

Stone Skin

Applicazioni in architettura e design di gusci *free-form*
ultraleggeri in pietra naturale fibrorinforzata

Giuseppe Fallacara Politecnico di Bari, Dicar
giuseppe.fallacara@poliba.it

Maurizio Barberio Politecnico di Bari-Università degli Studi Roma Tre, Consorzio Argonauti
maurizio.barberio@uniroma3.it

La ricerca indaga le possibilità di utilizzo in architettura e design di pannelli in granito, marmo o pietra naturale a doppia o singola curvatura, rinforzati attraverso l'utilizzo di strati di fibra di carbonio o fibra di vetro, per la costituzione di gusci lapidei ultraleggeri. La combinazione tra questi due materiali consente la riduzione dello spessore delle componenti lapidee fino a pochi millimetri e il raggiungimento di grandi performance di resistenza statica del nuovo materiale. Il progetto è frutto di una collaborazione tra gli scriventi (Politecnico di Bari) e l'azienda ticinese di lavorazione del marmo e del granito Generelli SA.

Pietra Sottile, Pietra Fibrorinforzata, Materiali Compositi, Pannelli Free-form, Gusci Free-form

This research investigates the applications for architecture and industrial design of free-form panels made of natural stone, reinforced through the use of carbon fiber (or glass fiber) sheets on the back. The combination of these two materials allows reducing the thickness of the stone components up to few millimetres and the achievement of a great static performance. The project is a collaboration between the authors (from Polytechnic University of Bari) and the Ticino-based company Generelli SA.

Thin Stone, Fiber Reinforced Stone, Composite Materials, Free-form Panels, Free-form shells

Il processo di progressivo alleggerimento della costruzione litica, da massa stereotomica a pelle di rivestimento, rappresenta un'ambizione che ha sempre accompagnato l'uomo fin dall'antichità: dall'ordine dorico si è passati ai più snelli ordini ionico e corinzio; durante il medioevo, le masse murarie delle cattedrali si sono svuotate lasciando emergere gli enormi scheletri lapidei dell'architettura gotica e così via. Rendere tutto più leggero è una necessità sia della materia che della sfida intellettuale dell'uomo che punta a coniugare leggerezza materiale e forza strutturale. Del resto è la natura stessa che ci suggerisce di concentrare la materia solo dove serve, senza lasciare nulla al caso. L'imitazione della natura in questo senso, si è materializzata anche in architettura, partendo dalle prime applicazioni costruttive degli studi sulla curva catenaria di Hooke e Gaudi. Tuttavia questo percorso verso l'ottimizzazione delle strutture, costruite con materiali resistenti esclusivamente a compressione, subisce una brusca interruzione nei primi anni del Novecento, quando il modernismo mette di fatto al bando volte e cupole (D'Amato, 2014, pp. 6-9).

Come si legge nel catalogo della mostra *The International Style* del 1932: «l'effetto di massa, di solidità statica, fino ad ora qualità principale in architettura è completamente scomparso; al suo posto c'è un effetto di volume, o più precisamente di superfici piane delimitanti un volume.» (Hitchcock, Johnson [1932], 1982, pp. 52). Per l'architettura in pietra è l'origine di un lungo oblio, durato più di mezzo secolo. Il Movimento Moderno relegherà la pietra al ruolo di mero rivestimento superficiale. Tuttavia, nel corso degli ultimi trent'anni, la superficie curvata, prima prerogativa esclusiva dello spazio voltato lapideo, è tornata prepotentemente alla ribalta. Il *New Fundamentals Research Group* [1] da molti anni attivo nell'aggiornamento delle strutture massive in pietra portante (Fallacara, 2007, 2012, 2015; Fallacara, Stigliano, 2014; Fallacara, Minenna, 2014), con la ricerca dal nome *Stone Skin*, si è posto l'obiettivo di indagare le possibilità di utilizzo in architettura e design di pannelli sottili in pietra naturale a doppia o singola curvatura, rinforzati attraverso l'utilizzo di strati di fibra di carbonio o fibra di vetro, per la costituzione di gusci ultraleggeri in pietra naturale. La ricerca nasce dalla collaborazione tra il gruppo di ricerca e l'azienda ticinese di lavorazione del marmo e del granito Generelli SA, detentrica del brevetto europeo numero 16155341.7, *Method of production of objects in stone and composite material*.

