

Emanuela Lanzara

Shaping & Paneling

Superfici complesse per l'architettura e il design

FORME DEL DISEGNO
FrancoAngeli

FORME DEL DISEGNO

Collana diretta da Elena Ippoliti, Michela Rossi, Edoardo Dotto

La collana FORME DEL DISEGNO si propone come occasione per la condivisione di riflessioni sul disegno quale linguaggio antropologicamente naturale, al tempo stesso culturale e universale, e che indica contemporaneamente la concezione e l'esecuzione dei suoi oggetti.

In particolare raccoglie opere e saggi sul disegno e sulla rappresentazione nell'ambito dell'architettura, dell'ingegneria e del design in un'ottica sia di approfondimento sia di divulgazione scientifica.

La collana si articola in tre sezioni: PUNTO, che raccoglie contributi più prettamente teorici su tematiche puntuali, LINEA, che ospita contributi tesi alla sistematizzazione delle conoscenze intorno ad argomenti specifici, SUPERFICIE, che presenta pratiche ed attività sperimentali su casi studio o argomenti peculiari.

Comitato editoriale - indirizzo scientifico

Carlo Bianchini, Pedro Manuel Cabezas Bernal, Andrea Casale, Alessandra Cirafici, Paolo Clini, Edoardo Dotto, Pablo Lorenzo Eiroa, Fabrizio Gay, Elena Ippoliti, Leonardo Paris, Sandro Parrinello, Fabio Quici, Michela Rossi, Andrew Saunders, Graziano Mario Valenti

Comitato editoriale - coordinamento

Andrea Casale, Elena Ippoliti, Leonardo Paris, Fabio Quici, Graziano Mario Valenti

Progetto grafico

Andrea Casale



Il presente volume è pubblicato in open access, ossia il file dell'intero lavoro è liberamente scaricabile dalla piattaforma **FrancoAngeli Open Access** (<http://bit.ly/francoangeli-oa>).

FrancoAngeli Open Access è la piattaforma per pubblicare articoli e monografie, rispettando gli standard etici e qualitativi e la messa a disposizione dei contenuti ad accesso aperto. Oltre a garantire il deposito nei maggiori archivi e repository internazionali OA, la sua integrazione con tutto il ricco catalogo di riviste e collane FrancoAngeli massimizza la visibilità, favorisce facilità di ricerca per l'utente e possibilità di impatto per l'autore.

Per saperne di più:

http://www.francoangeli.it/come_publicare/publicare_19.asp

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: www.francoangeli.it e iscriversi nella home page al servizio "Informatemi" per ricevere via e-mail le segnalazioni delle novità.

Emanuela Lanzara

Shaping & Paneling

Superfici complesse per l'architettura e il design

FORME DEL DISEGNO
Sezione
LINEA

FrancoAngeli

Isbn Open Access: 9788891798923

Copyright © 2019 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore ed è pubblicata in versione digitale con licenza *Creative Commons Attribuzione-Non Commerciale-Non opere derivate 4.0 Internazionale* (CC-BY-NC-ND 4.0)

L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate sul sito

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

Indice

Presentazione <i>Riccardo Migliari</i>	9
Introduzione	11
Parte prima. <i>Architectural surfaces</i>	
1. La superficie: un supporto per la complessità (<i>What?</i>)	17
Speculazione: virtuale vs reale	17
Interazione: acquisizione e prestazione	22
Iconicità: evocazione e narrazione	25
La superficie come sistema: implosione ed esplosione	28
2. <i>Keywords (Why?/How?)</i>	35
Forma complessa: il problema	35
Discretizzazione: il mezzo	38
Ottimizzazione: il processo	39
Industrializzazione: l'obiettivo	43

Shaping & Paneling

3. <i>Architectural Geometry (Who?/Where?/When?)</i>	49
<i>Main character: la figura dell'architetto</i>	49
<i>Main research field: Architectural Geometry</i>	55
<i>Main topic: Paneling architectural complex surfaces</i>	57
<i>Main digital tool: computational design</i>	61

Parte seconda. Principi e tecniche

4. <i>Paneling & Digital Fabrication</i>	69
Sistemi regolari vs sistemi casuali: ordine e caos	69
<i>Surfaces Paneling: piccola, media e grande scala</i>	73
Sistemi portati vs sistemi autoportanti	75
Sistemi discreti, semidiscreti e continui: <i>in medio stat virtus?</i>	76
I materiali e le tecniche di fabbricazione	80
Oltre l'architettura: ambiti di sperimentazione	96
5. I principi geometrici	101
La rivelazione delle superfici: dal dato al <i>pattern</i>	101
Cenni di geometria differenziale: la curvatura delle superfici	112
Classificazione e discretizzazione	129
6. <i>Shape & pattern</i>	135
I sistemi discreti: <i>mesh</i> "funzionali"	135
<i>Pattern</i> triangolare	150
<i>Pattern</i> esagonale	159
<i>Pattern</i> quadrangolare	165
<i>Offset Mesh</i>	174
I modelli semidiscreti: <i>DStrips</i>	178
I sistemi misti: <i>Panel Fitting</i>	185

Parte terza. Best practices

7. Sistema discreto autoportante: i <i>Cocoon pavilions</i>	191
8. Sistema semidiscreto portato: le <i>Eiffel Tower pavilions façades</i>	203

9. <i>Digital Form Finding & Paneling</i>	215
<i>Digital shells</i>	215
Membrane & <i>hexagonal Paneling</i>	222
Catenarie & <i>DStrips</i>	226
<i>Offset Mesh & Digital Stereotomy</i>	231
English abstracts	237
Bibliografia	239

Presentazione
di Riccardo Migliari

Alla fine del XVIII secolo, la divulgazione e lo sviluppo della geometria descrittiva ha reso possibile la soluzione accurata di un gran numero di problemi, relativi al taglio delle pietre, che soffrivano prima di approssimazioni ed errori.

Allo stesso modo, due secoli più tardi, il calcolo digitale e la computer grafica hanno permesso di scomporre in facce piane, ripetibili, e perciò di realizzare, le superfici di forma libera tanto amate da quegli architetti che una critica adulatoria ha voluto definire 'archistar'.

Questi risultati si debbono, principalmente, al matematico austriaco Helmut Pottmann, che ha coniato anche un nuovo nome per queste applicazioni: Architectural Geometry, non ritenendo adeguata la vecchia denominazione, che avrebbe ben potuto essere 'Stereotomia', così come geometria descrittiva è pur sempre la scienza alla quale queste nuove teorie e le relative applicazioni appartengono.

Lungi da me l'intento di polemizzare con Pottmann, vorrei, invece, con questa breve premessa, mettere in luce uno dei caratteri di maggiore originalità di questo libro, che è proprio quello di ricondurre la rappresentazione e la realizzazione delle forme libere nell'alveo della Storia.

Fortunatamente, Emanuela Lanzara ha avuto l'ottima formazione della Scuola napoletana della geometria descrittiva, la cui tradizione risale a Vincenzo Flauti che fu il primo, in Italia, a riprendere e sviluppare l'insegnamento di Sylvestre Lacroix e Gaspard Monge e giunge fino a noi attraverso l'insegnamento di Anna Sgrosso.

Questa educazione si riflette, innanzitutto, nell'intento di generalizzare il problema, collocando le superfici di forma libera in un contesto che è, in primo luogo, quello dell'Architettura contemporanea, in un percorso che, a ritroso, risale fino ai primi del Novecento.

L'abitudine al pensiero razionale e all'iter dimostrativo si rivela, poi, nell'analisi delle superfici di forma libera, intese come complessi di frazioni continue, legate da vincoli di discontinuità, ciò che fa di loro, già all'origine del progetto, sistemi discreti, come appunto erano le strutture oggetto della stereotomia. E come in questa scienza antica la tecnica del tagliapietre condizionava la discretizzazione del volume massivo di archi e volte, così nel taglio delle superfici complesse (Paneling) hanno un ruolo dominante i processi produttivi e i relativi processi di ottimizzazione, che Emanuela Lanzara esamina in modo approfondito, ma mai avulso dal contesto storico.

E si giunge così ai principi teorici che sono alla base dei suddetti processi, che sono esplicitamente ricondotti alla tradizione geometrico-descrittiva e che permettono, infine, di comprendere gli algoritmi che sono alla base dei diversi processi di discretizzazione.

Due esempi pratici, o, meglio, due rapide sperimentazioni, che applicano la teoria precedentemente esposta al progetto e alla realizzazione di due padiglioni in forme simili al toro o alle ciclidi, permettono agli studiosi di consolidare le conoscenze acquisite e fanno, di questo libro, un testo che va ben oltre la dissertazione accademica: un utile strumento di formazione.

Emanuela Lanzara merita dunque un ringraziamento particolare, per averci regalato questa sua fatica, ma un riconoscimento di merito deve essere attribuito ai suoi Maestri, della Università Federico II, che hanno così bene seguito questa giovane e promettente ricercatrice.

Introduzione

Una forma complessa può coincidere, o meno, con una o più superfici complesse. Una superficie complessa, invece, coinciderà sempre con una forma complessa. Rispetto al punto o alla linea, la superficie rappresenta un ente geometrico la cui natura dipende strettamente dalle mutue relazioni esistenti tra le parti che la compongono. Questa interpretazione rende la superficie un supporto ottimale attraverso il quale la complessità può manifestarsi, fornendo delle possibili risposte ai problemi che essa stessa, in quanto tale, pone. Lo scopo principale è quello di rispondere in maniera prestante ed espressiva alle sfide architettonico-ambientali. Nella sua totalità, la complessità delle forme dell'architettura contemporanea può essere indagata e interpretata da diversi punti di vista: concettuale, spaziale e tecnologico. Tra teoria e prassi, l'obiettivo di questo volume è lo studio teorico-applicativo delle tecniche di *Paneling* di superfici complesse. Il campo di ricerca all'interno del quale esso si colloca è il settore multidisciplinare dell'*Architectural Geometry*. Il termine *rationalization* (razionalizzazione) è utilizzato dai *geometry experts* e *computational designers* per considerare tanto i processi di *optimized Paneling* che mirano alla discretizzazione di una superficie complessa (scomposizione in facce piane), tanto quelli che mirano alla genesi di modelli semidiscreti (scomposizione in elementi sviluppabili derivanti dall'ulteriore suddivisione di sistemi discreti) e misti (scomposizione di una superficie complessa in porzioni di superficie a singola e a doppia curvatura). Pertanto, appare evidente quanto la geometria da sempre rappresen-

ti la chiave di lettura, nonché il principale strumento analitico-attuativo, attraverso cui è possibile controllare l'intero processo di produzione architettonica, a partire dalla fase creativa, fino a raggiungere quella costruttiva. In particolare, nell'ambito della realizzazione di architetture di forma complessa, l'obiettivo principale risiede nell'indagine e nella sperimentazione di quei processi che consentono di ottimizzare un'opera dal punto vista costruttivo, estetico ed economico. Ottimizzare significa soprattutto favorire la creazione di processi integrati e multidisciplinari attraverso lo sviluppo di nuove competenze da parte delle figure coinvolte nel processo: lo scopo è favorire l'innovazione dei processi, congiungendo le conoscenze produttive, eventualmente derivanti da altri settori, con le necessità espressive del progetto.

Le forme complesse non rappresentano solo l'espressione di una nuova estetica legata al particolare momento culturale e socio-economico generato dalla rivoluzione digitale ma possono essere considerate il luogo per sperimentare e ottimizzare le soluzioni a cui la nuova coscienza ecologica mira per la realizzazione di un'architettura sostenibile. Grazie ai nuovi strumenti, come dimostrano gli approcci intrapresi dai casi guida trattati all'interno della terza parte del volume, un *computational architect* non progetta a priori la forma di un edificio, ma ricerca e manipola una serie di dati, codificati come una sequenza di equazioni parametriche, al fine di generare una serie di possibili soluzioni progettuali mirate a fornire una risposta sostenibile alle differenti, nuove sfide ed esigenze architettonico-ambientali. L'opportunità di manipolare l'oggetto architettonico attraverso la finestra virtuale del computer consente di focalizzare l'attenzione sulle proprietà geometriche della forma e di ragionare attraverso figure e solidi elementari alla ricerca di una possibile soluzione di scomposizione e semplificazione della complessità.

La logica di aggregazione e le relazioni di interdipendenza degli elementi costituenti l'architettura si riflettono nella complessità ed unicità della realtà compositiva e costruttiva. I prototipi, da sempre, rappresentano dunque il luogo virtuale su cui effettuare le operazioni geometriche necessarie a verificare e garantire le interazioni tra i vari elementi che compongono un oggetto.

«Qualsiasi tentativo di costruzione teorica nel nostro ambito deve, fin dall'inizio, assumere un ruolo ausiliario, una condizione secondaria subordinata alle opere [...] È come la centina che rende possibile la costruzione dell'arco: una volta compiuta la sua missione, scompare e non rientra nella percezione che abbiamo dell'opera finita, ma sappiamo che è stato un passaggio obbligato e imprescindibile, un elemento necessario a erigere quello che ora vediamo e ammiriamo¹». Nei secoli passati, come oggi, l'approccio alla ricerca consiste, talvolta, nel ri-

baltare l'oggetto dell'attività progettuale dall'opera agli elementi necessari per realizzarne ogni singola parte. Nel passaggio dalla tradizione all'innovazione, agendo sulle superfici mediante specifiche operazioni geometriche, è possibile ricavare le tracce-profilo attraverso cui viene discretizzata la forma iniziale e vengono prodotti gli elementi necessari per la realizzazione del manufatto. Le superfici vengono realizzate ricucendo materialmente le singole porzioni o *patches* geometricamente definite mediante le operazioni di *Paneling* del prototipo digitale. Lo scopo di tale operazione è, in definitiva, quello di ricavare le geometrie guida per la fabbricazione dei singoli elementi, traducendo così le impronte ricavate in ambito digitale in elementi tangibili e riconoscibili nelle opere costruite. A tal proposito, il principale contributo di questo libro consiste nella ricerca e nella dimostrazione del legame esistente tra la curvatura delle superfici complesse e le tecniche di razionalizzazione che consentono di ottimizzarne la fattibilità. Sulla base di tale ipotesi, si dimostra che l'analisi della curvatura gaussiana rappresenta uno strumento progettuale capace di veicolare ed ottimizzare l'intero processo di realizzazione di una superficie, dalla fase ideativa a quella costruttiva, in quanto inevitabilmente coinvolto nel processo e negli esiti che sottendono alla distribuzione dei *pattern* (reti di curve, tassellazioni, distribuzione di pannelli piani e curvi) necessari per approcciare e per raggiungere la non immediata realizzabilità fisica di un oggetto di forma complessa.

Coerentemente con le riflessioni elaborate, il volume è strutturato da tre parti. La prima parte introduce e osserva, in maniera critica, il tema dell'uso della superficie in architettura, indagata in qualità di supporto speculativo, interattivo ed iconico per la manifestazione di contenuti e di relazioni complesse, innate o indotte. Le fasi di discretizzazione, ottimizzazione e industrializzazione strutturano la sequenza di azioni necessarie per giungere alla realizzazione sostenibile di una forma complessa. L'attenzione è rivolta al ruolo, consapevole o meno, che la figura dell'architetto, non sempre *computational designer* o programmatore, svolge all'interno del processo.

La seconda parte introduce ed indaga il tema del *Paneling* di superfici complesse. A supporto delle ipotesi avanzate è stato analizzato un campione di superfici complesse pannellizzate e appartenenti alla media e grande scala architettonica; inoltre, sono stati indagati i materiali e le tecniche di *Digital Fabrication* che favoriscono l'industrializzazione del prodotto. L'indagine affronta le modalità di razionalizzazione discreta (panelli piani), semidiscreta (panelli sviluppabili), e mista (panelli piani e curvi). Le superfici rigate rappresentano, da sempre, la tipologia di forme più semplice da gestire: da riferimento morfologico diventano il mezzo attraverso cui scomporre, in parti più semplici ed economiche, la

complessità delle forme libere. La classificazione differenziale delle superfici, finalizzata alla distribuzione ottimizzata di *pattern* regolari (triangolare, esagonale e quadrangolare) fornisce la risposta geometrico-compositiva per ottimizzare l'applicazione delle tecniche di razionalizzazione o *Paneling*.

Dalla teoria alla prassi, la terza parte verifica l'applicazione dei contenuti teorici indagati all'interno della seconda parte attraverso l'analisi di casi studio emblematici: involucri e facciate a doppia curvatura la cui ottimizzazione geometrico-costruttiva consiste nella messa a punto di sistemi discreti, semidiscreti e misti.

Infine, sono state affrontate una serie di sperimentazioni di *Digital Form Finding* ispirate dallo studio dei casi indagati e finalizzate alla ricerca delle condizioni geometriche ottimali che consentono di coniugare la natura formale delle superfici complesse con le tecniche di razionalizzazione ritenute più idonee. Tra le proposte di ricerca futura sono segnalate le proprietà di *offset* di cui alcuni *pattern* sono dotati per studiarne le eventuali ricadute nell'ambito della *Digital Stereotomy*, con particolare riferimento al *pattern* esagonale, e lo sviluppo di soluzioni formali che favoriscano l'utilizzo di strisce e porzioni di superfici sviluppabili per la razionalizzazione di superfici complesse.

In conclusione, questo volume rappresenta uno strumento finalizzato a sistematizzare parte dei gli studi di un campo di ricerca avanzato ed in continuo fermento contribuendo allo sviluppo di approcci consapevoli in risposta alle esigenze ed alle problematiche riferite all'uso delle superfici complesse in architettura e poste dalla sfide socio-economiche contemporanee. Lo scopo principale è quello di ispirare nuove soluzioni future per l'architettura e il design.

Parte prima
Architectural surfaces

1. La superficie: un supporto per la complessità (*What?*)

Il caso ha delle regole che ancora non conosciamo.
Albert Einstein

Speculazione: virtuale vs reale

Una forma complessa può coincidere, o meno, con una o più superfici complesse.

Una superficie complessa, invece, coinciderà sempre con una forma complessa.

La superficie rappresenta un ente geometrico la cui natura dipende dalle mutue relazioni esistenti tra le parti che la compongono. Questa interpretazione rende la superficie un supporto ottimale attraverso il quale la complessità può manifestarsi, fornendo delle possibili risposte ai problemi che essa stessa, in quanto tale, pone. Come Aldo Aymonino afferma, «Mentre il punto, la linea sono da considerare elementi distanti dal fare architettura, la superficie può invece essere considerata come del tutto dotata di un'identità architettonica [...] Ad un certo punto, il Moderno comincia a riconciliarsi con la superficie, staccandosi dall'ideologia del Primo Moderno che



Fig. 1/ *Isopycnic system*, Z.Oksiuta.
Fonte: <http://oksiuta.studio/>

Figg. 2, 3/ *Biological Habitat*, Z.Oksiuta
(2011). Fonte: <http://oksiuta.studio/>

diffidava dalla superficie in quanto luogo della delittuosa decorazione. È in pieno *International Style* che la superficie si emancipa dalle sole sperimentazioni di tipo pittorico e decorativo, acquistando così finalmente corpo, grana e spessore»¹.

Osservando diversi esempi di architetture antiche, moderne e contemporanee è dunque possibile concludere che lo spazio possa essere semplicemente delimitato da superfici (figg. 1-3). Negli anni '50, Reyner Banham ipotizzava che gli spazi abitati dai primitivi fossero «non volumetrici», ricorrendo, volta per volta, alla realizzazione di accampamenti capaci di rispondere alle diverse esigenze². Pertanto, i sistemi che potremmo definire privi di massa, come ad esempio le coperture, gli involucri o le facciate, possono essere ricondotti ai più antichi esempi di rami e di pelli intrecciati per la realizzazione delle costruzioni primitive. Alla luce delle profonde ed attente riflessioni elaborate da Branko Kolarevic, e pubblicate all'interno della sua celebre opera *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*³, è pertanto interessante rintracciare le permanenze, o delineare le trasformazioni, che oggi è possibile individuare nell'ambito della realizzazione delle forme complesse rispetto ai contenuti e alle speculazioni teorizzate nei secoli precedenti. Gli scritti di teorici e studiosi, dal filosofo e matematico tedesco Wilhelm Leibniz, al pensatore francese Gilles Deleuze⁴, hanno informato ed influenzato gli approcci contemporanei alla progettazione architettonica. In particolare, le teorie di Deleuze, derivanti dallo studio del pensiero e dell'estetica barocca, introducono l'ambiguità spaziale e figurativa generata dalla piega, ispirando la creazione di superfici architettoniche duttili e lisce e di spazi transitori talvolta capaci di fondere l'edificio con il sito nel quale esso stesso è inserito. La prima era digitale ha eletto la curva quale principale strumento per il pensiero e la graficizzazione del

1 Aymonino 2006, p. 25.

2 Banham 1980.

3 Kolarevic 2003.

4 Deleuze 2004.

progetto⁵. Questo approccio ha lasciato un segno indelebile nella figurazione e nell'identità dell'architettura contemporanea. La prima era digitale è caratterizzata da un'architettura narcisista, impegnata nella spettacolarizzazione della propria immagine. Tuttavia, a conferma del continuo «ricorso alle cose umane»⁶, il fascino dei più recenti esperimenti di progettazione architettonica non risiede nell'esplorazione e nella comunicazione di forme astratte ma nei meccanismi tra le parti che compongono l'intero sistema. La potenza di calcolo dei nuovi strumenti e la poetica tecnica della seconda era digitale hanno progressivamente generato un fenomeno di standardizzazione digitale di massa. I processi di ottimizzazione da sempre sono ispirati dal principio della modularità, generando un inevitabile processo di visibile frammentazione della continuità: un graduale tecnicismo si sovrappone ad un'immagine complessa ed intangibile. In *The Second Digital Turn. Design Beyond Intelligence*⁷, Mario Carpo parla di un'architettura e di un *design* che derivano da una nuova consapevolezza professionale legata all'uso dei nuovi strumenti digitali che accompagnano gli sviluppi della terza rivoluzione industriale, non più «strumenti per creare, ma strumenti per pensare»: l'obiettivo principale è l'ottimizzazione di tutti gli elementi coinvolti nel processo. Questa ricerca è dunque ispirata dalle numerose riflessioni derivanti dall'osservazione dei fenomeni architettonico-spaziali che hanno modificato e che stanno modificando, in maniera radicale, quelli che da sempre rappresentano i concetti fondativi e strutturanti della disciplina architettonica. Dalla seconda metà del '900, l'opera *Theory and Design in the First Age Machine*⁸, ha contribuito a favorire le speculazioni formali di diversi gruppi, tra cui Archigram, Metabolism e Superstudio, scaturite in immagini di «città molli e di metafore robotiche», di architetture scultoree, non abitabili.



Figg. 4, 5/ *DAW*: vista d'insieme e particolare. MARC FORNES / THE VERY MANY. Fonte: Courtesy by Inception and MARC FORNES & THEVERYMANY.

5 Cfr. Carpo 2017.

6 Vico 1744.

7 Carpo 2017.

8 Banham 1980.



Fig. 6/ Modello di una *Embriological House*, progetto non realizzata di Gregg Lynn. Fonte: <https://www.flickr.com/photos/eager/10781374024>. Autore: Forgemind ArchiMedia.

Fig. 7/ *H2O Pavilion*, Nox/Lars Spuybroek. Fonte: Wikimedia Commons.

Fig. 8/ *Burnham Pavilion* (Chicago), Zaha Hadid. Fonte: JohnPickenPhoto.

9 Kolarevic 2003.

10 Cfr. Ippolito 2006, pp. 18-19.

11 Il *software Binary Large Objects* (BLOB), utilizzato da Lynn genera la forma in base all'azione di forze esterne (<http://www.artsblog.it/post/866/greg-lynn-e-la-blob-architecture>).

12 Thomson D'Arcy 1917, in Kolarevic 2003.

13 Novak 1991.

14 Cfr. Ippolito 2006, p. 69.

I materiali deformabili, come la plastica, hanno ispirato il trattamento gratuito e spesso sfrenato della forma, accogliendo superfici topologicamente complesse, come il toro, il nastro di Möbius e la bottiglia di Klein, in ambito architettonico⁹. Tali posizioni sono state adottate con entusiasmo da una serie di architetti contemporanei d'avanguardia, autori di quelle architetture cosiddette "immateriali"¹⁰.

Greg Lynn è stato uno dei primi architetti ad utilizzare i *software* di animazione per generare forme complesse e biomorfe¹¹ (fig. 6): il segno è tracciato dal moto e dall'azione della forza. Nelle sue speculazioni è, dunque, l'animazione che implica l'evoluzione della forma. La teoria secondo la quale la forma e le sue trasformazioni rappresentano il prodotto dell'azione dinamica di forze è stata adottata da Lynn direttamente dalle teorie pubblicate da D'Arcy Thompson nella sua opera *Crescita e forma*¹², in cui questi sostiene che, in natura, la forma e le sue variazioni sono dovute all'azione di forze.

