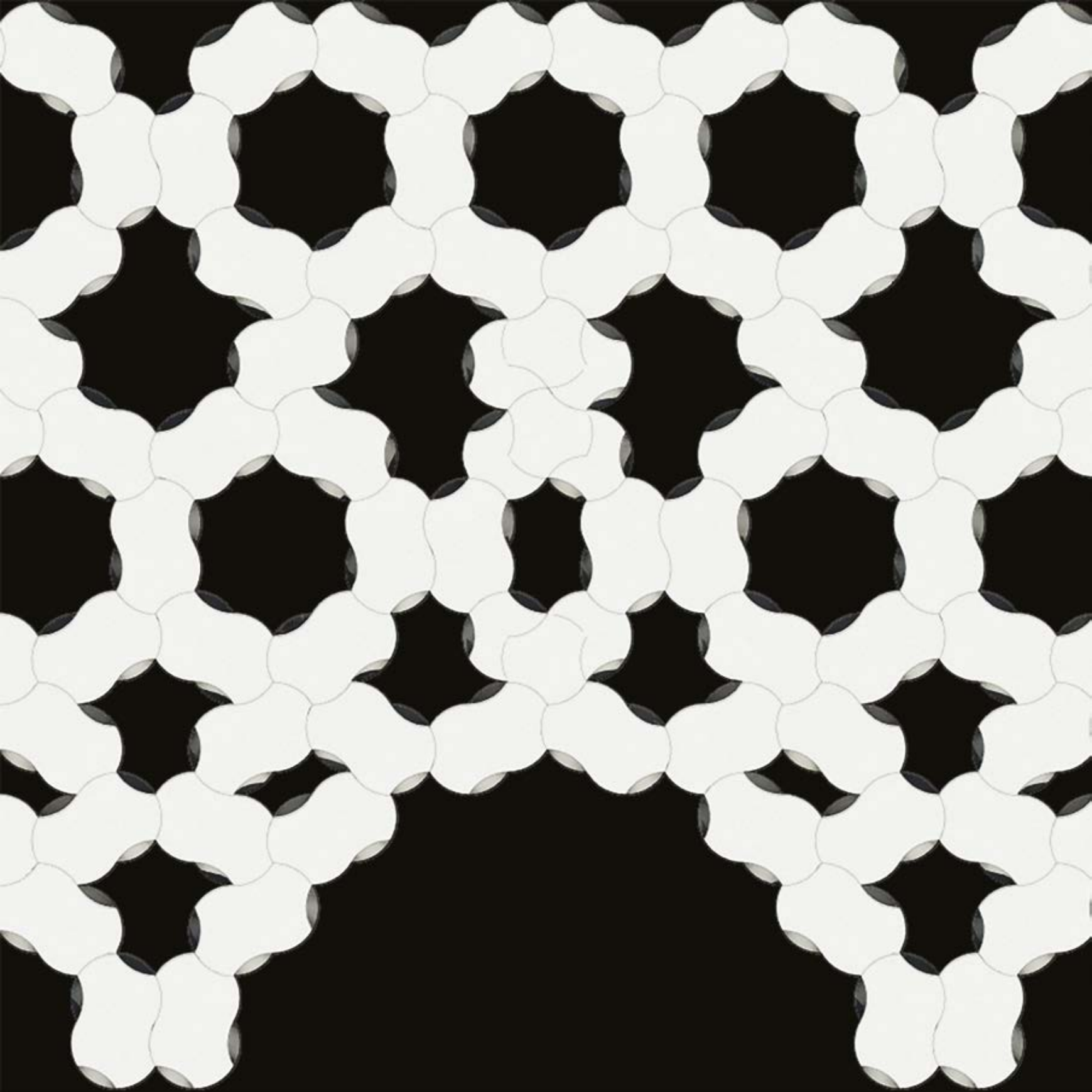
La scelta di una struttura voltata "standard" è giustificata dalla volontà di non subordinare la genesi e la combinazione grafica degli elementi costituenti in pietra, al comportamento meccanico di membrane complesse ed evidenziare, quindi, le caratteristiche del concio, sia nella forma che nella successiva commistione. Con semplici considerazioni geometriche, al fine di ottenere una volta con luce di circa 8 m e lunghezza di circa 15 m e 7 appoggi per due lati per un totale di 12 aperture, si è optato di procedere, inizialmente, nella creazione in pianta della superficie necessaria alla futura modellazione; considerando un poligono di 17x15 m, compresi i piedritti di circa 2 m, si è proseguito all'assemblaggio dei conci, seguendo uno schema che presenta una configurazione diversificata che si intensifica verso gli elementi di scarico a terra, ottenendo la conformazione desiderata, che successivamente è stata importata su 3ds Max e modellata.

La morfogenesi del concio è stata concepita perseguendo il principio dell'osteomorfia delle giunzioni, che permette di ottimizzare la ripartizione delle sollecitazioni, per conferire solidità al complesso strutturale. La ricerca formale per tale scopo si sviluppa considerando elementi geometrici quali un esagono regolare, una

circonferenza e la loro simbologia nell'arte islamica. In geometria statica l'esagono rappresenta il 6, come 6 sono le superfici di un cubo, cubo che rappresenta l'essere umano evoluto da pietra grezza a pietra atta alla costruzione o "pietra angolare". Il cerchio, oltre ad essere il rappresentante del cielo e del divino, è l'elemento fondamentale necessario all'attuazione della Simmetria, cioè l'esatta ripetibilità di un disegno geometrico all'interno di una forma perfetta (il cerchio), principio cardine dell'arte islamica. La prima parte, in geometria piana, elaborata con un programma CAD, è iniziata con il disegno di un esagono regolare (diagonale dei vertici opposti parallela all'asse x) iscritto in un cerchio di raggio 20 cm, duplicata l'immagine è stata traslata lungo la direzione dell'asse x di una quantità pari al raggio. Si ottiene così un esagono irregolare avente due lati paralleli equivalenti alla misura del diametro e due cerchi intersecati, la cui distanza dei centri è di un diametro e mezzo. Successivamente, degli 8 archi di circonferenza individuati dai punti di contatto con l'esagono, solo 4 sono stati specchiati, in modo alternato rispetto ai lati del poligono irregolare, ottenendo una configurazione concavo-convessa con lunghezza massima di 60 cm. Per sviluppare il solido si è considerata la figura enantiomorfa di quella raggiunta, sovrapposta ed elevata rispetto alla principale di 20 cm; eseguito il comando "loft" si ottiene un elemento tridimensionale caratterizzato, in alzato, da giunzioni a doppia curvatura alternamente invertite. La qualità chirale dell'intero oggetto costituisce un aspetto peculiare, in quanto conferisce versatilità e adattabilità nell'elaborazione di numerose configurazioni possibili d'incastro degli elementi. Analizzando la struttura degli schemi ornamentali islamici, in particolare gli affascinanti arabeschi, si è cercato di sfruttare la conformazione del concio per evocare, attraverso le linee sinuose, gli elementi calligrafici delle decorazioni arabe e attraverso la disposizione ritmica di figure simmetriche, i motivi geometrici.

Ideato il concio e creato il pattern su AutoCAD, è stato importato in 3ds Max e deformato per tassellare la superficie in oggetto. Una volta selezionato il pattern si va nella sezione dedicata ai modificatori, nella categoria "parametric deformers", dove si seleziona il comando "Bend" (piega) per la modellazione. Una volta cliccato il tasto "Bend", il programma ci darà la possibilità di scegliere l'angolo di curvatura della volta desiderata, che per una volta a botte standard è di 180°, mentre, nel nostro caso, è stata ruotata di 200° per una migliore stabilità della struttura in modo tale da far cadere la risultante delle pressioni all'interno del nocciolo centrale d'inerzia di ciascuna sezione in maniera che il concio risulti compresso, che le tensioni non superino i limiti di resistenza del materiale e ottenere allo stesso tempo una configurazione rettilinea dei piedritti.

Il materiale scelto è la "Pierre du Gard", un tipo di pietra calcarea proveniente dalle cave della Provenza, principalmente nei territori di Vers-Pont-du-Gard, ed è caratterizzata da un colore giallo paglierino, con una grana molto compatta e grossolana.



Numerosi esempi di opere costruite con questo materiale, li troviamo infatti nel Sud della Francia:

- Il ponte del Gard, famoso acquedotto romano
- La cantina per il monastero di Solan, la Bastide d'Engras (2003-2007) e la cantina a Vauvert (1998), costruite dall'architetto francese Gilles Perraudin.

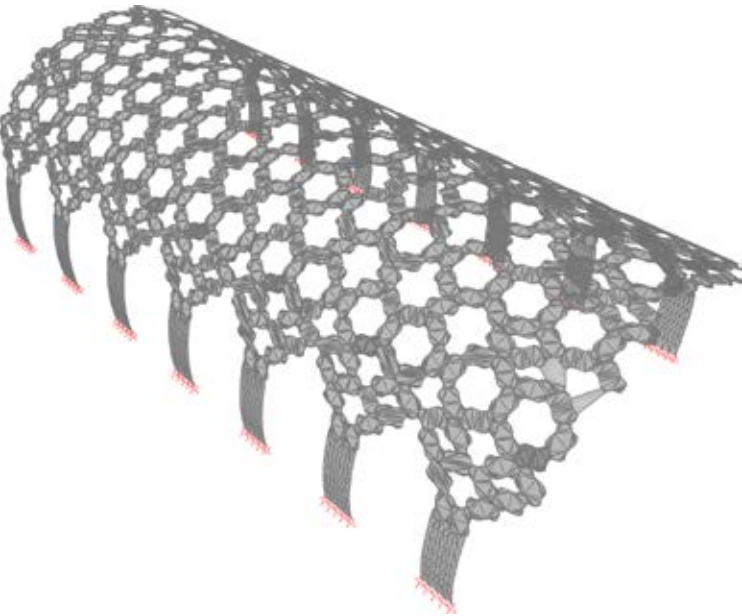
Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Provenza	"Pierre du Gard"	2747	2356	32	615600	0.33	Ambrato

Per il completamento della struttura voltata è stata prevista una rete di armature all'estradosso, post tese, predisposte trasversalmente con un passo di circa 2,5 m.

Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura minimo (kN)	Carico rottura massimo (Kg)
303 fili 8x25FV -anima metallica parallela -crociata destra, crociata sinistra	2160	22.0	1.17	2.22	484.0	49360

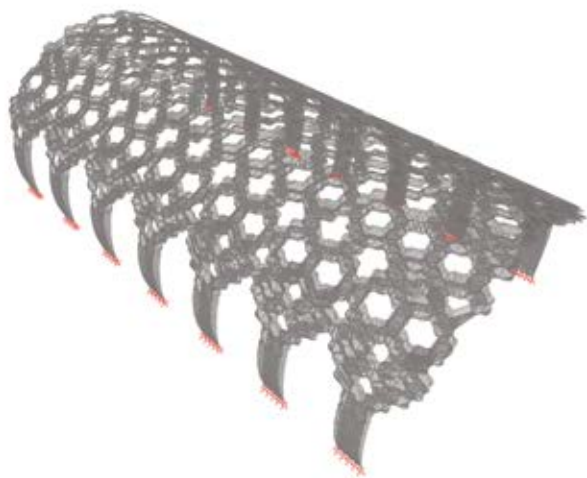
Per effettuare l'analisi, con il programma SAP2000, delle reazioni della struttura sollecitata da differenti condizioni di carico, è stato necessario modificare la volta 3d in una configurazione bidimensionale. Per questo procedimento è stato necessario l'utilizzo del programma Rhinoceros, con il quale, attraverso il comando "Mesh", è stato possibile ridurre ogni singolo concio 3d ad una schematizzazione 2d, ottenendo una vasta rete di triangoli. La struttura della volta così modificata è stata importata nel programma SAP2000 , essa presenta in totale 14 elementi di appoggio che, per l'analisi delle sollecitazioni, sono stati assimilati a delle cerniere. Per poter procedere nell'attribuzione dei vincoli esterni si sono selezionati tutti i punti di appoggio, successivamente dal menu a tendina "Assign" si è selezionato "Joint" e scelto il vincolo di cerniera. La proprietà della struttura è stata modificata in "Shell" (menu a tendina "Define Area section"), ovvero elementi bidimensionali di spessore limitato o elementi solidi bidimensionali con comportamento a piastra, membrana o completo. Successivamente è stata attivata l'opzione "Thick" che permette di considerare l'influenza delle deformazioni a taglio negli elementi. "Bending" (comportamento flessionale) e "Membrane" (comportamento membranale) sono disaccoppiati solo per permettere eventuale modellazione dei diversi comportamenti, caratteristici delle piastre, il valore attribuito ad entrambi è di 0,2 m.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

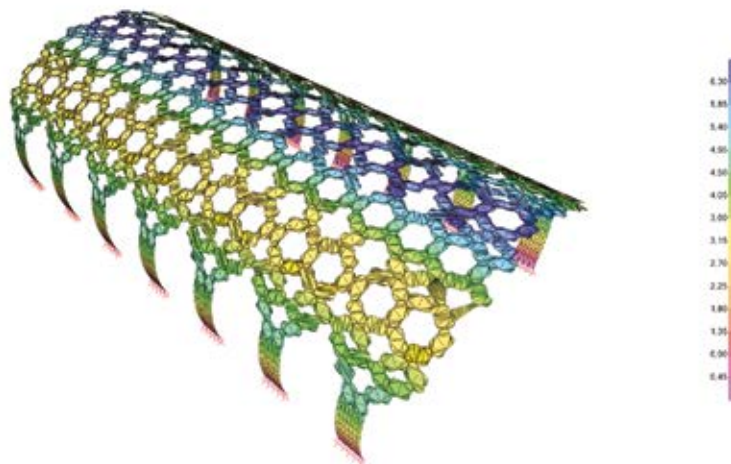


1. Mesh

Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	37
Appoggio 2	43
Appoggio 3	52
Appoggio 4	59
Appoggio 5	52
Appoggio 6	43
Appoggio 7	37



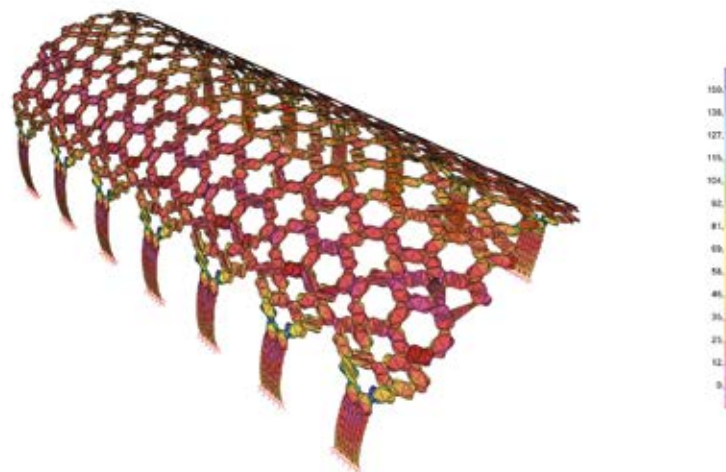
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



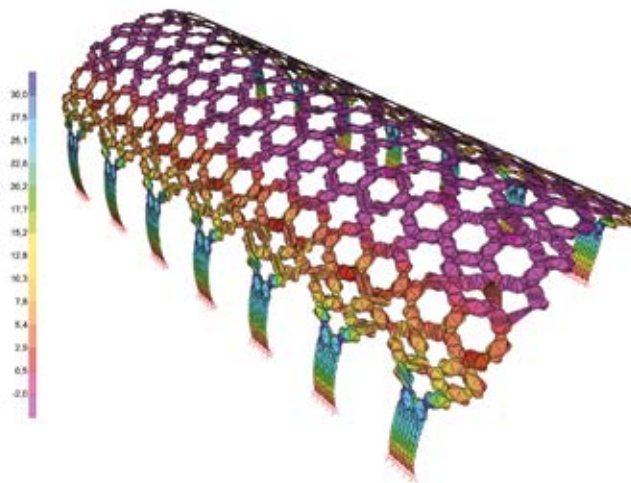
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN/m)



5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN/m)



6. Momento flettente locale _ componente x (KNm\m)



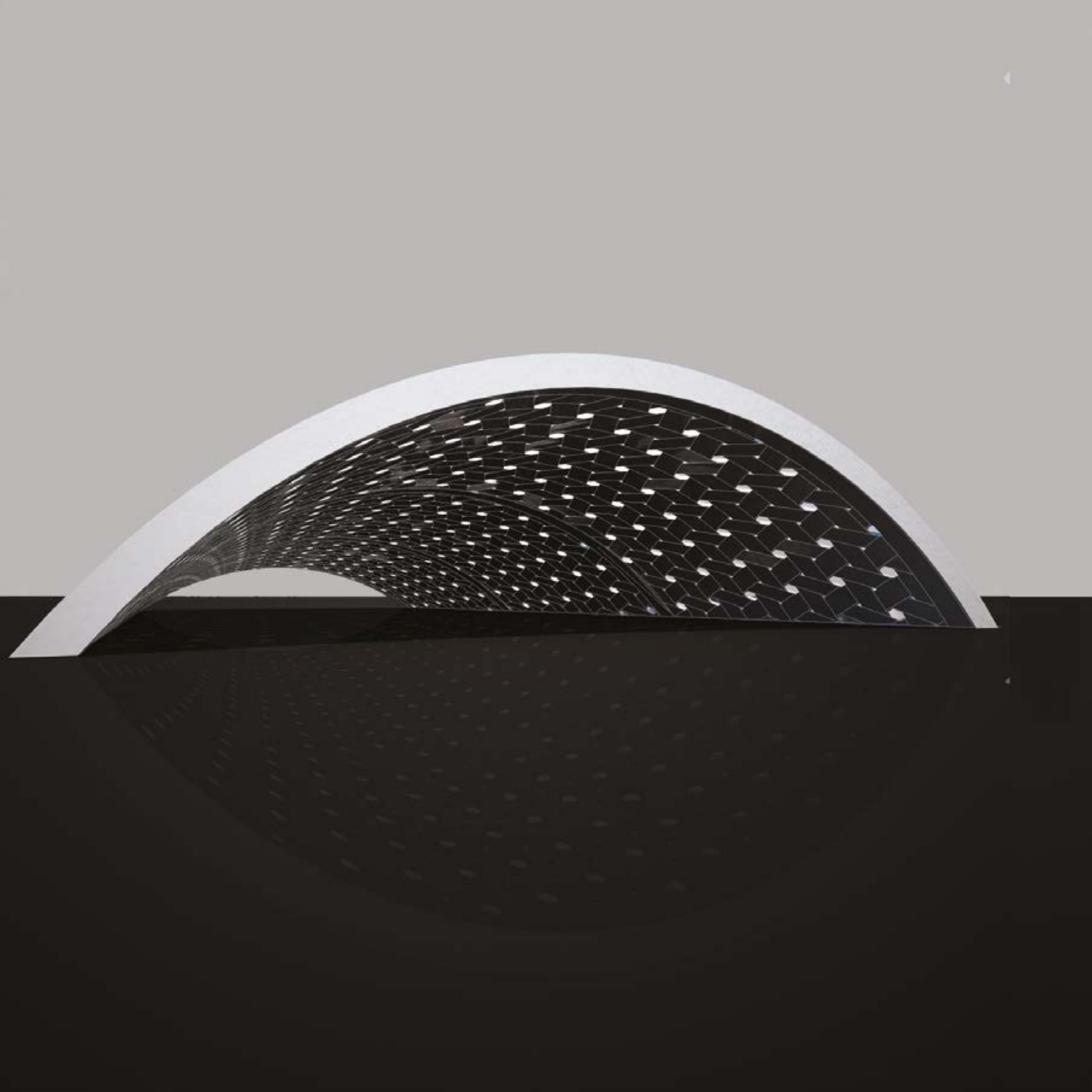
7. Momento flettente locale _ componente y (KNm\m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N\mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N\mm²)



La struttura progettata è composta da quattro archi a sesto ribassato che sorreggono tre porzioni di volta, anch'essa a sesto ribassato. La particolarità di questa soluzione sta nel fatto che, comunque si consideri una sezione di volta lungo il suo sviluppo rettilineo, il rapporto tra freccia e raggio risulta essere sempre minore di uno; di conseguenza il centro della circonferenza generatrice starà sempre al di sotto della linea d'imposta, che quindi non coincide con il diametro (come avviene invece nel tutto sesto).