Pietra sottile: antecedenti e stato attuale della ricerca

La produzione di pannelli sottili in pietra naturale fibrorinforzata è di introduzione relativamente recente. La letteratura scientifica su questo argomento è formata prin-



01

01
Carrara Robotics
(Jelle Feringa,
2014);

Grotta/Cave
(Pongratz
Perbellini
Architects, 2006);

Drappi di Pietra,
Ottoman
(R. Galiotto,
2012)

principalmente da una buona quantità di brevetti che si sono susseguiti nel tempo a partire dal brevetto depositato in Germania nel 1995 da Gernot Ehrlich sulle sfoglie di pietra naturale per rivestimenti. In architettura tra i primi casi applicati è possibile segnalare la realizzazione del pavimento dell'Aeroporto Internazionale di Denver [2] nel 1993 e, tempo dopo, è bene segnalare il progetto *Marble Curtain* di Studio Gang per la mostra *Masonry Variations* del 2003, dove il marmo rinforzato da fibra di vetro, è stato impiegato per resistere a soli sforzi di trazione, anziché compressione (Kolarevic et al. 2008, pp. 81-83). I pannelli fibrorinforzati rappresentano l'ultima evoluzione del plurimillenario impiego della pietra naturale come rivestimento, la cui popolarità è rimasta immutata nei secoli. In particolare, è possibile notare che negli ultimi due secoli, sia la ricerca scientifica che la produzione industriale, nonché la pratica architettonica, si sono principalmente concentrati sullo sviluppo di questo specifico utilizzo dei materiali lapidei rispetto ad altri (Scheffler, 2001, pp. 27-34). Oltre alla produzione dei brevetti, è bene sottolineare che la ricerca applicata sul tema del rivestimento in pietra sottile, è portata avanti soprattutto dalle aziende del settore.

Al momento, la produzione di pannelli sottili in pietra è piuttosto variegata e si può fare una distinzione tra pannelli fibrorinforzati pieghevoli e pannelli fibrorinforzati non pieghevoli. A titolo esemplificativo, si possono citare le seguenti tecnologie per i pannelli pieghevoli:

- *Flexible Stone Veneer*, tecnologia brevettata nel 1995 (Ehrlich, 1995, pp. 1-8) che prevede l'uso di sfoglie piegabili in pietra naturale fibrorinforzata per rivestimenti;
- *CFS - Carbon Fiber Stone*, sistema brevettato nel 2006 (Kuse, 2006, pp. 1-3), che prevede l'apposizione di due strati di fibra di carbonio su uno strato di pietra naturale. Il sistema è stato specificamente studiato per realizzare sia pannelli di grandi dimensioni, sia elementi strutturali, come alternativa all'utilizzo dei materiali metallici;
- Marmo pieghevole, sviluppato da Pusterla Marmi e Lorenzo Damiani nel 2012 [3], utilizzato per realizzare oggetti di design a partire da lastre di marmo piegato a singola curvatura;

- *Stone Rug*, letteralmente “tappeto di pietra” formato da uno strato molto sottile di pietra naturale tagliato al laser secondo un pattern triangolare, e uno strato retrostante di fibra di vetro e cotone. Sviluppato da Dominik Ruskin nel 2015 [4].

Per i pannelli non pieghevoli, sempre a titolo esemplificativo, si possono citare le seguenti tecnologie:

- *Stone Honeycomb Panels* o *TF Panels*, pannelli composti brevettati nel 1968 (Bourke, 1968, pp. 1-3), formati da uno strato sottile di pietra naturale e un pannello in alluminio di supporto con struttura a nido d’ape, ulteriormente fibrorinforzati con strati di resina epossidica;
- *GFRS* - *Glass Fiber Reinforced Stone*, tecnica impiegata principalmente per la realizzazione di oggetti di design o architettonici (pavimenti, facciate) che necessitano di spessori ridotti ma anche di adeguata resistenza meccanica [5].

