Author: T. Iori & S. Poretti (eds)
Title of the monograph: Ingegneria oggi - Rassegna di architettura e urbanistica
Date of publication: 01/11/2012

This monograph was published in the framework of SIXXI Research



thanks to funding of



ERC ADVANCED GRANT 2011
P.I. SERGIO PORETTI

RASSEGNA DI ARCHITETTURA E URBANISTICA
Anno XLVI - n. 137/138

Sommario

Editoriale di *Maria Argenti* 5

Per Antonino Terranova di *Lucio Barbera* 8

RICERCHE

Tullia Iori, Sergio Poretti
«Pop Structures» per il nuovo millennio 9

Bruno Reichlin
La bellezza del calcolo 29

Rinaldo Capomolla
«Toys and games»: i ponti di Santiago Calatrava 43

Luciano Cardellicchio
Vestiti d'alta moda, ossature prêt-à-porter: trends strutturali per il grattacielo contemporaneo 59

Luca Guido
Italia 1990 - 2012: *Under-design*, ovvero un progetto di anonimato tecnico e politico 69

Andrea Micheletti
Strutture Tensegrity 85

J. K. Mauro Pierconti
Il bisogno di iniziare, il senso di appartenere: Itō Tōyoo alla prova della musica nel Matsumoto Performing Arts Centre (2000-2004) 97

Giulio Barazzetta
Grandi opere di inizio millennio. Cronache di architettura integrata da due cantieri italiani 109

APPARATI

Ilaria Palazzi
Opere di ingegneria dal mondo 124

ENGLISH TEXTS 167

BIOGRAFIE DEGLI AUTORI 171

Edizioni Kappa ISSN 0392-8608

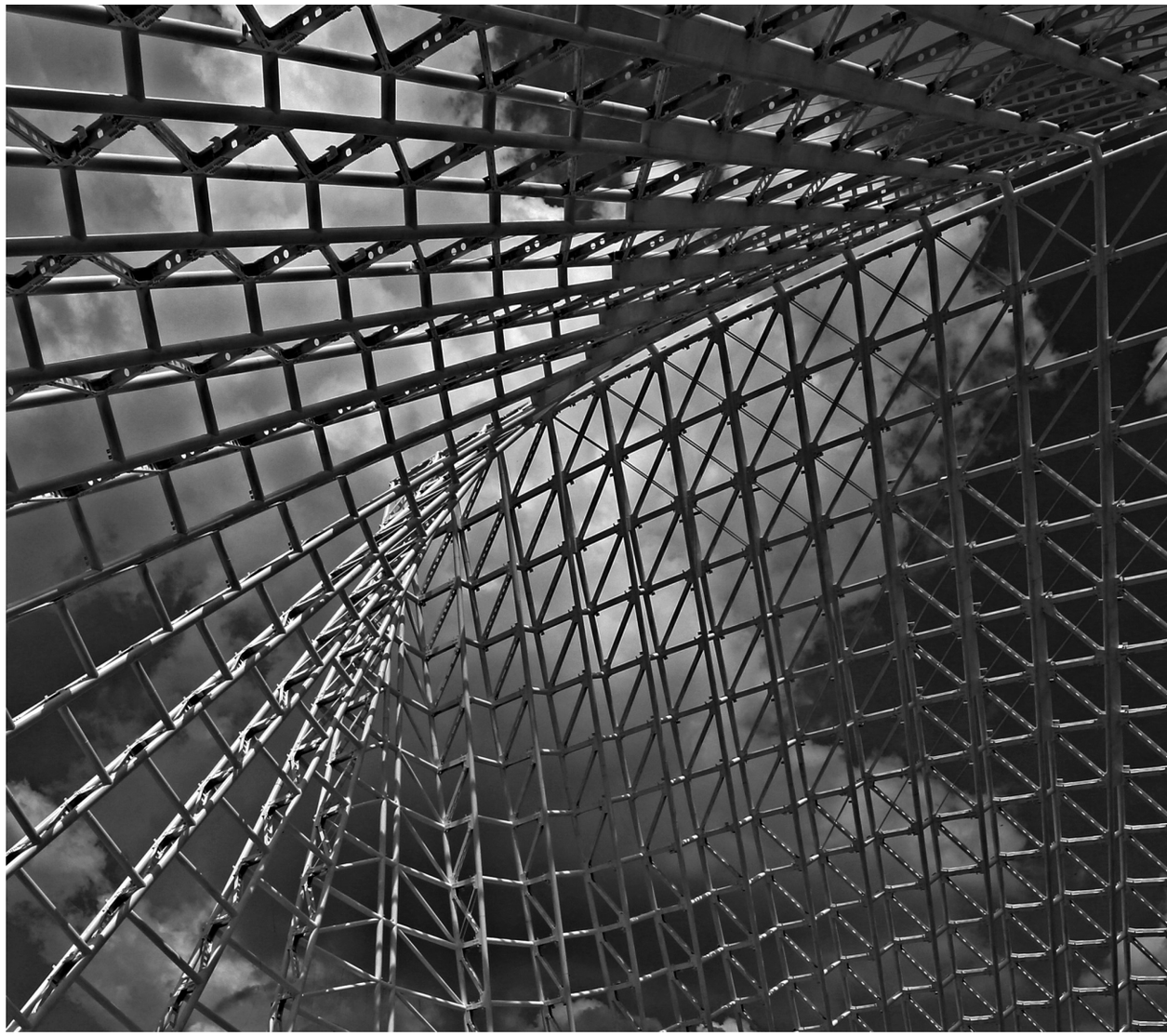
RASSEGNA DI ARCHITETTURA E URBANISTICA 137/138