La base della volta è di forma trapezoidale, soluzione che, insieme al sesto ribassato, comporta una graduale diminuzione delle dimensioni degli archi, sia in altezza che in larghezza; si va quindi dall'arco maggiore che misura 20 metri di larghezza e 5 di altezza, posizionato in corrispondenza della base maggiore del trapezio, fino a quello minore, coincidente con la base minore del trapezio, e le cui larghezza e altezza sono invece di 14 metri e 2,70 metri. Questa conformazione geometrica, per cui sia i piani laterali che quello superiore convergono ad uno stesso punto di fuga, comporta una percezione più profonda dello spazio voltato, che quindi parrebbe ad un ipotetico spettatore più lungo dei suoi effettivi 32 metri (Palazzo Spada - Borromini).

Il software utilizzato per la modellazione della volta è stato AutoCAD; tramite il comando "LOFT", assegnando la sezione iniziale e quella finale è stata generata la superficie di riferimento, alla quale sarà in seguito applicato il pattern studiato.

La geometria di base scelta per la realizzazione del pattern è l'esagono. Inizialmente il lavoro è stato svolto in due dimensioni, estendendo i lati della figura piana e facendo corrispondere a ciascuno di questi un parallelogramma; successivamente si è passati alla modellazione in tre dimensioni. A ciascun parallelogramma si è fatto corrispondere una stessa figura, traslata sull'asse Z, di dimensioni tali che, una volta modellato il concio base costituente il pattern, l'angolo tra le facce del solido ottenuto fosse tale da assicurare una perfetta aderenza tra le stesse, e quindi un adeguato comportamento da un punto di vista statico. Particolare

attenzione è stata posta nella scelta delle dimensioni dei lati dei parallelogrammi, inferiori e superiori, dato che si è visto che, al variare di queste, era considerevole la differenza tra i risultati ottenuti nel successivo sviluppo tridimensionale del pattern nel suo insieme. Tutto ciò al fine di ottenere un disegno della volta caratterizzato da pieni e vuoti, quest'ultimi di forma esagonale e triangolare e di dimensioni differenti, con i primi più grandi dei secondi. Anche per la modellazione tridimensionale del pattern il software utilizzato è stato AutoCAD, tramite il comando "LOFT", assegnando i parallelogrammi come sezioni iniziali e finali.

Il risultato a cui si è giunti è stato così un pattern esagonale composto da sei singoli conci.

Prima dell'applicazione del pattern alla volta, si è provveduto alla stesura in piano del singolo pattern ripetuto in serie, avendo come riferimento lo sviluppo in piano della volta stessa, di forma trapezoidale. Successivamente, tramite i softwares Rhinoceros e Grasshopper, si è assegnata la geometria multipla di base alla superficie di riferimento per la volta, precedentemente realizzata in AutoCAD. Grazie all'impiego di questi softwares è stato possibile deformare tridimensionalmente ogni singolo pattern in modo che si adattasse alla superficie e che mantenesse dimensioni ottimali per una concreta realizzazione in pietra della volta progettata.

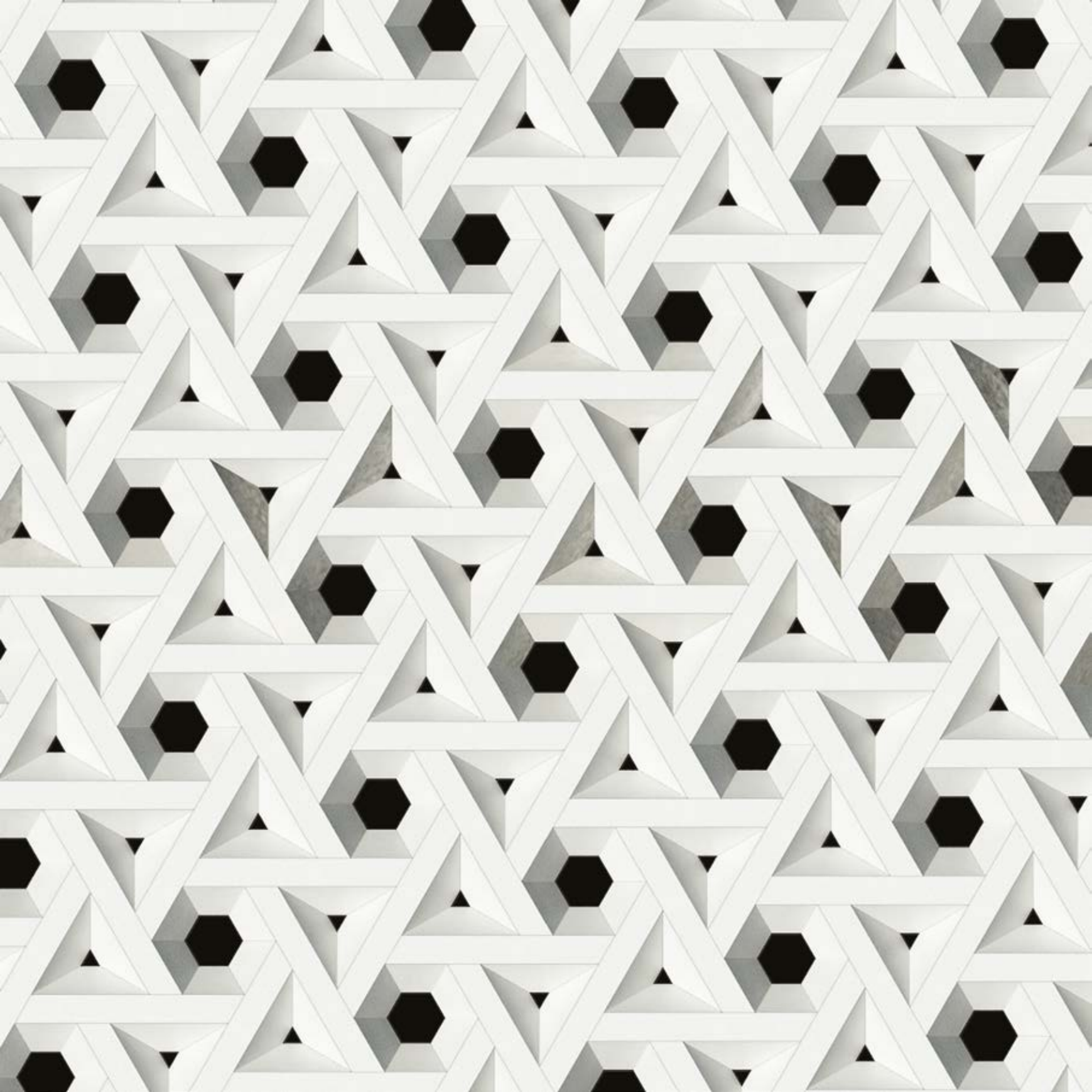
I conci dei quattro archi presenti nel progetto sono stati studiati in modo tale da assicurare una perfetta corrispondenza con i conci adiacenti della volta; a tale scopo sono stati sagomati i primi in modo da realizzare l'incastro con i secondi.

Il materiale scelto per la realizzazione della struttura è il Bronzetto di Apricena, pietra calcarea caratterizzata da buona resistenza a compressione, buona lavorabilità e durata, estratta dalle cave presenti nell'area del comune pugliese dal quale prende il nome.

Il Bronzetto di Apricena, a seconda del tipo di lavorazione a cui è sottoposto, può presentare tonalità oscillanti tra il beige, l'avorio ed il rosato, con frequenti venature il più delle volte sottili e sinuose, che ne caratterizzano la superficie.

Da un punto di vista strutturale, gli elementi portanti della struttura sono i quattro archi che sorreggono le tre porzioni di volta. Per la loro realizzazione, l'uso della pietra, materiale che, come si è detto, ha una buona resistenza alla compressione, ha posto la necessità di inserire una armatura di acciaio al fine di evitare che gli sforzi di trazione e quelli di flessione portino la pietra stessa a rottura. Da un punto di vista tecnico si è scelta, a tale proposito, una soluzione ideata e brevettata da Viollet Le Duc nel XIX secolo. Tale soluzione prevede una barra metallica posta all'intradosso dell'arco, che quindi ripropone il sesto ribassato, con piastre metalliche applicate alla barra stessa a distanza tale da poter collocare tra loro i conci di pietra che compongono l'arco; una soluzione del genere permette inoltre di realizzare l'arco senza l'uso delle centine.

È stato infine realizzato uno studio preliminare del progetto da un punto di vista strutturale, importando il modello in SAP2000, al fine di quantificare le sollecitazioni presenti nella struttura, in relazione alle caratteristiche meccaniche del materiale scelto per la realizzazione e per l'armatura.



Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Apricena - Poggio Imperiale	Pietra di Apricena - Bronzetto di Apricena	2710	2670	35	438000	0.2	Beige tendente al bronzo

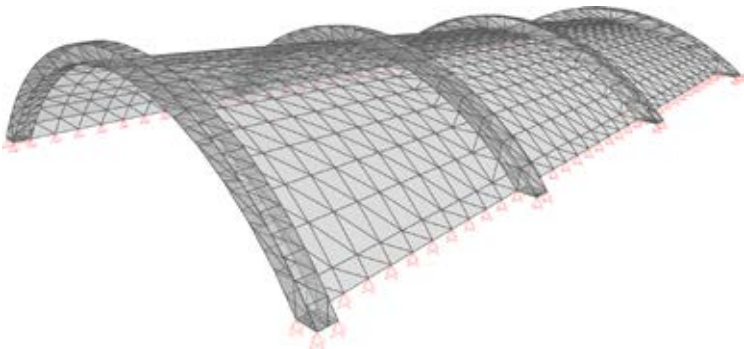
Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Spessore elemento "pala" (mm)	Peso per metro (Kg)	Resistenza a rottura (N/mm²)
Profilati metallico con sezione (500x50)	355	10	170	510

Per fare ciò è stato creato un modello semplificato della volta progettata, riconducendola ad una superficie opportunamente suddivisa in triangoli che ne approssimino in modo adeguato la forma e che permettano uno studio più agevole in SAP2000.

Per fare questo è stato utilizzato il software Rhinoceros, creando una mesh e suddividendola in triangoli; successivamente tramite il comando "esplodi" è stato possibile ottenere i singoli triangoli in "Faccia 3D".

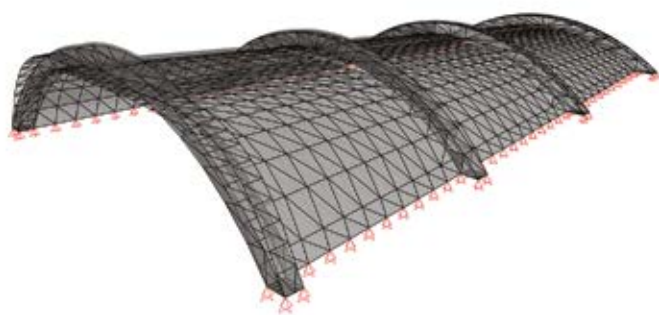
Il file così realizzato è stato importato nel software per il calcolo strutturale. Si è poi passati all'inserimento dei dati relativi alle caratteristiche della pietra scelta, il Bronzetto di Apricena, così come riportati in precedenza; successivamente sono stati impostati i parametri riguardanti la sezione tipo, che ha uno spessore di 20 cm. Infine è stata definita la combinazione di carico agente sulla struttura che tiene conto del carico derivante dal peso stesso della struttura e di quello accidentale (carico della neve sulla struttura, ipoteticamente considerando Roma, fascia climatica D, e quindi pari a 0,48 KN/mq) e sono stati applicati i vincoli esterni(cerniere cilindriche, ovvero dispositivi meccanici che permettono al punto vincolato la sola rotazione attorno all'asse x e non permettono alcuna traslazione, né in verticale né in orizzontale) nei punti in cui gli archi scaricano a terra.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

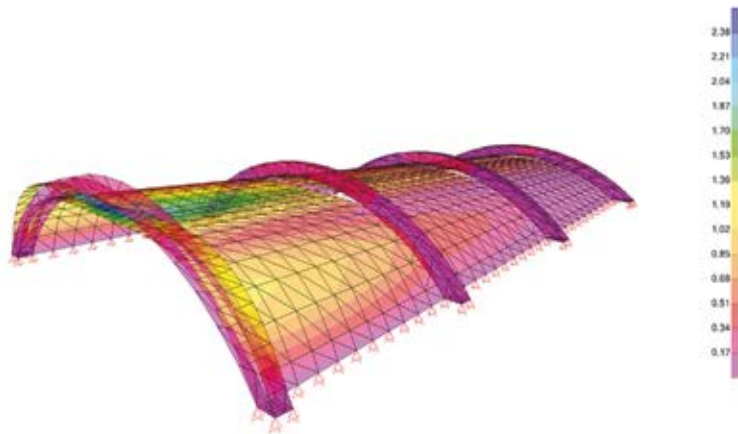


1. Mesh

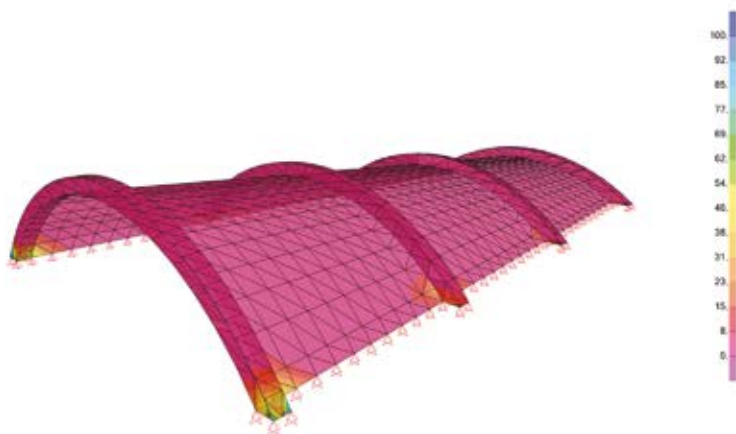
Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	54
Appoggio 2	64
Appoggio 3	64
Appoggio 4	54



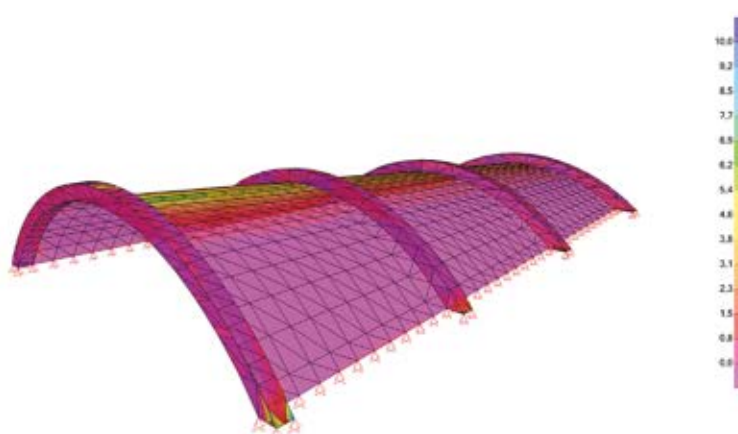
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



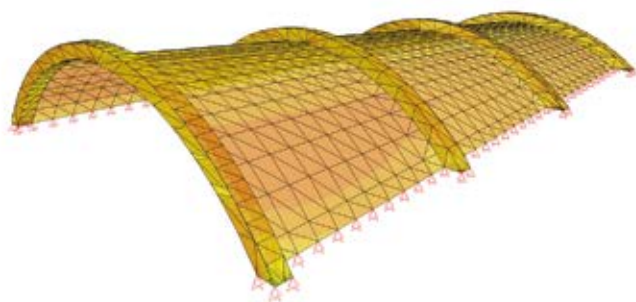
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



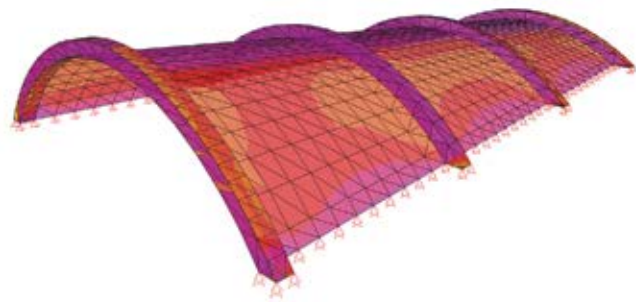
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN/m)



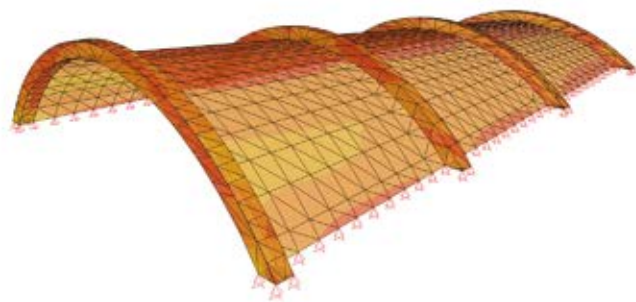
5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN/m)



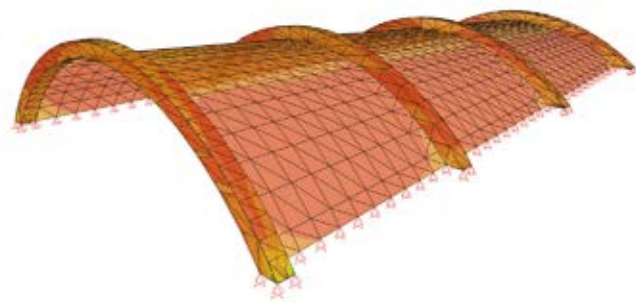
6. Momento flettente locale _ componente x (KNm\m)



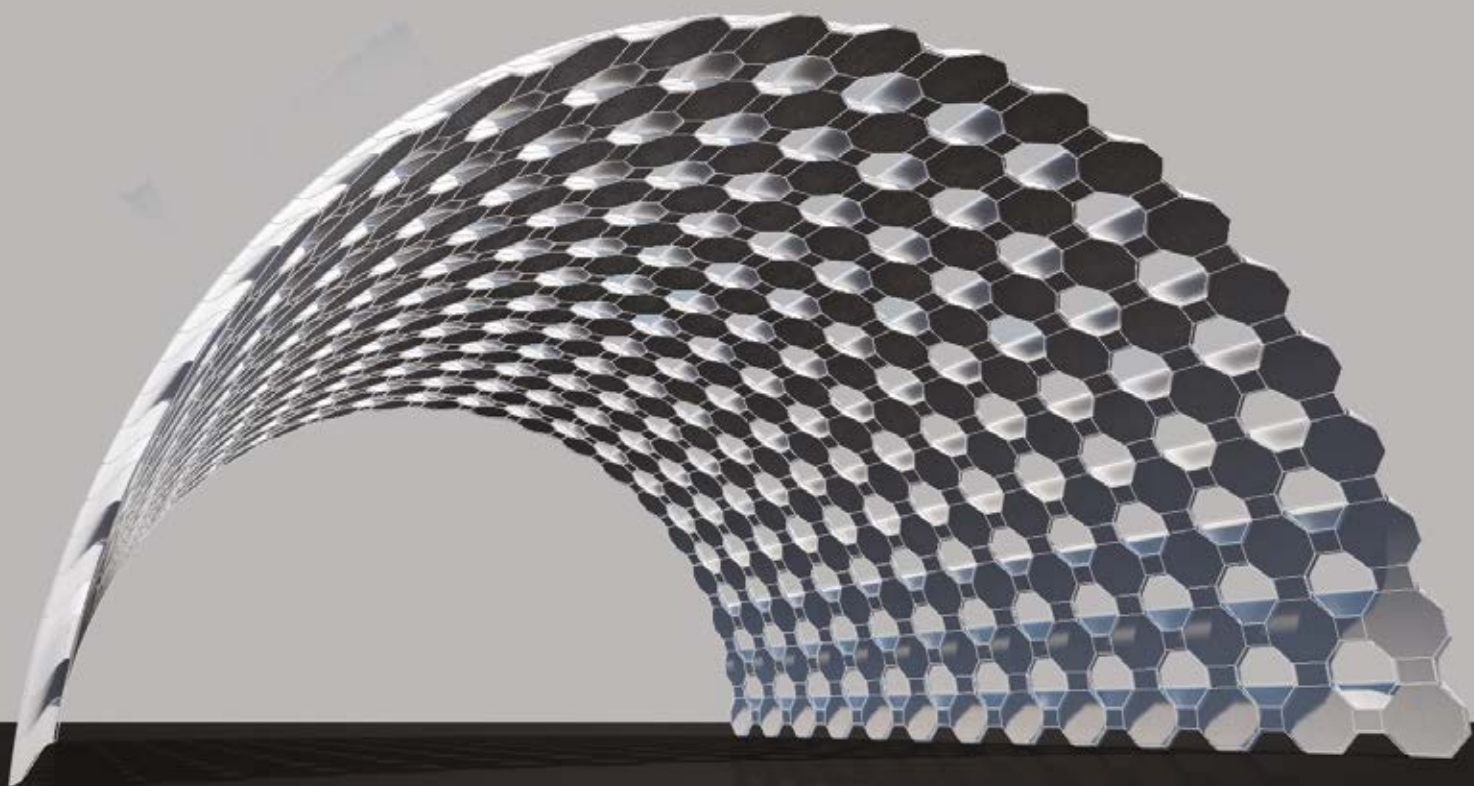
7. Momento flettente locale _ componente y (KNm\m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N\mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N\mm²)



La figura geometrica di riferimento utilizzata nel nostro progetto è un arco a tutto sesto a profilo circolare, tagliata lungo la direttrice da un piano parallelo alla superficie. Definiamo quindi la volta a botte come la traslazione di un arco lungo la direttrice ad esso ortogonale. Essendo la circonferenza una figura nota, possiamo descrivere la curva analiticamente come superficie parametrica, calcolando tramite alcuni software le grandezze che ne caratterizzano il comportamento statico strutturale.