Pannelli *free-form* sottili in pietra naturale fibrorinforzata: *Stone Skin*

La progettazione di spazi architettonici caratterizzati da superfici *free-form* a doppia curvatura, è ritornata in auge definitivamente agli inizi degli anni Novanta, con l’introduzione e la diffusione degli strumenti di modellazione tridimensionale [6]. Ancora oggi, le superfici *free-form* sono fortemente al centro degli interessi di teorici, ricercatori e progettisti, in svariati ambiti disciplinari. Nel settore lapi-

02



02

Produzione di un elemento prefabbricato in pietra leccese ricomposta (Giuseppe Fallacara e Marco Stigliano con Tarricone Prefabbricati, 2016)

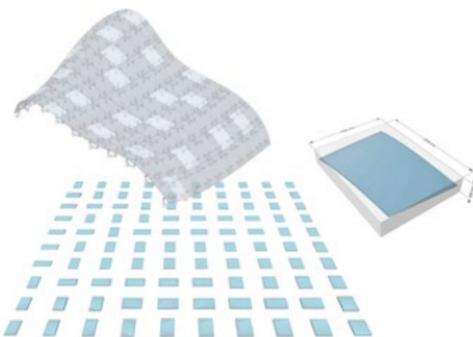
deo le superfici *free-form* sono ancora poco impiegate e, fino ad ora, hanno talvolta interessato ambiti disciplinari quali la fabbricazione robotica, la progettazione architettonica e il design [fig. 01].

I pannelli *free-form* (sottili o meno) costituiti da materiali non metallici, sono generalmente prodotti in pietra ricomposta variamente armata (*cast stone*), in cemento ad altissime prestazioni (UHPC) o in calcestruzzo fibrorinforzato (FRC), prevedendo l'utilizzo di "pietra liquida" calata all'interno di stampi di polistirolo, gesso o tessuto. Se l'elemento da fabbricare attraverso l'uso di stampi, è anche modulare, esso risulta molto più economico, data la sua riproducibilità e la conseguente possibilità di riutilizzare lo stampo più volte [fig. 02]. Tuttavia, l'aspetto superficiale ottenuto utilizzando queste tecniche è molto lontano delle qualità estetiche e prestazionali proprie della pietra naturale (qui intesa in senso lato e non secondo la classificazione UNI-8458), risultando più affine ai ricomposti a base cementizia [7].

Ritornando alla sperimentazione in atto e oggetto di questo articolo, è bene precisare che la ricerca riguarda proprio la produzione di pannelli *free-form* sottili in pietra naturale, fibrorinforzati con strati di fibra di carbonio o fibra di vetro. È possibile pensare all'impiego di questo tipo di pannelli anche per impieghi strutturali, utilizzando specifiche morfologie strutturali resistenti per forma (archi, volte, gusci, ecc.), conformando i singoli pannelli in modo tale da garantirne la resistenza intrinseca. È utile segnalare infatti che, all'aumentare della curvatura positiva dei pannelli, aumenterà la resistenza ai carichi perpendicolari alla superficie di estradosso degli stessi; in più, la loro resistenza può essere migliorata corrugandone localmente la superficie in base, ad esempio, all'andamento delle isostatiche di compressione. I principi appena descritti sono ben espressi in natura osservando la conchiglia dei molluschi bivalvi, sia essa liscia, come nel caso dei Mitili (*Mytilus gallopro-*

03
Bounding box
dei diversi
pannelli di una
superficie *free-*
form, generati
tramite uno
script elaborato
con Grasshopper
(Maurizio
Barberio, 2016)

04
Fasi di
fabbricazione del
pannello *Stone*
Skin (Generelli
SA, 2015)



03



04



Il prototipo Sfera. Si noti la traslucenza del granito. (Giuseppe Fallacara con Generelli SA, 2015)

vincialis), oppure corrugata, come nel caso dei Canestrelli (*Chlamys opercularis*).