Marcos Novak, attraverso le sue esplorazioni algoritmiche, costruisce modelli matematici e procedure generative legate alla presenza di numerose variabili, preoccupandosi di manipolare le mutue relazioni tra le parti coinvolte, piuttosto che gli oggetti stessi¹³. La continua mutabilità della forma comporta la ridefinizione del tempo come elemento attivo, dunque come parametro, del processo progettuale¹⁴. Attraverso l'approccio parametrico-generativo, per generare una forma è possibile sottoporre elementi geometrici semplici all'influenza di campi di forze: ne sono esempio gli esperimenti di torsione e flessione degli oggetti, di genesi e manipolazione di *Blobs* o di *metaballs* amorfi e mutuamente interagenti e gli esperimenti di *Shaping e/o Digital Form Finding*. Grazie alla fusione tra le ricerche intraprese da diversi studiosi, *designer* e *computational designer*, le potenzialità dei nuovi *digital tools*, gli avanzamenti

nel campo della *Digital Fabrication* e le speculazioni teorizzate all'inizio del secolo acquisiscono sempre più fisicità (figg. 7, 8). L'obiettivo di queste ricerche è quello di sviluppare soluzioni ottimizzate dal punto di vista estetico, costruttivo ed economico per migliorare il rapporto tra il costruito e l'ambiente all'interno del quale esso si inserisce, traendo ispirazione dalla natura stessa e dall'applicazione dei principi che ne derivano per generare innovazione attraverso la creazione e il controllo di forme e sistemi biomorfi. Le sperimentazioni artistiche ed architettoniche dell'architetto e *computational designer* francese Marc Fornes, fondatore di *THEVERYMANY™*, centro di ricerca con sede a New York, rappresentano dei prototipi la cui natura geometrica e strutturale è attentamente calcolata dalle fasi iniziali di ricerca formale a quelle successive della produzione¹⁵ (figg. 9, 10). Marc Fornes ha collaborato con Zaha Hadid, Ross Lovegrove e SOM ed è una delle figure di spicco nello sviluppo di protocolli per programmi di calcolo applicati alla progettazione e produzione nei campi dell'architettura e del design. Il gruppo di ricerca ha ideato un approccio basato sull'assemblaggio di "strisce strutturali" piane in alluminio di spessore inferiore ad un millimetro per ottimizzare la realizzazione di forme complesse autoportanti. Il *Pleated inflation*, ad Argeles-sur-mer (Francia) è tra le strutture autoportanti più ardite realizzate dal gruppo. Il *pop up store di Louis Vuitton & Yayoi Kusama* è la prima struttura a guscio autoportante realizzata in fibra di carbonio (fig. 11). Nonostante la complessità delle forme generate, le creazioni di MARC FORNES/*THE VERY MANY™* derivano dall'assemblaggio di un insieme di elementi sviluppabili.

L'*ICD/ITKE Reserch Pavilion* è un progetto di ricerca interdisciplinare diretto da Achim Menges¹⁶ e rivolto allo studio e sviluppo delle correlazioni esistenti tra



Figg. 9, 10/ Il *Pleated inflation*, 2015, Argeles-sur-mer (Francia) di MARC FORNES / THE VERY MANY. Fonte: Courtesy by Inception and MARC FORNES / THEVERYMANY.

Fig. 11/ Il *Pop up store di Louis Vuitton & Yayoi Kusama*, MARC FORNES / THE VERY MANY. Fonte: Courtesy by Inception and MARC FORNES & THEVERYMANY.

15 Theverymany.com/

16 Achimmenges.net/

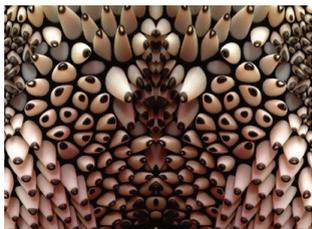
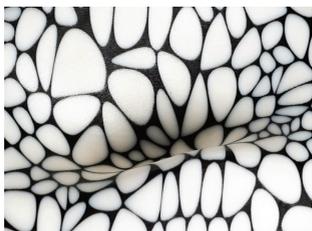


Fig. 12/ *Monocoque*, 2007, N. Oxman, Fonte: Wikimedia Commons.

Fig. 13/ *Fibonacci Mashrabiya*, 2009/11, N. Oxman. Fonte: Wikimedia Commons.

Fig. 14/ *Silk pavilion*, 2013, N. Oxman. Fonte: Wikimedia Commons from Mediated Matter Group.

le strategie di progettazione biomimetica ed i nuovi processi di produzione robotizzata. Con il suo *team* di ricerca, Menges ha realizzato una serie di strutture sperimentando diverse tipologie di materiali, tra cui il carbonio e la fibra di vetro. L'accoppiamento diretto tra la geometria e i sistemi computazionali ha permesso la genesi e l'analisi comparativa di numerose soluzioni mirate allo sviluppo di strutture altamente efficienti con il minimo uso di materiale (figg. 15, 16). Neri Oxman, nel 2010 ha fondato presso il *Mit Media Lab*¹⁶ il gruppo *Mediated Matter*, con il quale svolge un'intensa attività di ricerca nell'ambito della progettazione computazionale, della fabbricazione digitale, della scienza dei materiali e della biologia sintetica, finalizzata alla progettazione e fabbricazione di oggetti e di sistemi dalla piccola alla grande scala. Oxman è autrice di numerosissimi progetti¹⁷: il progetto *Monocoque* (2007) (fig. 12) promuove la creazione di prototipi che sfruttano l'eterogeneità e la differenziazione delle proprietà dei materiali per generare "pelli portanti"¹⁸ (fig. 10).

Fibonacci's Mashrabiya (2009-2011) (fig. 13) o il *Silk Pavilion* (2013) (fig. 14) sono due prototipi ispirati dai modelli geometrici presenti in natura e studiati per esplorare le capacità organizzative dei materiali "informati" grazie all'interazione con una serie di parametri ambientali. Lo scopo è quello di computare la distribuzione di nuovi *pattern* prestanti in risposta alle esigenze avanzate da uno specifico contesto ambientale.

Interazione: acquisizione e prestazione

Se, in passato, era consuetudine attribuire superficialità e casualità alle attività puramente dedicate alla ricerca formale, oggi appare chiaro quanto i risultati che derivano da tale attività siano, al contrario, strettamente relazionati con la ricerca di interazione con l'ambiente circostante e finalizzate all'innovazione

17 Neri.media.mit.edu/
18 Materialecology.com/

La superficie: un supporto per la complessità (*What?*)

ed implementazione di numerosi ambiti della ricerca scientifica, tra cui quello ingegneristico, archeologico, sanitario e biomedico. Grazie ai nuovi strumenti, gli architetti non progettano a priori la forma di un edificio o di un oggetto, ma ricercano e manipolano una serie di dati, o parametri, opportunamente codificati attraverso una sequenza di equazioni, al fine di generare un *set* di possibili soluzioni progettuali mirate a fornire una risposta sostenibile alle differenti sfide ed esigenze attuali e future, sperimentando le proprie conoscenze e abilità in svariati ambiti, professionali e di ricerca. Luigi Moretti, figura di spicco dell'architettura italiana del secondo Dopoguerra, attraverso le ricerche svolte in collaborazione con il matematico Bruno De Finetti, nel 1942 giunge a definire l'architettura generata secondo tale approccio con il termine "architettura parametrica"¹⁹. I parametri e le loro interrelazioni, espresse attraverso formule matematiche, divengono così, in tutti i sensi, l'espressione di un nuovo linguaggio architettonico. Il disegno parametrico rifiuta, dunque, l'elaborazione di soluzioni predeterminate in favore dell'esplorazione delle potenzialità infinitamente variabili di un sistema²⁰. Attraverso l'*input* e di specifici parametri, i progettisti possono generare e gestire molteplici geometrie a partire da uno schema articolato sulla base di specifiche relazioni. La superficie rappresenta, a tal proposito, il luogo per eccellenza attraverso cui sperimentare soluzioni innovative. Secondo tale approccio, una forma architettonica complessa non è dunque concepita come un'entità stazionaria, ma rappresenta un'entità mutevole che si evolve in modo plastico e dinamico grazie all'interazione con una serie di forze esterne. Questa è la ragione per la quale questi sistemi vengono definiti responsivi. La lingua inglese designa genericamente con l'aggettivo *responsive* tutto ciò che reagisce o risponde rapidamente e in modo appropriato ad



Fig. 15/ *BUGA Fibre Pavilion*, 2019, M. Fornes & THE VERY MANY. Fonte: Wikimedia Commons. Autore: Joachim Köhler.



Fig. 16/ *ICD/ITKE Research Pavilion*, 2012. Fonte: Wikimedia Commons.

¹⁹ Tedeschi 2014, p. 20.
²⁰ Kolarevic 2003.

uno stimolo. In italiano l'aggettivo che rende al meglio tale termine è "adattivo", cioè capace di adattarsi per soddisfare nuovi requisiti²¹. Questi oggetti sono dotati di un'intelligenza digitale che consente loro di interagire con l'ambiente in cui sono inseriti o con le persone che li fruiscono²². Più specificamente, il termine architettura responsiva nasce alla fine degli anni '60, ad opera di Nicholas Negroponte, e viene utilizzato per descrivere quel tipo di architettura che ha la capacità di "riconfigurarsi" se stimolata dall'ambiente circostante²³. Su tali considerazioni si fondano le ricerche sviluppate da Kas Oosterhuis: «[...] se gli edifici possono diventare attivi e se le loro azioni vengono connesse a un *database*, ecco allora che cominciano a sviluppare un sistema per agire autonomamente. Non dovranno più resistere a delle deformazioni ma si deformeranno in tempo reale per creare delle specifiche configurazioni, legate alle differenti specificità d'uso. [...] Ciò che facciamo come architetti è determinare l'ampiezza delle deformazioni. Non possiamo prestabilire alcuna configurazione specifica, né un suo contenuto fisico, così come in quello informativo [...] La reattività in tempo reale e la possibilità di riconfigurazione producono nuovi comportamenti all'interno dell'architettura. L'interazione tra utenti ed edificio si trasforma allora in un'esperienza dinamica attraverso interfacce trasparenti [...]»²⁴. La computazione di sistemi cinetici e dinamici favorisce la genesi di architetture altamente tecnologiche²⁵. Mentre i sistemi cinematografico-responsivi scambiano informazioni con l'ambiente circostante attraverso l'esecuzione di vere e proprie azioni, gli esperimenti di simulazione dinamica coinvolgono gli effetti di forze esterne agenti sui sistemi stessi. La forza di gravità, il vento, l'azione del sole, le azioni ed i pensieri degli esseri viventi rappresentano parte dei parametri di input utilizzabili per la genesi e per la manipolazione della forma

21 Lamanna 2012.

22 Cfr. Valenti, Romor 2012, p.309.

23 Cfr. Nebuloni et al. 2014.

24 Brizzi 1999.

25 Cfr. Kolarevic 2003.

di un oggetto capace di interagire con l'ambiente. Tali parametri, la cui azione può essere simulata dai nuovi strumenti digitali, vengono assorbiti dalle superfici, le quali assumono una specifica configurazione oppure si trasformano in sistemi attivi, "animati". Nel corso degli anni, tra i numerosi esempi di superfici-sistemi responsivi agli stimoli climatici, luminosi o acustici, è possibile citare la facciata dell'*Institut du Monde Arabe* (1987) di Jean Nouvel, a Parigi, il nuovo *Campus di Giustizia* di Madrid (2006) di Norman Foster, la *Resonant Chamber* (2011) del gruppo RVTR, le *Al Bahar Towers* (2012), progettate dal gruppo Aedas Architects, l'*Hygroscope meteorosensitive morphology* (2012), l'*HigroSkin pavilion* (2013) (fig. 17, 18), entrambi di Achim Menges. La *D-tower* (2004), dei Nox Architects, è un pezzo d'arte, commissionato dalla città di Doetinchem (Paesi Bassi) per "mappare" le emozioni degli abitanti: la scultura, cambiando colore, comunica i dati derivanti dalle risposte che i cittadini offrono ad una serie di domande²⁶. *Son-O-House* (2004), sempre dei Nox Architects, e *Muscle NSA* (2003), di Luca Di Carlo, sono due esempi di prototipi programmabili e capaci di cambiare forma: le mutazioni morfologiche sono generate dalla presenza e dalle azioni delle persone.

Iconicità: evocazione e narrazione

In accordo con la teoria estetica dell'*Einführung*, che tanto ispirò il pensiero e l'opera di Henry Van de Velde incentrata sulla ricerca e sull'espressione della «forma-forza»²⁷, alcuni esempi contemporanei dimostrano che, in architettura, la superficie può essere considerata uno strumento "empatico", capace di assumere e comunicare diversi significati. La superficie, grazie alla sua duttilità, assume un carattere fortemente iconico ed in quanto tale può essere considerata come un vero e proprio mezzo di

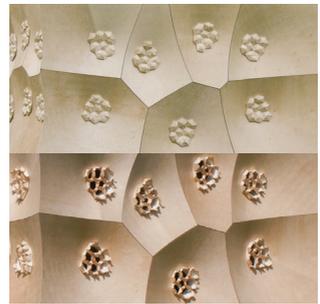


Fig. 17, 18/ *Hygroskyn: meteorosensitive pavilion*, 2013, A. Menges. Fonte: Wikimedia Commons.

26 Nox-art-architecture.com/
27 Frampton 2008, p. 105.
28 Bertozzi 2005, pp. 601-602.

comunicazione²⁸. Per definizione, l'aggettivo iconico richiama la capacità di rappresentare per mezzo di immagini realistiche²⁹. Come sinonimo di "figurativo", esso richiama il notevole grado di rassomiglianza o di corrispondenza formale con l'oggetto rappresentativo³⁰. Pertanto, la superficie rappresenta un supporto, un mezzo attraverso cui raccontare un contenuto. Essa assume dunque il ruolo di "significante", cioè di un sistema capace di esprimere un dato significato. Alla luce di tali riflessioni, è assolutamente da sottolineare il potere onirico, simbolico e comunicativo³¹ di cui è dotata l'architettura contemporanea degli involucri, delle facciate e delle superfici decorate. Le architetture di forma complessa sono spesso considerate estranee o inopportune per il contesto all'interno del quale sono inserite; tuttavia, esistono e dunque non possono essere ignorate. «Sarà poi il giudizio critico della collettività a riconoscere o a negare tale (relativa) perfezione [...]»³². Diversi esempi di architetture contemporanee si avvalgono di superfici capaci di evocare ed enfatizzare contenuti e significati: è interessante citarne alcuni. Il *Nuovo Museo di Salvador Dali* (2011), realizzato a St. Petersburg da Hok, in Florida, evoca *lo duro y lo blando* (il duro e il molle), due simboli ricorrenti nelle opere surrealiste dell'artista a cui l'opera stessa è dedicata³³. La *Dancing House* (1996), realizzata da Frank Gehry e tra le icone della città Praga, è un complesso composto da due edifici affiancati molto diversi tra loro: una torre dinamica di vetro ed un cilindro statico e pieno rappresentano il vecchio ed il nuovo, la cui forma "a passo di danza" richiama le movenze di due ballerini (Ginger Roger e Fred Astaire), impegnati in una *performance*. La facciata ovest della nuova *Arena Corinthians* (2013) di San Paolo del Brasile è una superficie curva e depressa, simulante la deformazione della rete al momento del *goal*³⁴. Il *Ponte della Pace* (2012), progettato dall'architet-

29 Dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/l/iconico.shtml

30 Treccani.it/vocabolario/iconico/

31 Aymonino 2006, p. 23.

32 Porrino 2004, p.64.

33 Crearte.wordpress.com

34 Vetro curvo made in Italy per Brasile 2014. vallineleonora.wordpress.com/2014/05/31/vetro-curvo-made-in-italy-per-brasile-2014/

La superficie: un supporto per la complessità (*What?*)

to italiano Michele De Lucchi per la città di Tbilisi, capitale della Georgia, si trova sul fiume Mtkvari e connette il più antico quartiere di Bericoni con quello di Rikhe, oggetto di un recente piano di sistemazione di respiro internazionale. La superficie in vetro del ponte è una membrana composta da una struttura di tubi di acciaio e da elementi triangolari in vetro. La sua struttura a guscio, stabile per forma, incarna una nota icona cittadina. Nel punto in cui sorge il Ponte, il fiume divide il nucleo storico dalla nuova Tbilisi: il ponte diviene così un monumento al dialogo tra presente e passato, segno di riferimento e simbolo visivo per l'orientamento nella città. Altri esempi di architetture, invece, dimostrano la predisposizione narrativa della superficie-supporto. La ricerca dello studio EMBT da sempre si è concentrata sulle superfici, trattando queste ultime come il supporto su cui tracciare dei veri e propri racconti decorativi: l'estradosso della copertura del *Mercato di Santa Caterina* (2003) a Barcellona diviene una superficie pensile narrativa. Le maioliche colorate che rivestono la superficie richiamano il Parco Guell di Gaudì. Altro celebre, iconico esempio di superficie "narrativa" è la *Kunsthause* (2003) di Graz, di Peter Cook & Colin Fournier, l'opera forse più nota della numerosa serie di sistemi progettati per comunicare mediante la semplice proiezione di immagini e flussi di testo. Alcune superfici, a differenza da quelle responsive, semplicemente "subiscono" l'azione dell'ambiente circostante, i cui agenti trasformano solo temporaneamente il supporto appositamente predisposto allo scopo di favorire la rappresentazione di un dato fenomeno. In questi casi, la superficie rappresenta un supporto che si potrebbe definire "passivo", cioè "non informato", capace di assumere un significato ma non di svolgere attivamente un'azione. *Windshape* (2006), il *land art project* disegnato dagli nArchitects a Léren, in Francia, è stato concepito



Fig. 19/ *Nuovo Museo di Salvador Dali*, 2011, St Petersburg, Florida (USA), Hok.

Fig. 20/ *Dancing House*, 1996, Praga (Repubblica Ceca) di F.O.Gehry.

Fig. 21/ *Mercato di Santa Caterina*, 2004, Barcellona (Spagna) di EMBT.

Fig. 22/ *Kunsthause*, 2003, Graz (Austria) di Peter Cook & Colin Fournier Fonte: creativecommons.org/

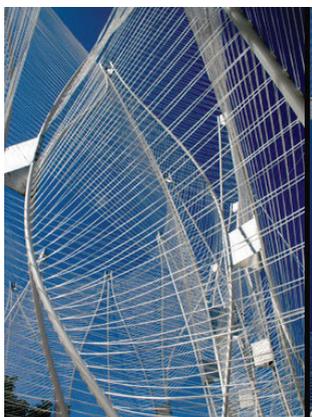


Fig. 23/ *Windshape*, 2008, Léréen (Francia) di nArchitects. Fonte: archdaily.com/4608/windshape-narchitects/

come un laboratorio sperimentale per testare l'idea di una struttura che risponda "passivamente" agli stimoli naturali (fig. 23). È una struttura commissionata dal Savannah College of Art & Design (SCAD) e nasce come spazio per l'organizzazione di eventi. L'opera consiste in due alti padiglioni la cui forma muta dinamicamente sotto l'azione del vento. Una rete strutturale di tubolari bianchi in plastica, tenuti insieme da elementi in alluminio, sostiene 50 km di nastro bianco in polipropilene tessuto fittamente a creare una superficie. Variando il grado di tensione dei nastri, il sistema risponde al vento in diversi modi, dalle oscillazioni ritmiche e ondulatorie delle superfici all'emissione di caratteristici sibili, assumendo diverse configurazioni³⁵. Gli interventi di *Land Art*, dai frammenti di spazio ad interi paesaggi artificiali, estrapolano nuovi paesaggi artificiali, concettuali, decontestualizzati. Dal punto di vista comunicativo ed evocativo la duttilità e la malleabilità conferiscono alle superfici, talvolta calate come un velo sul paesaggio naturale e costruito esistente, un potere "dislocativo", provocando nello spettatore o nell'utente nuove suggestioni, percezioni e, dunque, una nuova, inedita interpretazione dei luoghi.

La superficie come sistema: implosione ed esplosione

Un sistema, per sua definizione, è costituito da più elementi interdipendenti uniti tra loro in modo organico e tra i quali si stabiliscono dei rapporti fondati su specifici principi fondamentali, le cui regole possono essere interne o indotte, note o sconosciute. In architettura, una superficie curva si mostra come un oggetto "tendenzialmente continuo", dotato di maggiore o minore complessità geometrica. Le modalità di distribuzione degli elementi che la compongono, implicitamente distribuiti o esplicitamente visibili, comunicano in maniera più o meno efficace l'espressività della forma. Pertanto, anche

³⁵ Archdaily.com/4608/windshape-narchitects/

nei casi di superfici architettoniche apparentemente continue la scomposizione dell'unità esiste ma è "implosa". Di contro, un sistema discreto o semidiscreto è composto da elementi chiaramente distinguibili: le parti di cui si compone sono chiaramente identificabili e la forma complessa "esplode": la continuità originaria si frammenta in un certo numero di parti chiaramente distinguibili. La configurazione esplosa assunta dal sistema superficie descrive le relazioni interne che ne determinano la complessità, generando risultati esteticamente e costruttivamente più o meno coerenti e armonici.

Alla luce di tali riflessioni si evince che, dal punto di vista topologico, un'architettura di superficie può assumere indifferentemente una configurazione continua o sfaccettata: la differenza deriva dalle diverse circostanze culturali, tettoniche, morfologiche, materiali, economiche ed ambientali che influenzano ed informano il progetto. Il linguaggio di cui le forme complesse si avvalgono, in architettura come in altri ambiti, è spesso difficilmente comprensibile ed esplorabile: indipendentemente dal metodo di discretizzazione, la ricerca di coerenza tra le forme generate e quelle costruite rappresenta uno dei temi di indagine più attuali.

All'atto della progettazione e della costruzione, è importante sviscerare quei contenuti impliciti ma necessari per approcciare alla forma in maniera corretta e sostenibile. Alla luce delle riflessioni sopra riportate, parlare di architetture che si manifestano attraverso la fabbricazione e l'assemblaggio di parti che costituiscono un involucro, di una facciata, più in generale di una pelle, significa considerare tanto quei manufatti caratterizzati da una continuità di natura materica e strutturale, quanto quelli che necessitano, soprattutto in relazione alla scelta del tipo di materiale da impiegare per la loro realizzazione, di una frammentazione della continuità originaria,

Shaping & Paneling

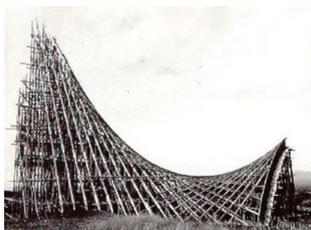


Fig. 24/ *Capilla de Cuernacava*, 1958, di Felix Candela. Fonte: Capone 2012.

Fig. 25/ *Capilla de Cuernacava*. In foto sono visibili gli elementi che compongono la struttura sono distribuiti secondo l'andamento delle due schiere di generatrici rettilinee. Fonte: Capone 2012.

Fig. 26, 27/ Padiglione per lo studio dei raggi cosmici, 1951, di Felix Candela. In foto sono visibili gli elementi che compongono la struttura sono distribuiti secondo l'andamento delle due schiere di generatrici rettilinee. Fonte: Capone 2012.

senza la quale sarebbe impossibile procedere alla loro realizzazione. Gli architetti moderni, dagli anni '50 in poi, hanno mostrato una grande attrazione per gli esperimenti derivanti dal Costruttivismo: le loro sperimentazioni sono scaturite nella trasparenza e nella leggerezza del vetro e delle strutture composte da intelaiature leggere e nella computazione di solette continue e sottili, aprendo così la strada a due modi differenti di gestire il problema della fabbricazione delle superfici in architettura.