Negli anni la figura della circonferenza ha sempre fornito numerosi spunti di particolare rilevanza nell'architettura, soprattutto italiana; nella storia infatti, è stata più volte ripresa come distribuzione planimetrica o come schema in alzato.

L'arco si declina in forme diverse, che rispecchiano, in genere, le varie civiltà architettoniche che lo applicano. Il mondo classico, privilegiò l'arco a tutto sesto, che già gli etruschi utilizzavano e che divenne uno degli elementi caratterizzanti dell'architettura romana.

Avendo preso come riferimento la figura circolare e volendo progettare uno spazio voltato, si è pensato di utilizzare solo una porzione della curva originaria, tranciando dunque la figura iniziale secondo la direzione del diametro, ottenendo così una semicirconferenza.

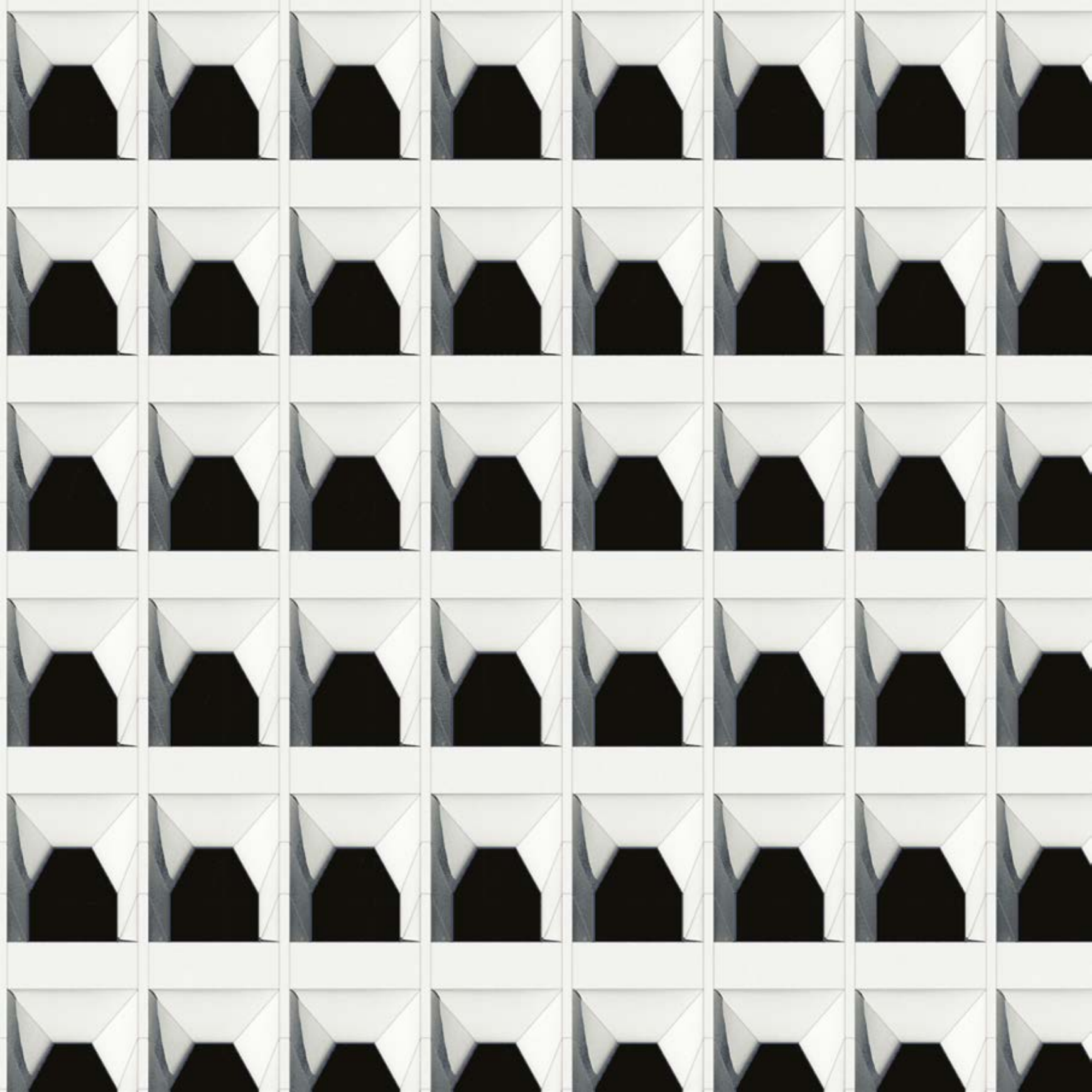
L'arco fornisce l'opportunità di dislocare il peso ai lati, dando vita a luci più estese.

Come per la curva generatrice, anche l'ideazione del pattern deriva da un'analisi storica architettonica delle volte, che hanno caratterizzato il nostro territorio e che continuano ad essere un'importante fonte di ispirazione per le nuove architetture. Tra gli esempi di particolare rilievo possiamo annoverare nel corso del tempo la copertura del Pantheon, la Basilica di Massenzio, le cupole rinascimentali e barocche per arrivare infine alla lettura in chiave moderna delle opere in calcestruzzo precompresso di Pier Luigi Nervi che sfrutta le nervature della volta.

La modellazione del pattern è stata dunque finalizzata alla creazione di nervature inclinate, che evidenziassero una tessitura

a maglia rettangolare. Per la creazione del concio si è partiti dalla sovrapposizione in pianta di tre figure rettangolari di differenti dimensioni (60x40cm e 35x20cm e 50x40cm) fino a creare, attraverso la modellazione tridimensionale, un prisma dello spessore di 20cm con superfici non perpendicolari tra loro che agevolasse l'accostamento in serie dei vari elementi. Al fine di migliorare ulteriormente l'aderenza tra i singoli conci gli spigoli della faccia superiore sono descritti da porzioni di ellisse; in questo modo ad una superficie concava corrisponde sempre una superficie convessa. Le nervature così ottenute presenteranno un andamento sinuoso che caratterizza la trama dell'intradosso della volta, caratterizzata da fori ottagonali. L'estradosso invece è caratterizzato da due direttrici di diverso spessore e forma che ripetendosi nello spazio danno vita ad una scacchiera, creando negli incroci una alternanza di pieni e vuoti, un gioco di ombre tra le diverse direzioni.

La pietra d'Istria è una roccia compatta calcarea microcristallina con bassa porosità, proveniente appunto dalla penisola istriana. Appena estratta dalla cava appare candida (con sfumature variabili dal rosa al verde chiaro), ma con l'esposizione agli agenti atmosferici tende ad assumere un colore grigio pallido. È caratterizzata da alta densità e bassa porosità, alta resistenza alla compressione (1350 kg/cm²) e alta velocità di trasmissione del suono. Nonostante la sua elevata resistenza alla corrosione salina, questo calcare è soggetto a fenomeni di alterazione in seguito a solfatazione, processo comune a molte rocce a composizione carbonatica esposte all'anidride solforosa presente nell'aria inquinata. Viene estratta principalmente nelle cave di Montauro nella regione di Rovigno, da cui sono stati estratti 700.000 m³ di pietra. Altre aree di estrazione sono nei pressi delle città di Parenzo e Pola. La pietra d'Istria è strettamente legata all'urbanizzazione della città di Venezia. La sua importazione, specialmente dalla cava di Orsera, inizia con l'annessione alla Repubblica di Venezia delle città istriane nel 1267-1335. I veneziani l'hanno utilizzata ampiamente nelle strutture e rivestimenti di pavimenti, ponti, canali, case, chiese, palazzi, fino alla fine del XVIII secolo. In scultura, la pietra d'Istria è stata utilizzata in particolare durante il periodo gotico al posto delle molte opere in marmo di periodo veneto-bizantino.



Tuttavia, solo all'inizio del XIV secolo si è scolpito in pietra d'Istria un leone alato, simbolo della potenza veneziana. La scoperta di una vena di pozzo a Calcide mostra come la pietra d'Istria lavorata dagli scalpellini veneziani fosse esportata sin nel Levante.

Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Rovigno (HR)	Pietra d'Istria	2694	2497	37	33650	0,27	Beige

Le barre d'armatura, inserite nell'intradosso della volta, contribuiscono alla stabilità e alla solidità della struttura. La tipologia di fune di acciaio scelta è quella costituita da un'anima metallica parallela ad otto trefoli circostanti.

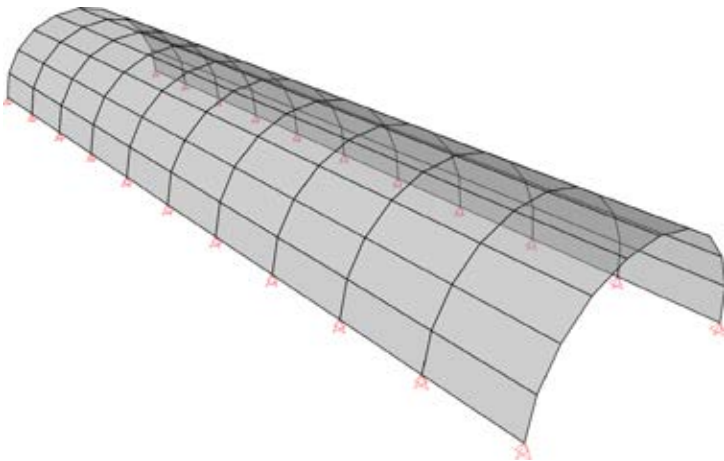
Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura minimo (kN)	Carico rottura massimo (Kg)
anima metallica parallela ad otto trefoli circostanti	2160	20.0	1.07	1.82	387.0	40500

Per realizzare il pattern, il software utilizzato è stato AutoCad, che ci ha permesso di modellare il concio di base, utilizzando una pianta ottagonale e una a base rettangolare ed eseguendo il comando "LOFT" tra di esse. Il "LOFT" ripetuto tra due sezioni di base diverse ha creato dei piani inclinati che permettono ai conci di reggersi gli uni con gli altri e rendere la struttura autoportante.

Una volta realizzato il pattern, prima di applicarlo alla volta, si è provveduto alla stesura di quest'ultimo in piano, avendo come riferimento le dimensioni della volta stesa sul piano stesso. Il passo successivo è stato l'utilizzo di softwares di modellazione 3D quali Rhionceros e Grasshopper, ai quali, assegnata la geometria multipla di base alla superficie di riferimento per la volta, il pattern è stato adattato.

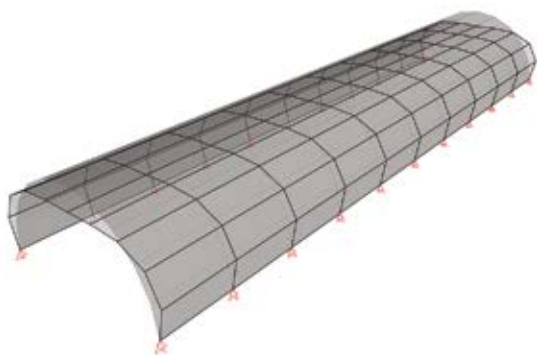
Per quantificare le sollecitazioni presenti all'interno della struttura in relazione anche al materiale è stato utilizzato Sap2000, importando il modello da AutoCAD; modello semplificato, ricondotto ad una superficie, opportunamente discretizzata in triangoli che facilitino il compito del software. Questo è stato possibile grazie alle mesh create con Rhinoceros e successivamente tramite il comando "esplodi" è stato possibile ottenere la discretizzazione in "3D Faces".

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

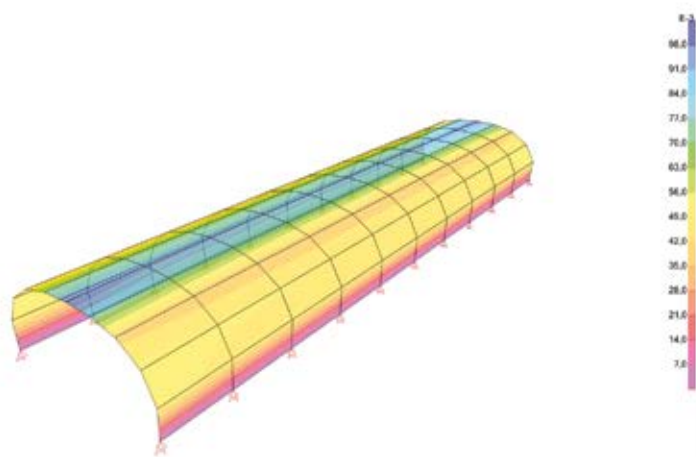


1. Mesh

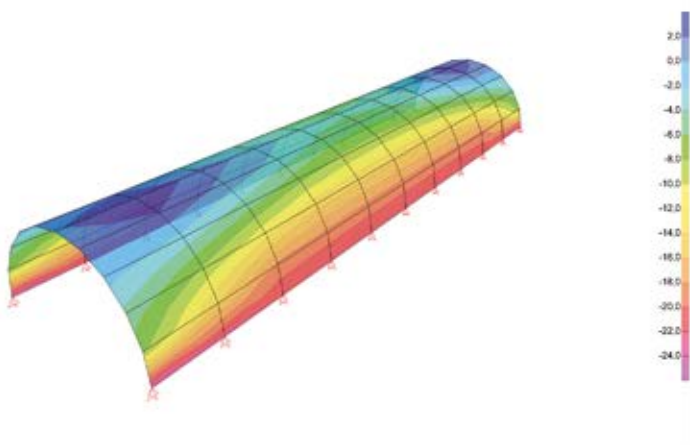
Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	61



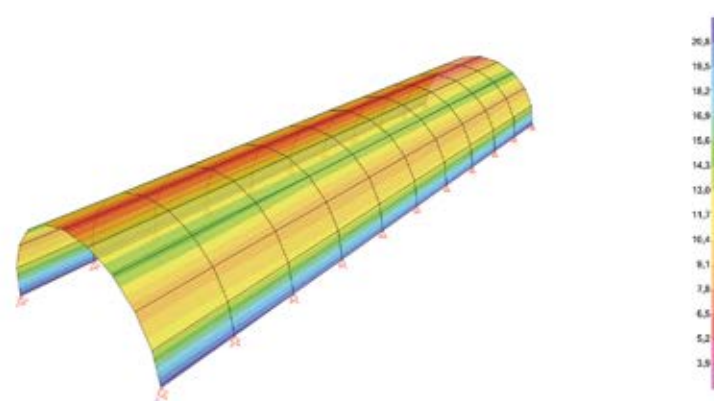
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



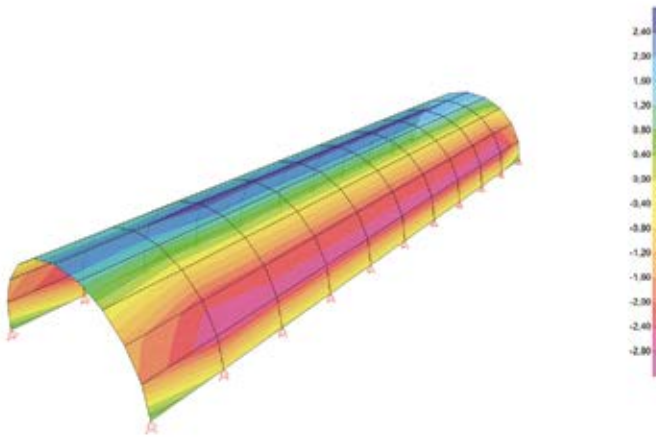
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



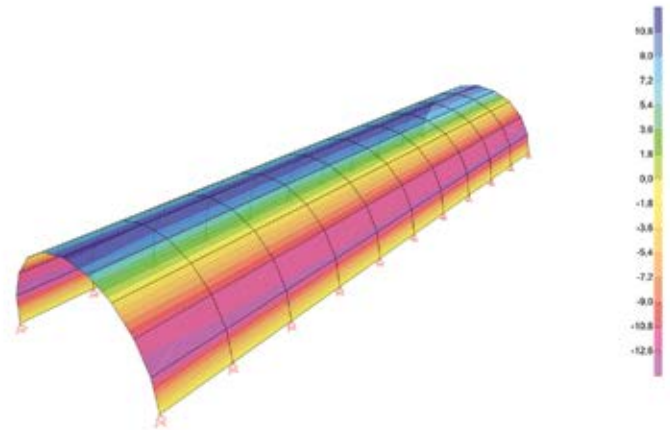
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN\m)



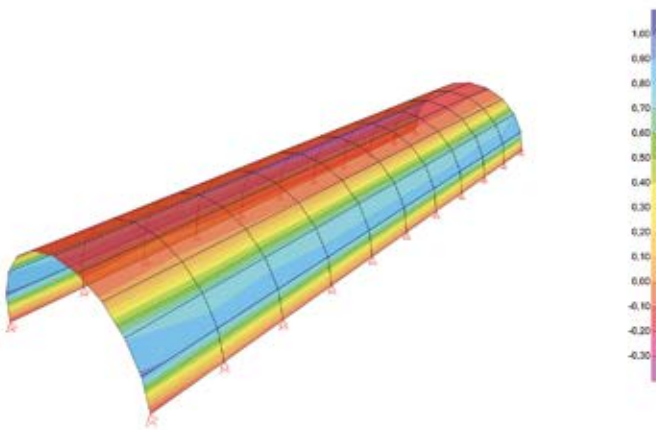
5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN\m)