È possibile conformare le parti del guscio con morfologie molto complesse, ottenute attraverso l'utilizzo di modellatori nurbs, quali Rhinoceros, o parametrici, quali Grasshopper. I pannelli a doppia o singola curvatura sono prodotti attraverso operazioni di fresatura dal blocco pieno di partenza, impiegando macchine utensili a controllo numerico, ed è possibile automatizzare la produzione attraverso un algoritmo studiato appositamente per "orientare" sul piano orizzontale i pannelli e calcolare la dimensione del *bounding box* necessario a produrre i pezzi [fig. 03]. La fabbricazione attraverso fresatura è stata scelta per non limitare la sperimentazione all'utilizzo esclusivo delle superfici rigate (Rippmann et al., 2011; Weir et al., 2016, pp. 284-293), prerogativa invece del *robotic diamond wire cutting* (McGee et al., 2013, pp. 62-71).

La fabbricazione del pannello *Stone Skin* a doppia curvatura avviene generalmente seguendo questo iter [fig. 04]:

- si parte dal blocco solido che contiene interamente il pannello;
- il blocco viene lavorato fino a che la parte posteriore del pannello non è interamente fresata;
- la faccia appena lavorata viene rinforzata incollando sottovuoto uno strato di fibra di carbonio o fibra di vetro;
- il blocco fibrorinforzato viene ruotato e fresato dall'altra parte, sino a che il pannello non ha assunto lo spessore desiderato (generalmente tra i 6 e 3 mm).

Stone Skin: prototipi in fase di sviluppo

Il primo prototipo realizzato secondo la tecnica descritta è Sfera, presentato dagli scriventi in occasione di un CPD presso lo studio Zaha Hadid Architects a Londra nel dicembre 2015, formato da petali di granito a doppia curvatura tutti uguali tra loro; nella variante del pannello fibrorinforzato con la fibra di vetro è possibile notare la traslucenza del granito stesso [fig. 05]. Attualmente è in produzione il prototipo *Stone Skin Arch*, un arco catenario

06



06

Il prototipo
Stone Skin
Arch (Giuseppe
Fallacara con
Generelli
SA e MGI
Sicilmarmi, 2016)

07

Le sedute Mobius
nelle varianti
divano e sedia
(design: Giuseppe
Fallacara con
Generelli SA e
MGI Sicilmarmi,
2016)

07



inscritto in un quadrato di 2,5 m di lato, realizzato con 12 pannelli in Perlato di Sicilia fibrorinforzato, larghi 1,3 m e spessi tra i 3 e i 5 mm [fig. 06]. I pannelli di intradosso ed estradosso, dotati di morfologia superficiale complessa e variabile, saranno giustapposti tra loro e fissati attraverso semplici congiunzioni bullonate in prossimità dei quattro vertici di ciascun pannello. La sua realizzazione consentirà di avere contezza dei primi dati riguardanti il reale comportamento statico e meccanico del singolo pannello in quanto tale, ma soprattutto in relazione alla totalità della struttura e delle relazioni reciproche dei suoi componenti. Un altro prototipo in fase di studio, è la seduta Mobius, costituita da un "nastro" di Perlato di Sicilia fibrorinforzato che conforma la seduta senza soluzione di continuità [fig. 07]. L'analisi FEM della seduta è stata effettuata dall'Ing. Daniele Malomo dell'Università degli Studi di Pavia [fig. 08].