La geometria rappresenta da sempre la chiave di lettura, nonché il principale strumento analitico-attuativo, attraverso cui è possibile controllare l'intero processo di produzione architettonica, a partire dalla fase creativa, fino a raggiungere quella costruttiva. Essa è il principale strumento necessario per il controllo dell'invenzione e, in quanto tale, è capace di trasformare un'idea compositiva o una suggestione spaziale in un oggetto fisicamente esistente e funzionante. La ricerca geometrico-spaziale e costruttivo-strutturale condotta sull'uso delle superfici in architettura rappresenta il filo conduttore che lega e confronta numerosi progetti, dal periodo moderno a quello contemporaneo. Le sperimentazioni perseguite dagli architetti e dagli ingegneri moderni hanno permesso di ricavare soluzioni formali capaci di rappresentare un'importante fonte di ispirazione per gli approcci contemporanei. Grazie alle potenzialità espressive del cemento armato è stato possibile sperimentare nuove tipologie strutturali e costruttive, resistenti, funzionanti, dotate di spessori molto contenuti e capaci di alleggerire il loro peso proprio. Tra le superfici dotate di maggiore espressività formale è possibile citare il paraboloido iperbolico, l'iperboloido iperbolico, i conoidi e le numerose soluzioni derivanti dalla combinazione ed intersezione di queste. I principi geometrici posti alla base della definizione di tali superfici guidano il processo

progettuale, ottimizzando il comportamento strutturale e costruttivo delle nuove soluzioni formali. La genesi geometrica di queste tipologie di superfici consente di discretizzare la forma mediante schiere di elementi rettilinei. Queste superfici sono economiche sia in termini di tempi di realizzazione, che di costi di produzione: dal punto di vista strutturale, le generatrici rettilinee rappresentano le barre per l'armatura della soletta, mentre la doppia curvatura della forma garantisce un'alta resistenza dal punto di vista strutturale³⁶ (figg. 28-30). È possibile individuare alcune tipologie ricorrenti di superfici ricavate dalla combinazione di porzioni di paraboloidi iperbolici, talvolta caratterizzate dalle variazioni dalla geometria del quadrilatero sghembo su cui la genesi della superficie si imposta, dando vita ad una ricca varietà ed espressività dal punto di vista formale. Tale superficie può, infatti, essere suddivisa o tagliata senza generare problemi di efficienza dal punto di vista statico. Particolarmente numerose sono le opere realizzate da Felix Candela, Santiago Calatrava, Oscar Niemeyer e Le Corbusier³⁷. Per queste architetture di superficie è possibile sottolineare l'evidente coincidenza tra gli elementi lineari che compongono la struttura portante e la forma che ne deriva (figg. 24-27). Un sistema di superfici "apparentemente" meno riconoscibile dal punto di vista geometrico è il *Padiglione Philips* di Le Corbusier, realizzato per l'esposizione di Bruxelles del 1958: la genesi delle superfici che ne definiscono la struttura non è immediatamente riconoscibile.

«In questo caso, le potenzialità espressive della superficie sono utilizzate dal progettista per realizzare un vaso spaziale moderno, pluridirezionato, comunque basato sull'applicazione rigorosa dei principi geometrici³⁸». La volontà di integrare e potenziare la ricerca sull'uso delle superfici ha incoraggiato la fusione di ambiti disciplinari diversi, tra cui



Fig. 28/*Tendril*, di Antony Gibbon.
Fonte: antonygibbondesigns.com/work/

Fig. 29/*Twine house*, di Antony Gibbon.
Fonte: antonygibbondesigns.com/work/

Fig. 30/*Mobius*, di Antony Gibbon.
Fonte: antonygibbondesigns.com/work/

36 Cfr. Capone 2012, pp. 12-13.

37 *Ibidem*, pp.14-15.

38 *Ibidem*, p. 19.

quello della matematica, allo scopo di sperimentare e di definire nuove soluzioni per l'architettura. Tra la fine del XIX e gli inizi del XX secolo, le sperimentazioni condotte sull'impiego del cemento armato per la realizzazione di grandi cupole aprono la strada alla progettazione di nuove forme³⁹. Tra i progettisti impegnati nella progettazione delle strutture a guscio, superfici resistenti per forma, si distinguono le figure di Antoni Gaudì, Edoardo Torroja, Eero Saarinen ed Heinz Isler. Le molteplici configurazioni sperimentate da Isler dimostrano il carattere flessibile e "speculativo" di cui la superficie, per sua natura, è indiscutibilmente dotata. In questi casi, gli elementi che guidano la genesi della forma non sono enti geometrici direttamente gestibili da un punto di vista grafico, come accade per le superfici rigate sopra citate, ma consistono in forze, enti fisici di cui è possibile simulare l'azione in ambiente digitale. Il principio alla base del funzionamento delle strutture a guscio risiede nella coincidenza esatta della struttura con la forma ricavata, garantita dalla ricerca dell'equilibrio tra le forze reali agenti su una geometria di base e la risposta geometrico-morfologica manifestata dalla sua deformazione. Esempi di sistemi impiegati per tale approccio, tanto nella realizzazione di modelli materiali, tanto nella definizione di processi parametrici e computazionali, sono le catenarie e le membrane invertite. La superficie generata dall'interpolazione delle curve e delle membrane rilassate sarà pertanto in grado di resistere alle sollecitazioni proprio in quanto la sua forma è stata determinata dall'azione delle stesse.

In ambito architettonico e strutturale, lo sfruttamento delle plastiche e dei materiali sintetici ha portato alla realizzazione delle strutture pneumatiche⁴⁰. Queste architetture di superficie sono realizzate attraverso la tecnica dell'ambiente pressurizzato: le membrane sono sostenute solo dalla pressione dell'a-

39 Cfr. Pone 2005, pp. 49-51.

40 *Ibidem*, pp. 83-84.

ria insufflata all'interno della membrana e sono ancorate al suolo per evitare che la pellicola che costituisce la copertura possa volare via. La membrana può essere realizzata anche mediante l'assemblaggio di più settori di superficie⁴¹. Contemporaneamente a queste sperimentazioni, a rappresentare l'*alter ego* delle architetture di superficie, ci sono le strutture e le pellicole discrete, architetture che derivano dall'evoluzione degli studi compiuti sui solidi platonici ed archimedei. Queste architetture fondano la loro genesi sui principi geometrici di tassellazione dello spazio e del piano, mediante la definizione di *pattern* capaci di esplicitarne le mutue, implicite relazioni.

Tassellare significa ricoprire con una o più figure un piano infinito, sia esso euclideo che non euclideo, senza lasciare vuoti tra i vari tasselli e senza creare intersezioni o sovrapposizioni tra di essi; per tassellazione dello spazio s'intende, invece, l'occupazione completa dello spazio ottenuta utilizzando poliedri regolari, poliedri semiregolari o entrambi⁴².

Il principio di tassellazione spaziale si basa sugli studi e sulle indagini delle formazioni cristalline che compongono la materia e sulle sue aggregazioni molecolari, favorendo un approccio interdisciplinare che ancora oggi rappresenta un importante motore di innovazione e di avanzamento per le attuali ricerche nel campo dell'*Architectural Geometry*.

Queste ricerche si basano sugli studi condotti negli anni '60 da Keith Critchlow sulla tassellazione spaziale e pubblicati nell'opera *Order in Space*⁴³ e sulle ricerche di Burt,⁴⁴ rivolte allo studio delle strutture degli scheletri e delle configurazioni dei cristalli (fig. 31). A tale proposito è importante citare le ricerche di George Robert Le Ricolais, ricercatore e pittore costruttivista per il quale le conchiglie, i radiolari, i cristalli evocano vele, reti e strutture che egli cerca di tradurre in progetti avvalendosi di fonti afferenti a diverse discipline⁴⁵. Agli esordi del XX secolo, tra

41 *Ibidem*, p. 105.

42 Baglioni 2009, pp. 327-331.

43 Critchlow 1969.

44 Burt 1973.

45 Le Ricolais 1966.

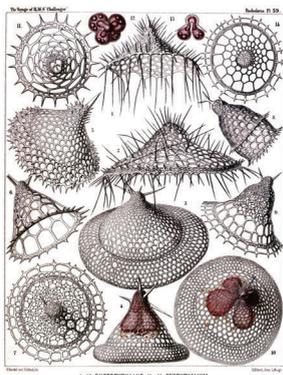


Fig. 31/ *Radiolaria*. Ernst Haeckel (1834-1919); incisioni di Adolf Giltisch (1852-1911). Fonte: [Wikimedia Commons](#).

Fig. 32/ Padiglione di vetro, Esposizione Werkbund, 1914, Colonia (Germania), di Bruno Taut. Fonte: [Wikimedia Commons](#).

Fig. 33/ Esempio di cupola geodetica. Buckminster Fuller. Fonte: [Wikimedia Commons](#).

le prime cupole realizzate in vetro è possibile citare il Padiglione in vetro di Bruno Taut del 1914 (fig. 32), o la prima cupola geodetica progettata da Walter Bauerfeld nel 1922 per la realizzazione del Planetario Zeiss di Jena. Tali ricerche sono poi confluite e maturate negli esperimenti sulle geodetiche condotti da Buckminster Fuller (1895-1983), i cui studi erano basati sulla discretizzazione di primitive curve continue⁴⁶ (fig. 33).

Tuttavia, le strutture a maglie triangolari, sebbene nel corso degli anni siano state considerate le più vantaggiose da un punto di vista economico, in realtà presentano una serie di problematiche e di limiti che hanno portato ad importanti approfondimenti relativamente allo studio e all'applicazione di diversi *pattern* per la discretizzazione delle forme complesse. Pertanto, le proprietà geometriche delle superfici analitiche citate (quadriche rigate) ritornano oggi particolarmente utili per semplificare la realizzazione delle superfici complesse.

In conclusione, i numerosi approcci ed esempi citati hanno rappresentato un'importante punto di partenza ed una corretta fonte di ispirazione per le riflessioni teoriche e per gli esperimenti di ottimizzazione affrontati all'interno di questo volume, evidenziando «lo stretto legame tra evoluzione del pensiero geometrico ed evoluzione del pensiero artistico in cui l'architettura gioca un ruolo determinante⁴⁷». Avvalendosi dell'uso della geometria, l'esigenza attuale è quella di risolvere le problematiche legate alla costruzione delle forme complesse computando soluzioni economicamente sostenibili ed utilizzando materiali capaci di rispondere alle diverse esigenze funzionali ed ambientali.

In particolare, essa è rivolta allo studio ed alla sperimentazione di soluzioni riferite alla progettazione, ottimizzazione e fabbricazione di sistemi discreti e semidiscreti.

46 Capone 2012, p. 71.

47 Paris 2009.

2. Keywords (Why?/How?)

I percorsi della costruzione contemporanea sembrano incrociarsi con la necessità di rivisitare alcuni concetti di base che la caratterizzavano, tra cui quelli dell'industrializzazione e dell'innovazione tecnologica.

Mario Losasso

Forma complessa: il problema

Il capitolo precedente interpreta la superficie in qualità di supporto complesso.

Il termine complesso deriva dal latino *complexus*, che significa "abbraccio", a sua volta derivante da *complectere*, ossia *cum-plectere*, o plectere, che significa intrecciare. Un'entità complessa può dunque essere considerata come un sistema composto da più parti strettamente intrecciate o connesse.

La moderna teoria della complessità è legata alla teoria del caos, fondata sull'esistenza di proprietà "emergenti" dall'interazione non-lineare di tutti gli elementi che costituiscono un sistema.

Per comportamento emergente di un sistema complesso si intende, dunque, l'emersione di proprietà

inspiegabili sulla sola base delle leggi che governano separatamente le sue componenti¹. I sistemi “non lineari” mutano continuamente, producendo risultati inaspettati. Il loro comportamento non può essere spiegato attraverso la semplice analisi dei singoli componenti, perché è la rete di interdipendenze e interazioni che ne definisce il funzionamento².

Nella sua totalità, la complessità delle forme dell'architettura contemporanea può essere indagata e interpretata da diversi punti di vista, concettuale, spaziale e tecnologico. La logica di aggregazione e le relazioni di interdipendenza degli elementi costituenti l'Architettura si riflettono nella complessità ed unicità della realtà compositiva e costruttiva.

Per comprendere le regole che sottendono le forme architettoniche contemporanee è necessario scavare a fondo l'identità delle superfici complesse, instaurando un dialogo continuo tra i modelli digitali e la loro interpretazione matematico-geometrica³.

«Nel contesto del CAD 3D le forme si distinguono in semplici o complesse a seconda che le superfici che compongono la forma siano analitiche o a forma libera (*free form*), intendendo con analitiche le superfici che tutti conosciamo quali piani, cilindri e cono ... , e intendendo con *free form* tutte le altre»⁴.

Molteplici sono le tecniche computazionali per la genesi di forme complesse, dalle polisuperfici isomorfe (*blob*)⁵, agli esperimenti di *Digital Form Finding*.

Le forme complesse generate al computer sembrano ignorare o sfidare le convenzioni di stile e di estetica in favore di una continua attività a servizio della speculazione⁶. L'opportunità di generare e manipolare l'architettura attraverso la finestra virtuale del computer consente di focalizzare l'attenzione sulle proprietà geometriche della forma e di ragionare attraverso figure e solidi elementari alla ricerca di una possibile scomposizione e semplificazione della complessità⁷.

1 [It.wikipedia.org/wiki/Scienza_olistica](http://it.wikipedia.org/wiki/Scienza_olistica)

2 Cfr. Kolarevic 2003.

3 Cfr. Campi 2007, p. 10.

4 Ciaroni 2009, p. 42.

5 Cfr. Kolarevic 2003.

6 *Ibidem*.

7 Cfr. Galizia, Santagati 2012, p. 143.

La complessità delle forme contemporanee spinge al massimo la potenzialità espressiva dell'architettura; tuttavia, è necessario un bagaglio tecnico di livello elevato per raggiungere delle soluzioni costruttive fattibili e, soprattutto, sostenibili.

Il carattere complesso ed articolato delle forme libere necessita di un *iter* integrato per il controllo dell'intero processo. Gestire la complessità scomponendo un progetto in sotto-progetti da ricomporre in seguito rappresenta un approccio errato al problema. La qualità della progettazione e della realizzazione di una forma complessa dipende, a sua volta, dalla quantità e dalla qualità delle informazioni, delle conoscenze e delle competenze coinvolte.

Gli approcci contemporanei hanno progressivamente abbandonato le pratiche di progettazione tradizionale e hanno abbracciato i nuovi processi digitali integrati, capaci di veicolare la gestione della forma verso il risultato complessivo che s'intende raggiungere⁸.

Il progettista genera in maniera globale la forma, controllandone il comportamento nel corso del tempo e al variare delle informazioni di *input*. La forma viene in seguito sottoposta a processi di deformazione o di trasformazione, i cui esiti dipendono dalle relazioni che strutturano il sistema stesso e che determinano una configurazione emergente tra le infinite possibili. In un sistema non lineare, l'aggiunta o la sottrazione di un particolare tipo d'informazioni possono influenzarne notevolmente il comportamento. Il compito del progettista è quello di indagare criticamente le diverse soluzioni progressivamente generate per convergere verso una scelta opportunamente ponderata: sulla base di tale consapevolezza si fonda la ricerca delle tecniche di ottimizzazione⁹. Approcciare in maniera consapevole alle attuali tecnologie informatiche è fondamentale per gestire la complessità delle forme in maniera scientifica e rigorosa.

8 Cfr. Paoletti 2006.

9 Cfr. Kolarevic 2003, p. 1.

Discretizzazione: il mezzo

Se è possibile considerare una superficie complessa come un sistema composto da più parti mutuamente connesse e interagenti, questo equivale a dire che essa è fondamentalmente sempre discreta. Data una superficie, è sempre possibile scomporla meccanicamente in un certo numero di parti. Il termine "discreto" assume anche il significato di "scelto", "misurato", individuando quindi qualcosa di più del semplice significato di "suddiviso" o "scomposto". Nei secoli sono stati sviluppati diversi approcci mirati alla ricerca di modelli applicativi che tentano di estrarre e di combinare le singole componenti di un sistema alla ricerca di un unico *status* di equilibrio e armonia. Il metodo analitico classico di Cartesio procede all'analisi di un sistema complesso suddividendolo in parti ed indagandone approfonditamente ciascuna di esse. Di contro, l'approccio olistico si basa sul concetto di emergenza, intesa come il risultato dell'interrelazione di molte entità che vanno a costituire un sistema: secondo questo punto di vista, l'azione del discretizzare può essere considerata coincidente con lo studio della qualità delle interazioni tra le parti, la quale prende il sopravvento rispetto allo studio delle parti stesse.

Il termine olistico deriva dal greco *olos*, e significa "totalità"¹⁰. La parola è stata coniata da Christiaan Jan Smuts¹¹, che definisce l'olismo «*the tendency in nature to form wholes that are greater than the sum of the parts through creative evolution*»¹².

Secondo tale visione esiste, pertanto, una differenza qualitativa tra un sistema e la somma delle sue parti: la seconda domina sul primo. Un oggetto o un sistema può essere riconosciuto come un "tipo" attraverso l'individuazione di alcune caratteristiche interdipendenti in grado di renderne riconoscibile l'identità. Lo scopo è quello di effettuare una discretizzazione o, in senso più ampio, una raziona-

10 [It.wikipedia.org/wiki/Olismo](http://it.wikipedia.org/wiki/Olismo).

11 Smuth 1926.

12 Secondo l'Oxford English Dictionary, Smuts ha definito l'olismo come "la tendenza, in natura, a formare interi che sono più grandi della somma delle parti, attraverso l'evoluzione creativa" - <http://it.wikipedia.org/wiki/Olismo>.

lizzazione del problema capace di assecondare tali interrelazioni rivelandone l'esistenza e assecondando la natura di un dato oggetto. In ambito digitale, secondo tale punto di vista, discretizzare una superficie complessa non si riduce, dunque, all'atto di suddividere meccanicamente la stessa in un certo numero di parti, ma significa tradurre le intime relazioni attraverso un codice comprensibile e, dunque, manipolabile. Nella grammatica del progetto, costruire significa estrarre ed assemblare le singole parti dell'architettura distribuendole secondo l'uso di regole geometriche. In qualsiasi ambito, discretizzare significa, dunque, scegliere, "interpretare". In Architettura l'atto del discretizzare è un processo finalizzato a raggiungere un sistema funzionante e non può ridursi ad una semplice, meccanica suddivisione della forma¹³. Per ottimizzare la costruzione di un'architettura di forma complessa è dunque importante evitare una distribuzione irrazionale delle parti che la compongono. Tale casualità è il risultato derivante dall'applicazione di tecniche di discretizzazione totalmente indifferenti alla natura dell'oggetto sul quale sono applicate.

Ottimizzazione: il processo

Ottimizzare significa intervenire sulle relazioni esistenti all'interno del sistema allo scopo di ricavare un risultato efficiente impiegando una quantità di risorse ponderata. Tanto il sistema continuo, quanto la sua versione discreta possono essere oggetto di ottimizzazione. Tale condizione, riportata in ambito architettonico, è necessaria per produrre risultati sostenibili. Nonostante la parola ottimizzazione contenga al suo interno il termine "ottimo", un processo di ottimizzazione produce un sistema "quasi-ottimale", quindi non concluso o comunque imperfetto. In campo matematico-informatico ottimizzare significa trovare la migliore soluzione tra

¹³ Cfr. Galizia 2012, pp. 135-136.

tutte le soluzioni fattibili mediante un approccio iterativo di tipo combinatorio delle diverse variabili in gioco. A tale scopo, gli algoritmi sono progettati per trovare soluzioni quasi-ottimali a problemi difficili¹⁴. A tale proposito, è utile distinguere tra metodi esatti e metodi euristici. Un metodo esatto garantisce il raggiungimento della soluzione ottima; viceversa un metodo euristico è un metodo diretto alla scoperta di nuovi, continui risultati¹⁵, non può fornire garanzie sull'ottimalità della soluzione e, nella maggioranza dei casi, si limita a produrre soluzioni ragionevolmente buone sulla base di criteri fissati a priori. Ogni realtà operativa o produttiva impone, in sede di formulazione del problema, richieste, vincoli e restrizioni legate alle tecnologie utilizzate e al tipo di prodotto. Dunque, tanto più complesso e peculiare è il contesto d'azione, tanto più sarà preferibile utilizzare metodi euristici per la ricerca di soluzioni¹⁶.

Nel campo della realizzazione di architetture di forma complessa, scopo dell'ottimizzazione è raggiungere contestualmente la sostenibilità economica, strutturale ed estetica del prodotto.

Come la fantasia è capace di evocare una sorprendente varietà di forme, così è necessario gestire la qualità complessiva del risultato trovando un equilibrio tra il livello di approssimazione geometrica del sistema, le tecnologie disponibili, la qualità costruttiva ed estetica del prodotto ed i costi totali. Tuttavia, i processi industriali, proprio in quanto basati sulle proprie regole, logiche e limitazioni, si scontrano con i problemi derivanti dalla complessità delle forme attuali: ottimizzare l'intero processo significa ridurre questa discrepanza già a partire dalla fase progettuale¹⁷. È fondamentale sottolineare che il problema non si riduce all'individuazione di una tecnologia adeguata e consolidata per favorire la realizzazione del progetto, ma incoraggia l'esigenza di fare progredire la ricerca verso soluzioni avanzate ed innovative.

14 it.wikipedia.org/wiki/Problema_di_ottimizzazione.

15 Zingarelli, *Lo Zingarelli. Vocabolario della Lingua Italiana*, Zanichelli Editore.

16 Cfr. Pastorello 2011, p. 13

17 Cfr. Vaudeville 2012, pp. 279-280.

Alla luce di tale esigenza, ottimizzare significa dunque favorire la creazione di processi integrati attraverso lo sviluppo di nuove competenze da parte delle figure coinvolte nel processo: lo scopo è favorire l'innovazione dei processi, congiungendo le conoscenze produttive ed eventualmente derivanti da altri settori con le necessità talvolta fortemente espressive del progetto architettonico. L'acquisizione di nuove conoscenze e lo sviluppo di soluzioni favoriscono la crescita delle richieste, determinando un conseguente abbassamento dei costi.

Come Fuller suggerisce «Non cambierai mai le cose combattendo la realtà esistente. Per cambiare qualcosa, costruisci un modello nuovo che renda la realtà obsoleta».

Pertanto, ottimizzazione e innovazione sono da considerare due processi strettamente interdipendenti: lo sviluppo dell'uno è favorito dagli avanzamenti dell'altro. La mancanza di innovazione tecnologica è talvolta legata al vincolo delle tecnologie esistenti e delle conoscenze limitate alle loro funzioni tipiche, spesso trascurando, anche per lungo tempo, le effettive o eventuali potenzialità di una nuova tecnologia: dunque è il contesto storico-culturale che favorisce l'introduzione e lo sviluppo di un sistema o di un elemento innovativo. I processi ottimizzati prevedono, dunque, la sperimentazione di continue verifiche e prototipazioni atte a validare una possibile soluzione. L'obiettivo finale è costruire un modello a quattro dimensioni codificato con tutte le informazioni dimensionali, qualitative e quantitative necessarie per la progettazione, l'analisi, la fabbricazione e la costruzione, oltre che con le informazioni basate sul tempo necessario per le sequenze di montaggio¹⁸. In ambiente digitale, i processi di ottimizzazione, da semplice strumento di risoluzione a posteriori di problemi, stanno diventando un efficace strumento di esplorazione e di progettazione formale¹⁹.

¹⁸ Kolarevic 2003.

¹⁹ Cfr. Pugnale 2014, pp. 353-359.

L'affiancamento di potenti strumenti digitali alle consuete tecniche progettuali, non solo ottimizza le possibilità di carattere rappresentativo dell'architettura ma aggiunge informazioni utili per la concretizzazione del progetto²⁰ potenziando la comunicazione e riducendo quindi i tempi necessari per il completamento dei cicli di fabbricazione e delle conseguenti fasi di assemblaggio in cantiere.

Un ulteriore aspetto legato alla fabbricazione delle superfici complesse riguarda l'ottimizzazione dei materiali: da sempre, l'ambizione è quella di raggiungere la progressiva diminuzione degli stessi per la realizzazione delle strutture. Oltre che da un punto di vista economico, tale condizione favorisce la riduzione del peso complessivo dell'opera e della complessità dei nodi di giunzione tra gli elementi, aspetto che a sua volta chiama in causa lo studio approfondito dei *pattern* in maniera tale da favorire un processo di fabbricazione e di assemblaggio ottimizzato. La ricerca dell'ottimizzazione si sviluppa anche attraverso la computazione di soluzioni formali in grado di combinare le strategie di razionalizzazione e il controllo del sistema in termini di sostenibilità ambientale. È importante dedicare una particolare attenzione all'involucro, da progettare in funzione dell'ambiente circostante, del risparmio energetico, della fattibilità, della stabilità e della manutenibilità. Le forme complesse rappresentano un supporto idoneo per favorire lo sviluppo di interessanti sperimentazioni in tale direzione. La superficie di una forma complessa è quantitativamente inferiore rispetto a quella di una primitiva geometrica di volume identico: ciò determina non solo la conseguente riduzione del numero di elementi necessari per la sua realizzazione, ma anche la riduzione delle dispersioni termiche del sistema e il guadagno di calore interno²¹. A tale scopo, il calcolo analitico eseguito per la verifica prestazionale degli edifici può

20 Paoletti 2006.

21 Cfr. Foletto 2007, p. 257.

essere utilizzato “a priori” per modellare la forma degli edifici in modo dinamico e performante, alterando le geometrie e trasformando le forme sulla base dell’ottimizzazione di specifici parametri e criteri ambientali.