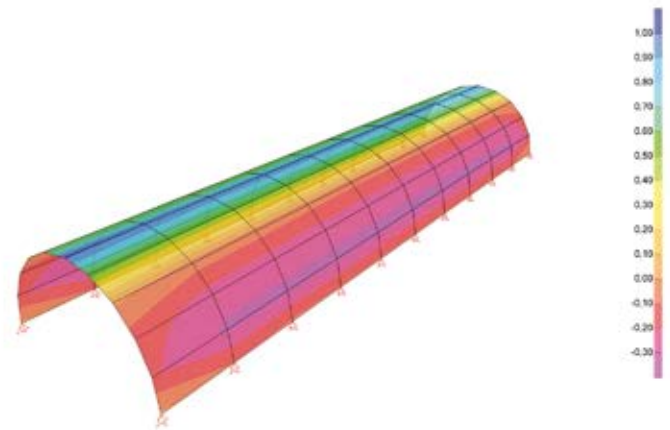
6. Momento flettente locale _ componente x (KNm/m)



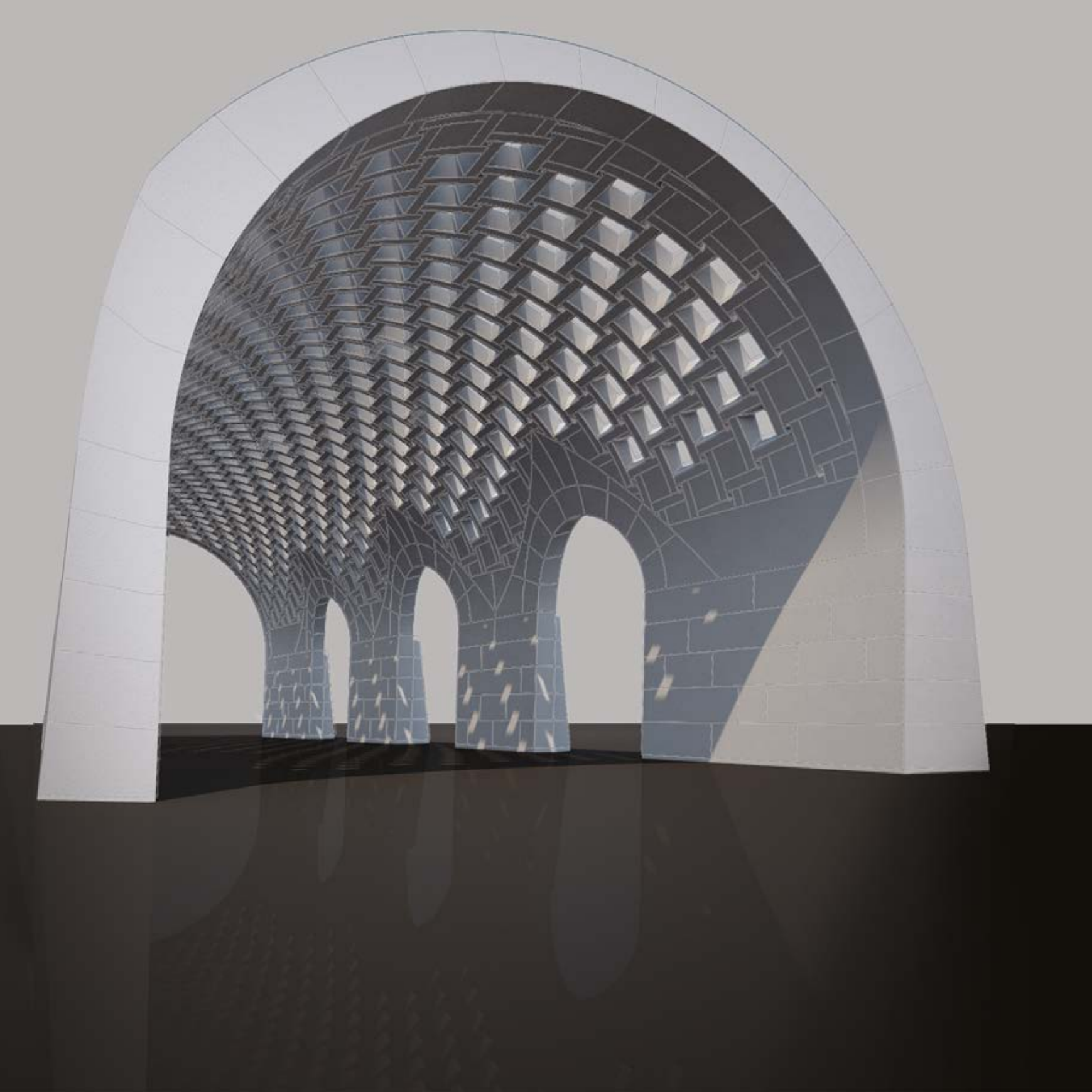
7. Momento flettente locale _ componente y (KNm/m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N/mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N/mm²)



La volta a botte fa parte delle superfici cilindriche (cioè prodotta dal movimento rigido di una retta), ed è generata dalla rotazione di una retta intorno a un asse di rotazione, creando in questo modo una superficie semicilindrica che poggia su due muri di spalla.

Le volte a botte, fino all'età contemporanea, hanno avuto una grande importanza nell'architettura, perché consentivano di coprire grandi ambienti con materiali di modeste dimensioni (mattoni, blocchi di pietra, ecc.). Queste strutture fiorirono soprattutto in età romana come naturale derivazione dell'arco a tutto sesto: mentre quest'ultimo consentiva la delimitazione di aperture nei muri, la volta consentiva la copertura degli ambienti. La volta a botte in esame è stata realizzata in Rhinoceros: attraverso il comando "Sweep 1 binario" è stata creata la superficie della volta, disegnando una retta generatrice lunga ventitré metri e un arco direttore di raggio quattro metri. Poi con il comando "Offset" la superficie è stata trasformata in un solido, necessario per effettuare le operazioni booleane.

Per creare le aperture ad arco laterali sono stati modellati tre semicilindri con diametro di tre metri. Questi sono stati intersecati ortogonalmente alla volta principale con un passo tra di loro di tre metri e infine, tramite delle operazioni booleane di sottrazione, sono state fatte le aperture ad arco laterali.

Una volta che la superficie di base è stata ultimata, si è potuto procedere con la modellazione dei vari conci che formano la struttura a volta.

La cupola cassettonata del Pantheon di Roma è stato il riferimento principale per la composizione del pattern utilizzato.

In contrapposizione con il Pantheon, il pattern presenta dei "cassettoni vuoti" che consente alla luce naturale esterna di entrare all'interno, creando così una simbiosi tra spazio naturale e spazio artificiale, tra natura e uomo. I conci sono stati accostati in modo che i vuoti si alternino linearmente ai pieni, la superficie viene così divisa in obliquo dalle aperture.

Altro riferimento utilizzato è il tema michelangiolesco della torsione: questa è stata ottenuta sia grazie alle fasce oblique vuote

che scandiscono l'intera volta a botte creando un effetto a spirale, sia con i conci che sono stati modellati unendo un rettangolo con un altro rettangolo ruotato di circa 5°, creando in questo modo un effetto di torsione che si vede su tutta quanta la superficie della volta. Il vortice creato dai vuoti illuminati dall'ambiente esterno è equilibrato da un altro vortice, che sembra girare in senso opposto, creato dalle ombre dei conci del pattern proiettate a terra. La luce in alto si contrappone alle ombre in basso, realizzando uno spazio armonioso e bilanciato.

Il pattern è stato realizzato sempre in Rhinoceros disegnando la base inferiore rettangolare del concio di dimensioni 30x60 cm, e, a distanza di 20 cm, la base rettangolare superiore obliqua di dimensioni circa 15x70 cm e ruotata di 4,76°. Queste due basi sono state unite attraverso il comando "Loft" generando il concio base del pattern.

Dopo che il pattern è stato modellato, è stata estratta la superficie d'intradosso della volta creata in precedenza ed è stata sviluppata sul piano, cioè la superficie curva della volta è stata "stesa" orizzontalmente, mantenendo inalterate le dimensioni, e quindi l'area, e rendendo possibile l'applicazione del pattern in piano. Poi, sempre con il comando "Loft", sono stati modellati i conci che formano gli archi laterali (dello spessore di 50 cm), e i conci di raccordo tra pattern e archi.

Finita la modellazione in piano della volta a botte, tramite un codice creato in Grasshopper, sono stati selezionati tutti i conci modellati che compongono la "volta piana" e sono stati applicati sulla superficie curva di partenza, piegando i conci sopra la volta ma mantenendo inalterate le proporzioni degli stessi.

Per ultimo sono state modellate le spalle sulle quali poggia la volta a botte e gli archi rastremati principali, che all'imposta partono con lo stesso spessore dei muri di spalla e in chiave di volta si riducono fino allo spessore di 50 cm. Anche i muri di spalla sono rastremati: lo spessore della base inferiore è di circa 150 cm, mentre la superiore è di 110 cm. Inoltre le due basi dei muri di spalla non sono rettangolari, ma sono smussate in modo da raccordarsi con gli archi laterali spessi 40 cm.

Il materiale usato la Dolomia, pietra calcarea, è una roccia sedimentaria carbonatica costituita principalmente dal minerale dolomite, chimicamente un carbonato doppio di calcio e magnesio. Le sue varietà cromatiche, nella forma intrusiva, spaziano dal bianco al grigio, esaltate da pigmentazioni nere.

Le cave di Dolomia sono molto diffuse nei gruppi montuosi delle Dolomiti nel nord Italia.



Sito di estrazione	Denominazione commerciale	Peso (Kg/m³)	Massa volumica apparente (Kg/m³)	Angolo attrito (°)	Modulo elastico (Kg/cm²)	Poisson (ν)	Colore
Dobbiaco	Dolomia	2560	2657	38	538000	0.27	Bianco/Grigio

La volta a botte sarà armata con funi di acciaio plastificato del diametro di 24 mm e resistenza 1960 N/mm2. Queste saranno disposte con passo di 2,5 metri passanti per il baricentro delle sezioni dei conci.

Armatura interna	Resistenza (N/mm²)	Diametro fune (mm)	Diametro fili esterni (mm)	Peso per metro (Kg)	Carico rottura minimo (KN)	Carico rottura massimo (Kg)
2 trefoli e 112 fili (8 W/S zincata)	1960	24	1.43	4.121	1180	110600

Per il calcolo delle azioni sulla struttura è stato utilizzato il software di calcolo strutturale SAP2000. L'importazione del modello nel software è possibile solo se la volta è formata da superfici "3DFace" che vengono convertite in Shell.

Per la modellazione delle "3DFace" è stato utilizzato Rhinoceros, prima di tutto sono state estratte tutte le superfici dai solidi 3D che formano l'estradosso della volta, poi queste sono state trasformate in mesh con l'apposito comando "Mesh da superficie".

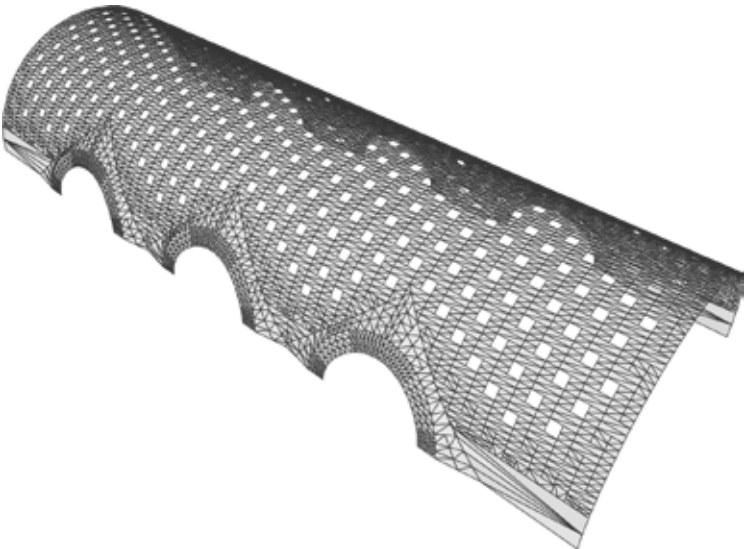
Il modello della volta formato da mesh è stato importato in AutoCAD e, tramite il comando "Esplodi", da queste sono state ricavate le superfici "3DFace".

Infine quest'ultimo modello è stato importato in SAP2000 rendendo possibile l'applicazione dei carichi, dei vincoli e il successivo calcolo delle sollecitazioni della struttura.

Come vincoli esterni, sono state applicate delle cerniere all'imposta dei sei archi laterali e degli archi principali della volta a botte. Inoltre sono state inserite altre cerniere sulla linea d'imposta della volta in corrispondenza dei conci rastremati che sono di passaggio tra il pattern e gli archi laterali.

In SAP2000, alla Shell è stato impostato come spessore 20 cm e come peso 2500kg/m3, poi sono stati inseriti i casi di carico, oltre al peso proprio è stato messo anche il carico accidentale della neve di 0,48 kN/m2.

Modellazione strutturale ad elementi finiti - SAP2000

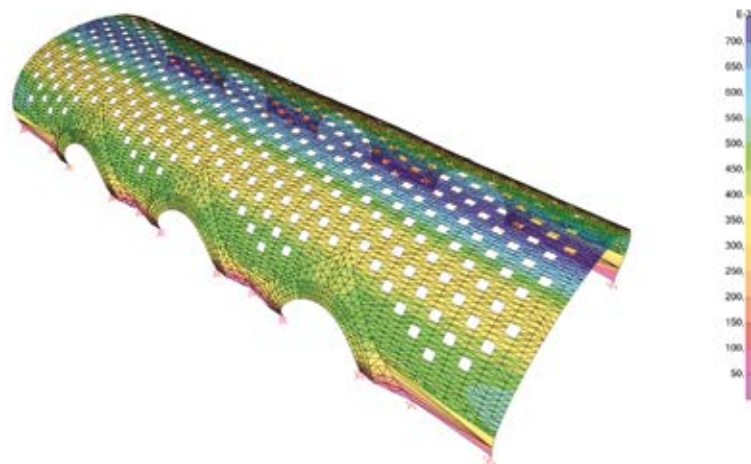


1. Mesh

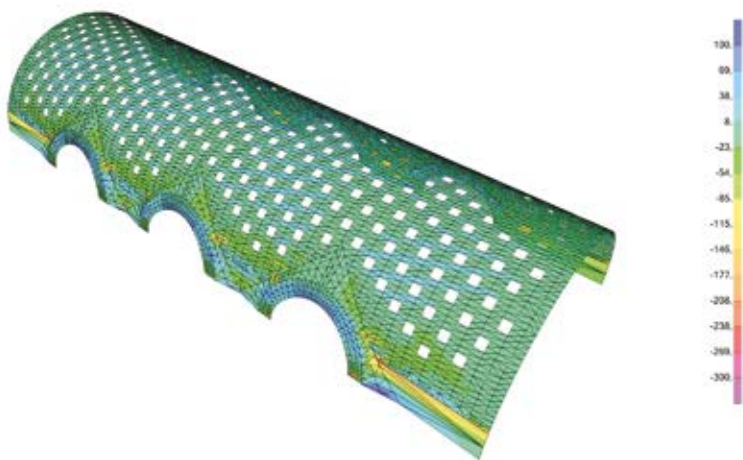
Reazioni vincolari	
Appoggio N°	Valore Rz [kN]
Appoggio 1	45
Appoggio 2	65
Appoggio 3	65
Appoggio 4	45



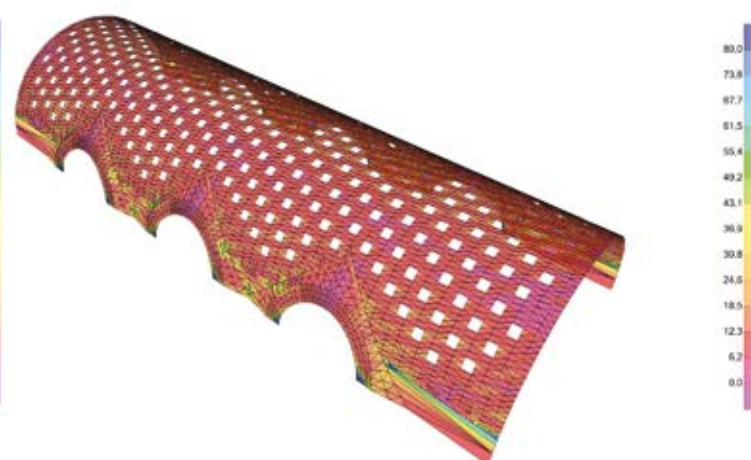
2. Configurazione deformata _ carichi verticali



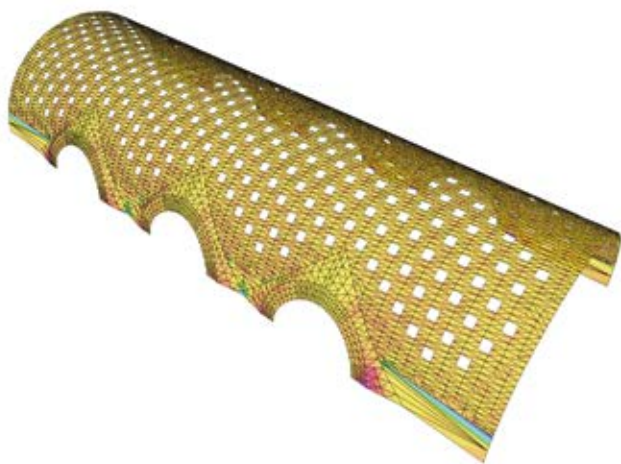
3. Risultante degli abbassamenti _ direzione z (mm)



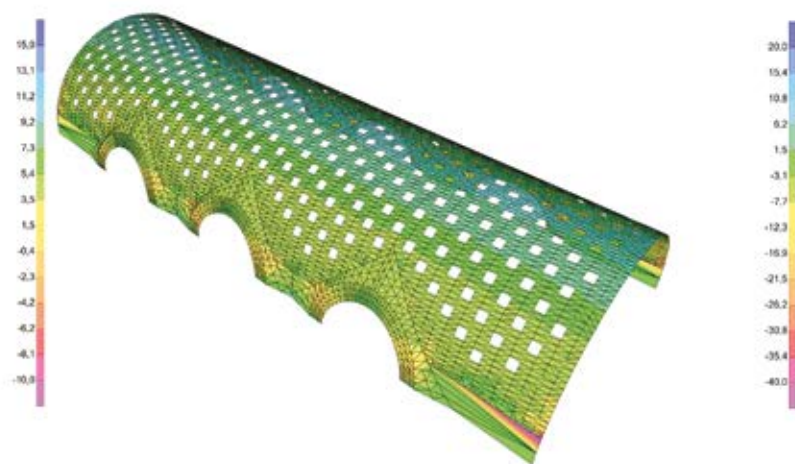
4. Forza nel piano locale _ componente xx (KN\m)



5. Forza di taglio locale massimo fuori piano (KN\m)



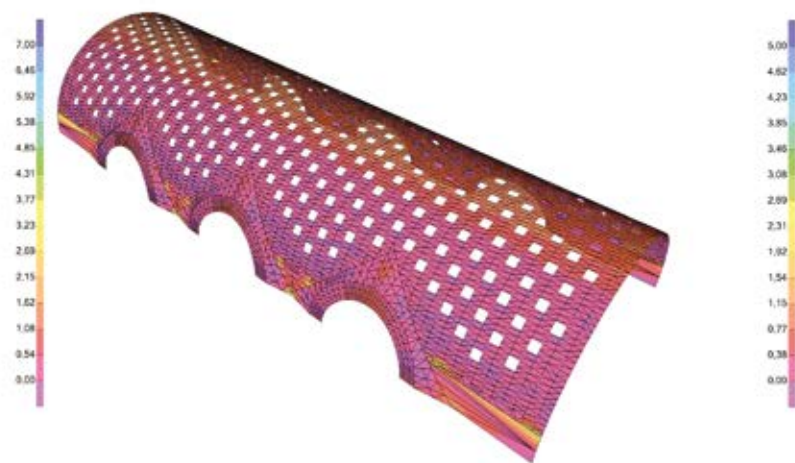
6. Momento flettente locale _ componente x (KNm\m)



7. Momento flettente locale _ componente y (KNm\m)



8. Risultati degli sforzi principali _ top face (N\mm²)



9. Risultati degli sforzi principali _ bottom face (N\mm²)





Esperienze didattiche

Workshop Melbourne (Au)

New Stereotomic Vaulted Structures with Interlocking, Discrete and Reciprocal Frame Blocks

Proff. Yuri Estrin, Giuseppe Fallacara, Tim Schork, Andrey Molotnikov.