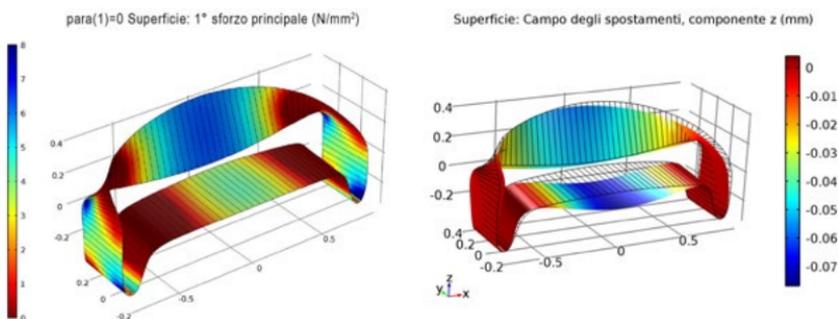
Campi d'applicazione e possibili sviluppi

I campi d'applicazione del pannello *Stone Skin* si possono dividere schematicamente in due grandi famiglie: pannelli a vocazione strutturale e pannelli non strutturali.

Per pannelli a vocazione strutturale, si intende l'utilizzo in architettura di pannelli atti alla creazione di coperture estroflesse tendenzialmente assemblati fra loro senza ulteriori strutture di supporto. Se opportunamente conformati, è possibile utilizzare infatti i pannelli per realizzare archi, volte e gusci a singola o doppia curvatura e a singolo o doppio guscio (accoppiando cioè due pannelli tra loro). È possibile inoltre far collaborare i pannelli con una griglia formata da bande metalliche, in modo da migliorare l'integrità statica della struttura e permetterne la posa in opera con modalità simili a quelle delle gridshell post-formate. Nel caso di strutture a doppio guscio, è possibile riempire lo spazio cavo con materiale isolante, al fine di migliorare l'isolamento termico della struttura, con schiuma poliuretanic, che una volta solidificatasi migliora la solidità complessiva dei pannelli accoppiati tra loro, restituendone idealmente la monoliticità.

Per pannelli non strutturali invece, si intende l'utilizzo di pannelli portati da una struttura di supporto. In questo caso lo strato di fibra di carbonio è utilizzato prevalentemente per questioni di sicurezza, al fine di evitare che una eventuale rottura della pietra possa arrecare danni a terzi. Questi pannelli possono essere usati in architettura, per realizzare cortine lapidee, facciate ventilate, coperture [fig. 09], controsoffitti acustici, nel campo dell'*industrial design* e dell'*automotive design*. Un altro aspetto interessante è rappresentato dalla possibilità di retroilluminare i pannelli, sfruttando la traslucenza data dal loro spessore ridotto, attraverso l'applicazione di strisce led, *LED Light Tiles* e pellicole fotoluminescenti, in combinazione con l'uso di fibra di vetro nella parte retrostante.

08
Analisi FEM
della seduta
Mobius (Design:
Giuseppe
Fallacara, Analisi
FEM: Daniele
Malomo, 2016)



08



Esempio di facciata/copertura complessa, modellata con Grasshopper (Maurizio Barberio, 2016)

Concludendo, nel presente articolo si è voluto innanzitutto inquadrare l'argomento oggetto della ricerca da un punto di vista storico, ripercorrendo la storia recente delle tecnologie di produzione lapidee relative alla pietra sottile e delle loro applicazioni in architettura, definendo più compiutamente il collocamento del pannello *Stone Skin* all'interno di questa classificazione. In futuro si intende portare avanti la ricerca sotto diversi aspetti:

- minimizzazione del volume dei bounding box lapidei da cui ricavare i pannelli, tramite l'ottimizzazione algoritmica del paneling della superficie free-form di partenza;
- minimizzazione dello sfrido necessario alla produzione dei pannelli, nonché studio di strategie efficaci di riciclo del materiale di scarto;
- indagini sulle capacità flessionali del pannello indotte dall'azione meccanica e dal calore, con possibilità di rendere reversibile la deformazione per il progetto di responsive façades;
- progettazione di morfologie strutturali complesse e innovative.

NOTE

[1] Il *New Fundamentals Research Group*, è un team di architetti e ricercatori italiani coordinati dal Prof. Giuseppe Fallacara. Il team è affiliato al DICAR del Politecnico di Bari. Canale YouTube del gruppo: <https://www.youtube.com/channel/UClal-Nkbf2msXg8GqyA7yHIA>

[2] <http://www.thinstonesystems.com/technical.html>

[3] Si veda il progetto "Panca foglio" di Lorenzo Damiani, Calvasina con Pusterla Marmi, 2012.