Le forme complesse non rappresentano, dunque, solo l’espressione di una nuova estetica o un particolare momento culturale e socio-economico generato dalla rivoluzione digitale, ma possono essere considerate il luogo per sperimentare e ottimizzare le soluzioni a cui la nuova coscienza ecologica mira per la realizzazione di un’architettura sostenibile²².

Industrializzazione: l’obiettivo

Il momento centrale del processo di modernizzazione, che con essa tende a identificarsi, è costituito dall’industrializzazione dei processi produttivi²³.

L’ottimizzazione rappresenta la premessa per lo sviluppo di processi industrializzati; allo stesso tempo, l’industrializzazione dei processi produttivi favorisce la trasformazione della conoscenza scientifica in tecnologia²⁴. Industrializzare un processo significa fondere e gestire in maniera ottimizzata le nuove conoscenze teoriche e tecnologiche per sperimentare ed acquisire nuove tecnologie e materiali.²⁵ Il fenomeno dell’industrializzazione, grazie alle sue origini ed alle sue continue manifestazioni nel tempo e nello spazio, è di tale portata che la sua risonanza non può essere limitata all’interno di definizioni troppo rigide o di spiegazioni riduttive e unilaterali. In quanto tale, è un evento fondamentale per comprendere il verificarsi di diversi fenomeni sviluppatisi all’interno di ambiti differenti da quello di tipo esclusivamente economico o tecnologico, tra cui quello sociale, culturale e, dunque, architettonico²⁶. Dal punto di vista storico, i primi settori investiti dal fenomeno dell’industrializzazione sono stati i settori produttivi dei materiali e degli elementi costruttivi²⁷.

22 Cfr. Kolarevic. 2003, pp.11-27.

23 Cfr. Paz 1999, p. 48.

24 Cfr. *Ibidem*.

25 Cfr. Berman 1978, p. 200.

26 Cfr. Paoletti 2006, p. 200.

27 Cfr. L’*Universale. La grande enciclopedia tematica*, Garzanti Libri S.p.A., Volume I, 2004.

Tra il XVIII e il XIX secolo l'artigianato si è evoluto verso le forme di produzione industriale: l'introduzione delle macchine ha mutato radicalmente le condizioni della fabbricazione. La rivoluzione industriale ha dato il via, con l'utilizzo massiccio del ferro e del carbone, alla più radicale trasformazione delle forme produttive della storia umana ed i pensatori, i filosofi e gli intellettuali in genere, hanno cercato di cogliere, analizzare e decodificare gli aspetti sociali e culturali di un fenomeno di tale portata, impegnandosi nella costruzione di filosofie in grado di spiegare ciò che stava accadendo. Se la prima rivoluzione industriale, che aveva nelle fabbriche, nel settore tessile e nell'invenzione della ferrovia i suoi cardini, è stata l'età dei pensatori "economisti", la seconda rivoluzione industriale, periodo di straordinario progresso scientifico esteso a tutti i campi del sapere (dalle scienze naturali a quelle umane), ha segnato il definitivo divorzio tra la scienza e la filosofia vera e propria e ha favorito il trionfo del Positivismo, mito del progresso e culto della scienza, denominando la tendenza di un'epoca. Il decollo del sistema industriale, della scienza e della tecnica, la possibilità di accelerare gli scambi commerciali e culturali su larga scala ha determinato un clima di fiducia entusiastica nelle potenzialità del sapere scientifico e tecnologico e una generale fiducia nell'incontrastabile progresso umano. Il continuo avanzamento della ricerca (nella chimica, nella fisica, nell'ingegneria, nella medicina) si tradurrà in una vera e propria dipendenza dal pensiero e dall'approccio di tipo scientifico e tecnico.

In questo clima, i primi tentativi di accorciare le distanze tra le belle arti e le arti applicate, procedendo verso la nascita del *design* novecentesco, risalgono alla seconda metà dell'Ottocento, quando William Morris diede vita al movimento denominato *Arts and Crafts*, opponendosi alla produzione massificata delle industrie e sostenendo il recupero del lavoro

artigianale per combattere l'alienazione provocata dai processi di meccanizzazione. Tuttavia, gli alti costi dei prodotti hanno impedito la realizzazione del suo programma, limitandone la fruizione ad un'utenza selezionata. La sua eredità è stata accolta da Henry van de Velde che, a differenza da Morris, considerava l'impiego delle macchine e delle nuove tecnologie industriali il solo mezzo per avviare il rinnovamento della società moderna.

La ricerca sul fenomeno dell'industrializzazione richiama, inevitabilmente, l'opera ed il pensiero dei maestri del Movimento Moderno, tra cui Gropius, Le Corbusier ed i loro progetti per componenti standardizzati e prefabbricati sviluppati attraverso il tema della casa di abitazione e dell'alloggio di massa.

Successivamente, il fenomeno dell'industrializzazione tende a rallentare nel settore residenziale e si sposta verso le strutture con funzione collettiva, il che determina anche uno spostamento dell'interesse dai sistemi "massivi" ai sistemi di superficie composti unicamente da struttura e involucro, aprendo ulteriori ambiti di ricerca nei sistemi industrializzati per il progetto. Soltanto nel XX secolo, grazie all'avvenuto processo di standardizzazione e di unificazione dei prodotti, si giunge ai sistemi costruttivi totalmente prefabbricati e prodotti per via industriale, accompagnati anche da una progressiva meccanizzazione dei cantieri. L'attività cantieristica può, infatti, usufruire di una serie di prodotti industriali che riducono al minimo le lavorazioni *in loco* dei materiali²⁸. La produzione di massa si evolve verso tecniche più snelle e veloci, consentite dall'uso di macchine guidate da manodopera specializzata: ciò ha favorito la risoluzione di molteplici problemi legati alla complessità realizzativa dei progetti.

Attualmente, il progetto di architettura, grazie all'incremento esponenziale delle tecnologie presenti sul mercato, è il prodotto di un processo che anticipa,

28 Cfr. *L'Universale. La grande enciclopedia tematica*, Garzanti Libri S.p.A., Volume I, 2004.

e dunque veicola, le fasi tecnologiche e produttive: ciò favorisce lo sviluppo di sistemi e di prodotti prefabbricati e successivamente assemblati in cantiere, determinando sempre più la progressiva industrializzazione dei processi²⁹. L'attuale processo di industrializzazione può essere diviso in varie fasi: in una prima fase si analizzano le richieste in collaborazione con il cliente, si procede poi con lo sviluppo di soluzioni tecniche ottenute con programmi e soluzioni evolute, ed infine si passa alle fasi di prototipazione e di collaudo del prodotto. Questo permette di valutare eventuali soluzioni alternative per migliorare il prodotto e l'intero processo di fabbricazione.

Negli ultimi decenni, nel mondo della progettazione architettonica e più in generale del *design*, si è assistito ad una vera e propria rivoluzione digitale, grazie allo sviluppo di applicazioni e *software* parametrico computazionali sempre più avanzati ma, allo stesso tempo, intuitivi e di facile utilizzo.

Allo stesso modo, sul lato *hardware* si sta delineando una nuova trasformazione dei processi produttivi, rappresentata dalla *Mass Customization*³⁰.

All'interno di questo nuovo scenario l'impiego di sistemi computerizzati consente di ottenere *output* personalizzabili in funzione delle esigenze dell'utente, fino ad arrivare all'autoproduzione degli oggetti da parte degli stessi utilizzatori³¹.

L'industria si ritrova dunque a dialogare e ad adattarsi alle esigenze delle imprese e dei singoli professionisti e, pertanto, deve essere in grado di rispondere alle richieste di flessibilità e di innovazione avanzate dai progettisti, realizzando prodotti sempre più spesso disegnati *ad hoc*, ma che prevedano comunque dei processi di ottimizzazione per il controllo della produzione. Per comprendere ed affrontare il problema della fabbricazione di forme complesse è interessante declinare il problema tanto dal punto di vista dell'industrializzazione del processo,

29 Cfr. Paoletti 2010, p. 520.

30 Cfr. Antonioli 2014, pp. 60-64.

31 *Ibidem*.

più vicino alla scala architettonica, quanto da quello della produzione artigianale, sicuramente più vicino alla scala del *design*, quindi dimensionalmente più limitata e che, per tali ragioni, consente una maggiore libertà di azione. A tale scopo è importante comprendere il legame che si instaura tra tradizione ed innovazione.

La tradizione artigiana da sempre è accompagnata da una precisa vocazione all'innovazione, la quale oggi si manifesta nel passaggio dall'idea concettuale alla prototipazione attraverso la fabbricazione digitale di prototipi. Dal 2003, anno di fondazione del primo *FabLab* presso il *Media Lab* del *Massachusetts Institute of Technology*, la nuova idea di laboratorio pensata da Neil Gershenfeld si è evoluta ed è cresciuta a dismisura.

«I nostri *personal computer* saranno presto affiancati nelle nostre case dai *personal fabricator*, stampanti tridimensionali in grado di assemblare vere e proprie macchine: metastrumenti, insomma, la cui esistenza è stata per lungo tempo uno dei grandi temi della fantascienza. Oggi, questa idea è già una realtà: creare su misura ciò di cui si ha bisogno o semplicemente si desidera avere»³².

I *FabLab* permettono di realizzare, di sperimentare e di fare ricerca espandendo la creatività ad un costo basso e con risultati notevolissimi, evitando che molte ipotesi rimangano dei concetti teorici sviluppati e dimostrati solo su carta. Ciò permette di comprendere le motivazioni che attualmente incoraggiano le aziende con una lunga tradizione nella storia dell'artigianato ad investire sui *FabLab*: «Esplorare le potenzialità di relazione che possono esistere tra l'approccio al *design* contemporaneo e la capacità realizzativa che le aziende manifatturiere, in possesso di strumentazione adatta, possono realmente offrire al fine di implementare l'innovazione del tessuto produttivo»³³.

Molte aziende tecnologicamente avanzate sono in

32 Gershenfeld 2005.
33 Picerno 2014.

grado di realizzare prodotti estremamente complessi: l'unico limite di lavorazione è rappresentato dalle capacità dell'immaginazione umana. I possibili benefici raggiungibili sono lo sviluppo di conoscenze e di tecnologie avanzate, l'apertura di nuovi mercati e lo sviluppo di nuove opportunità di *business* e di sinergie interessanti tra realtà differenti. Ad oggi, le reti di *teams* operanti nel mondo in questo settore forniscono consulenze altamente specialistiche³⁴. Ciò richiede alla "ritrovata figura dell'architetto" che potremmo definire "*computational architect*", un *know-how* più ricco e flessibile basato sulla consapevolezza dei sistemi di produzione alla ricerca di soluzioni tecniche adatte alle forme complesse ed allo stesso tempo capaci di restituire prestazioni elevate. Il rinnovato e potenziato rapporto con l'industria è incoraggiato dalle potenzialità degli strumenti informatici, i quali consentono un'intermediazione efficace dei contenuti del progetto e l'intervento diretto da parte del progettista nella catena produttiva, stimolando continuamente la ricerca di tecnologie avanzate ed innovative, sempre e comunque attraverso la collaborazione con altre figure specializzate (matematici, informatici, ingegneri, *etc.*). La sintesi tra i nuovi modi di progettazione computazionale, i materiali e la fabbricazione automatizzata consente l'esplorazione di un nuovo repertorio di possibilità architettoniche e lo sviluppo di strutture estremamente leggere e materialmente efficienti, dunque ottimizzate. Il settore dell'*Architectural Geometry* mira a definire e ad ottimizzare gli approcci rivolti alla soluzione di tali problematiche.

34 Cfr. Paoletti 2010.

3. *Architectural Geometry* (*Who?/Where?/When?*)

Comprendere vuol dire essere capaci di fare.
Johann Wolfgang von Goethe

Main character: la figura dell'architetto

Il genere umano, in maniera più o meno consapevole, ha da sempre affrontato i problemi inerenti la definizione geometrica e la fattibilità delle strutture. Il fenomeno dell'industrializzazione rappresenta una chiara dimostrazione di quanto l'evoluzione di un processo, di qualunque natura esso sia, coinvolga molteplici ambiti, da quelli teorici, a quelli di natura pratica: entrambe le tipologie sono da sempre oggetto delle competenze dell'architetto.

«Qualsiasi lavoro riguardante la trattazione dell'architettura oggi non può più prescindere dal considerare la condizione dell'architetto e della sua figura¹». Progettare e realizzare forme e strutture irregolari da sempre rappresenta una sfida importante per gli architetti e per i designer, in quanto la complessità delle forme complica i confini della fattibilità di tali prodotti, favorendo necessariamente il

1 Florio 2004, p.18.

coinvolgimento di contenuti afferenti ad altri settori. Tra il 30 e il 20 a.C. Vitruvio affermava che il sapere dell'architetto è ricco degli apporti di numerosi ambiti disciplinari². La parola architetto deriva dal greco *architékton*, "capo dei lavoratori", cioè colui che fornisce principalmente i progetti³.

Tuttavia, la suddivisione dei compiti e delle competenze e la mancanza di collaborazione tra le figure coinvolte nel processo generano risultati talvolta incoerenti e non ottimizzati. Per trovare una soluzione a tale fenomeno, i matematici studiano metodi capaci di migliorare la fattibilità delle opere, sperimentando nuove tecnologie e materiali e puntando su un approccio di tipo integrato, che preveda il coinvolgimento di diverse discipline, e quindi di differenti figure. Tracciare una sintesi della strada fino ad oggi percorsa è utile per comprendere meglio l'attuale contesto. Da sempre, i progettisti affrontano i problemi legati all'uso dei materiali, tra cui la pietra, il legno, i mattoni ed i metalli per la realizzazione di opere architettoniche: questi materiali, oggi come in passato, garantiscono la coerenza tra i linguaggi architettonici e le sintassi attraverso cui essi sono strutturati, che si tratti della composizione di un ordine architettonico o della realizzazione di un involucro complesso. Fin dall'antichità l'architettura è basata sul legame tra matematica e rappresentazione. In origine, la composizione e la percezione degli elementi costruttivi erano organizzate all'interno di una conoscenza e di uno spazio geometrico di tipo euclideo. I rivoluzionari costruttori delle cattedrali medievali erano esperti tanto dell'arte del costruire, quanto di tutte le altre attività di cantiere, fornendo soluzioni a qualsiasi problema⁴.

Nel XVI secolo, la rivoluzione copernicana, legata al pensiero di Galileo⁵ e di Newton⁶, assume una dimensione filosofica che si concretizza in una nuova concezione dell'uomo e del suo ruolo e che con-

2 Florio 2004, p. 18.

3 *L'Universale: Architettura*, vol. I, 2004, Editore Il Giornale, p. 47.

4 Galasso 2008, p. 9.

5 Galilei 1543.

6 Newton 1687.

durrà ad una rivoluzione scientifica fondata su quei principi che caratterizzano ancora oggi l'idea di scienza. In primo luogo si afferma la ricerca fondata sull'osservazione e verifica dei risultati, legata all'impiego di nuove tecnologie e del calcolo matematico. La ricerca assume quindi una dimensione scientifica che porterà, nei secoli seguenti, all'elaborazione di teorie quali l'Illuminismo e il Positivismo.

Per cui, se l'Illuminismo aveva celebrato come tipo ideale il "filosofo" ed il Romanticismo "il poeta", il Positivismo esalta soprattutto la figura dello "scienziato", di cui è incarnazione massima «quel Newton della biologia che è Darwin⁷».

Le possibilità derivanti dagli studi della matematica alimentano nei filosofi la fiducia che la diffusione della conoscenza scientifica possa sanare i mali da cui la società è afflitta. Gustave Comte riteneva la matematica quale scienza fondamentale posta alla base di tutte le altre. Ogni scienza più complessa eredita nella sua indagine i risultati ed i principi delle scienze precedenti e rappresenta la base per quelle successive, pur non essendo ad esse riducibile⁸.

Le innovazioni di questo fenomeno, inevitabilmente, investono tutti i campi del sapere, coinvolgendo anche la figura dell'architetto. All'inizio del XIX secolo, le prime grandi scoperte nel campo della matematica, da Leibnitz a Monge, determinarono una svolta legata alla sistematizzazione dei principi teorici ed alla comparsa dei nuovi materiali, tra cui l'acciaio. Gradualmente, le formule legate alla resistenza dei materiali sostituiscono le antiche teorie di proporzione. Tale approccio culmina negli studi pubblicati da ingegneri come Henri Navier, Augustin Louis Cauchy o Jean-Claude Barre de Saint-Venant⁹. Lo sviluppo di un approccio fortemente scientifico, attraverso cui affrontare le nuove sfide architettoniche, ha causato la separazione tra la figura dell'architetto e quella dell'ingegnere, segnando-

7 Cfr. autore sconosciuto, *Il pensiero nell'età del progresso. Il positivismo.*

8 *Ibidem.*

9 *Ibidem.*

ne i futuri rapporti e delineando differenti profili. Con l'ascesa dell'industria automobilistica, aeronautica e l'uso di materiali quali il cemento armato, il vetro e l'acciaio, la cultura matematica dell'ingegnere è sempre più necessaria alla definizione delle logiche d'industrializzazione e di commercializzazione dei processi: il linguaggio razionale della matematica, dalla fine del XIX secolo e per tutto il XX secolo, è sempre più dominante ed influente in ogni campo.

I lavori sulla geometria frattale del matematico polacco Benoit Mandelbrot (1924-2010)¹⁰ e la teoria delle catastrofi, mediante la quale René Thom (1923-2002)¹¹ mira ad applicare la matematica ai fenomeni naturali, rappresentano solo alcuni degli esempi dello sviluppo di tale fenomeno.

Gli anni del secondo conflitto bellico mondiale danno l'inizio di una vera e propria rivoluzione che condurrà all'invenzione dei primi calcolatori elettronici. Gli studi di Alan Turing nel campo dell'elaborazione automatizzata rappresentano la base per gli sviluppi successivi: durante il secondo dopoguerra, le Università statunitensi realizzarono macchine dotate di elevate capacità di calcolo¹².

Intorno agli anni '50-'60, ingegneri ed architetti hanno dovuto confrontarsi con una nuova serie di problemi derivanti dalle potenzialità delle nuove macchine e dei nuovi materiali, tra cui la possibilità di sperimentare nuove forme e strutture fluide, confluite nella progettazione e realizzazione delle strutture a guscio, delle tensostrutture o dei sistemi pneumatici. Le superfici a doppia curvatura di Buckminster Fuller, Pier Luigi Nervi, Frei Otto, Felix Candela e gli esperimenti di Eduardo Torroja rappresentano le celebri manifestazioni di tale approccio.

Negli anni '80 si assiste allo sviluppo e alla commercializzazione di computer dotati di notevoli capacità di elaborazione ed economicamente accessibili,

10 Benoit Mandelbrot è il fondatore di ciò che oggi viene chiamata geometria frattale.

11 René Thom, matematico e filosofo francese, ha studiato i modelli matematici di fenomeni discontinui causati dalla continua variazione dei parametri da cui dipendono.

12 Cfr. Campi 2007, p. 10.

destinati non solo allo sviluppo di ricerche e di applicazioni di natura scientifica ed accademica, ma rappresentanti un irrinunciabile supporto per diverse figure professionali, accessibile soprattutto grazie allo sviluppo di interfacce di tipo iconico¹³.

Il fenomeno della rivoluzione digitale ha favorito lo sviluppo di strumenti capaci di rendere possibile la diretta correlazione tra ciò che può essere progettato e ciò che può essere costruito, modificando l'iter di comunicazione delle informazioni necessarie per risolvere i problemi di produzione, di comunicazione, applicazione e controllo.

I sistemi parametrici ed i calcoli algoritmici hanno favorito lo sviluppo di ricerche di carattere puramente formale e di nuovi materiali, e con essi la messa a punto di nuove tecnologie per l'ottimizzazione dei processi. Non appena le forme hanno iniziato a complicarsi, è stato necessario abdicare in favore dei sistemi parametrico-computazionali e dei calcoli matematico-algoritmici, i quali oggi rappresentano uno strumento irrinunciabile per la gestione dei *big data* e per la fattibilità delle opere¹⁴, talvolta anche indipendentemente dal loro grado di complessità.

Tuttavia, non sono pochi gli architetti che restano ancorati ad una visione "filosofico-astratta" dell'Architettura. Anche all'interno degli studi di architettura maggiormente impegnati nella progettazione di forme complesse, le figure dell'*engineering expert* o del *computational designer* continuano a rappresentare delle figure irrinunciabili a cui il progettista affida il controllo della fase esecutiva dell'opera. Talvolta accade che costruttori e produttori modifichino i progetti o che i *designer* impongano condizioni e restrizioni sulla produzione, il tutto al di fuori di una collaborazione consapevole: ciò può produrre conseguenze drammatiche sui costi totali e sulla sostenibilità del prodotto. Il risultato è che molti progetti, a causa della loro complessità, resta-

13 *Ibidem*.

14 Cfr. Hesselgren 2012, pp.7-9 e pp. 13-22.

no sulla carta, mentre quelli realizzati devono essere semplificati o modificati, optando per l'uso di geometrie semplici più adatte a processi produttivi standardizzati, i cui risultati funzionali ed espressivi sono prevedibili o, peggio, incoerenti con le intenzioni iniziali del progettista. Tuttavia, lo sviluppo e la crescente diffusione ed accessibilità dei nuovi strumenti digitali e tecnologici favoriscono la definizione di un nuovo linguaggio digitale comune, superando la separazione tra le varie figure coinvolte all'interno del processo decisionale e generando la nascita di una figura completa e rinnovata: il *computational architect*. Integrando la progettazione, l'analisi, la fabbricazione e l'assemblaggio di edifici con le tecnologie digitali, la collaborazione tra architetti, ingegneri, matematici, informatici e costruttori può ridefinire radicalmente le relazioni tra ideazione e produzione¹⁵. Nel campo della realizzazione delle forme complesse, la soluzione risiede nello sfruttare e veicolare le potenzialità della scienza e dello sviluppo tecnologico verso l'ottimizzazione dei processi, coordinando e fondendo le conoscenze tecniche provenienti da diversi settori di ricerca, tra cui la chimica, la biologia molecolare, l'informatica, la scienza dei materiali e da settori come l'aeronautica e il navale¹⁶. Le recenti risposte avanzate dall'industria suggeriscono pertanto un necessario sviluppo di nuove competenze da parte di architetti e *designer*. Un architetto "tradizionale", infatti, raramente è in grado di affrontare e di gestire progetti dalla complessità molto elevata, con conseguenze talvolta inadeguate.

La conoscenza delle tecnologie CAD, CAM, CAE, CAF e FEM¹⁷ e dei nuovi materiali rientrano, pertanto, inevitabilmente tra i requisiti attualmente richiesti ad un *computational architect*. Ritorna dunque necessario concepire il progetto come un'attività multidisciplinare, come il frutto di un approccio sistemico. Non è infatti corretto parlare di specialismi

15 Cfr. Kolarevic 2003.

16 Paoletti 2006.

17 *Ibidem*.

o di specializzazioni, i quali rafforzano la separazione delle linee di confine che delineano le varie figure coinvolte nel processo. Piuttosto, è più corretto parlare di miglioramento delle conoscenze e delle competenze proprie di una determinata figura, sviluppabile già a partire dalla fase di formazione dei futuri *computational architects* allo scopo di favorire una crescita e degli esiti consapevoli¹⁸.

Main research field: Architectural Geometry

La fantasia umana è certamente capace di evocare una sorprendente varietà di forme, ma è necessario trovare un equilibrio concreto tra la qualità complessiva del risultato ed i costi, di qualsiasi natura essi siano, affinché gli esperimenti virtuali possano concretizzarsi. Attualmente, la ricerca di soluzioni a questo specifico problema viene affrontata dagli avanzamenti condotti nell'ambito dell'*Architectural Geometry*. L'*Architectural Geometry* è un settore di ricerca che combina elementi di matematica, geometria computazionale, Informatica, Ingegneria, biologia e architettura. Da sempre, gli architetti hanno preso in prestito gli approcci e le tecniche derivanti da altri settori, navale, automobilistico e aerospaziale, che per tale ragione possono dunque essere considerati complementari a quello architettonico.