Tutor: Lee Djumas, Sofia Colabella.

Studenti del MADA (Monash Art Design and Architecture):

Luke Lim

Rifat Muharram

Dale Mouat

Ivan Putrama Karlo

Ben Kampschoer

Evdokia Achilleos

Ayhan Ibraimovski

Michael Still

Rory Sheppard

Rosie Norris

Adrian Keen

Annabel Ayala Rodriguez

Idee in legno e pietra prendono forma

Prof. Sofia Colabella



NEW STEREOTOMIC VAULTED STRUCTURES WITH INTERLOCKING, DISCRETE AND RECIPROCAL FRAME BLOCKS

Giuseppe Fallacara,Tim Schork*

** Professore associato SSD ICAR 14, Dipartimento ICAR - Politecnico di Bari*

*** Phd, b.arch (hons), lecturer | department of architecture | madaguest professor for digital design techniques | department o6 - asl | kassel universitydirector | mesne design studio*

Il workshop, organizzato dal prof. Tim Schork all'interno delle attività didattiche del MADA, è parte integrante dell'attività di ricerca svolta dal prof. Giuseppe Fallacara, in qualità di visiting professor, a Melbourne nel mese di settembre 2015 grazie all'invito del prof Yuri Estrin. La forte attinenza tra le ricerche architettoniche solte presso il DICAR del Politecnico di Bari e quelle dell'equipe di Yuri Estrin, sulle proprietà meccaniche e fisiche delle costruzioni basate sul concetto dell' "interlocking discrete blocks", è il motivo principale della volontà di stabilire dei proficui sviluppi di ricerca tra le due istituzioni universitarie. I diversi approcci e le diverse scale di interesse a tale ricerca, più macroscopico e architettonico il primo, e più microscopico/nanoscopico e ingegneristico il secondo, tendono a far convergere la ricerca in un ambito di multidisciplinarietà e completezza contribuendo ad allargare le prospettive di sviluppo della stessa. Il workshop, frequentato da soli studenti in architettura, ha avuto lo scopo di sviluppare nuove idee creative sul tema degli spazi voltati in pietra da taglio, argomento sicuramente poco noto, ai partecipanti, anche se consueto nella

prassi costruttiva. Ritornare al sistema voltato e alla pietra ha consentito di operare quel tipico sfasamento concettuale, fertile alla creatività, e utile a resettare la mente al fine di produrre, da zero, nuove idee. Le lezioni preliminari del workshop hanno riguardato, da un lato, la spiegazione dei termini specifici del tema di progetto, soffermandosi sui concetti legati ai termini stereotomia, blocchi discreti, interconnessione e reciprocità strutturale, e dall'altro, la natura e le proprietà geometrico-meccaniche della interconnessione dei solidi, la qualità della forma dei giunti tra topologia e trasformazione parametrica.

In sintesi, il compito degli studenti è stato quello di progettare nuove "spazialità architettoniche" basate su sistemi voltati discreti (non calotte continue) costituiti da conci in pietra da taglio dalla geometria complessa. Ulteriore caratteristica dei blocchi lapidei, a cui si è fatto attenzione, è stata la "connessione reciproca" dei conci operando un raffronto di similitudine concettuale tra le "strutture reciproche" (reciprocal frame structures), tipiche dei materiali elastico-lignei, e i noti brevetti francesi di J. Abeille e S. Truchet in

102

P. 112 e 114: Immagini del workshop (Foto di Sofia Colabella)

Fig. 1 Reciprocal Frame VS Volta Piana

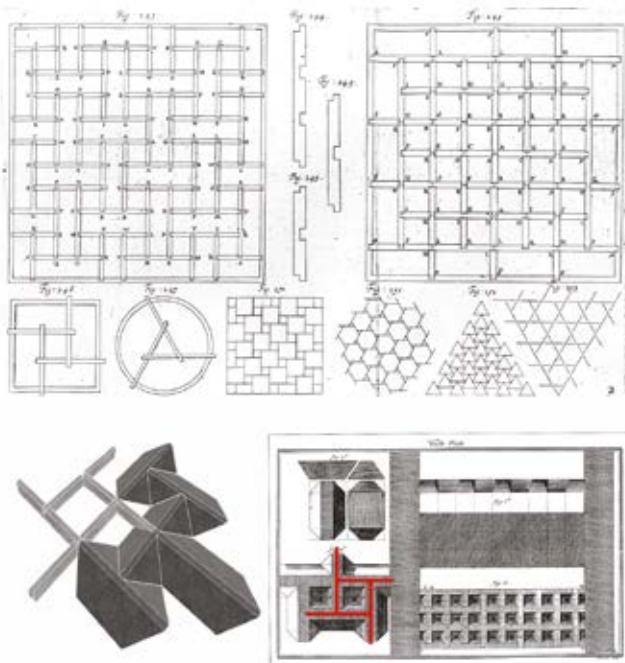
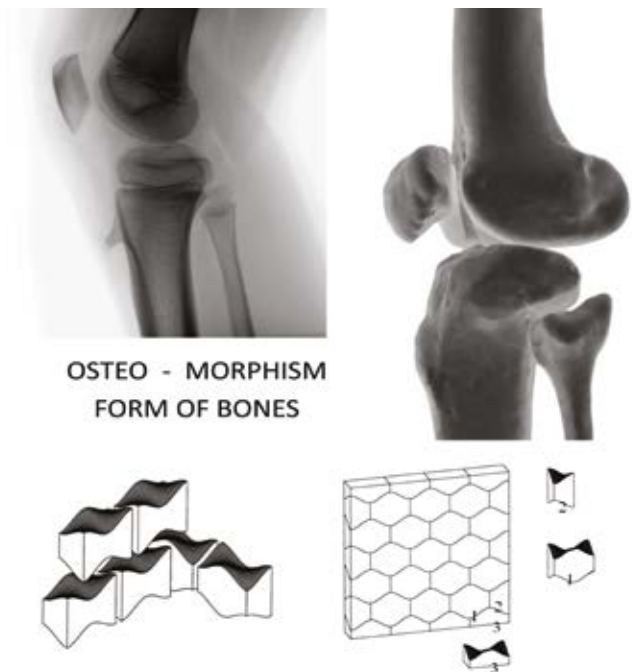


Fig. 2 Connessioni Osteomorfe

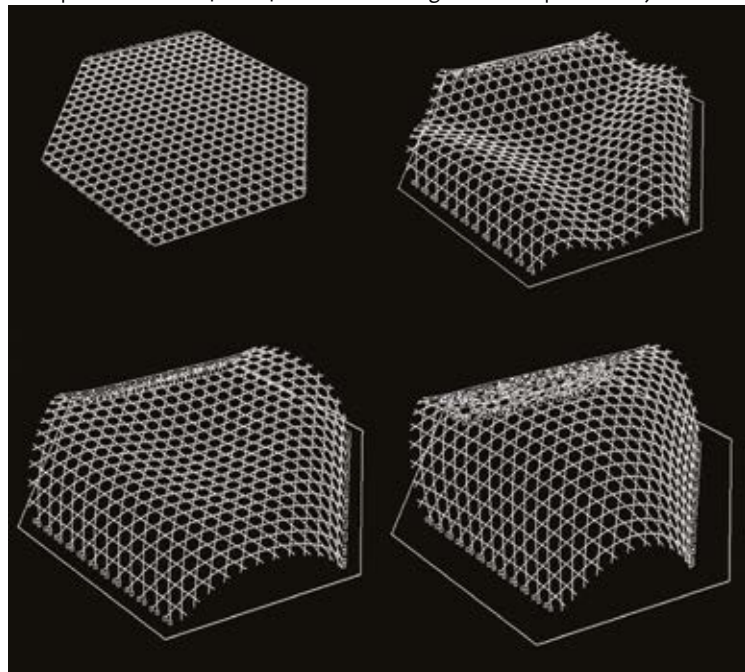


pietra da taglio precedentemente illustrati in questo libro (Fig. 1). La qualità formale del blocco lapideo ha riguardato, in particolar modo, la conformazione dei letti di contatto dei conci preferendo la geometria spaziale a quella piana. In tal modo si è introdotto il concetto di "connessione osteomorfa" (riferimento alla forma delle giunzioni dell'ossatura umana) come miglioramento delle prestazioni meccaniche dei sistemi voltati costituiti da elementi discreti (Fig. 2).

Il concetto di "geometria topologica" riferita, così, alla forma dei giunti di contatto tra i blocchi, è stato trasferito anche alla forma globale dello spazio voltato introducendo il principio di variazione e trasformazione topologica, dalla composizione piana alla composizione spaziale, del sistema voltato. Tale presupposto è stato alla base dell'utilizzo degli strumenti info-grafici di "trasformazione topologica parametrica" (già abbondantemente illustrati in precedenza) che hanno consentito virtualmente di "piegare, torcere e deformare" il pattern murario solido modellato in precedenza secondo la logica dell'interconnessione reciproca e osteomorfa.

Il passaggio dalla composizione piana a quella spaziale ha consentito di compiere un'ulteriore similitudine concettuale con la tecnica costruttiva tipica delle *gridshell structures*¹, ovvero di capire come sia possibile costruire fisicamente un sistema voltato grazie alla "deformazione" di una struttura lineare assemblata e concepita in prima istanza sul piano (vedi articolo di Sofia Colabella). La stessa operazione viene impiegata, virtualmente, tramite la deformazione info-grafica per l'ottenimento delle

Fig. 3 Esempio di "messa in forma" di una Gridshell (<https://designontopic.wordpress.com/2014/02/14/tri-directional-gridshell-experiment/>)



single geometrie volumetriche dei conci lapidei che dal piano hanno assunto una nuova configurazione spaziale. I due sistemi costruttivi, per quanto matericamente differenti, possono trovare punti di similitudine e sviluppo all'interno della più ampia ricerca sulla morfologia strutturale (Fig. 3).

I risultati ottenuti (Fig. 4-8), dopo la prima delle tre settimane complessive di workshop, presentati in queste pagine mostrano l'efficacia del metodo da molteplici punti di vista:

- Velocità dell'apprendimento;
- Grande facilità di manipolazione e ricerca formale di strutture geometricamente complesse;
- Gestione e comprensione di elementi dalla geometria solida facilmente realizzabili tramite sistemi di prototipazione rapida e/o CNC;
- Ri-valutazione e/o miglior comprensione della qualità estetica e meccanica dei sistemi tradizionali voltati in pietra.

I recenti sviluppi nella progettazione info-grafica e nella fabbricazione digitale non solo hanno permesso una rinascita, ma hanno anche notevolmente ampliato il campo di applicazione della costruzione di pietra in architettura. Sebbene la moderna tecnologia di lavorazione della pietra permetta al materiale di essere sagomato in una varietà di forme e dimensioni, le caratteristiche intrinseche del materiale e le logiche costruttive della pietra sono ancora, purtroppo, trascurate o addirittura eliminate nel processo di progettazione. Questo workshop interdisciplinare ha riunito ricercatori provenienti da differenti campi del sapere, dall'architettura all'ingegneria e la scienza dei materiali al fine di esplorare le potenzialità architettoniche relative alle soluzioni di connessione dei blocchi osteomorfi e alla successiva fase di fabbricazione robotizzata.

L'augurio è quello di poter vedere, chissà, un domani, anche in Australia, le pietre locali "vibrare" in aria come pietre preziose sotto il sole del nord.

Alle pagine seguenti:

Fig. 4 Prototipo di Maglia interconnessa a blocchi "cuneiformi", progetto di Y. Estrin (Foto di Sofia Colabella)

Fig. 5 Dall'alto verso il basso, studenti : B. Kampschoer, D. Mouat

Fig. 6 Dall'alto verso il basso, studenti : I. Putrama Karlo, R. Sheppard

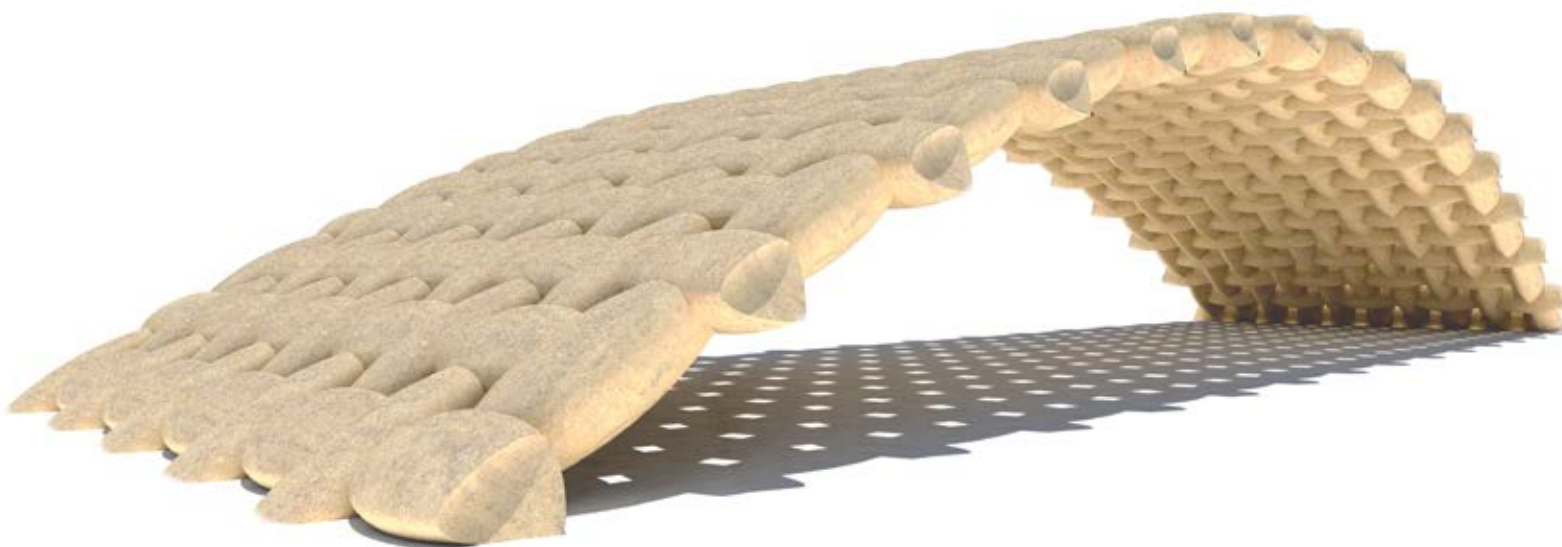
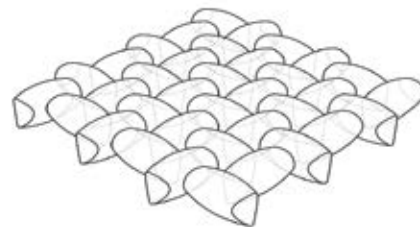
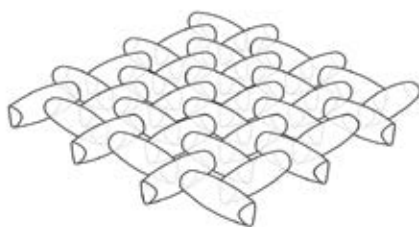
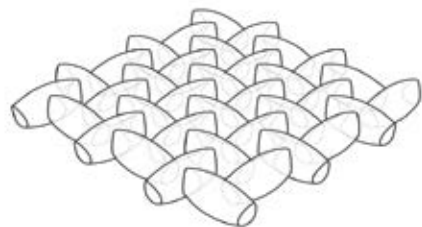
Fig. 7 Laboratorio di prototipazione rapida multi-materia, Monash University, Clayton

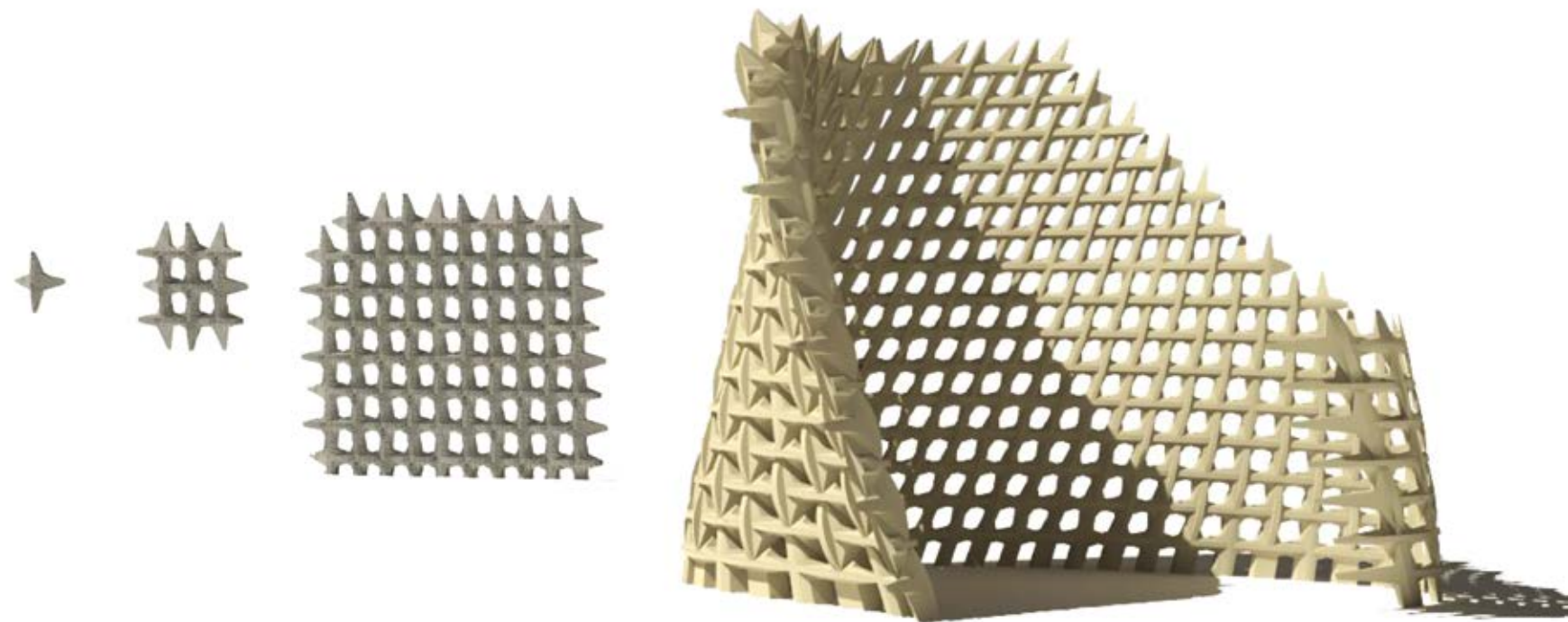
Fig. 8 Prototipo Wave block con superfici di contatto ad aderenza migliorata (Foto di Sofia Colabella)