[4] Per ulteriori dettagli si consulti: <https://dominikraskin.com/2015/11/15/stone-rug/>

[5] Per ulteriori dettagli si consulti: <https://www.strombergarchitectural.com/materials/gfrs>

[6] Numerosa la bibliografia sull'argomento, tra cui si segnala: Mario Carpo (ed.), *The Digital Turn in Architecture 1992-2012* (AD Reader), London, Wiley, 2013, pp. 267.

[7] È bene sottolineare la natura non strutturale di questo tipo di pannelli, da non confondere quindi con il filone progettuale proprio dei gusci sottili monolitici e continui costruiti in calcestruzzo armato nel secolo scorso (Candela, Isler, ecc.).

REFERENCES

Hitchcock Henry-Russell, Johnson Philip, *The International Style*, **1932** (tr. It. *Lo Stile Internazionale*, Bologna, Zanichelli, 1982, pp. 262).

Bourke Patrick Terence, *Marble faced wall panels and method of making same*, brevetto US3723233, registrato il 19 Febbraio **1968**, pp. 1-3.

Ehrlich Gernot, *Flexible sheet material*, brevetto DE19522875A1, registrato il 23 Giugno **1995**, pp. 1-8.

Scheffler Michael J., "Thin-Stone Veneer Building Facades: Evolution and Preservation", *APT Bulletin* 32 (1), **2001**, pp. 27-34.

Kuse Kolja, *Method for stabilizing thin stone or ceramic panels using carbon fiber matrix and carbon fiber stone support layer*, brevetto DE202006009793U1, registrato il 21 Giugno **2006**, pp. 1-3.

Fallacara Giuseppe, *Verso una progettazione stereotomica. Nozioni di Stereotomia, Stereotomia digitale e trasformazioni topologiche: ragionamenti intorno alla costruzione della forma*, Roma, Aracne Editrice, **2007**, pp. 187.

Kolarevic Branko, Klinger Kevin, *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*, New York, NY, USA, Routledge, **2008**, pp. 81-83.

Rippmann Matthias, Block Philippe, "Digital Stereotomy: Voussoir geometry for freeform masonry-like vaults informed by structural and fabrication constraints", in *Proceedings of the IABSE-IASS Symposium 2011*, London, United Kingdom September 20-23, **2011**.

Fallacara Giuseppe, *Stereotomy. Stone Architecture and New Research*, Paris, Presses des Ponts, **2012**, pp. 315.

Mcgee Wes, Feringa Jelle, Søndergaard Asbjørn, "Processes for an architecture of volume", pp. 62-71 in Brell-Cokcan Sigrid, Braumann Johannes, (a cura di), *Rob|Arch 2012. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Wien-New York, Springer, **2013**, pp. 320.

Fallacara Giuseppe, Stigliano Marco (a cura di), *New Fundamentals of Natural Architecture*, Roma, Aracne Editrice, **2014**, 122.

Fallacara Giuseppe, Minenna Vincenzo (a cura di), *Stereotomic Design*, Maglie (LE), Edizioni Gioffreda, **2014**, pp. 96.

D'Amato Claudio, *Perché il modernismo non ha mai costruito volute*, pp. 6-9, in Fallacara Giuseppe, Minenna Vincenzo (a cura di), *Stereotomic Design*, Maglie (LE), Edizioni Gioffreda, **2014**, pp. 85.

Fallacara Giuseppe, *Vers une architecture en pierre. Bureaux SNBR a Troyes 2008-2015*, Paris, Presses des Ponts, **2015**, pp. 128.

Weir Simon, Moulton Dion, Fernando Shayani, "Stereotomy of Wave Jointed Blocks", pp. 284-293 in Reinhardt Dagmar, Saunders Rob, Bury Jane (a cura di), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, Wien-New York, Springer, **2016**, pp. 473.