Branko Kolarevic¹⁹ dimostra come gli architetti e i costruttori, da sempre, abbiano moltissimo da imparare dalla cantieristica di altri settori ricordando una serie di esempi che testimoniano l'importanza di tale approccio: Palladio ha progettato il tetto della Basilica di Piazza dei Signori a Vicenza (1617) come uno scafo di una nave rovesciata e ha coinvolto dei costruttori navali per realizzarlo; Buckminster Fuller, per i suoi progetti della *Dymaxion House* (1946) e della *Dymaxion Car* (1933) ha optato per i metodi di produzione delle industrie aeronautiche e navali; Future Systems ha realizzato il *Lord's*

¹⁸ Losasso 2014.

¹⁹ Cfr. Kolarevic 2003.

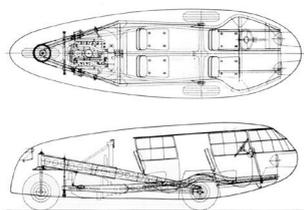
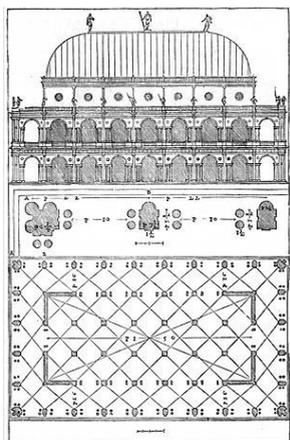


Fig. 1/ *La Basilica*, da *I quattro Libri dell'Architettura* (1540) di Andrea Palladio.

Fig. 2/ *Dymaxion Car*, 1933 di R. B. Fuller. Fonte: Wikimedia Commons. Autore: brewbooks from near Seattle, USA.

Fig. 3/ *Dymaxion House*, 1946 di R. B Fuller. Fonte: Wikipedia.

20 *Ibidem*.

21 AAG-Conference Proceedings.

22 Cfr. Pottmann, Kilian e Hofer 2008, pp.3-4.

23 I seminari AAG si svolgono con cadenza biennale.

Media Centre di Londra (1999) grazie ad una serie di segmenti di alluminio recuperati dallo scafo di uno *yacht*, essenziali per la produzione della struttura monoscocca in alluminio; Frank O'Gehry ha rivestito la superficie curva della *DZ Bank AG* in Pariser Platz, Berlino (1997-2000) con delle lastre di acciaio inossidabile prodotte ed installate da costruttori di barche e non avrebbe potuto realizzare il *Guggenheim Museum* (1997) di Bilbao senza il ricorso all'industria siderurgica²⁰. È soprattutto intorno alla Rivoluzione digitale, che ha inevitabilmente investito il campo dell'Architettura, che si sviluppa l'approccio olistico dell'*Architectural Geometry*. Gli approcci multidisciplinari sviluppati all'interno di tale settore²¹ enfatizzano lo studio di problemi derivanti dalle interazioni tra le parti costituenti i sistemi complessi. La tendenza è quella di riunire ricercatori provenienti da differenti ambiti disciplinari per affrontare problemi e questioni complesse attraverso il confronto e l'integrazione dei continui progressi teorici e pratici raggiunti o proposti²².

La continua realizzazione di opere dotate di elevata complessità ha favorito notevoli sviluppi ed avanzamenti del settore, aumentandone la popolarità. Il potenziamento e lo sviluppo di efficienti algoritmi di ottimizzazione e di strumenti *user-friendly* concentrati sulla ricerca di continui progressi in campo computazionale e tecnologico rappresentano le sfide attualmente più sentite da matematici, ingegneri, informatici, *computational designer* e *architects* coinvolti nel settore dell'*Architectural Geometry*.

Le ricerche nel campo della matematica applicata all'architettura sono in crescita: le conferenze biennali *Advances in Architectural Geometry* (AAG) rilevano un incremento del numero di partecipanti dal 2008, anno del primo seminario, al 2018, anno in cui si è tenuto il più recente di questi incontri²³.

Tra i gruppi coinvolti in questo ambito, *Smart Geometry*, SIGraDI o eCAADe, grazie all'organizzazione di *workshop* e di conferenze annuali rivolti a scienziati, ricercatori, progettisti o artigiani, promuovono la diffusione e lo sviluppo di questi nuovi approcci, dalla progettazione alla produzione. I contributi pubblicati all'interno degli atti di tali conferenze ed eventi, che si tengono in diversi paesi del mondo, confermano la natura pluridisciplinare del settore²⁴. I *geometry experts*²⁵ e le altre figure coinvolte in questi gruppi di ricerca sfruttano le loro competenze matematiche, geometriche ed informatiche per risolvere problemi complessi legati a diversi *topics*, tra cui *Freeform curves and surfaces creation*, *Discretization*, *Generative design*, *Digital prototyping and Manufacturing Robotic Fabrication*²⁶.

Non è un mistero che la geometria, oggi applicata ad un livello mai raggiunto prima, giochi da sempre un ruolo fondamentale per la ricerca di soluzioni ai problemi dell'Architettura.

Pertanto, la tendenza a spingere i progetti verso un elevato grado di complessità formale determina l'esigenza di programmi di insegnamento mirati e di conoscenze più profonde dei principi geometrici di base ed avanzati, di cui parte sono tradizionalmente insegnati all'interno dei corsi di geometria descrittiva e di disegno. La validità o la fattibilità delle soluzioni rappresentano le grandi sfide per le quali è necessario mettere a punto delle opportune strategie, ma per eccellere nell'utilizzo delle nuove tecnologie computazionali e parametriche è necessario lo sviluppo di nuove competenze.

Main topic. Paneling architectural complex surfaces

Helmut Pottman²⁷ definisce il processo di *Paneling* «*an approximation of the design surface by a set of panels that can be manufactured using a selected technology at a reasonable cost, while respecting*



Fig. 4/ *Lord's Media Center*, 1999, Londra (UK), progettato da Future Systems. Fonte: Wikimedia Commons.



Fig. 5/ *DZ Bank AG*, 1997-2000, Berlino (Germania), progettata da Frank O Gehry.

24 *Architectural Geometry*, http://en.wikipedia.org/wiki/Architectural_geometry

25 Evolute.at/company-en/staff.html

26 Ceccato 2010, pp.5-6.

27 Helmut Pottmann (1959), matematico austriaco e professore universitario della TU di Vienna (Modellazione geometrica e geometria industriale), è tra gli studiosi di maggiore riferimento impegnati nel campo dell'*Architectural Geometry*.

the design intent and achieving the desired aesthetic quality of panel layout and surface smoothness»²⁸.

Dunque, "pannellizzare" una superficie significa approssimare il *design* di una superficie utilizzando diverse tipologie di pannelli, piani, curvi o di entrambi i tipi, computando una soluzione costruttiva, economica ed estetica ottimizzata, dunque sostenibile. Se si considera una superficie curva, indipendentemente dalla sua complessità, è noto che il metodo di discretizzazione da sempre ritenuto più semplice ed economico, oltre che sempre possibile, è quello di computare e di fabbricare *pattern* triangolari piani. Tuttavia, grazie all'evoluzione dei materiali, delle tecnologie e delle capacità di calcolo, le forme che una volta erano fuori controllo, sia in termini di controllo geometrico che di fattibilità economica, oggi risultano più elegantemente realizzabili²⁹.

I sistemi di tassellazione piana delle superfici curve sono oggetto di continui studi che mirano soprattutto al *clustering* (o raggruppamento) di elementi che siano il più possibile uguali tra loro. I sistemi composti da tasselli piani, indipendentemente dal *pattern* di distribuzione, determinano un aspetto sfaccettato della superficie curva originaria, conseguenza che si traduce principalmente in effetti di riflessione e di rifrazione discontinue dell'ambiente circostante, talvolta alterando le intenzioni morfologico-espressive dell'architetto. Una soluzione più coerente con l'idea progettuale di continuità è sicuramente raggiungibile utilizzando pannelli curvi. Tuttavia, i costi di realizzazione di pannelli a doppia curvatura sono elevatissimi.

Tra le figure fondamentali per lo sviluppo di questo *topic* emerge quella del già citato Helmut Pottmann, impegnato nella sperimentazione di soluzioni tecnologiche avanzate nel campo del *surfaces Paneling*.

*ARC, Architectural Freeform Structures from Single Curved Panels*³⁰, è un progetto messo a punto per

28 Eigensatz et al. 2103.

29 Cfr. Vaudeville et al. 2012, p.280.

30 *ARC - Architectural Freeform Structures from Single Curved Panels*. <https://www.geometrie.tuwien.ac.at/ARC/publications.html>.

la realizzazione di strumenti utili per progettare e fabbricare superfici complesse mediante la distribuzione ottimizzata di pannelli curvi; più precisamente, i principali partner coinvolti nel progetto ARC sono *Evolute GmbH*, il Politecnico di Vienna ed *RFR Group*. La poetica che li accomuna è quella di unire le competenze ed i linguaggi diversi, propri di questi settori, verso un obiettivo comune: razionalizzare una superficie *free form* assemblando porzioni di superfici sviluppabili (o comunque rigate), per ridurre i costi di produzione ed ottimizzando la fabbricazione e la qualità estetica delle superfici.

Evolute GmbH è un gruppo di *geometry experts* la cui società rappresenta una realtà capace di fornire servizi e *software* di carattere matematico-geometrico ed è uno *spin off* della *Vienna University of Technology*. Il gruppo realizza e pubblica ricerche *high-tech*, servizi di *consulting* e strumenti rivolti a tutte le figure che affrontano le sfide legate allo studio ed alla realizzazione di architetture complesse. Attualmente, *Evolute* offre una gamma di potenti strumenti per la razionalizzazione di superfici complesse: *Evolute Tools Pro, Lite, T.Map, D. Loft, Fit* e *Cluster*³¹.

L'attività di ricerca dell'Istituto di Matematica discreta e Geometria dell'Università di Vienna, in collaborazione con altre realtà accademiche e professionali, tra cui *RFR. Structure et Enveloppe*³², è concentrata sui problemi di ottimizzazione delle forme complesse, studiando soluzioni basate sui principi della geometria discreta, differenziale e computazionale.

RFR, fondata nel 1982 da Sir Peter Rice, è un'azienda che gode di fama mondiale nel campo della progettazione ed ottimizzazione di strutture, facciate e involucri complessi, avvalendosi di una vasta gamma di competenze in ingegneria, architettura e *design* industriale. Tra le sue collaborazioni troviamo la nota *Pyramide* inversa del Musée du Louvre, la stazione metropolitana di Saint Lazare (1997-2003),

31 evolute.at/software-en/software-overview
32 RFR Group | Paris, Stuttgart, Shanghai: <http://www.rfr-group.com>.

nota come la *lentille*, il *Terminal 2F* dell'aeroporto Charles de Gaulle, le superfici progettate da Frank Ghery per la *Fondation Louis Vuitton* (2014), le facciate dei tre nuovi padiglioni realizzati per la ristrutturazione del primo piano della Torre Eiffel (oggetto di approfondimento sviluppato all'interno della Parte terza di questa trattazione), la *Gare TGV de Belfort Montbéliard* (2006-2011) o la facciata del *La Samaritaine* (2010-2019).

La collaborazione tra *Evolute GmbH* e RFR mira a fondere la progettazione, l'ingegneria e il rigore matematico al fine di fornire strumenti che consentano ai progettisti e agli architetti di ampliare i confini della forma, delle strutture e dei materiali utilizzati.

Lo scopo del *topic* indagato è, dunque, quello di progettare, controllare e verificare i processi di *Paneling* delle superfici: in letteratura, questo processo è meglio noto con il termine riassuntivo di "razionalizzazione". Attraverso calcoli ricorsivi, il processo di razionalizzazione mira ad ottimizzare la geometria di un modello per controllare il dettaglio qualitativo ed i relativi costi inerenti la produzione delle parti che, assemblate, compongono il prodotto finale.

In particolare, il principale obiettivo del progetto *ARC* consiste nello sviluppo di metodi e algoritmi per la produzione e per l'uso ottimizzato di pannelli a singola curvatura, in quanto più semplici da realizzare e, al tempo stesso, capaci di generare l'effetto di continuità delle superfici curve offrendo un buon compromesso tra le intenzioni progettuali ed i costi di produzione di tali superfici.

L'esperienza condotta da questi gruppi dimostra quanto oggi sia necessario colmare il divario tra il mondo accademico ed i settori produttivi, promuovendo l'organizzazione di partenariati tra industria, centri di ricerca specializzati e Università.

Main digital tool: computational design

Dai primi anni '90, l'architettura ha dunque attraversato un periodo di forte accelerazione creativa. «Dall'applicazione delle regole della rappresentazione geometrica sui piani mongiani o delle simulazioni spaziali assonometriche e prospettiche, oggi si è giunti alla costruzione di modelli digitali di architetture costruite e costruibili. È in particolare su queste ultime che viene posta l'attenzione»³³. La diffusione di elementi prefabbricati, la necessità di ridurre le quantità di pezzi speciali, le restrizioni economiche e la necessità di progettare un ciclo di vita sostenibile per l'edilizia impongono lo sviluppo di nuove competenze da parte dell'architetto. Il *design* computazionale è lo strumento che rende consapevole la progettazione digitale.³⁴

Attualmente, gli algoritmi rappresentano gli strumenti necessari per risolvere i problemi legati al *Paneling* di forme complesse e, grazie alla loro trasposizione in elementi visualizzabili e personalizzabili, rappresentano uno strumento accessibile anche per gli architetti e per i *designer*. Tuttavia, all'interno dei *papers* dedicati al *topic* del *Paneling*, molto spesso, i principi geometrici di base su cui si fondano le teorie complesse e le conseguenti applicazioni non vengono puntualmente richiamati oppure vengono presentati attraverso la forma implicita dei linguaggi matematico ed informatico. Inoltre, la maggior parte delle pubblicazioni dedicate allo sviluppo dei *topics* che strutturano i settori dell'*Architectural* e *Computational Geometry* sono realizzati soprattutto da matematici, informatici o ingegneri che lavorano sull'integrazione tra le loro discipline di appartenenza e sulle possibili applicazioni e ricadute nel campo dell'architettura. Questo rende necessaria la sistematizzazione dei principi geometrico-matematici posti alla base dei principali algoritmi utili per la risoluzione del problema: la geometria descrittiva è

33 Campi 2007.

34 Tedeschi 2014, pp.15-30.

la disciplina adatta per esplicitare e rappresentare tali contenuti. È sicuramente necessario constatare che la questione ha favorito lo sviluppo e la diffusione di *software* avanzati e di relativi "tutorial esplicativi" basati su sistemi accessibili a tutte le figure coinvolte nel processo³⁵.

Gli applicativi, in continuo aggiornamento, sono appositamente studiati per interfacciarsi con le attuali logiche produttive, rispondere alle attuali necessità del mercato e consentire la creazione di modelli contenenti tutti i dati e le informazioni necessarie per la fase realizzativa, i quali sono direttamente trasferibili alle macchine a controllo numerico. Inoltre, questi strumenti consentono simulazioni e verifiche di carattere strutturale, ambientale ed energetico.³⁶

Il modello digitale, in questi casi, diventa una simulazione dell'oggetto edilizio³⁷. Oggi la popolarità degli strumenti algoritmico-generativi e la diffusione delle informazioni, favorite dall'organizzazione di *workshop* e di *tutorial on line*, è cresciuta esponenzialmente e gli utenti possono accedere liberamente ai contenuti e possono usufruire di una vasta gamma di strumenti didattici *open source*, approcciando in maniera consapevole alle nuove tecnologie.

L'affermazione della cultura del *design* digitale, di fatto, si conclude negli anni '90, ed è principalmente rappresentata dallo sviluppo di *software* di animazione per l'ideazione di forme complesse, cambiando per sempre il modo in cui lo spazio viene percepito, progettato e comunicato. La rivoluzione digitale ha determinato la nascita di nuovi stili e se il Disegno rappresenta un mezzo a servizio dell'Architettura, i nuovi stili, a loro volta, impongono lo sviluppo e la gestione di nuovi strumenti di controllo³⁸.

A tal proposito è utile indagare gli strumenti digitali forniti dai più recenti modellatori parametrici attualmente più diffusi. I nuovi strumenti computazionali consentono di affrontare con rigore, mediante ap-

35 *Ibidem*.

36 Paoletti 2010, p. 513.

37 *Idem*.

38 Geometrie.tuwien.ac.at/ARC/talks.html.

procci algoritmico-generativi, il problema della modellazione, gestione e realizzazione di superfici architettoniche curve e complesse.

«L'oggetto non è un oggetto ma un algoritmo, una funzione parametrica che può determinare un'infinita varietà di oggetti, tutti diversi (uno per ogni set di parametri) ma tutti simili (poiché la funzione sottostante è la stessa per tutti³⁹».

Un algoritmo viene generalmente descritto come un procedimento per la risoluzione di un problema. Il termine "algoritmo" deriva dalla trascrizione latina del nome del matematico persiano al-Khwarizmi⁴⁰, considerato uno dei primi autori ad aver fatto riferimento a questo concetto. Nel secolo scorso David Hilbert⁴¹ formalizza il concetto di algoritmo come strumento capace di risolvere il problema matematico della "decisione" (*Entscheidungs problem*).

Se questa idea aveva già una certa importanza per il calcolo matematico, è con l'informatica che il termine "algoritmo" ha iniziato a diffondersi.

Un algoritmo è dunque una sequenza ordinata e finita di *steps* elementari, cioè non ulteriormente scomponibili ed univocamente interpretabili.

Un algoritmo richiede una quantità finita di dati in ingresso (*input*) e l'esecuzione deve portare ad un risultato univoco (*output*) in un tempo finito. Per ogni passo compiuto all'interno di un algoritmo, il successivo deve essere uno e uno solo. È preferibile che gli algoritmi siano "modulari", ovvero orientati a risolvere specifici sotto-problemi e distribuiti secondo una specifica gerarchia appositamente strutturata allo scopo di rispondere ad un determinato problema. Particolare rilevanza teorica in tale ambito assume il teorema di Böhm-Jacopini, che afferma che qualunque algoritmo può essere implementato utilizzando tre strutture: la sequenza, la selezione e il ciclo (iterazione) da applicare ricorsivamente alla composizione di istruzioni elementari⁴².

39 Carpo 2011.

40 Boncompagni 1857.

41 Stovicek 2009, pp. 4-7.

42 Bohm 1966, pp. 366-371.

Graficamente, un algoritmo è descritto da un diagramma di flusso. Tale diagramma è successivamente tradotto, ad opera di un programmatore, in linguaggio di programmazione e quindi in linguaggio macchina, dando così vita al programma che sarà eseguito dal *computer*, da cui deriva il termine "computazionale". Per comunicare al *computer* una serie di istruzioni viene utilizzato un *editor* specifico. Gli *editor* possono essere applicazioni indipendenti, oppure possono essere inserite all'interno di un *software* e permettono la scrittura d'istruzioni (*visual scripting* o *visual programming*) per automatizzare le attività. La costruzione di una geometria, ad esempio, può avvenire mediante la definizione di una sequenza algoritmica: secondo questo approccio, una linea è definita a partire da due punti, definiti a loro volta dalle rispettive coordinate. Ciò significa che la linea non viene "tradizionalmente" tracciata all'interno dello spazio virtuale, ma deriva dall'associazione e dalla sequenza di una serie di *steps* che ne definisce la genesi geometrica. La possibilità di stabilire delle relazioni associative tra oggetti diversi, come numeri, primitive geometriche e dati di diverso tipo, genera forme senza precedenti derivanti dal coinvolgimento di molteplici parametri di *input*. La progettazione algoritmica consente ai progettisti di trovare nuove soluzioni superando i limiti dei tradizionali sistemi CAD. Secondo tale logica, gli oggetti sono generati attraverso delle procedure espresse in un linguaggio di programmazione specifico: tale operazione è detta *scripting*. Tra i programmi di *scripting* è possibile citare *Autolisp* in *Autocad*, *Rhinoscript* in *Rhinoceros*, MEL in *Maya* e altri linguaggi di programmazione, tra cui *Python*⁴³. Tale processo genera un modello digitale interattivo in cui la variazione degli *input* manipola l'intero sistema ed i relativi *output*. Recentemente, diverse case produttrici di *software* hanno sviluppato degli

43 Tedeschi 2014, p. 10.

strumenti visuali per rendere lo *scripting* accessibile a qualsiasi utente, basati su metodi grafici strutturati attraverso sequenze, o diagrammi, composti da nodi e connessioni, facilitando così tale compito soprattutto agli architetti e ai *designers* non programmatori. Questi strumenti permettono agli utenti di computare geometrie complesse (*output*) mediante l'associazione di geometrie e di dati semplici (*input*)⁴⁴. Negli ultimi anni sono stati pubblicati diversi manuali di supporto per l'uso di questi digital tools⁴⁵.

Grazie alla diffusione di numerosi plug-in, in commercio o *open source*, sono ad oggi disponibili dei componenti che, al loro interno, contengono appositi algoritmi e formule matematiche per lo sviluppo di specifiche azioni virtuali da compiere sugli oggetti digitali. In particolare, le applicazioni, i casi studio e le sperimentazioni riportate all'interno di questo volume sono stati indagati e realizzati attraverso l'uso del *software Rhino-ceros (McNeel & Associates)*, unitamente ai *plug-in Grasshopper (open source)* ed *Evolve Tools Pro*.

Grasshopper, strumento utilizzato principalmente per costruire definizioni algoritmico-generative, si avvale di un linguaggio di programmazione visuale sviluppato da David Rutten e Robert McNeel & Associates, capace di trasformare le operazioni di *scripting* di un codice in una serie di *steps* visuali⁴⁶.

Evolve Tools Pro è un *plug-in* commerciale dotato di un insieme di strumenti per la gestione e l'ottimizzazione di superfici complesse⁴⁷.

44 Tedeschi 2014, p. 23.

45 Alcuni dei manuali dedicati al *plug-in Grasshopper (Rhino-ceros)*: A. Payne, R. Issa, *Grasshopper Primer, for version 0.6.0007*, edizione italiana a cura di A. Cremaschi, A. Innocenti (2009 - *ebook*: <http://www.liftarchitects.com/blog/2009/3/25/grasshopper-primer-english-edition>);

Woo Jae Sung, *Rhino Grasshopper Tutorial* (2009 - *ebook*: www.woosung.com); A. Tedeschi (2010), *Architettura Parametrica. Introduzione a Grasshopper*, Le Penseur Publisher; Z. Khabazi, *Algoritmi generativi con Grasshopper* (2011 - *ebook*: <http://grasshopperresources.blogspot.it/2011/02/algoritmi-generativi-by-zubin-khabazi.html>), edizione italiana a cura di A. Marsala (2011); A. Tedeschi (2014), *AAD - Algorithms - Aided Design*, Le Penseur Publisher.

46 Nebuloni et al. 2014.

47 Evolute.at.

Parte seconda

Principi e tecniche

4. *Paneling & Digital Fabrication*

Una regola giapponese dice: la perfezione è bella, ma è stupida,
bisogna conoscerla, usarla, ma romperla.
Bruno Munari

Sistemi regolari vs sistemi casuali: ordine e caos

Gli antichi, nel progettare le loro opere, miravano alla composizione di un ordine regolato da leggi fondate sui rapporti armonici tra le parti ed il tutto¹. La modularità è, da sempre, uno degli obiettivi più ambiti per la scomposizione di un sistema indipendentemente dalla sua complessità: la produzione industriale tende inevitabilmente alla realizzazione e all'impiego di elementi modulari, i quali favoriscono l'ottimizzazione delle fasi di fabbricazione e di assemblaggio dei prodotti finali.

L'oggetto di questa trattazione è quello di tracciare un percorso metodologico per interpretare e gestire la complessità attraverso diverse, possibili combinazioni distributive di forme semplici. Da sempre, la natura rappresenta una ricca fonte d'ispirazione per la ricerca di soluzioni: la regolarità delle simme-

¹ Munari 2002, p.53.

trie spaziali che determinano la struttura dei cristalli e dei radiolari hanno ispirato le proposte originali di diversi studiosi, tra cui M. C. Escher e B. Fuller, anticipando ricerche tra le più recenti².

La divisione regolare del piano rappresenta la fonte di ispirazione più ricca per le produzioni di Escher. Le geometrie degli arabeschi, decorazioni di pareti e pavimenti con pezzi di maiolica colorati e mutualmente assemblati hanno stimolato le sue ricerche sulle tassellazioni cicliche, scaturite nella produzione di *pattern* di diversa complessità³.

«Se si vuole riuscire a rappresentare la simmetria su una superficie piana, bisogna tener conto di tre principi fondamentali della cristallografia: traslazione, rotazione e riflessione»⁴.