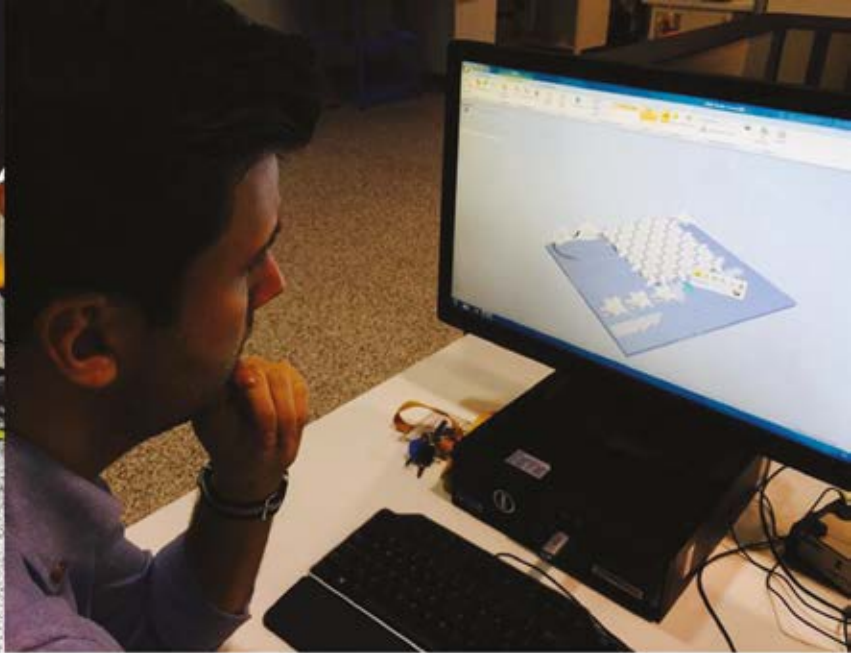
Note

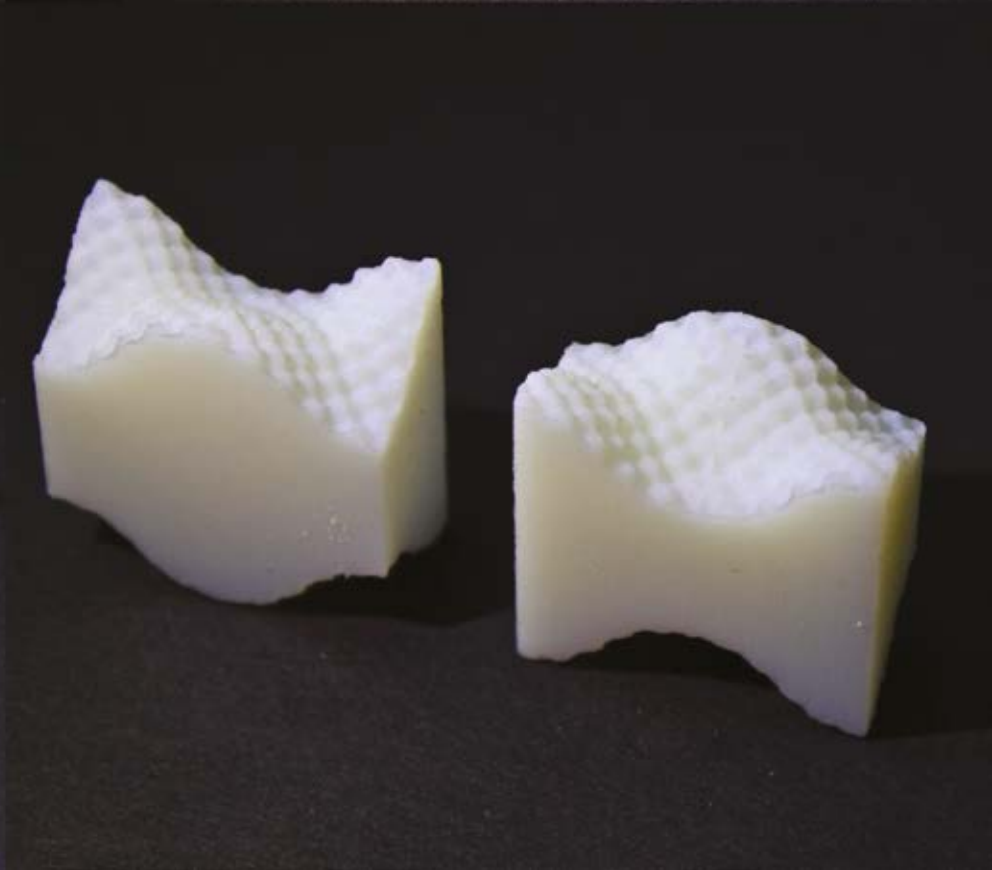
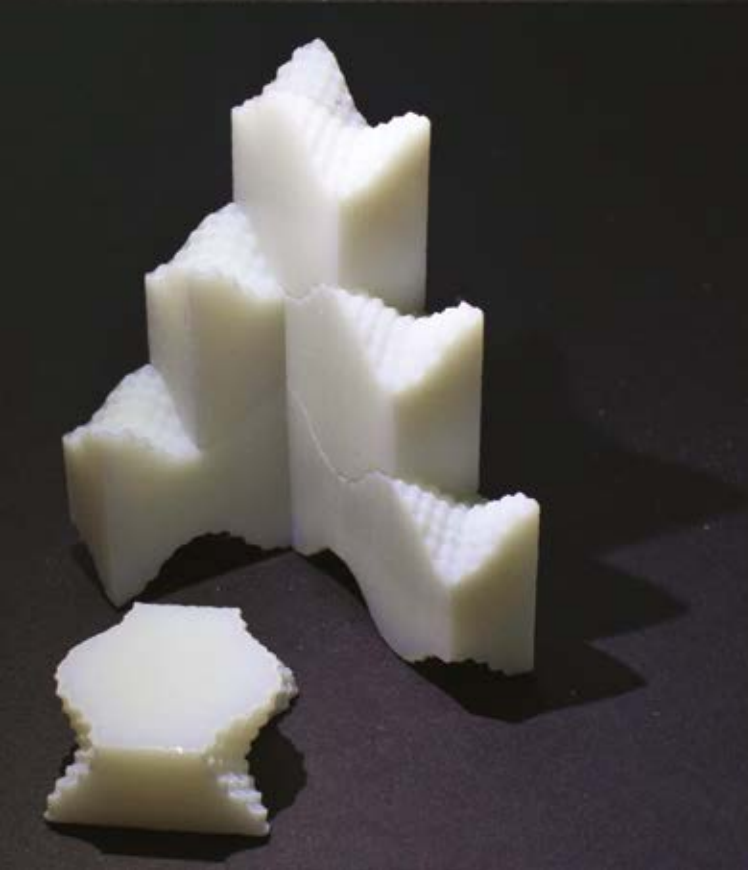
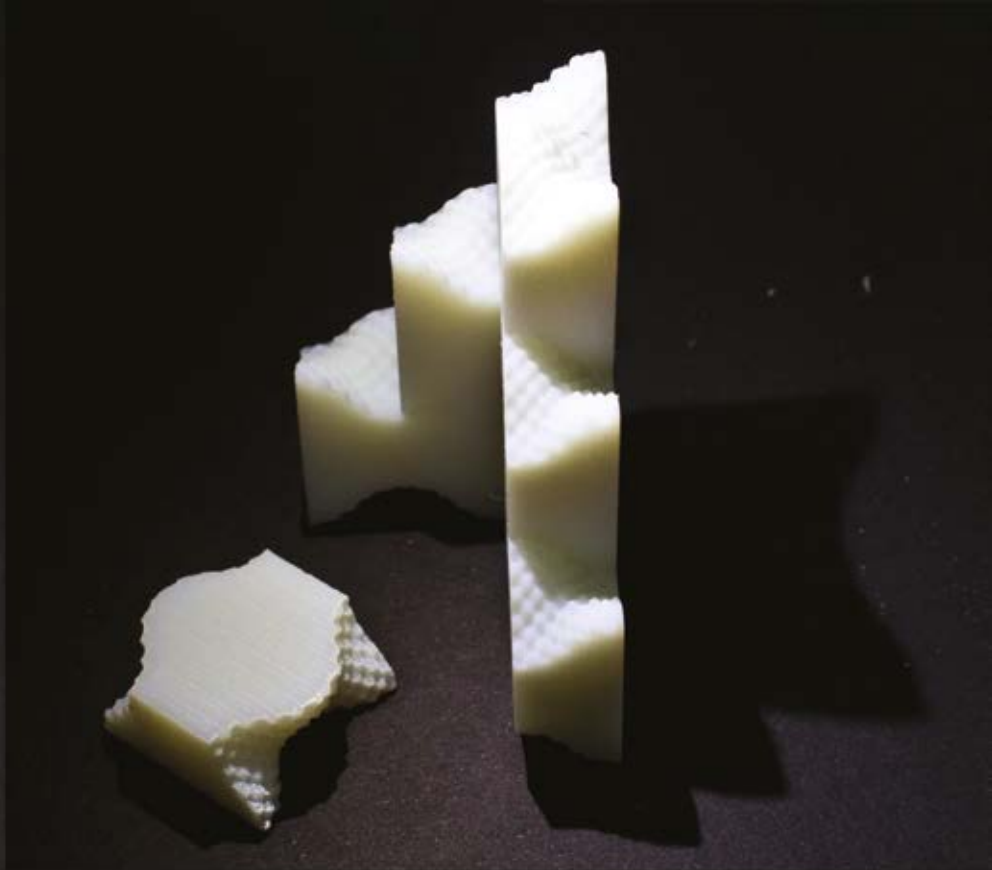
[1] Per approfondimenti: www.gridshell.it e Pone S., Gridshell. I gusci a graticcio in legno tra innovazione e sperimentazione, Alinea, Firenze, 2012.













IDEE IN LEGNO E PIETRA PRENDONO FORMA

**Sofia Colabella*

** PhD in Tecnologia dell'Architettura, Docente a contratto di Progettazione di Sistemi costruttivi, co-fondatrice di Gridshell.it*

È appena finito il workshop New Stereotomic Vaulted Structures with Interlocking, Discrete and Reciprocal Frame Blocks, ospitato dalla Monash University, facoltà di Art Design and Architecture di Melbourne. È stata un'esperienza intensa, intrecciata con una sezione di stampa 3D e un'altra di ampio respiro sull'architettura in pietra che mi appaiono, a conclusione dell'evento, il felice raggiungimento di un modo calviniano di trattare la leggerezza¹. La pietra, materiale greve per eccellenza, si trasforma in sistemi voltati leggeri tramite un processo di ricerca di forma. La conoscenza esatta e il controllo della composizione delle mutue forze che s'instaurano tra i conci per effetto del peso proprio e dell'attrito consente di rifuggire dall'opacità dell'inerzia e della ridondanza. «Ogni pietra – spiegava Franco Laner, uno dei più grandi esperti italiani di architettura del legno – deve essere indispensabile all'energia vitale dell'insieme, in modo che nessun concio dorma! Viceversa, nelle costruzioni in muratura, gli elementi possono dormire, perché c'è la malta che veglia»². Siamo partiti dall'arco, la forma resistente più antica e semplice. È però anche, e forse prima, un'idea costruttiva, un sistema materiale, un'ipotesi architettonica. Inseguendo idee costruttive e ipotesi di ricerca abbiamo provato

a ridefinire, attraverso il lavoro degli studenti, il concetto stesso di leggerezza. Rendere le cose più leggere non è solo questione di tipologia strutturale o, evidentemente, di peso specifico del materiale, ma riguarda l'abilità di saper combinare questi due mondi tra loro, con l'obiettivo di usare la minima quantità di energia e di risorse. Non si parla qui solo di paradigmi di sostenibilità ma di utilizzare questa stessa limitazione come elemento catalizzatore per un diverso modo di pensare e concepire il progetto di architettura. Alleggerire le strutture facendo uso del materiale più pesante potrebbe sembrare una contraddizione in termini, di segno opposto ma ugualmente folle come la scelta di utilizzare bacchette di legno più piccole di una tavola di parquet per realizzare una sala di 60 m di luce libera³. Come nel caso del legno in coazione delle gridshell post-formate⁴, infatti i sistemi voltati stereotomici non sfruttano la potenza muscolare della massa per raggiungere la massima luce possibile ma un principio di resistenza per forma; più specificamente, e diversamente dalle gridshell in legno, sfruttano la forza di gravità (il loro stesso limite) per sostenere il peso proprio⁵ (Fig.1): «La forma delle costruzioni leggere solo di rado è casuale. Piuttosto è il risultato di processi di sviluppo e

110

P. precedente: Sistemi voltati stereotomici e gridshell post-formate in legno, un'ipotesi di ricerca.

A sinistra: prime sperimentazioni di ricerca di forma a partire dalla griglia piana di Woodome (http://www.gridshell.it/gridshell_woodome_lecce), disegni di Giuseppe Fallacara. A destra: Trio Gridshell, progetto di Gridshell.it con Bernardino D'Amico e Filena Nigro, foto di Daniele Lancia.

Fig. 1 I materiali di base, conci stereotomici di studio realizzati con la stampante 3D (sinistra) e bacchette in legno di larice, sezione 2.5x5.0 cm (destra). Foto di Sofia Colabella



ottimizzazione, che seguono il principio della riduzione della propria massa»⁶.

Una gridshell si può definire come una struttura a guscio discretizzata in elementi lineari che, a loro volta, costituiscono un reticolo, oppure come una struttura tridimensionale che resiste ai carichi applicati per mezzo della sua stessa forma⁷ (Fig. 2). La suddivisione del guscio continuo è il procedimento che rende ugualmente possibile ricercare la forma migliore per una struttura stereotomica; qui il procedimento di ottimizzazione riguarda principalmente la scelta delle forme finalizzate alla minimizzazione della quantità di pietra da utilizzare, per ragioni economiche e, ancor più, per ragioni strutturali.

Gridshell e architetture stereometriche nascono da principi di efficienza strutturale ben definiti. Di recente, attraverso la simulazione digitale e l'ottimizzazione strutturale, hanno trovato nuove possibilità formali, inconcepibili fino a pochi anni fa.

Difficile, perciò, resistere al fascino di ipotesi di ibridazione tra due materiali appartenenti al patrimonio della nostra cultura costruttiva e architettonica plurimillenaria, di contaminazione tra tecniche costruttive a secco e di potenziamento tra diversissimi comportamenti strutturali, alla ricerca di forme che consentano il raggiungimento della massima luce possibile, superando d'un colpo i limiti imposti dalle caratteristiche intrinseche di ciascun materiale.

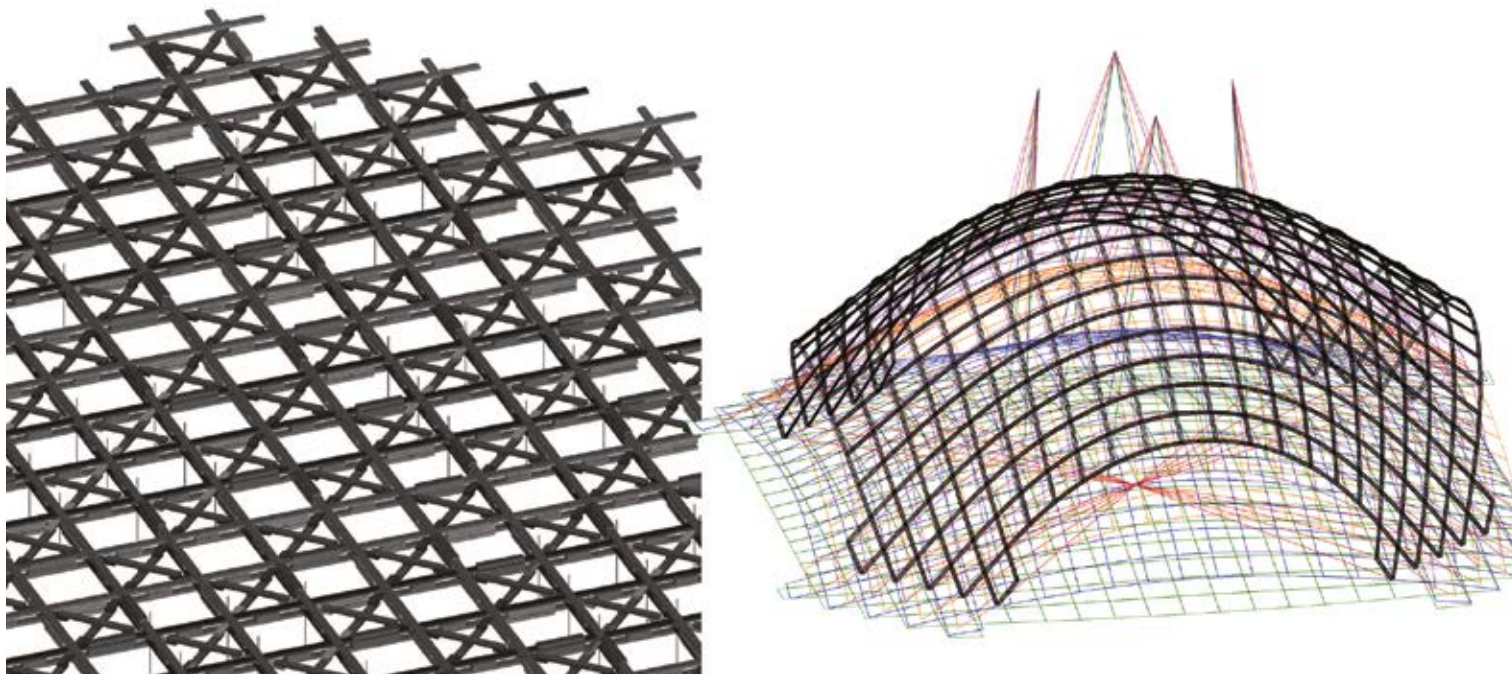
Uno dei punti di contatto più interessanti tra le strutture voltate a blocchi stereotomici e le gridshell post-formate in legno (Fig. 3) riguarda il modo in cui queste ultime sono costruite e calcolate. S'inizia

con l'assemblaggio in piano del reticolo strutturale che viene, in un secondo momento, progressivamente "forzato" ad assumere la forma finale; questa deformazione della maglia piana avviene attraverso la combinazione della flessione delle aste con la loro rotazione rispetto alla configurazione piana originaria. Una volta raggiunta la forma di progetto, si termina l'assemblaggio della struttura serrando i bulloni, aggiungendo un sistema di controventi (diagonali lignee pannelli in multistrato etc.) che blocchi la rotazione tra le aste e, infine, inserendo dei connettori a taglio che ne stabilizzino la curvatura. Come abbozzato da Giuseppe Fallacara nell'immagine di copertina, sostituire la flessione delle assicelle con un sistema di sola compressione dei blocchi incernierati e ottimizzare le superfici di connessioni tra i blocchi per incrementarne l'attrito, potrebbe essere il primo passaggio per comprendere secondo quali parametri ibridare i due sistemi, compression only dei gusci e active bending delle gridshell.

I procedimenti di ricerca di forma⁸ e i sistemi di deformazione della maglia piana⁹, quindi, lasciano spazio a molteplici possibilità di combinazione con i sistemi voltati a blocchi stereotomici, senza necessariamente immaginare quel carattere ausiliario (come il caso delle cèntine e dei relativi archi¹⁰) che in molta dell'architettura antica ha caratterizzato il rapporto tra pietra e legno.

Se è vero, quindi, che tutto nasce dalla forza d'immaginazione e che proprio da lì iniziano le responsabilità, la ricerca sui sistemi di ibridazione tra gridshell post-formate in legno e sistemi voltati stereotomici in pietra è di fatto già iniziata¹¹.

111 Fig. 2 Napoli, cortile del Dipartimento di Architettura, prototipo Toledo 2, progetto di Gridshell.it, con Bernardino D'Amico, Oreste Mammana e Raffaele Stabile. Il sistema di monitoraggio dei nodi è stato effettuato in collaborazione con Leopoldo Repola e Raffaele Memmolo.
A sinistra la maglia piana, a destra le fasi di montaggio dalla griglia piana alla configurazione finale e determinazione dei punti di sollevamento. Disegni di Sofia Colabella e Bernardino D'Amico.



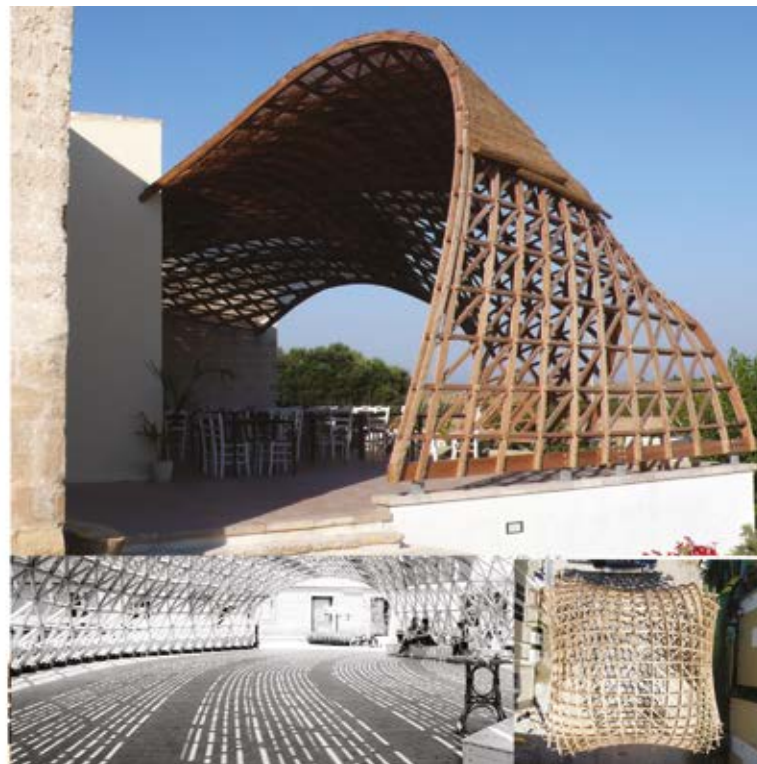
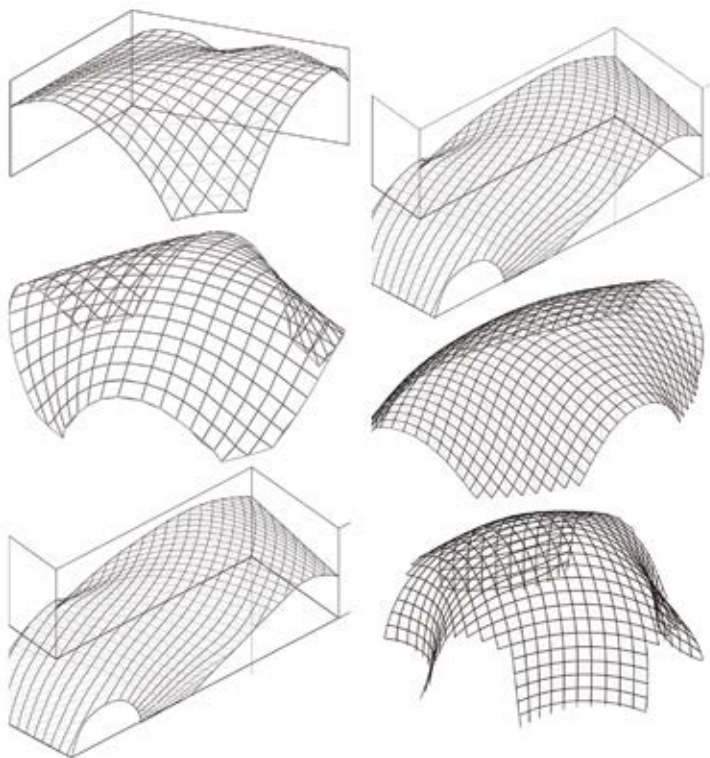


Fig. 3 Modelli tridimensionali di base e foto di alcune delle gridshell progettate e costruite da Gridshell.it. Foto di Gridshell.it

Note

[1] Calvino Italo, *Lezioni americane*, Mondadori, Milano, 2000.

[2] Laner F. Nessun dorma. Costruzioni di pietra a secco, in *Archetipo* n. 37, 2008.

[3] La luce libera della cupola della Mannheim Multihalle è pari a 80 m, compreso il corridoio e 60 m nella direzione opposta. Cfr: Happold E., Liddell W. I. Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgarten, *The Structural Engineer*, Vol. 53, No. 3, March 19, 1975.

[4] Progettare e costruire gridshell in legno è insieme una passione e una sfida che mi ha portato a co-fondare, insieme a Sergio Pone, Bianca Parenti e Daniele Lancia, la società Gridshell.it. Finora, abbiamo realizzato 13 gridshell, occupandoci di tutto il processo, dalla progettazione alla costruzione.

[5] Cfr. Charles Perrault «l'arte di servirsi della pesantezza della pietra contro sé stessa e di farla sostenere dallo stesso peso che la fa cadere».

[6] Eberhard Möller, Cit. in Ferraro A. (2005), Recensione a Frei Otto e la costruzione leggera, Domusweb.

[7] La definizione di stereotomia data quasi 450 anni, mentre molto più recente è la definizione di gridshell, una parola che entra a far parte del nostro vocabolario architettonico nel 1974, quando l'Istituto per le Strutture Leggere di Stoccarda ha dedicato un'intera monografia a questa tipologia strutturale, Lio: Gitterschalen – Grid Shells, Institut für leichte Flächentragwerke (IL)/ Karl Krämer Verlag, Stuttgart (1974).

[8] Per approfondimenti sul tool di ricerca di forma Gfft: Pone S., Colabella S., D'Amico B., Fiore A., Lancia D., Parenti B., Timber Post-formed Gridshell: Digital Form-finding / drawing and building tool, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013, Beyond The Limits Of Man*.

[9] Per approfondimenti sui sistemi di monitoraggio e deformazione della maglia piana: Colabella S., Lancia D., Repola L., Memmolo R., Pone S., A monitoring system for wooden post-formed gridshells, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Symposium 2015, Future Visions*.

[10] Cfr. Aris C. M., *La cèntina e l'arco*, Marinotti, 2007.

[11] In dreams begins responsibility: epigrafe al libro *Responsibilities* di B. W. Yeats, 1914.





Esperienze didattiche

Stage Monopoli (Bari)

Workshop di Progettazione "PONTI DI PUGLIA" Recupero e valorizzazione di un paesaggio

Proff. Giuseppe Fallacara, Marco Ferrero, Vincenzo Minenna

Tutor: Dott. Ing. Daniele Malomo

Collaboratori al tutoraggio: Armando Pellecchia, Costanza Livadiotti

Studenti del Politecnico di Bari, DICAR:

Angelica Abascià

Paola Bianco

Antimo Farina

Giuseppe Gissi

Emanuele Saracino

Mariangela Urgesi

Studenti dell'Università di Roma Sapienza:

Susanna Baldassarri

Anna Maria De Rio

Martina Di Bona

Susanna Giancristoforo

Paola Ielapi

Roberto Nocentini

Diletta Siniscalchi

Stage Rivera (Ticino, CH)

Realizzazione di volta catenaria con conci "osteomorfi"

Design: Giuseppe Fallacara

Proff. Giuseppe Fallacara, Marco Ferrero, Vincenzo Minenna

Tutor: Daniele Malomo

Collaboratori al tutoraggio: Armando Pellecchia, Costanza Livadiotti

Studenti del Politecnico di Bari, DICAR:

Angelica Abascià

Paola Bianco

Antimo Farina

Giuseppe Gissi

Emanuele Saracino

Mariangela Urgesi



OSTEOMORPHING, VOLTE CATENARIE E COLONNE LITICHE PRECOMPRESSE A CONCI OSTEOMORFI.

NOTE SULLO STAGE PRESSO LA GENERELLI SA, RIVERA (SVIZZERA)

**Giuseppe Fallacara, Vincenzo Minenna, Lab. Laurea Morfologia Strutturale 2.0 (*)*

(*) <https://www.facebook.com/pages/Morfologia-Strutturale-20/432767090236736?sk=timeline>

Nel più ampio tema di ricerca sulle strutture lapidee osteomorfe, sviluppate dai proff. G. Fallacara (Politecnico di Bari) e Y. Estrin (Monash University, Melbourne), si inserisce il progetto sperimentale di Volte catenarie e colonne litiche precompresse a conci osteomorfi (figg. 1-2).

L'arco catenario progettato¹ è stato funzionalizzato come arcata aggiunta alla struttura preesistente del ponte Archi di Santa Cesarea Terme (LE) Italy in occasione del workshop "BRIDGE TRAD" promosso da UPI Puglia, tenutosi nel Maggio 2015 con il fine di dare rilievo ai ponti tradizionali pugliesi, e creare nuovi poli attrattivi e punti panoramici privilegiati così da esaltare la magnificenza del luogo.

Il progetto del ponte del tuffatore è un' infrastruttura costituita da due arcate catenarie di pietra e da una struttura metallica che collega l'impalcato superiore ed estradosso di entrambe le volte. Come preannuncia il nome dato al progetto, le volte hanno un passaggio con un trampolino da cui è possibile spiccare il volo per il tuffatore e poter poi risalire grazie alle scalinate.

All'interno della maglia metallica sono inseriti dei collegamenti verticali che coprono tutta l'altezza del ponte, e permettono la

percorrenza dal mare fino alla passerella superiore e viceversa. Superiormente è presente un camminamento con un pavimento formato da listelli di legno che si estende sopra gli archi, garantendo la percorribilità del ponte (figg. 3-4).

Gli esiti di questa ricerca si sono concretizzati nel corso dello stage presso la Generelli SA marmi e graniti Rivera-Bironico, Ticino, Switzerland nel giugno 2015.

Si è infatti realizzato un arco con conci osteomorfi dalla geometria sinusoidale complessa: un arco catenario. L'arco catenario è un arco la cui curva ricorda quella di una lunga catena tenuta dalle due estremità e lasciata pendere, la catenaria appunto, che somiglia ad una parabola. È detto anche arco equilibrato perché la sua forma consente una omogenea redistribuzione del carico; a differenza di altri tipi di archi, non necessita né di contrafforti né di altri elementi di supporto e rinforzo (figg. 5-6-7-8).

Per una maggior gestione e possibilità di generare varianti, la progettazione del manufatto si è servita di mezzi parametrici, in particolare del plug-in di Rhinoceros, Grasshopper. Con questo plug-in si generano dei codici parametrico-variazionali.

Le fasi della parametrizzazione sono state le seguenti:

P. precedente: Arco catenario e colonna litica a conci osteomorfi;
Fig. 1 Stone Wave Block, strutture lapidee osteomorfe.

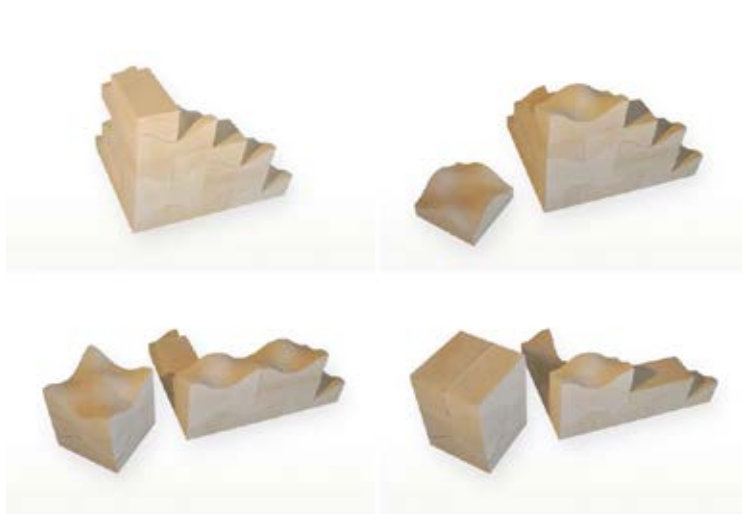
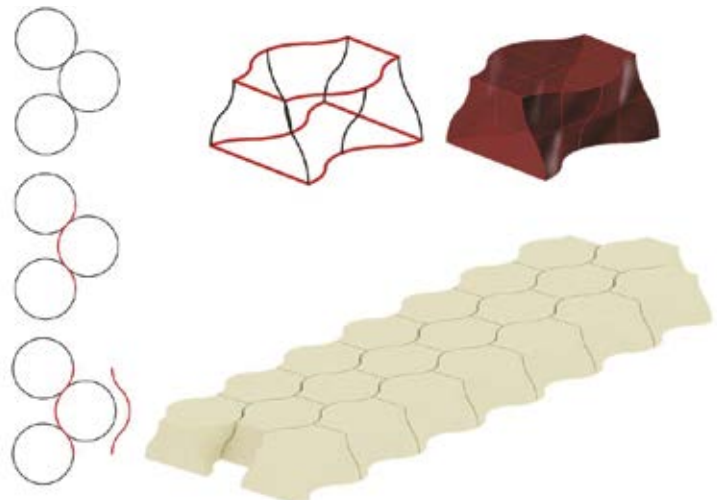


Fig. 2 Schema della genesi geometrica dei conci osteomorfi; curve sinusoidali alle basi e render dell'assemblaggio dei conci.



Documentazione fotografica storica dell'area del ponte di S. Cesarea Terme (LE)



OSTEO MORPHING CATENARY WIT

dicar. SAPRENDI GEMELLI SA

Il progetto del Ponte del tuffatore a Santa Cesarea Terme (LE) Italia, ideato dal Prof. Arch. Giuseppe Fallacara in occasione del workshop "BRIDGE TRAD" promosso da UPI Puglia, è stato progettato al fine di dare rilievo al preesistente ponte Archi ed esaltare la magnificenza del luogo. Il ponte è un'infrastruttura costituita da due arcate catenarie di pietra e da una struttura metallica che collega l'impalcato superiore (percorribile) ed estradosso di entrambe le volte. Come preannuncia il nome dato al progetto vi è la possibilità di giungere tramite delle scale ai due trampolini posti all'interno delle arcate da cui è possibile tuffarsi per poi risalire. L'arco, progettato da G. Fallacara, ha una forma catenaria che rappresenta uno stato di tensione pura (compressione o trazione), è formato da blocchi osteomorfici (interbloccabili con incastro topologico concavo-convesso a secco) chiamati così per il loro aspetto simile ad un'articolazione. I vantaggi di questa forma sono la maggior resistenza a fessurazioni, urti e assorbimento acustico, nonché facilità di montaggio: non consentono scorrimenti, grazie alla loro geometria che aumenta l'attrito. Gli studi in merito alla geometria di questo tipo di concio sono stati portati avanti da G. Fallacara e dal Prof. Ing. Yuri Estrin. Grazie al contributo della Gemelli SA marmi e graniti, Rivera-Bionico, Ticino, Switzerland, è stata possibile, mediante uno stage, la realizzazione di un prototipo di arco catenario a conci osteomorfici.

The project of Oliver's Bridge in Santa Cesarea Terme (LE), Italy, designed by Prof. Arch. Giuseppe Fallacara at the workshop "BRIDGE TRAD" promoted by UPI Puglia, is designed in order to give relief to the existing bridge arches and enhance the magnificence of the place. The bridge is an infrastructure consisting of two catenary arches of stone and a metal structure that connects top deck (viable) and extrados of both times. As the name of the project says it is possible to reach by stairs to the two trampolines placed inside of the arches from which you can dive and go up again. The arch, designed by G. Fallacara, has a catenary shape that represents a state of pure tension (compression or traction), it is formed from osteomorphic blocks (interlocked with topological dovetail concave-convex dry) named for their similar appearance to a joint. The advantages of this form are greater resistance to cracking, shock and sound absorption, as well as ease of assembly: do not allow sliding movements, thanks to their geometry that increases friction. Studies on the geometry of this type of block were carried out by G. Fallacara and Prof. Ing. Yuri Estrin. Thanks to the contribution of Gemelli SA marble and granite, Rivera-Bionico, Ticino, Switzerland, was made possible, through an internship, the realization of a prototype of a catenary arch made of osteomorphic blocks.



Conci geometrici del concio

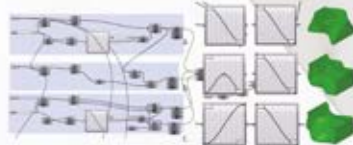




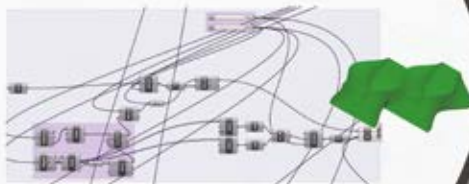
Fig. 3 Tavola per l'esposizione al Marmomacc 2015 – Stone Academy

FASI DI PROGETTO:

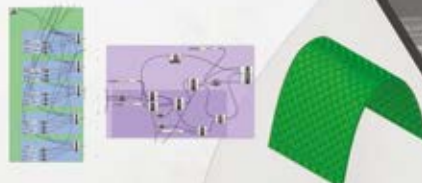
1. **Modellazione del concio base** attraverso il programma di modellazione parametrica Grasshopper, con la possibilità di gestire il grado di curvatura dei profili longitudinali e trasversali del concio base attraverso l'interfaccia del Graph mapper.



2. **L'aggregazione delle unità** è coordinata tramite parametri di controllo legati a spostamenti vettoriali del singolo concio nel piano orizzontale.



3. La **modellazione spaziale** dell'orditura della volta viene effettuata con un'operazione di morphing che applica l'aggregazione precedentemente ottenuta su un profilo catenario.



CONTESTUALIZZAZIONE

Render del prototipo dell'arco catenario in pietra dolomia, realizzato poi durante lo stage tenuto nel Giugno 2015 presso la Generelli SA.



FASI DI REALIZZAZIONE presso Generelli SA Rivera - Svizzera

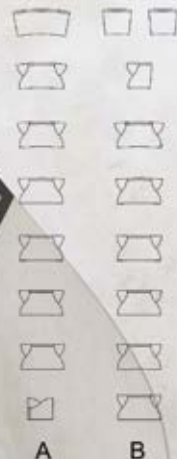
ESECUTIVO

FASI DI MONTAGGIO:

I conci precedentemente realizzati attraverso un braccio robotizzato a controllo numerico, vengono posizionati a terra, giuntati a secco, compressi e bloccati alla base. Successivamente, l'arco catenario viene sollevato, ed armato esternamente da cavi di acciaio.



Vista frontale dell'arco catenario e scomposizione in singoli conci.



OSTEO MORPHING CATENARY VMT

STAGE

9 - 10 - 11 GIUGNO 2015
presso Generelli SA Marmi e Graniti
CH - 6802 Rivera TICINO
DESIGN: Prof. Arch. Giuseppe Fallacara

COLLABORATORI: Tutor Arch. Vincenzo Minemba, Miraela Colella

PARTECIPANTI: studenti del Lab. di Tesi in Morfologia Strutturale



Dott. Ing. Daniele Malomo,
Armando Pellecchia, Costanza Livadiotti

dicar.

SAPENZA

GENERELLI SA

Fig. 4 Tavola per l'esposizione al Marmomacc 2015 - Stone Academy

1. MODELLAZIONE DEL CONCIO

La modellazione dell'unità è stata eseguita mediante tecniche di controllo del giunto per grafici di funzioni matematiche. Variando i valori associati a determinate coordinate spaziali dei punti appartenenti alle curve di giunto, si possono definire le geometrie generali del concio e, di conseguenza, dettare determinate condizioni per l'aggregazione delle unità. In ordine a lato, la sezione di codice utile, il concio tipo con i grafici di controllo e due delle possibili variabili.