Le proiezioni piane delle simmetrie spaziali dei poliedri sfociano negli omeomorfismi, da cui derivano forme apparentemente disordinate ma determinate da permutazioni regolari e da geometrie frattali. Ciò significa che la reiterazione di forme semplici può generare geometrie complesse, riproducibili e gestibili attraverso delle elaborazioni di tipo automatico: è proprio da tale approccio che trae ispirazione una parte degli esperimenti formali dell'Architettura Decostruttivista⁵.

Regolarità e modularità favoriscono la creazione di sistemi componibili prefabbricati attraverso i quali comporre diverse soluzioni figurative. L'ambiente che ci circonda è carico di esempi di sistemi modulari: trame di tessuti, piastrellature, griglie e maglie metalliche⁶. Indagando la questione dal punto di vista geometrico, le forme modulari dalle quali è possibile generare tutte le altre figure sono il cerchio, il triangolo ed il quadrato⁷ (figg. 1-3). In una struttura modulare gli elementi, talvolta, presentano la stessa forma della figura generatrice ma dimensioni inferiori. Il modulo, in questo caso, può quindi essere considerato come un "sottomultiplo

2 Rossi 2009, p.50.

3 *Ibidem*.

4 Escher 1990, pp. 7-8.

5 Rossi 2009, pp. 52-59.

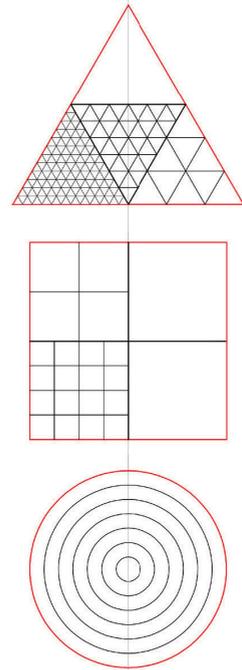
6 Si tralascia volutamente lo studio dei *pattern* decorativi, ampiamente trattati all'interno di numerosi studi e pubblicazioni in merito.

7 Valeri 1975, p.74.

della forma⁸: esso è invariabile, ripetibile e capace di generare strutture componibili. Due figure geometricamente simili hanno la stessa forma e possono differire solo per dimensioni ed orientazione; se esse sono uguali, saranno geometricamente congruenti e potranno essere distinte solo in base alla loro orientazione. A differenza dal quadrato e dal triangolo, meno chiaramente definibile è la struttura modulare del cerchio⁹. I *Mandàla*, termine derivante dal sanscrito *mandala*, che letteralmente significa "essenza" (*manda*) e possedere o "contenere" (*la*)⁹ rappresentano dei diagrammi circolari costituiti, di base, dall'associazione di diverse figure geometriche: le più usate sono proprio il triangolo, il cerchio ed il quadrato.

Tuttavia, quando la complessità della forma, che sia essa piana o curva, aumenta, frammentare il continuo mediante elementi modulari rappresenta una soluzione lineare al problema che chiaramente contrasta con la natura complessa, dunque "non lineare" del supporto. Tra le tecniche di frammentazione del continuo è utile richiamare, in maniera sintetica, l'arte musiva. Un mosaico è una tecnica artistica e decorativa che consiste nel creare dei motivi geometrici o figurativi accostando piccoli pezzi di materiale lapideo e vitreo. Esso permette di rivestire superfici anche di grandi dimensioni, piane e curve, oltre che sculture e oggetti tridimensionali.

Osservando le numerose opere musive prodotte nei secoli, si osserva che ciascuna delle tessere può rappresentare un modulo e quindi può essere riprodotta seguendo la stessa forma, ma non necessariamente la stessa dimensione, oppure può presentare una forma irregolare. La geometria della superficie da rivestire o da suddividere influenza in maniera sostanziale la fattibilità dell'operazione e la qualità del risultato: le superfici piane e le superfici di rotazione e di traslazione consentono di ricavare più sempli-



Figg. 1-3/ Modularità del triangolo, del quadrato e del cerchio.

⁸ *Ibidem*, p.79.

⁹ Il termine può essere tradotto anche come "cerchio-circonferenza" o "ciclo".

Il mandala riveste un significato spirituale e rituale sia nel Buddismo che nell'Hinduismo.

it.wikipedia.org/wiki/Mandala



Fig. 4/Particolare del *Parco Güell*, 1900-1914, Barcellona (Spagna) di Antoni Gaudí. (Foto dell'autore).

Fig. 5/Passaggio da tasselli quadrangolari a triangolari per assecondare la pendenza della strada. (Foto dell'autore).

Fig. 6/Particolare della copertura della Fiera di Milano Rho, 2014. Massimiliano Fuksas. (Foto dell'autore).

10 Filet Mazza 2005.

11 Tosi 2004.

cemente dei sistemi discreti. Nel XX secolo si assiste ad una rinascita dell'arte musiva applicata all'architettura. Se nei mosaici più antichi la distribuzione delle tessere segue dei reticoli geometrici regolari, in quelli successivi essa tende ad un andamento di tipo figurativo, manifestantesi attraverso forme curvilinee ed irregolari¹⁰.

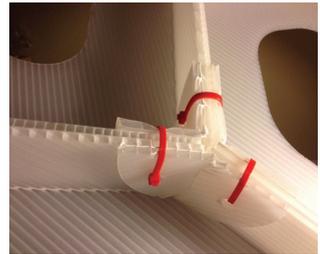
Nel '900, Antoni Gaudí esprime la propria poetica anche attraverso l'uso del mosaico ricoprendo le superfici delle sue opere con pezzi di ceramica variopinta. Nella *Sagrada Família* e nel *Parc Güell* di Barcellona l'architetto catalano propone delle nuove soluzioni decorative applicando l'antica tecnica moresca del mosaico di maiolica, nota come *tracandis*, un particolare taglio dei singoli frammenti ceramici giocato sull'irregolarità. In particolare, i suoi mosaici di Casa Batlló (1904-1906) e di Casa Milà (1906-1912) rivestono forme organiche con tasselli irregolari di ceramica vitrea colorata (fig. 4).

L'uso di tessere dalle dimensioni ridotte consente di ricoprire le superfici senza limitare l'espressività e la continuità delle forme progettate. Il linguaggio musivo trova espressione nelle sperimentazioni di diversi esponenti dell'architettura neo-eclettica italiana, di cui Alessandro Mendini e Lucio Fontana rappresentano alcuni degli esponenti.

Quando la superficie da ricoprire è di grandi dimensioni, ed è pertanto necessario abbassare i tempi ed i costi di riproduzione, è possibile ricorrere alla produzione di mosaici industriali¹¹.

Com'è possibile osservare nell'ambiente che ci circonda, tutte le tessere di un sistema modulare sono solitamente prefabbricate, mentre le cosiddette tessere "di snodo" o "di raccordo" sono invece tagliate a mano secondo delle forme particolari, spesso triangolari, per seguire la curvatura e le irregolarità del supporto da rivestire (figg. 5, 6). Se nell'arte musiva il rapporto con l'industria rappresenta per

molti una limitazione al carattere artistico-artigianale dell'opera, in architettura la messa a sistema di geometria, arte, tecnologia ed industria favorisce lo sviluppo di nuove tecniche di discretizzazione e di nuovi sistemi di produzione che a loro volta favoriscono la sperimentazione di nuovi materiali. Dal punto di vista estetico-formale è inoltre importante che il sistema discreto aderisca il più possibile alla forma originaria dell'oggetto da produrre, favorendo la coerenza tra le intenzioni del progettista ed il manufatto realizzato. In conclusione, la regolarità del *pattern* e la semplicità dei nodi di giunzione tra gli elementi che compongono il sistema rappresentano due presupposti fondamentali per ottimizzare i processi di fabbricazione e di assemblaggio.



Surfaces Paneling: piccola, media e grande scala

“Pannellizzare” una superficie significa trasformare una superficie in un sistema di pannelli, piani, curvi, o di entrambi i tipi. Tale sistema può essere composto da elementi uguali per geometria e dimensione, oppure differenti l'uno dall'altro, generando soluzioni distributive più o meno regolari.

È possibile definire la maggiore o minore “funzionalità” di un *pattern* anche in base alla scala architettonica dell'oggetto da realizzare: è sufficiente pensare che un oggetto destinato alla grande scala, oltre ad essere composto da un numero elevato di elementi, deve essere in grado di rispondere a specifici requisiti strutturali, costruttivi, economici ed estetici.

Di contro, se l'oggetto da realizzare è di piccole dimensioni è evidente che per la sua discretizzazione è possibile sfruttare dei *pattern* non necessariamente regolari in quanto sia il quantitativo di tasselli da fabbricare e da assemblare, sia la funzione a cui l'oggetto è destinato sono sicuramente limitati dal punto di vista delle prestazioni, soprattutto strutturali, rispetto a quanto accade per un oggetto architetto-

Fig. 7/ICD/ITKE. *Research pavilion ICD*, A. Menges, J. Knippers, 2010.

Particolare del sistema di assemblaggio delle strisce.

Fig. 8/*Shellstar pavilion*, 2012, progettato da Andrew Kudless (*Matsys*) + Riyad Joucka (HKU) in collaborazione con Ricci Wong (*Art Lab HK*) e gli studenti del Dipartimento di Architettura delle Chinese University e Hong Kong University. Particolare del nodo (materiale: *translucent Coroplast, nylon*).



Fig. 9/ ICD/ITKE Research Pavilion ICD. Particolare del sistema di assemblaggio dei pannelli.

Fig. 10/ Particolare del sistema di assemblaggio dei pannelli del Cocoon Evo Pavilion, 2013, Co-de. iT-Medaarch (materiale: etalbond). (Foto dell'autore).

Fig. 11/ Particolare di un nodo della struttura di copertura della Fiera di Milano Rho, 2014. Massimiliano Fuksas. (Foto dell'autore).

nico di media e grande scala. Pertanto, il carattere scultoreo di tali oggetti non necessita dello sviluppo di prestazioni strutturali e costruttive avanzate: molto spesso, i sistemi di assemblaggio degli elementi consistono in originali, improvvisate soluzioni "artigianali", generate dalla creatività di *designer* e *makers* (figg. 7-10). Osservando un alto numero di architetture di media e grande scala caratterizzate dalla presenza di facciate, involucri o membrane di forma complessa è stato possibile sollevare le qualità e le criticità dei diversi sistemi di razionalizzazione impiegati, favorendo l'individuazione di specifiche tematiche che necessitano di maggiori approfondimenti e sperimentazioni.

Dal punto di vista metodologico sono stati individuati gli indicatori necessari per la sistematizzazione dei diversi sistemi di *Paneling*: geometria del *pattern*, curvatura dei pannelli, comportamento strutturale del sistema. La sottostruttura rappresenta, infatti, il risultato di un ulteriore, talvolta necessario, processo di discretizzazione della forma, soprattutto nel caso in cui il *pattern* del sistema-involucro e il *pattern* composto dagli elementi strutturali non coincidono. Ai fini dell'ottimizzazione dei sistemi di fabbricazione e montaggio è utile indagare i rapporti di dualità esistenti tra *pattern* differenti.

È stata inoltre indicata la natura del materiale utilizzato per la fabbricazione dei pannelli e la scala architettonica a cui l'intervento si riferisce (media e grande scala architettonica). Dall'osservazione del campione risulta che i pannelli prodotti per la razionalizzazione di superfici complesse sono prevalentemente piani. Inoltre, i *pattern* geometrici maggiormente utilizzati sono quello triangolare, quadrangolare e, in piccolissima percentuale, esagonale: l'uso prevalente dei *pattern* corrispondenti alle tre tassellazioni regolari conferma la ricerca di regolarizzazione e modularità dei sistemi, quindi

di semplificazione della forma. Il *pattern* esagonale, nonostante i numerosi vantaggi di natura costruttiva e geometrica, è ancora molto poco sfruttato. Inoltre, la maggior parte dei sistemi è composta dall'assemblaggio di pannelli in vetro: pertanto, necessita di un'apposita sottostruttura di sostegno. Si è più volte sottolineato che uno degli aspetti che influenza notevolmente il problema del *Paneling* delle superfici complesse risiede nelle modalità attraverso cui la superficie è generata.

Dunque, è necessaria una ricognizione dei principi geometrici necessari per sistematizzare i problemi legati alla pannellizzazione delle superfici complesse, allo scopo di approfondire le conoscenze teoriche necessarie per la ricerca di nuove soluzioni.

La conoscenza dell'intimo rapporto tra la natura delle superfici complesse e gli esiti derivanti dalla distribuzione di tali *pattern* rivela le potenzialità ed i limiti, dunque la sostenibilità, manifestati da una data forma in fase di discretizzazione.

Sistemi portati vs sistemi autoportanti

Nella media e grande scala architettonica, le dimensioni, la funzione, le prestazioni, le condizioni di vincolo e la natura delle superfici influenzano in maniera importante la realizzazione di involucri, facciate e sistemi di copertura curvi. La "gerarchia" esistente tra le diverse parti che compongono il sistema determina la distinzione tra sistemi staticamente dipendenti dall'esistenza di una sottostruttura di sostegno, quindi sistemi portati (figg. 12, 13) e sistemi staticamente indipendenti o autoportanti, in cui i singoli pannelli sono assemblati l'uno all'altro a comporre un sistema stabile ed indipendente (fig. 14). È evidente che data l'assenza di una struttura portante, tali sistemi rappresentano la soluzione economica e costruttiva più vantaggiosa. A causa delle complesse relazioni che legano forma e comportamento strut-

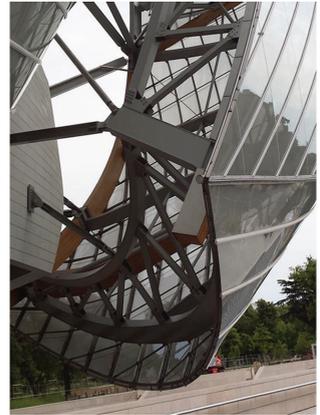


Fig. 12/ La *Fondazione Louis Vuitton*, 2014, Parigi (Francia), progettata da F. O. Gehry. (Foto dell'autore).

Fig. 13/ *Hypocoche* house, Berlino, 1996, progettato da J. Gribl. (Foto dell'autore).

Fig. 14/ *Catalyst Hexshell*, 2012, Minneapolis, Minnesota, progettata da Matsys. Photo courtesy by Matsys. <https://www.matsys.design/>



Figg. 15, 16/ *Vaulted Willow*, Edmonton (Canada). M. Fornes & THE VERY MANY. Fonte: *courtesy* by Inception and Marc Fornes & THEVERYMANY.

Fig. 17/ *Minima | Maxima*, progettata da MARC FORNES / THE VERY MANY. Fonte: *courtesy* by Inception and MARC FORNES / THEVERYMANY.

turale e data la necessità di realizzare comunque membrane utilizzando materiali poco versatili in termini di assemblaggio delle parti questi sistemi sono ancora presenti in minoranza rispetto ai primi e rappresentano il principale obiettivo di sperimentazioni avanzate (figg. 15-17). Le caratteristiche del materiale utilizzato per la fabbricazione dei pannelli, dunque, giocano un ruolo fondamentale nella definizione di tale gerarchia. Per alcuni materiali compositi, come l'*alucobond* o l'*etalbond*, i cartoni, i polimeri (plastiche, gomme sintetiche e fibre tessili, ad esempio il nylon), l'alluminio o il legno, dunque materiali altamente flessibili alla piegatura ed adatti al taglio, è possibile studiare diverse soluzioni per la giunzione o incastro tra i pannelli, senza ricorrere necessariamente alla realizzazione di un'apposita struttura di sostegno. La scelta del materiale è determinante anche per definire la geometria e la natura meccanica della tipologia di nodo da realizzare, a cui sono inevitabilmente legati specifici costi di produzione. Maggiore sarà il numero di elementi uguali, nodi e aste, minori saranno i costi di produzione ed i tempi di montaggio. Sulla base di tali osservazioni è utile indagare i *pattern* corrispondenti alle tre tassellazioni regolari, caratterizzati quindi dalla distribuzione di nodi aventi sempre la stessa valenza.

Sistemi discreti, semidiscreti e continui: *in medio stat virtus?*

La curvatura dei pannelli che compongono una superficie complessa rappresenta un dato fondamentale per la computazione di una soluzione economicamente ed esteticamente sostenibile.

La complessità delle forme architettoniche non rappresenta solo la libera espressione dell'immaginazione, ma è il riflesso dell'evoluzione delle capacità di calcolo, delle tecnologie e dei nuovi materiali. Gli avanzamenti delle ricerche affrontate all'interno di

questo specifico settore mirano a sviluppare un *range* di soluzioni capace di integrare ed ottimizzare le fasi di progettazione, produzione e costruzione, favorendo la sostenibilità dell'intero approccio senza limitare l'espressività di designers e architetti.

Pertanto, è necessario indagare le forme al fine di trovare la migliore soluzione nel rispetto dei vincoli geometrici e progettuali stabiliti.

Dall'osservazione del campione è possibile riscontrare che gli involucri e le facciate curve vengono realizzati soprattutto mediante l'assemblaggio di pannelli piani e che alcune superfici derivano dall'assemblaggio di porzioni di superfici a loro volta complesse, poco convenienti in quanto molto costose da produrre e maggiormente soggette a rottura.

Alcuni casi dimostrano che è possibile realizzare una superficie complessa assemblando porzioni di superfici analitiche. È possibile classificare gli approcci alla progettazione e realizzazione di una superficie *free form* in *contouring* (sistemi non-razionalizzati), pre-razionalizzazione (la geometria della forma favorisce la razionalizzazione), e post-razionalizzazione¹². Il *contouring* (fig.18) è una tecnica che consiste nel sezionare una superficie con un reticolo di piani mutuamente ortogonali: la rete di curve individuata suddivide la forma in un sistema di *patch* a doppia curvatura perfettamente adiacenti l'una all'altra che conservano la continuità originaria restituendo la curvatura del modello originale.

Le curve/sezioni distribuite sulla superficie sono, pertanto, curve piane: per fabbricare gli elementi strutturali è necessario eseguire un *offset* di tali curve. Il *Bubble BMW – Solar Cloud* (1999) di Bernard Franken è un esempio immediato di tale approccio. L'approccio di "pre-razionalizzazione" guida la fase di progettazione della forma attraverso l'individuazione di determinate classi di superfici, dotate di specifiche proprietà geometriche che fornisco-

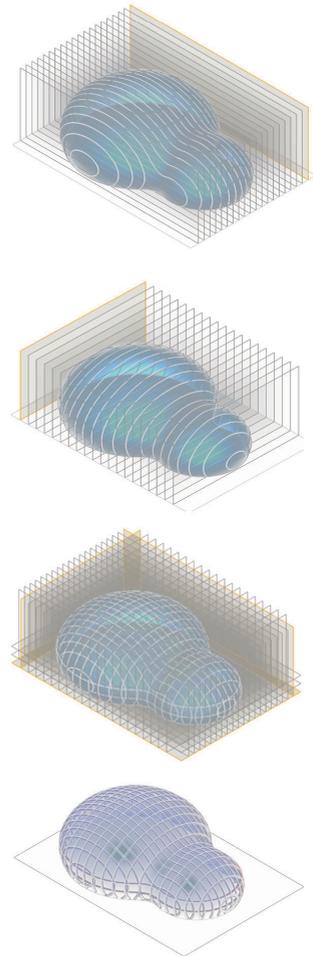


Fig. 18/ La sequenza di figure mostra il *contour* eseguito sul prototipo digitale del *Bubble BMW - Solar Cloud*, 1999, progettato di B. Franken. Esempio di sistema "non razionalizzato". (Elaborazione dell'autore).

12 Shiftner et al. 2012, pp. 216-220.



Figg. 19, 20/ Dettagli della copertura del Dipartimento delle Arti Islamiche inserita all'interno del Museo del Louvre, 2012, Parigi, progettata da M. Bellini e R. Ricciotti. esempio di sistema di post-razionalizzazione. (Foto dell'autore).

no in se stesse una soluzione ottimizzata al problema della discretizzazione e fabbricazione. Il *Fashion and Lace Museum* di Calais (2008), progettato da Moatti & Rivière Architectes, è un esempio di sistema pre-razionalizzato che potremmo definire "ibrido": in questo caso il *contouring* è stato eseguito su una superficie le cui curve di sezione derivano dalla variazione del diametro di tre cerchi distribuiti lungo tutto l'edificio ed individuabili nel profilo della struttura di supporto della facciata (figg. 21, 22).

La messa in opera di tale configurazione necessita della creazione di stampi differenti, tuttavia distribuiti su una superficie caratterizzata da due assi di simmetria¹³. La *Biosfera* di Genova, progettata da Renzo Piano, superficie sferica nota anche come la *Bolla*, è chiaramente una superficie analitica a curvatura gaussiana costante, dunque geometricamente più semplice da gestire. Per l'elevata complessità formale, tuttavia talvolta solo apparente, è sicuramente da citare la poetica e l'attività progettuale di Frank O. Gehry: per generare le sue forme l'architetto si avvale dell'utilizzo di fogli di carta o di diverso materiale. In diversi casi le superfici realizzate derivano dalla scansione di forme modellate a partire dalla semplice piegatura di fogli piani: pertanto, esse consistono in porzioni di superfici sviluppabili¹⁴.

Altre classi di superfici a cui questo secondo sistema di razionalizzazione si riferisce sono le superfici di traslazione, rotazione e rototraslazione.

È possibile citare diverse soluzioni architettoniche le cui superfici, per la maggior parte rappresentate da sistemi di copertura o da facciate realizzate in vetro, sono state generate seguendo tale approccio, tra cui: la cupola di *Rostocker Hof*, a Rostock, le coperture della *West entrance* dell'*Hannover Fair* (figg. 23, 24), la superficie vetrata realizzata a copertura della piattaforma della nuova stazione ferroviaria di Lehrter, a Berlino, il complesso sistema

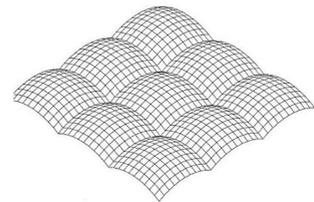
13 Baldassini 2009, p. 717.

14 Pottman 2012, pp. 534-535.

di copertura di un cortile della *former Bosch Area* a Stoccarda. Le opere citate sono state realizzate in Germania da Schlaich Bergermann & Partners¹⁵. Un altro caso realizzato seguendo tale approccio è l'*Hippopotamus house* dello zoo di Berlino, progettato da J. Gribl. Le superfici scelte per la realizzazione degli involucri e delle facciate di queste opere consentono di razionalizzare le forme generate utilizzando pannelli quadrangolari piani, condizione geometrica non di facile realizzazione (fig. 13).

I sistemi discreti ed i sistemi semidiscreti rappresentano il prodotto di un approccio di post-razionalizzazione: entrambe le tipologie sono oggetto di molteplici ed interessanti ricerche sviluppate nell'arco degli ultimi venti anni. La triangolazione rappresenta la tecnica più semplice di post-razionalizzazione, in quanto non esistono limitazioni di natura geometrica all'individuazione di un piano passante per tre punti comunque distribuiti nello spazio, indipendentemente dalla curvatura della superficie da discretizzare ed alla quale i punti stessi appartengono. Un inconveniente di tale sistema è legato alla complessità geometrica dei nodi ed alla non "offsettabilità" del sistema discreto ottenuto, impedendo la realizzazione di sistemi multistrato. È comunque possibile ottimizzare i risultati derivanti da tale tecnica gestendo la regolarità distributiva, la dimensione, la forma, la ripetizione, l'allineamento e la qualità visiva della triangolazione ottenuta. L'aspetto sfaccettato di questi sistemi è garante di una maggiore fattibilità economica ma, talvolta, può penalizzare la resa estetica ed espressiva delle superfici.

Come anticipato, uno degli avanzamenti più interessanti nel campo del *Paneling* di superfici architettoniche di media e grande scala è rappresentato dalla possibilità di trasformare le superfici continue in geometrie non-sfaccettate in quanto derivanti dall'assemblaggio di porzioni di superfici a singo-



Figg. 21, 22/ Vista d'insieme e dettaglio della Facciata del *Fashion and Lace Museum* di Calais, 2008 progettato da Moatti e Riviere architects. Esempio di approccio di pre-razionalizzazione. Fonte: Glimph 2004.

Figg. 23, 24/ Sistema di copertura della *West Entrance, Hannover Fair*. esempio di approccio di pre-razionalizzazione. Fonte: Glimph 2004.