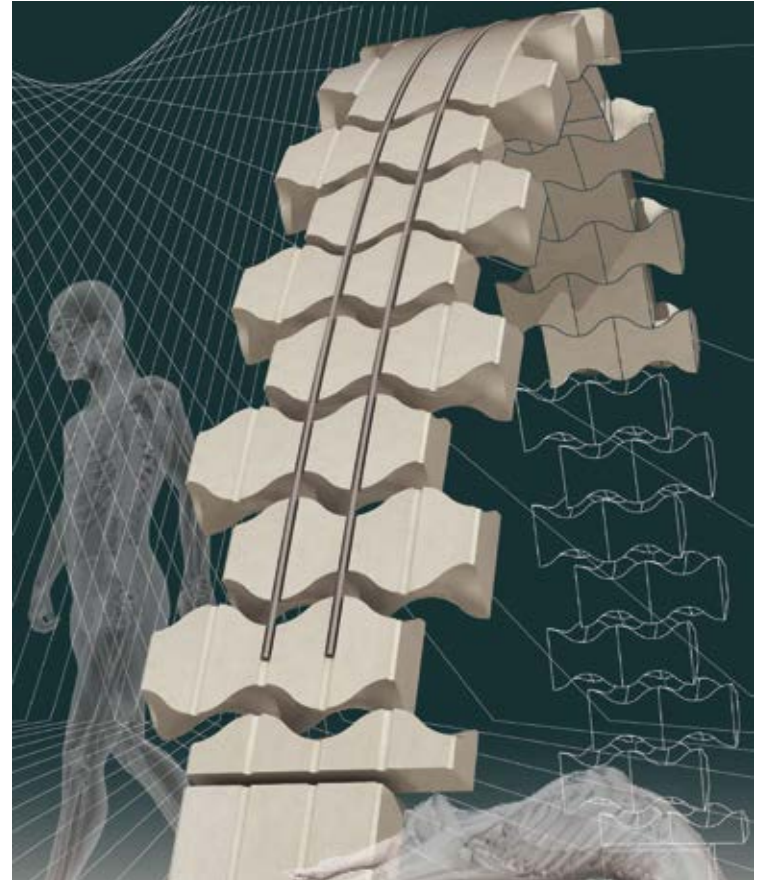
2. AGGREGAZIONE DELLE UNITA'

L'aggregazione delle unità è coordinata tramite parametri di controllo legati a spostamenti vettoriali del singolo concio nel piano orizzontale. (aggregazione sul piano orizzontale; particolare del giunto)

3. MORPHING

La modellazione spaziale dell'orditura della volta viene effettuata con un'operazione di morphing, ovvero deformazione topologica dell'aggregazione precedentemente definita sul piano orizzontale, in modo da generare un profilo catenario utilizzando una superficie guida. Un arco che segue una curva catenaria rappresenta uno stato di tensione pura (compressione o trazione) in cui l'elemento strutturale è inserito al di sotto. La parametrizzazione della volta inoltre include anche l'inserimento dei conci in chiave e dei conci d'attacco a terra, sfruttando le condizioni imposte per domini matematici per ordinare le posizioni degli elementi nell'opera stereotomica.

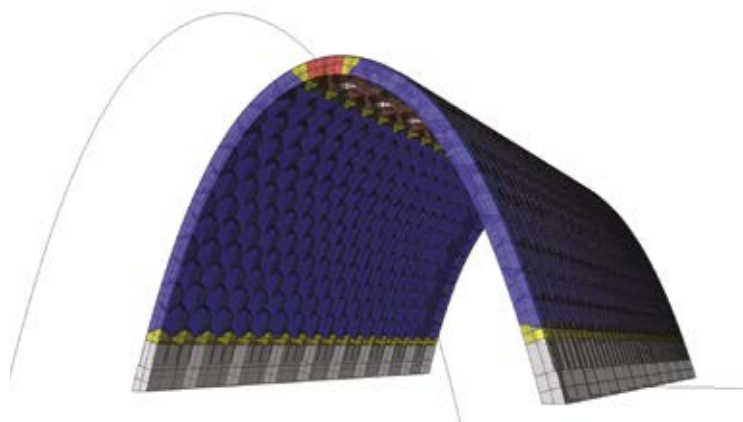
121 Durante lo stage partendo dalla modellazione tridimensionale sono stati realizzati i singoli conci: in prima battuta un braccio robotico a CN ha tagliato per mezzo di un elettro-mandrino i blocchi rettangolari di marmo (quindi un processo per sottrazione



Figg. 5-6-7 Fasi di montaggio dell'arco catenario precompresso a giunti osteomorfi.



di materiale); i conci sono stati numerati e posizionati a terra, giuntati e assemblati a formare un arco catenario. Prima di ruotare l'arco è stata applicata una trave di legno che vincola a sé i piedritti in modo tale da impedire i movimenti di quest'ultimo. In seguito l'arco è stato ruotato da terra di 90 gradi. Nella parte bassa, sono stati effettuati dei fori direttamente sui conci, al cui interno sono stati inseriti dei fermi in acciaio. Questi ultimi contribuiscono al blocco dei due tiranti posizionati lungo tutto l'estradosso dell'arco allo scopo di mettere in tensione l'intera architettura (fig. 9). Il sistema costruttivo potrebbe anche essere agevolmente usato per coperture a botte con sezione catenaria in una concezione di montaggio prestabilita con mezzi meccanici (figg. 10-11).



122



Fig. 8 Montaggio dell'arco catenario a giunti osteomorfi;
Fig. 9 Armatura estradossata dell'arco per post-tensione di precompressione della struttura;
Fig. 10-11 Esempificazione di montaggio.



Figg. 12-13 Comportamento "flessibile" della Colonna Osteomorfa;
Figg. 14-15 Realizzazione della Colonna Osteomorfa.

Durante lo svolgimento dello stage è stata affrontata un'altra tematica di stereotomia osteomorfa in particolare la Colonna Osteomorfa, con la realizzazione di un elemento verticale che, imitando le caratteristiche della colonna vertebrale è rigido ma elastico al tempo stesso. La Colonna Osteomorfa è dunque formata da conci lapidei la cui geometria a curve sinusoidali le garantisce maggiori vantaggi tra cui aumentare la superficie di contatto tra i conci, diminuendo l'attrito. E' dunque evidente il parallelismo che si genera con il midollo osseo: il cuscinetto di neoprene (cuscinetti di appoggio per i nodi strutturali) così come i dischi di cartilagine; i cavi che dal basso verso l'alto uniscono tutti i conci della colonna, così come il midollo spinale, che percorre e attraversa tutta la colonna vertebrale (figg. 12-13).

I conci progettati in 3D, sono stati tagliati con il una macchina a controllo numerico. Quest'ultima mediante un elettro-mandrino incide i blocchi di marmo in maniera precisa rispetto al modello





Figg. 16-17 Realizzazione della Colonna Osteomorfa.

124

3D di progetto. Ogni concio è stato forato verticalmente; nei fori allineati dei vari conci sono stati inseriti dei cavi in acciaio che mantengono salda la struttura. Inoltre tra un concio e l'altro sono state inserite delle sfere in metallo per permettere l'oscillazione dei conci posti uno sull'altro.

I conci realizzati, sono stati montati l'uno sull'altro verticalmente. La colonna così formata, sottoposta ad una leggera spinta è stata in grado di compiere oscillazioni senza modificare la sua geometria. I possibili utilizzi della colonna osteomorfa possono così spaziare da colonne portanti per gli edifici ad oggetti di design (per esempio lampade piegabili) (figg. 14-15-16-17).

Note

[1] Il progetto è stato diretto dal prof. Arch. Giuseppe Fallacara con la collaborazione del prof. Ing. Marco Ferrero e il tutoraggio dell'arch. Vincenzo Minenna e l'Ing. Daniele Malomo. Hanno partecipato alla progettazione gli studenti del Lab. Laurea Morfologia Strutturale 2.o e gli studenti del corso di Tecnologia dell'Architettura dell'Università Roma La Sapienza.


GENERELLI^{SA}
Marmi e graniti La pietra per passione


GENERELLI^{SA}
Marmi e graniti La pietra per passione



GENERELLI SA: LEADER NELLA LAVORAZIONE DELLA PIETRA NATURALE

**Matteo Generelli con G. Fallacara e V. Minenna*

** Amministratore GENERELLI SA Rivera-Bironico (CH)*

La Generelli SA mette a disposizione tutta la competenza e conoscenza acquisita in quarant'anni d'esperienza nel settore della pietra naturale, grazie ad un vasto assortimento di marmi e graniti dai più comuni fino a pietre altamente pregiate.

Il punto di forza dell'azienda è stato sempre quello di aggiornarsi tecnologicamente. Infatti proprio nell'ultimo periodo ha acquistato dalla T&D Robotics un nuovo macchinario di ultima generazione: lo STONE ROBOTICS SOLUTION è una soluzione brevettata, compatta e ad elevate prestazioni per la realizzazione di piani cucina, piani da bagno, complementi d'arredo, opere architettoniche, di design e statue. Grazie alla flessibilità del braccio antropomorfo e al sistema di cambio rapido e automatizzato della testa operatrice, STONE ROBOTICS SOLUTION (Fig. 1) può operare con elettro-mandrino, disco di taglio, testa di taglio water-jet e sistema di trasporto a ventose, in modo da eseguire in totale autonomia sia la lavorazione che la movimentazione dei pezzi, richiedendo la presenza di un solo operatore. E' un macchinario dalle elevate prestazioni che permette di compiere lavorazioni molto precise e in poco tempo, garantendo una qualità eccellente sia per piccole lavorazioni quali statue e sia per grandi lavorazioni quali piani cucina, passando ovviamente per lavorazioni di tipo architettonico. Per il lavoro pesante come la fresatura, il taglio e la sagomatura delle lastre di pietra, sono impiegate macchine a controllo numerico di ultima generazione, che garantiscono precisione ed una gestione efficiente della produzione.

"Per abbattere i costi di manodopera e produzione che in Svizzera sono estremamente elevati, ci siamo rivolti alla T&D Robotics. È nato un sodalizio che ha permesso di realizzare il primo impianto robotizzato. Questo ha risolto ogni preoccupazione legata alla produzione." Matteo e Moreno Generelli.

In seguito, operai specializzati trasformano le lastre in elementi per la creazione di ambienti interni ed esterni con perfezione tecnica.

Il reparto artistico è composto da maestranza altamente qualificata. L'azienda è specializzata nelle fasi di sgrossatura, cesellatura e finitura. Tutto questo al fine di ottenere un prodotto di qualità totalmente "SWISS MADE". L'impegno dell'azienda è quello di operare nel rispetto delle mansioni e delle procedure stabilite in modo tale da: offrire una vasta gamma di prodotti in termini di materiali (marmi e graniti nazionali ed esteri), formato (blocchi grezzi, lastre, marmette, manufatti), finitura (grezza, lucida, fiammata, anticata, resinata); orientare le vendite a tutte le fasce di mercato; mettere a disposizione la propria esperienza e fornire informazioni; rispettare gli accordi ed i contratti con il cliente in termini di prodotto e servizio; innovare continuamente i



Fig. 1 Braccio robotico Stone Robotic Solution a lavoro;

Fig. 2 Esempio di realizzazione di pavimento e rivestimento a parete in pietra lavorata con macchine a controllo numerico da Generelli SA.

propri impianti, per migliorare la qualità dei prodotti ed ottimizzare la produzione in modo da contenerne i costi; operare nel rispetto della legislazione; privilegiare un approccio preventivo ai problemi e migliorare continuamente l'efficacia del sistema; operare nel rispetto delle disposizioni in materia di sicurezza ed adeguatezza dell'ambiente di lavoro, a tutela degli operatori e dei visitatori per prevenire i rischi d'incidente ed infortunio.

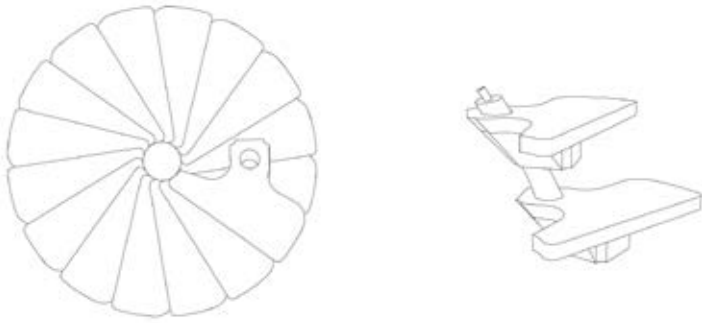
Le realizzazioni sono innumerevoli: si passa dalla collaborazione con l'Arch. Giuseppe Fallacara per la realizzazione di un arco a conci osteomorfi esposto dal vero al Marmomacc 2015, e di una colonna osteomorfa, alla customizzazione di serbatoi e carene per motociclette. Oltre a pareti e pavimenti per abitazioni private. (Fig. 2)

COMING SOON

Prototipo 1

Scala elicoidale

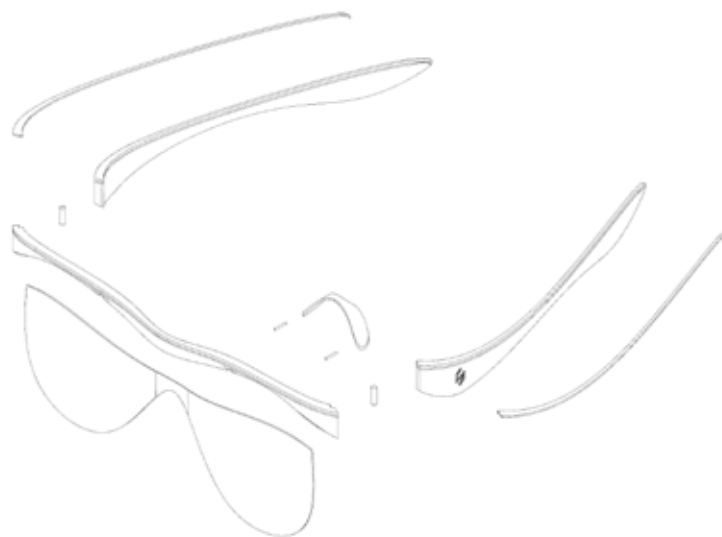
Dalla collaborazione nata tra l'azienda e il prof. Arch. G. Fallacara sono in fase di sviluppo nuovi progetti illustrati nelle pagine seguenti: la *scala elicoidale* composta da una serie di gradini disposti lungo una curva ad elica. La scala è formata solo da due pezzi in marmo reiterati lungo questa curva e dotati di armatura in malta rinforzata e fibra di carbonio



COMING SOON

**Prototipo 2
Occhiali**

Progetto di occhiali realizzati in marmo e fibra di carbonio.

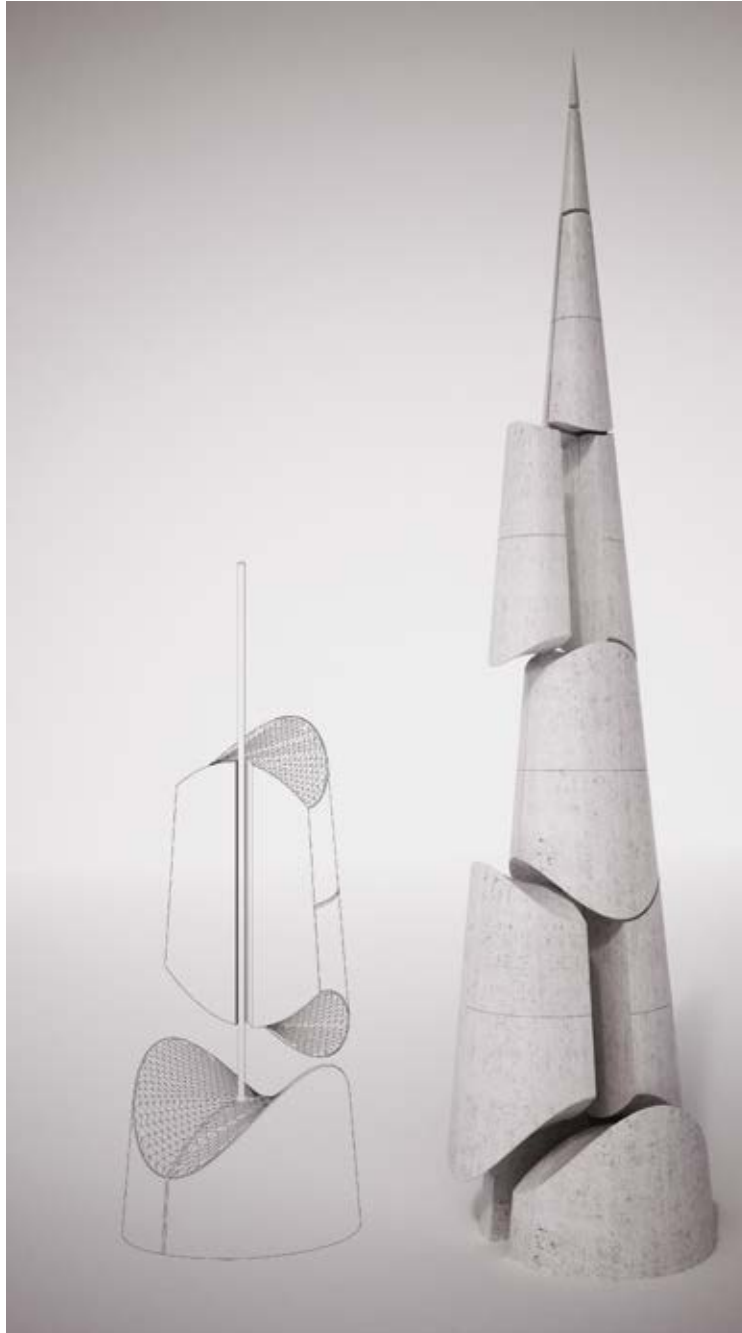


COMING SOON

Prototipo 3

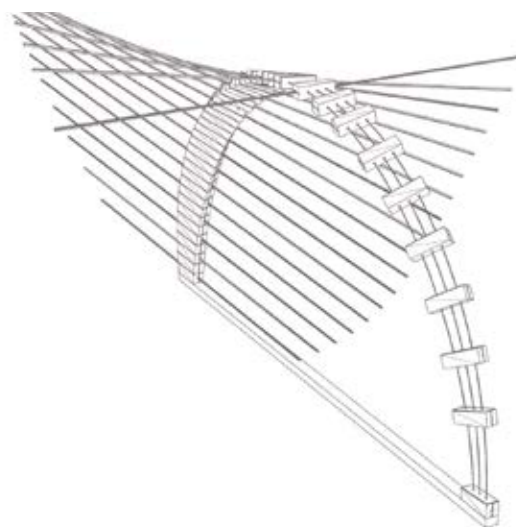
Obelix

Progetto *Obelix*, un obelisco in pietra formato da conci osteomorfi dalla geometria sinusoidale.



COMING SOON

Prototipo 4
Arco del Sol



Progetto dell' *Arco del Sol*, due archi di ellisse formati da conci di pietra dai quali fuoriescono delle barre in acciaio che si incastrano tra loro a formare una maglia spaziale.





LIBRO FINITO DI STAMPARE A SETTEMBRE DEL 2015
IN NUMERO RIDOTTO DI COPIE PER ESPlicita PRESENTAZIONE PRESSO IL 50° MARMOMACC, VERONA, 2015.
ALL'INTERNO DELLA FIERA SARANNO ESPOSTI I SEGUENTI PROTOTIPI LITICI DI CUI SI RIPORTANO LE SEGUENTI
IMMAGINI SINTETICHE.