15 Glimph et al. 2004, pp.194-199.

la curvatura, realizzando dei “modelli semidiscreti”, cioè “una via di mezzo” tra i sistemi discreti, cioè composti da pannelli piani, ed i sistemi composti da pannelli a doppia curvatura. Pertanto, in continuità con le riflessioni effettuate, è interessante avanzare il seguente quesito: i pannelli a singola curvatura ed i modelli semidiscreti rappresentano la soluzione in grado di garantire la sostenibilità costruttiva, economica ed estetica del processo di realizzazione di superfici architettoniche di forma complessa? Esistono approcci in grado di veicolare la natura geometrica delle parti coinvolte in un sistema?

Questa trattazione è stata sviluppata per fornire una risposta a questi quesiti, indagando le differenti tecniche di *Digital Fabrication*, i principi geometrici e mettendo a sistema le informazioni ricavate.

I materiali e le tecniche di fabbricazione

Per fornire delle risposte innovative al problema della razionalizzazione e fabbricazione delle superfici complesse è necessario articolare le indagini su più fronti: non si può prescindere dalla conoscenza delle tecnologie e dei materiali che favoriscono l’ottimizzazione e l’industrializzazione del processo. Ogni singolo aspetto costruttivo coinvolto deve essere contestualizzato all’interno di un quadro di riferimento complessivo. La fase di fabbricazione coinvolge, infatti, tanto la produzione dei pannelli, piani o curvi, tanto quella degli elementi che compongono il sistema strutturale. È stato più volte sottolineato quanto oggi si assista ad un rinnovato rapporto tra le potenzialità dell’industria, le costruzioni ed il progetto di architettura, oltre che alla stretta relazione tra ricerca della forma ed innovazione tecnologica favorita dall’evoluzione degli strumenti informatici e dal trasferimento di materiali e di semilavorati da settori avanzati. Le attuali tecniche di *Digital Fabrication* testimoniano il nuovo legame tra architettura, *design* industriale e fabbricazione ma, come

anticipato, richiedono l'approfondimento delle conoscenze e lo sviluppo di nuove competenze da parte dei progettisti. A supporto di tale esigenza, i prototipi, da sempre, rappresentano il luogo virtuale attraverso cui definire le operazioni geometriche necessarie a garantire la massima semplificazione costruttiva.

«Qualsiasi tentativo di costruzione teorica nel nostro ambito deve, fin dall'inizio, assumere un ruolo ausiliario, una condizione secondaria subordinata alle opere [...] È come la centina che rende possibile la costruzione dell'arco: una volta compiuta la sua missione, scompare e non rientra nella percezione che abbiamo dell'opera finita, ma sappiamo che è stato un passaggio obbligato e imprescindibile, un elemento necessario a erigere quello che ora vediamo e ammiriamo».¹⁶ Nei secoli passati, come oggi, lo scopo della ricerca diviene, talvolta, quello di ribaltare l'oggetto dell'attività progettuale dall'opera agli "stampi" necessari per realizzarne le singole parti.

La progettazione e produzione della cassaforma/stampo è da sempre una delle fasi più importanti per la realizzazione di un manufatto. Il cassero rappresenta, infatti, l'impronta in negativo necessaria ad imprimere nella materia una forma così come ideata in fase progettuale (fig. 25). La centina, ad opera ultimata non più presente o visibile, rappresenta un'impronta talvolta riconoscibile nella distribuzione degli elementi fabbricati.

Tra i numerosi esempi di ottimizzazione geometrica, la regola dei tre archi di Villard De Honnecourt (fig. 26) ha consentito di ricavare tre tipi di archi diversi aprendo il compasso una sola volta: dall'impostazione di un unico raggio costante deriva la curvatura della centina telescopica (fig. 26), ma soprattutto l'organizzazione del cantiere e del montaggio di elementi tutti uguali tra loro e derivanti da un'unica impronta geometrica ricorrente. Nel passaggio dalla tradizione all'innovazione, agendo sulle superfici

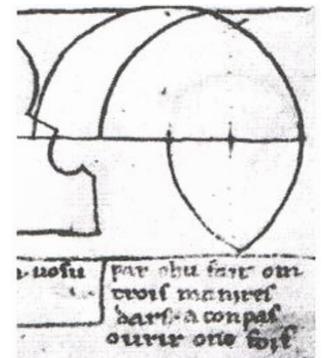
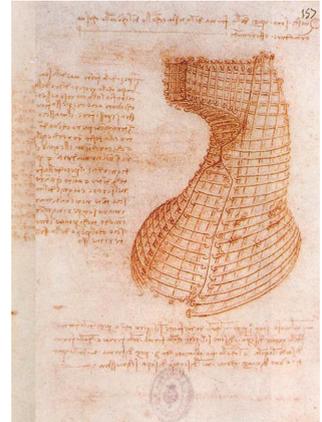


Fig. 25/ Disegno di progetto per lo stampo della testa del cavallo del monumento equestre dedicato a Francesco Sforza di Leonardo da Vinci. Fonte: Wikipedia.

Fig. 26/ La Regola dei tre archi dal *Livre de Portraiture* (1230) di Villard de Honnecourt.

Fig. 27/ La centina telescopica dal *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle* (1854-1866) E. Viollet Le Duc.

16 Aris 2007.

Shaping & Paneling



Fig. 28/ *Structural Oscillations*, Gramazio Kohler Research, ETH Zurich. Fonte: Wikimedia commons. Autore: *Architecture and Digital Fabrication, ETH Zurich*.

Fig. 29/ *Experience Music (EMP)*, Seattle, progettato da Frank O Gehry. Fonte: Wikimedia commons.

Fig. 30/ Dettaglio del *Selfridges Building*, Birmingham, progettato da Future Systems. Fonte: Wikimedia commons.

Fig. 31/ *Chanel Mobile Art exhibition building*, progettato da Zaha Hadid. Fonte: Wikimedia commons.

17 H. M. N. Afify, Z. A. ABD Elghaffar 2007, pp.76-77.

18 Paoletti 2006, p. 198.

mediante specifiche operazioni geometriche è possibile ricavare le tracce/profilo attraverso cui viene discretizzata la forma iniziale. Le superfici vengono realizzate fisicamente ricucendo materialmente le singole porzioni o *patch* definite mediante il *Paneling* del prototipo digitale. Tale operazione consente l'estrazione delle tracce degli elementi da fabbricare e da assemblare: lo scopo è quello di distribuire elementi ripetibili la cui fabbricazione è dunque più economica. Le tecniche impiegate per la produzione degli elementi operano per sottrazione, per addizione o tramite deformazione del materiale. La superficie, per essere realizzata, necessita di essere discretizzata, cioè "razionalizzata": tale operazione è tanto più necessaria quanto è più complessa la forma dell'oggetto da realizzare.

Tra i materiali sperimentati per la realizzazione di forme complesse troviamo il vetro, la vetroresina, i metalli, le schiume di titanio, le resine, i conglomerati, l'ETFE, il legno, il cartone, i polimeri, la gomma, la plastica, le membrane in PVC, diversi materiali riciclati ed i materiali compositi¹⁷. Mediante l'uso di tali materiali è possibile fabbricare pannelli piani e curvi. Altro riferimento materico interessante è rappresentato dall'uso innovativo del mattone, come nel caso del museo *MARTa* di Herford, progettato da Frank O. Gehry e dagli innumerevoli esperimenti condotti sul tema da Gramazio & Kohler (fig. 28), oppure dalla realizzazione di involucri matericamente compositi, come l'involucro realizzato in cemento e dischi di alluminio del *Selfridges Building* di Birmingham (fig. 30), progettato da Future Systems¹⁸. Altro esempio di sistema composito dal punto di vista della scelta dei materiali è il *Centre Culturel et Touristique du Vin* di Bordeaux, progettato da X-TU Architects, che presenta una facciata di 9.000 mq realizzata assemblando pannelli di metallo e di vetro piani e a singola curvatura. Un'indagine condotta sulle tecni-

che impiegate per la fabbricazione di pannelli curvi dimostra che la produzione di elementi a singola curvatura rappresenta la soluzione sicuramente più conveniente da ogni punto di vista. Ad esempio, le superfici complesse della *Walt Disney Concert Hall*, sono composte da pannelli metallici piani e a singola curvatura la cui forma è stata raggiunta attraverso un processo di conversione delle porzioni di superfici a doppia curvatura in superfici sviluppabili, mentre nell'*Experience Music (EMP)* di Seattle (fig. 29), le lastre metalliche che compongono la superficie sono state piegate a freddo ed in loco, ottimizzando al massimo la fase realizzativa dell'opera. I pannelli a doppia curvatura dello *Chanel Mobile Art exhibition building* (fig. 31) progettato da Zaha Hadid, sono stati fabbricati utilizzando un materiale plastico rinforzato (FRP) più economico e facile da manipolare rispetto ai pannelli di lamiera: la scelta di tale materiale deriva dal carattere temporaneo della struttura, richiamata ad offrire delle prestazioni sicuramente più limitate rispetto a quelle avanzate per una struttura permanente¹⁹. L'utilizzo di tecnologie CNC (*Computer Numeric Control*) consente di produrre direttamente dal modello digitale il prototipo o il componente edilizio, bypassando la produzione di disegni esecutivi, e proponendo un approccio *file-to-factory*. In fase di assemblaggio i disegni esecutivi possono essere omessi: i dati necessari per il montaggio del sistema sono riportati direttamente sugli elementi che lo compongono oppure vengono comunicati a robot e bracci meccanici appositamente programmati per manovrare ed assemblare i pezzi. Nell'ambito dei processi rivolti all'ottimizzazione dei processi *file-to-factory* è importante considerare l'operazione di *nesting*. La funzione *nesting*, termine inglese il cui significato è "annidamento", o "nidificazione", consente di ottimizzare la fase di taglio degli elementi da assemblare²⁰.

19 L. Ghang, K. Seonwoo 2012.

20 Garzantilinguistica.it



Fig. 32/Tecnologia CNC: *milling cutter*.

Fig. 33/Esempio di *nesting*. I pezzi sono distribuiti in maniera ottimizzata sul pannello di materiale da sottoporre a taglio. (Foto dell'autore).

Tale processo, derivante dall'industria tessile e dell'acciaio, è adottato in diversi settori, tra cui la scultura, il design, la moda, il settore navale, etc.

In particolare, questo studio focalizza l'attenzione sul tema del *nesting* di elementi bidimensionali. Avvalendosi di appositi algoritmi, tale procedura consiste nell'ottimizzare la distribuzione dei singoli pezzi piani all'interno del formato del pannello di materiale da sottoporre a taglio. Eseguito il *nesting* dei pezzi, per procedere al taglio è necessario convertire la geometria e la posizione degli elementi, virtualmente distribuiti sul supporto di materiale, in linguaggio macchina²¹. Le tecniche di *Digital Fabrication* possono essere classificate in base al tipo di processo, di macchine e di materiali impiegati: è possibile distinguere i processi *Bi-Dimensional Cutting*, le tecniche sottrattive e le tecniche additive²².

I processi *Bi-Dimensional Cutting* sono basati sul taglio di fogli bidimensionali di materiale (tra cui alluminio, acciaio, legno, compensato o acrilico) e consentono di produrre automaticamente pannelli piani di diversa forma. Il computer controlla il movimento delle macchine, che si dividono tra fresatrici (*milling cutter*) (figg. 32, 33), torni e macchine per il taglio laser (*laser cutter*) o a getto d'acqua, dette anche *water jet*.

Le tecniche sottrattive generano gli oggetti rimuovendo materiale da un blocco di partenza. Le macchine impiegate per queste tecniche producono gli stessi risultati raggiungibili con le tecniche *Bi-Dimensional Cutting*, con l'ulteriore vantaggio di specificare la profondità del taglio. I blocchi scolpiti per ricavare la geometria modellata possono essere realizzati utilizzando diversi materiali. Utilizzando una fresatrice a tre assi non è possibile riprodurre qualsiasi geometria: dunque, per fabbricare oggetti di maggiore complessità è necessario il ricorso a fresatrici a cinque o a sei assi²³. Tra le tecniche additive, la Prototipazione rapida, *Rapid Prototyping* (RP),

21 Dietrichs.com/ft/applicazioniiprodotti

22 Tedeschi 2014, pp. 309-319.

23 Tedeschi 2014, p. 315.

rappresenta un processo attraverso cui il materiale viene depositato in strati successivi fino a ricomporre l'oggetto tridimensionale. Tale tecnica ritorna utile per la produzione di stampi necessari per la fabbricazione di elementi curvi, in particolare per la realizzazione "a caldo" di pezzi a doppia curvatura. A differenza delle tecniche tradizionali di lavorazione meccanica per sottrazione, le tecniche additive RP operano per addizione di materiale, con la possibilità di ottenere forme anche molto complesse, impossibili da realizzare con le lavorazioni tradizionali, semplicemente aggiungendo materiale strato per strato, dunque mediante un processo di *layered manufacturing* (fabbricazione stratificata). Gli strati sovrapposti di materiale rappresentano le sezioni successive ricavate eseguendo lo *slicing* del modello digitale. Lo *slicing* consiste nella suddivisione del modello matematico in strati sovrapposti perpendicolarmente rispetto alla giacitura del piatto su cui è posizionato l'oggetto all'interno del volume di stampa della macchina. I differenti spessori degli strati che compongono lo *slicing* determinano differenti risultati: più sottili sono i *layers*, maggiori saranno i tempi di produzione. Lo *slicing* viene convertito in un formato leggibile dalla stampante 3D. Il formato di stampa 3D più comunemente usato è lo *Standard Triangulation Language* (STL). Il formato STL "triangolo" il modello digitale e comunica le coordinate dei vertici di ciascuno degli elementi seguendo la "regola della mano destra", quindi in base all'orientamento delle facce; maggiore è il numero dei tasselli triangolari che discretizzano la superficie, maggiore sarà la *smoothness* del modello prototipato. Il formato dei *files* di *output* può essere di tipo ASCII o *Binary*. La prototipazione procede con la deposizione del materiale, strato per strato, fino a realizzare l'oggetto finale. Infine è necessario prelevare l'oggetto stampato dalla macchina e liberarlo dal

supporto o dal materiale in eccesso, eventualmente operando ulteriori finiture. La classificazione delle tecniche RP può quindi essere basata sulla natura dei materiali impiegati, in particolare polveri, liquidi e solidi²⁴. Per la fabbricazione di pannelli curvi è possibile distinguere tra tecniche *hot bending* (piegatura a caldo) e *cold bending* (piegatura a freddo).

Nel primo caso è necessario considerare anche gli eventuali costi aggiuntivi per la produzione degli stampi²⁵. Il costo necessario per produrre uno stampo è più elevato del costo necessario per fabbricare un pannello curvo: pertanto, risulta particolarmente conveniente mirare all'impiego di tecniche che consentano il riutilizzo di uno stampo per creare un numero elevato di pannelli²⁶. Gli stampi possono essere suddivisi in tre tipologie differenti: stampi statici, di cui il tipo più comune è realizzato in EPS/PS (polistirene), prototipato utilizzando una cutter CNC (questa tecnica ha una elevata precisione, ma produce molto materiale di scarto); stampi in argilla o sabbia, dai quali deriva una bassa quantità di materiale di scarto, ma che non possono essere utilizzati per qualsiasi materiale; stampi flessibili, riutilizzabili per la produzione di elementi con curvatura variabile e in diverso materiale²⁷. L'utilizzo di macchine automatiche a controllo numerico consente di raggiungere degli standard qualitativi molto elevati con tolleranze di elevatissima precisione. Per la formatura dei fogli di metallo esistono diverse tecniche, classificate in relazione alla curvatura del pannello da produrre²⁸. Per razionalizzare una superficie complessa, indipendentemente dal materiale scelto e per ragioni legate alla curvatura gaussiana delle superfici, i pannelli cilindrici, dunque a singola curvatura, sono tecnologicamente ed economicamente preferibili. Di contro, i problemi matematico-geometrici legati all'ottimizzazione del *Paneling* di superfici a doppia curvatura mediante distribuzione di elementi a sin-

24 Tedeschi 2014, p. 316.

25 Tonelli 2012, p. 4.

26 Eigensatz, Schiffner 2012.

27 Pronk et al. 2009.

28 L. Ghang, K. Seonwoo 2012, p. 1328.

gola curvatura non può essere risolto da qualsiasi *software* ad oggi disponibile in commercio.

Tuttavia, soprattutto nel caso di superfici vetrate, la fabbricazione di pannelli a doppia curvatura è preferibilmente da escludere per ragioni di fattibilità economica e di resistenza dei pannelli prodotti. I *software* appositamente sviluppati permettono di verificare e di ridurre al minimo il rischio di rottura degli elementi derivante dalla deformazione del materiale ed i relativi costi complessivi di produzione rispettando il più possibile la morfologia delle superfici progettate.

Attraverso la tecnica *hot bending* la lastra piana di vetro viene posta su uno stampo, a sua volta prodotto seguendo il raggio di curvatura desiderato, e viene surriscaldata ad una temperatura di circa 650°C²⁵. A questa temperatura il vetro raggiunge uno stato visco-plastico, perde la sua rigidità e può essere modellato per gravità o per pressione meccanica secondo la geometria computata. Quindi, alla fase di piegatura segue la fase di raffreddamento. Dopo essere stati piegati, i pannelli possono essere laminati e assemblati. Attualmente le ricerche sul campo mirano ad ampliare i limiti di produzione in termini di controllo geometrico degli elementi (raggio, spessore) per offrire ad architetti e *designer* la possibilità di realizzare pannelli curvi di dimensioni maggiori²⁶. A differenza dalle superfici sviluppabili, più semplici da produrre, per realizzare una forma sferica o a doppia curvatura variabile sono necessarie altissime temperature, ed i risultati non sempre sono attendibili. La tecnica *hot bending* rappresenta la soluzione tradizionale da applicare nei casi in cui l'elemento presenti una curvatura elevata²⁷. Le piegatrici di ultima generazione, le *glass bending machines*, fabbricano pannelli in vetro temperato piegati a caldo, evitando la molteplice produzione di stampi volta per volta appositamente creati: l'uso di queste macchine è, dunque, chiaramente molto conveniente²⁸.

25 Cilento 2011.

26 *Ibidem*.

27 *Ibidem*.

28 Vaudeville 2012, p. 284.

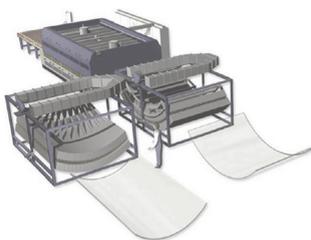
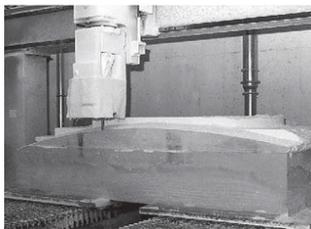


Fig. 34/ Stampo in polistirolo per la fabbricazione dei pannelli in policarbonato di "The Bubble", BMW Pavilion, Francoforte, 1999 progettato da Bernhard Franken. Fonte: Castaneda 2015.

Fig. 35/ Pannelli in vetro a doppia curvatura su relativi stampi in poliuretano (Tecnica di fabbricazione *hot-bending*). Fonte: Biondi 2006.

Fig. 36/ *Glass bending machine*.

Il raggio di curvatura del pannello è automaticamente comunicato alla macchina e consente di ottenere una variazione della geometria dei pannelli da produrre a costi contenuti²⁹. Un'altra caratteristica di queste macchine è che il pannello può essere introdotto in posizione inclinata rispetto all'asse della macchina, variando così la direzione di curvatura rispetto ai bordi laterali³⁰. La tecnologia *cold-bending* (piegatura a freddo), è più recente rispetto alle tecniche *hot-bending*³¹ (figg. 34, 35). I pannelli in vetro, in origine piani, vengono trasformati per assecondare la geometria progettata mediante una pressione esercitata sulla lastra piana, a sua volta posizionata su uno stampo o su una guida. È infatti possibile distinguere due tecniche: il vetro può essere lavorato in fabbrica (fig. 36) oppure in cantiere, curvando e fissando la lastra piana sugli elementi che compongono la struttura o la sottostruttura del sistema³². In conclusione, la tecnica di piegatura a freddo del vetro sfrutta la deformazione elastica delle lastre senza ricorrere al riscaldamento e alla plastificazione del materiale. In un pannello laminato la curvatura viene mantenuta dall'azione del materiale interstrato (PVB). Tuttavia, dopo che il pannello curvato viene rimosso dallo stampo, la curvatura inizialmente acquisita inizia gradualmente a ridursi a causa del ritorno elastico del materiale. Il comportamento a lungo termine del prodotto è principalmente legato alle proprietà visco-elastiche del materiale utilizzato per la fabbricazione delle lastre. Le attuali ricerche e tecniche di verifica sfruttano la fotogrammetria digitale per rilevare il ritorno elastico dei pannelli curvati a freddo³³. Le tecniche di piegatura a freddo rappresentano, dunque, la soluzione migliore per la fabbricazione di pannelli a singola curvatura. Esse offrono l'ulteriore vantaggio di evitare la distorsione ottica delle superfici, una conseguenza tipica delle tecniche di produzione dei pannelli piegati a caldo³⁴.

29 Leduc et al. 2012, p. 96.

30 *Ibidem*.

31 Cilento 2011.

32 *Ibidem*.

33 *Ibidem*.

34 Fildhuth et al. 2014.

In generale, per la produzione di pannelli curvi, entrambe le tecniche presentano degli svantaggi: i processi di piegatura a caldo sono più costosi e più difficili da controllare in fase di fabbricazione, mentre le tecniche di piegatura a freddo sono più convenienti ma necessitano di un maggiore controllo geometrico necessario per l'estrazione o la computazione di strisce sviluppabili a partire da una superficie *free form*. Uno dei limiti principali di queste tecnologie innovative è che, attualmente, esse sono solo in grado di fabbricare cilindri circolari. Inoltre è inevitabile che si verifichino discontinuità di posizione, di tangenza e di curvatura tra pannelli adiacenti³⁵. Tali limitazioni, al momento, sono controllate attraverso la computazione di *Paneling solutions* che prevedono la distribuzione di pannelli cilindrici dalla dimensione limitata, la quale dipende dall'angolo individuato tra le generatrici della superficie ed i bordi del pannello. La minimizzazione della divergenza esistente tra due pannelli curvi adiacenti rappresenta una sfida importante dal punto di vista architettonico e tecnico, e coinvolge la qualità di fissaggio dei pannelli e l'impermeabilità del sistema³⁶.

Un altro metodo per produrre pannelli curvi è fabbricare strisce sviluppabili di materiale, tecnica che risulta particolarmente utile nei settori della nautica, dell'aeronautica e dell'automobilistica. Le piastre realizzate in acciaio per gli scafi delle navi, ad esempio, sono sempre prodotte seguendo due possibili processi: *rolling*, o piegatura a freddo, e *hot-bending* o piegatura a caldo. Il taglio e la piegatura di strisce risulta particolarmente semplice se la laminazione del materiale è costante. Il posizionamento delle fibre del materiale è un tema molto importante nel campo della produzione di materiali compositi³⁷. Inoltre, se il materiale scelto per fabbricare le strisce ha una buona flessibilità "a freddo", come ad esempio il metallo, il legno o i tessuti, il *Paneling*

35 N. Leduc et al. 2012, p.98.

36 *Ibidem*.

37 Pottmann 2008, pp. 9-10.

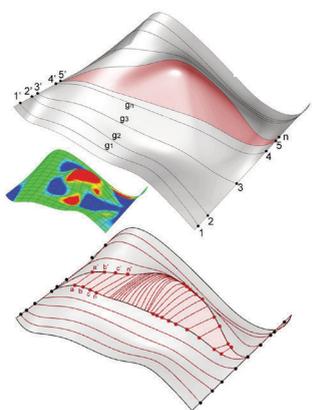


Fig. 37/ La facciata della *Maison Folie*, Lille (Francia), 2004, progettata dai *Nox Architect*. Fonte:Wikimedia commons. Autor: Karldupart.

Fig. 38/ Estrazione di geodetiche da una superficie complessa e *flattening* delle strisce. In corrispondenza dell'area a curvatura positiva è necessario estrarre le geodetiche in direzione opposta rispetto alle aree a curvatura negativa o nulla. (Elaborazione dell'autore).

della superficie mediante l'assemblaggio di strisce sviluppabili rappresenta una soluzione ancora più vantaggiosa dal punto di vista economico.

Per discretizzare una forma complessa mediante la fabbricazione, curvatura a freddo e assemblaggio di strisce piane di materiale è importante segnalare l'utilizzo delle curve geodetiche delle superfici (fig. 38). Le curve geodetiche rappresentano, da sempre, un mezzo per risolvere problematiche inerenti la progettazione e la costruzione architettonica³⁸.

Data una superficie, una curva ad essa appartenente è un curva geodetica se le sue normali coincidono con le normali alla superficie negli stessi punti attraverso cui la curva passa. Nella sfera, infatti, tutti i meridiani e l'equatore sono curve geodetiche della superficie, in quanto solo per queste circonferenze il raggio è costante, e quindi i cerchi osculatori e le normali delle curve e della superficie coincidono.

I piani individuati dalle normali saranno pertanto perpendicolari alla porzione di superficie racchiusa dalle curve geodetiche. Ne consegue che ogni striscia avrà i bordi che presenteranno curvatura uguale e opposta, cioè speculare, rispetto ai bordi delle strisce adiacenti. Dunque, lo sviluppo piano di queste strisce produce curve di bordo opposte e congruenti. La letteratura esistente presenta diversi approcci algoritmici per la computazione di modelli semidiscreti mediante l'utilizzo di questa specifica tipologie di curva³⁹. Pertanto, sulla base degli studi condotti e delle riflessioni sviluppate, risulta che la realizzazione di superfici complesse mediante la computazione di sistemi discreti genera dei risultati che inevitabilmente approssimano la "fluidità" delle forme originarie, la cui resa espressiva ed estetica spesso non soddisfa le esigenze dei progettisti e dei committenti. Questo pone l'accento sulla necessità di approfondire le ricerche rivolte alla computazione dei sistemi di razionalizzazione di forme complesse. Nell'ambito dei sistemi

38 Baglioni 2009, p. 299.

39 Capone, Lanzara 2019; Tang 2005; Stein 2018.

composti da pannelli piani le ricerche sono orientate allo studio di sistemi preferibilmente autoportanti che mirano alla sperimentazione di *pattern* diversi da quello triangolare optando, dunque, per l'uso di *pattern* quadrangolari ed esagonali. I casi studio e le sperimentazioni trattati all'interno dei capitoli successivi offrono numerosi spunti per cercare delle possibili risposte al problema. Dagli studi effettuati risulta, inoltre, che la fabbricazione di porzioni di superfici a doppia curvatura si rivela un approccio economicamente poco conveniente, generando spesso problematiche emergenti sia in fase di costruzione che in fase di esercizio. Un esempio emblematico è rappresentato dall'ingresso della *Gare Saint Lazare* di Arte Charpentier Architectes, a Parigi, nota come la *lentille*. Completata nel 2003, è un involucro realizzato mediante l'assemblaggio di pannelli in vetro a doppia curvatura, sagomati e piegati a caldo su stampi in acciaio⁴⁰. Parte dei pannelli è stata oggetto di rottura (figg. 39-41). Dal confronto dei casi indagati si può, quindi, dedurre che la computazione e fabbricazione di pannelli a singola curvatura rappresenta certamente la soluzione migliore per realizzare una superficie complessa mediante la distribuzione di pannelli curvi, garantendo una configurazione più coerente con le intenzioni progettuali e minimizzando i costi ed i rischi del processo. Dunque, è possibile affermare che i casi più innovativi ed interessanti sono quelli in cui il passaggio dal continuo al discreto avviene computando soluzioni "ibride". Si è quindi ritenuto opportuno descrivere più approfonditamente alcuni tra gli esempi architettonici di post-razionalizzazione più emblematici realizzate mediante l'assemblaggio di pannelli a singola curvatura o misti, in vetro o metallici. L'ordine di successione delle opere è dettato dall'anno di realizzazione e dalla crescente qualità di ottimizzazione delle soluzioni computate.



Fig. 39-41/ Dettagli della stazione *Saint Lazare* (*la lentille*), 2003, Parigi (Francia), progettata da ARTE Charpentier architectes Parigi, (Francia). In foto sono visibili i pannelli in vetro soggetti a rottura. (Foto dell'autore).

40 Baldassini 2009, p. 967.



Fig. 42/ *Ponte della pace*, 2011, Tbilisi (Georgia), progettato da Michele De Lucchi. Fonte: Wikimedia commons.

Fig. 43/ *Dongdaemun Design Park (DDP) building*, 2014, Seoul (Corea), progettato da Zaha Hadid e Patrik Schumacher. Fonte: Wikimedia commons.

Fig. 44/ *Arena Corinthians de Sao Paulo* (Brasile), 2014. Fonte: Wikimedia commons.

Il *Ponte della pace* (2011) progettato da Michele De Lucchi a Tbilisi, in Georgia, è una superficie a doppia curvatura in vetro di circa 2000 mq ed è composta da 512 pannelli di dimensioni massime di 2500 x 2100 mm. Ciascun pannello è in vetro stratificato: la lastra all'estradosso, temprata, ha spessore 15 mm, mentre quella all'intradosso ha spessore 12 mm.

I pannelli, giunti in cantiere piani, sono stati ancorati alla sottostruttura mediante quattro *clamps* (morsetti) discoidali disposti lungo due dei quattro bordi laterali dell'elemento e curvati in fase di montaggio. In fase di progettazione è stato necessario verificare le tensioni locali a cui le lastre sarebbero state sottoposte durante il fissaggio e che avrebbero potuto causarne la rottura. Compilate le principali attività di cantiere, il ponte è stato collegato alle fondazioni e collaudato. Tutta la costruzione è stata completata in 239 giorni⁴¹ (fig. 42).

Per il *Dongdaemun Design Park (DDP) building*, progettato nel 2014 da Zaha Hadid e Patrik Schumacher a Seoul (Corea), Ghang Lee e Seonwoo Kim hanno studiato un metodo *ad hoc* per la fabbricazione dei pannelli curvi in alluminio che rivestono l'edificio (fig. 43). La superficie da realizzare è notevolmente superiore a quella di altre costruzioni di forma complessa ed i ricercatori hanno impiegato tre anni per sviluppare una tecnica per la lavorazione a doppia curvatura della lamiera che prevedesse costi accessibili in termini di tempo ed economici. Dei 45.000 pannelli complessivi, il 48,2% è a doppia curvatura, il 21,2% è a singola curvatura ed il 30,7% sono piani: dunque i pannelli a doppia curvatura coprono quasi la metà della superficie totale⁴². Date le dimensioni dei pannelli da produrre, i metodi tradizionali utilizzati per la formatura delle lamiere mostravano diverse limitazioni per il raggiungimento dello scopo.

Per la fabbricazione dei pannelli sono state messe a punto diverse macchine e numerosi prototipi: il team incaricato ha sviluppato con successo un apposito me-

41 Colleoni 2011.

42 Ghang 2012.

todo innovativo per la formatura dei pannelli a doppia curvatura, il *multipoint stretch forming* (MPSF)⁴³ (figg. 45, 46). Questa tecnica, sfruttando il movimento automatizzato di un “campo” di perni regolabili in altezza, consente di deformare pannelli piani di lamiera di grandi dimensioni⁴⁴.

I perni rappresentano i punti che discretizzano la superficie curva: la loro posizione viene comunicata al sistema tramite il computer. Il metodo ha consentito di ridurre notevolmente i costi ed i tempi di fabbricazione. Tuttavia è stato comunque necessario integrare diverse tecniche di fabbricazione per completare il risultato⁴⁵.

La facciata ovest dell'*Arena Corinthians* de Sao Paulo, in Brasile (2014), è una superficie a doppia curvatura di 5400 mq, realizzata con pannelli in vetro prevalentemente di forma cilindrica (fig. 44).

In una prima fase, la superficie è stata suddivisa in 855 pannelli a doppia curvatura. La sfida era quella di seguire esattamente il progetto formale dell'architetto minimizzando i costi. La soluzione adottata è stata quella di optare per un uso predominante di pannelli a singola curvatura. Dei pannelli realizzati, l'84% sono cilindrici, il 10% sono piani e solo il 6% sono a doppia curvatura: questa distribuzione ha permesso di rispettare quanto più possibile la forma originaria della superficie. In conclusione, il 94% dei pannelli è stato prodotto utilizzando un processo industriale automatizzato, capace di ridurre i costi complessivi, consentendo il riutilizzo degli stampi⁴⁶.

Le superfici-involucro realizzate per la *Fondazione Louis Vuitton* (2014), progettate da Frank O. Gehry nel Bois de Boulogne di Parigi, rappresentano un esempio tecnologicamente molto avanzato, in cui «le geometrie tradizionali hanno una chiara ragion d'essere»⁴⁷ (fig. 47). L'ambiziosa struttura contiene delle gallerie d'arte, un auditorium e degli spazi di intrattenimento. L'involucro, un sistema portato, nasce dalla combinazione

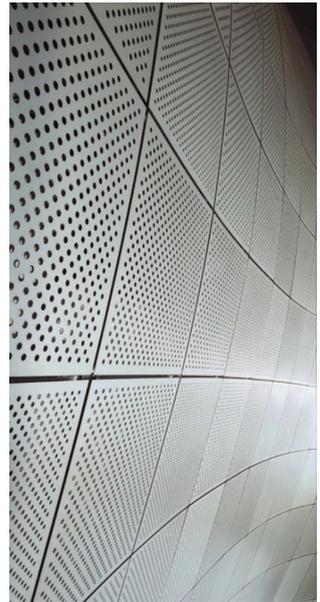


Fig. 45/ *Multipoint stretch forming machine*. Fonte: Castaneda 2015. Autore: SteelLife.

Fig. 46/ Particolare dell'involucro del *Dongdaemun Design Park (DDP) building*, 2014, Seoul (Corea), progettato da Zaha Hadid e Patrik Schumacher. Fonte: Wikimedia commons.

43 Cai et al. 2009, pp. 396-407.

44 *Ibidem*.

45 Ghang 2012.

46 Schiftner 2013, p. 523.

47 Vaudeville 2012, pp. 279-294.



Figg. 47, 48/ Vista d'insieme e particolari della Fondazione Louis Vuitton, 2014, Parigi (Francia). Il sistema è composta da una struttura portante e da una struttura secondaria in legno lamellare e acciaio per l'ancoraggio dell'involucro. (Foto dell'autore).

48 *Ibidem.*

49 *Ibidem.*

50 *Ibidem.*

51 *Ibidem.*

di elementi solidi (*iceberg*) intervallati da facciate vetrate (vele) le cui dimensioni variano da 500 a 3000 mq, per una superficie totale di circa 13400 mq⁴⁸. La struttura secondaria porta il carico dell'involucro ed è realizzata in legno lamellare, materiale scelto per contrastare l'importante presenza del vetro e dell'acciaio inossidabile della sottostruttura che regge i pannelli che compongono le vele (fig. 48). Il modello in scala ridotta, le cui superfici sono state realizzate in *plexiglass* mostra che ogni vela è composta dall'intersezione di due superfici sviluppabili: osservando attentamente il modello è possibile apprezzare la divergenza tra le due porzioni di superfici curve. Il prototipo è stato successivamente scansito, seguendo un processo di *reverse engineering*, e ricostruito in ambiente digitale. La forma e la dimensione dei singoli pannelli corrispondono alle aree individuate dall'intersezione delle curve che compongono la rete di suddivisione della superficie. Ciascuno degli elementi ha inclinazione, raggio e direzione di curvatura diversi⁴⁹.

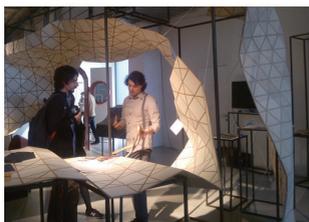
Tra le soluzioni prese in considerazione per la realizzazione dell'opera era stata prevista anche la fabbricazione di pannelli a doppia curvatura in vetro piegati a caldo, nel tentativo di seguire perfettamente la forma progettata per le vele.

Tuttavia, questi richiedono la produzione di numerosi stampi in acciaio ognuno diverso dall'altro ed è evidente che tale soluzione era assolutamente proibitiva dal punto di vista economico. Per realizzare i 3900 pannelli a singola curvatura distribuiti sulle 12 vele che compongono l'involucro (figg. 49-51), sono state impiegate delle *glass bending machines* di ultima generazione, con notevole risparmio economico⁵⁰.

Per gestire le aree con curvatura più accentuata è stato necessario forzare in loco, seppur minimamente, la piegatura a freddo di parte dei pannelli: la bassa curvatura della maggior parte degli elementi ha consentito tale processo.⁵¹



Figg. 49-51/ Particolari della *Fondazione Louis Vuitton*, 2014, Parigi (Francia). L'involucro è composto da strisce a singola curvatura in vetro. (Foto dell'autore).



Figg. 52/ Il sistema *Woodskin*, *pattern Decor*. (Foto dell'autore).

Oltre l'architettura: ambiti di sperimentazione

A conclusione di questo capitolo dedicato alle tecniche di fabbricazione ed ai materiali coinvolti nel *Paneling* di superfici architettoniche complesse è interessante citare gli ambiti di sperimentazione complementari che attualmente sono rivolti alla ricerca di soluzioni innovative. Il *Paneling* di superfici complesse è un processo che favorisce ed esalta il carattere multidisciplinare dell'architettura.

Per tale ragione, è possibile indagarne l'applicazione all'interno di svariati, specifici settori, tra cui la progettazione e fabbricazione di sistemi di rivestimento, lo sviluppo di strutture pieghevoli e responsive, lo sviluppo di sistemi robotici creati per l'ottimizzazione della fase di assemblaggio dei manufatti, il settore della moda, dei puzzle 3D e la creazione di interessanti applicazioni nel campo della *landart*.

Tra i sistemi di rivestimento, *WoodSkin*⁵² rappresenta un prodotto malleabile e di forte impatto estetico, interamente personalizzabile e capace di soddisfare molteplici esigenze progettuali. Tale sistema nasce dall'unione di elementi-*sandwich* di forma variabile (triangolari, quadrilateri) composti da due strati piani esterni di legno e da uno strato interno in tessuto di nylon e polimeri: gli strati sono tenuti insieme da una sostanza adesiva⁵³ (fig. 52). Le macchine CNC "frammentano" un pannello *sandwich* piano e rigido di partenza in maniera tale che questo possa successivamente adattarsi alla configurazione formale del progetto da realizzare. La piegatura dei singoli elementi prodotti è consentita dallo strato interno che lega gli elementi. Il sistema può essere utilizzato tanto per creare piccoli pezzi di *design*, quanto per sperimentare soluzioni di rivestimento alternative per gestire intere facciate di edifici⁵⁴. Da sempre, tra le tecniche impiegate per risolvere il problema della realizzazione di forme complesse, vengono praticate le tecniche del *folding* e dell'*origami*, entrambe ca-

52 wood-skin.com/

53 Torri, 2014.

54 *Ibidem*.

pacì di generare “artefatti sottoposti a pieghe continue”⁵⁵. Il termine *origami* deriva dal giapponese *ori* (piegare) e *kami* (carta): in un unico concetto “l’arte di piegare la carta”. La sola azione del piegare e del ridistendere su se stesso un foglio piano produce figure tridimensionali diverse, arrivando a definire una vasta varietà di forme più o meno complesse⁵⁶. La nota tecnica di piegatura rigida di fogli sottili di materiale è stata utilizzata in campo architettonico già nel XIX e XX secolo, sperimentando materiali tra cui il metallo ondulato e le piastre in calcestruzzo: i recenti progressi nella ricerca sui materiali e sull’ottimizzazione geometrica hanno determinato la ripresa di ricerche di metodi di discretizzazione e fabbricazione correlate alle tecniche dell’origami. Questo approccio si basa sulla discretizzazione di una superficie piana di partenza attraverso la distribuzione di un *pattern*, prevalentemente composto da elementi triangolari, in cui i bordi dei tasselli rappresentano le linee di piegatura, definite “pieghe valle” e “pieghe monte”, che consentono il dinamismo dell’intero sistema⁵⁷. *Miura, Yoshimura, Ron Resh*, sono tra i *pattern* capaci di consentire tale dinamismo⁵⁸. Le pieghe, cioè i bordi tra elementi consecutivi, permettono la flessione e la torsione della superficie piana di partenza trasformandola in una superficie a singola o a doppia curvatura automaticamente già suddivisa⁵⁹. È quindi possibile assistere ad un’inversione del processo: da un sistema discreto è possibile ottenere una forma complessa. Queste applicazioni rappresentano uno strumento interessante per sperimentare una vasta gamma di soluzioni nel campo delle strutture pieghevoli e responsive. Henrik Joakim Zimmer tratta lo studio e lo sviluppo di sistemi discreti dinamici a doppio strato, definiti *dual-layer spaces frames with planar faces*, sviluppati dalla RWTH Aachen University⁶⁰, in cui la flessibilità di uno degli strati consente il dinamismo dell’intero sistema (fig. 54). Gli strati sono

55 Ciammaichella 2013, p. 163.

56 Casale, Valenti 2012.

57 *Ibidem*.

58 Capone 2019 b.

59 Casale e Valenti 2012.

60 Zimmer 2004, p.51.



Fig. 53/ Yokohama International Port Terminal, FOA Architects. Fonte: flickr.com/photos/eager/5092946014

Figg. 54, 55/ Vista d'insieme e dettaglio del *Dual-layer spaces frames with planar faces*. Fonte: Zimmer 2014.

posti ad una certa distanza l'uno dall'altro. Le facce che definiscono il *pattern* di suddivisione dell'estradosso del sistema sono collegate tra loro dallo strato sottostante composto da elementi piramidali pieghevoli⁶¹. Le piramidi a base esagonale (fig. 55) sono generate dall'offset "normale" del vertice comune alle sei facce triangolari che suddividono i poligoni distribuiti sullo strato di base. Fisicamente, le piramidi sono state sagomate individualmente fissando un foglio di metallo su un supporto successivamente piegato mediante l'uso di una macchina a controllo numerico⁶². Il sistema può essere esteso anche a *pattern* composti da elementi quadrangolari, esagonali o misti⁶³. Un numero sempre maggiore di ricercatori indaga e sperimenta la progettazione di sistemi e tecnologie robotiche autonome per "automatizzare" ed agevolare la fase di assemblaggio di strutture architettoniche⁶⁴. I robot, per anni impiegati nel settore della produzione industriale, oggi vengono utilizzati da ingegneri e architetti per la fabbricazione e l'assemblaggio delle strutture, in quanto rappresentano una soluzione utile per ottimizzare i tempi di realizzazione e di montaggio. L'assemblaggio manuale di tutti gli elementi è una procedura complessa, che necessita di un lavoro di *clasting* (raggruppamento) dei pezzi affinché il montaggio avvenga seguendo il giusto ordine di distribuzione. Tale ordine è stabilito in fase digitale, assegnando a ciascun pannello un codice numerico per riconoscerne la posizione rispetto a quelli adiacenti. Nel panorama mondiale, Fabio Gramazio e Matthias Kohler, entrambi docenti presso l'Istituto ETH di Zurigo, sono stati tra i primi ad utilizzare i robot nella progettazione architettonica, esplorando numerose tecniche di fabbricazione sottrattive ed additive su una vasta gamma di materiali⁶⁵. I robot sono utilizzati per fabbricare installazioni dalle dimensioni contenute e alla grande scala architettonica⁶⁶ (fig. 55).

61 *Ibidem*, p. 57.

62 *Ibidem*, p.83.

63 *Idem*.

64 Poustinchi 2019, Tsikoliya et al. 2019, Likay et al. 2019.

65 Gramazio 2013.

66 Waibel 2011.

Il progetto KUKA/prc, ad esempio, nato dalla collaborazione tra KUKA⁶⁷, *Rhinoceros* e *Grasshopper* (McNeel & Associates), consente ai progettisti di simulare il controllo di robot e di bracci meccanici con un *software* noto per la modellazione NURBS e gli attuali processi di fabbricazione digitale. Gramazio & Kohler, in collaborazione con Raffaello d'Andrea, a Orléans (Francia), hanno curato il progetto *Flight Assembled Architecture*, in cui una serie di *quadrotors*⁶⁸ (fig. 56) sono stati utilizzati per assemblare una torre di 1500 blocchi di polistirolo espanso, per 6 m di altezza e 3,5 m di larghezza.

L'ambizione è quella di lavorare con dei sistemi robotici altamente sofisticati che possano essere impiegati direttamente in cantiere, dunque in condizioni spaziali ristrette e complesse⁶⁹.

I processi di discretizzazione delle superfici sono attualmente adottati anche nel settore della moda. Grazie agli sviluppi conseguiti nel campo della computer grafica è possibile simulare modelli tridimensionali di capi d'abbigliamento utilizzando dei manichini virtuali per definire le collisioni eventualmente esistenti tra le parti del corpo e del capo disegnato⁷¹ (fig. 57). Pertanto, dal momento che qualsiasi superficie NURBS è convertibile in un poliedro, la forma modellata può essere successivamente fabbricata tramite taglio o stampa 3D dei singoli elementi che discretizzano la superficie originaria. I software appositi trasformano i modelli 3D in un formato 2D stampabile ed assemblabile sviluppando il *pattern* di suddivisione della superficie e indicando i tratteggi delle pieghe che lo strutturano in maniera da consentire la creazione di un modello cartaceo del prototipo da realizzare⁷². *Wooden Skin Tone Dress* di Allison Walker⁷³, i modelli *Wooden Bag and Dress* delle designer Maria Bonita ed Elisa Stroyk, i *Woodendress* di Thrive⁷⁴, i *Wooden Textile Dress* di Léa Peckre & Elisa Stroyk⁷⁵ e gli esperimenti *V pattern* indossabili di Horst Kiechle⁷⁶ (fig. 58) sono tra



Fig. 55/ *The Endless Wall* (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich). Fonte: Wikimedia commons. Autore: Architecture and Digital Fabrication, ETH Zurich.

Fig. 56/ *Quadrotor impiegato per la Flight assemble architecture*, 2013, by Gramazio & Kohler and Raffaello d'Andrea.

67 KUKA è un produttore tedesco a livello mondiale di robot industriali e soluzioni per l'automazione industriale. kuka.com/it-it

68 Un quadrotore, o anche elicottero quadrotore (in inglese: *quadroto*), è un aeromobile sollevato e spinto da quattro rotori.

69 Molloy 2013.

70 Ciammaichella 2013, p. 190.

71 *Ibidem*.

72 *Ibidem*.

73 Alliwalk.com/wooden_dress.html

74 Thriveclothingcompany.com/

75 Elisastrozyk.com/fashion-new

76 Instagram.com/horstkiechle/

Shaping & Paneling



Fig. 57/ Modellazione numerica, sviluppo (in Pepakura Designer) e ricostruzione del prototipo cartaceo di una bito progettato da Irina Shaposhnikova, 2009. Fonte: Ciammaichella 2013.

Fig. 58/ *V pattern* (2017) di Horst Kiechle. *Courtesy by* Horst Kiechle.

77 Nervous.com/blog/

78 Francisbitonti.com/ditas-gown/

79 Bradleyrothenberg.com/

80 Ciammaichella 2013, p. 190.

i progetti realizzati assemblando tasselli piani distribuiti in maniera tale da assecondare la complessità delle forme progettate e riproporre le proprietà di flessibilità, malleabilità e adattabilità proprie di un tessuto. I tasselli sono successivamente agganciati o incernierati gli uni agli altri, oppure sono incollati su un tessuto molto fine: il risultato è una superficie versatile e trasformabile. Lo studio *Nervous System*, grazie al software *Kinematics*⁷⁷, combina la tradizionale tecnica degli origami con i nuovi approcci di stampa 3D. Appositi algoritmi aggiungono le cerniere ai gruppi di tasselli triangolari adiacenti: lo scopo è quello di estrarre un unico pezzo finale da un blocco di nylon senza bisogno di alcuna successiva fase di assemblaggio dei pezzi. Un'altra interessante applicazione nell'ambito della moda è rappresentato dalle creazioni di Michael Schmidt e Francis Bitonti, la cui realizzazione, sempre in nylon, è stata eseguita grazie all'utilizzo della stampante *3D Shapeways*. I capi sono disegnati seguendo le misure del corpo scansionato della modella, modellato digitalmente e poi stampato in 3D⁷⁸. Anche Bradley Rothenberg, architetto di New York, propone degli abiti stampati in 3D trasformando materiali come l'elastomero e il poliuretano termoplastico per realizzare capi indossabili. I tessuti nascono da un intreccio di fili stampati in 3D, i quali formano una rete che può raggiungere varie configurazioni, dimensioni e forme, permettendo al tessuto di muoversi liberamente assieme al corpo⁷⁹. «Del resto le sue superfici sono affini a quelle dell'architettura poiché entrambe le discipline lavorano sul corpo: gli abiti possono considerarsi come architetture che lo vestono e lo ridisegnano, nel frattempo i luoghi da abitare assumono le sembianze di ibridi antropomorfi»⁸⁰.