RASSEGNA DI ARCHITETTURA E URBANISTICA

137/138

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA

137/138



Ingegneria oggi

CONSIGLIO SCIENTIFICO

Maria Argenti
Lucio Valerio Barbera
Giorgio Ciucci
Jean Louis Cohen
Paolo Colarossi
Claudia Conforti
Umberto De Martino
Francesco Garofalo
Fulvio Irace
Elisabeth Kieven
Carlo Melograni
Francesco Moschini
Alessandra Muntoni
Carlo Olmo
Elio Piroddi
Sergio Poretti
Franco Purini
Piero Ostilio Rossi
Sergio Rotondi

COMITATO EDITORIALE

Michele Costanzo, Fabio Cutroni
Alessandro d'Onofrio, Paola Falini,
Fabrizio Toppetti

Segreteria

Maura Percoco
Fabio Speranza
Gianpaola Spirito

RASSEGNA DI ARCHITETTURA E URBANISTICA
Pubblicazione quadrimestrale della «Sapienza» Università di Roma
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile, Ambientale
Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale, Via Eudossiana, 18 – 00184 Roma

Direttore Responsabile: Maria Argenti
Progetto e realizzazione editoriale: Studio Mariano

Direzione: tel. 06.44585166 – email: maria.argenti@uniroma1.it
Segreteria: tel. 06.44585187
Autorizzazione del Tribunale di Roma del 27-3-65 n. 10277

Editore: Edizioni Kappa, Piazza Borghese, 6 - 00186 Roma - Tel. 06.6790356
Amministrazione: Via Silvio Benco, 2 - 00177 Roma - Tel. 06.273903 - fax 06.2147053

Abbonamento annuo (3 numeri): € 30,00; per l'estero € 45,00
Prezzo dell'intera collana (1965-1979) € 450,00 - (1980-1990) € 150,00 - (1991-2004) € 180,00
Versamenti su ccp n. 93123008 - Cappabianca Paolo & C. SAS, Via Silvio Benco, 2 - 00177 Roma
Centro di spesa: Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile, Ambientale – Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale

La rivista usufruisce di un contributo annuo della «Sapienza» Università di Roma

In copertina: S. Calatrava, Stadio del nuoto, Tor Vergata, Roma, 2012. Dettaglio della copertura (foto Sergio Poretti).

Il presente numero è stato curato da Tullia Iori e Sergio Poretti.

RASSEGNA DI ARCHITETTURA E URBANISTICA

Ingegneria oggi

137/138

RASSEGNA DI ARCHITETTURA E URBANISTICA
Anno XLVI - n. 137/138 – Maggio-Dicembre 2012

Sommario

Editoriale di *Maria Argenti* **5**

Per Antonino Terranova di *Lucio Barbera* **8**

RICERCHE

Tullia Iori, Sergio Poretti
«Pop Structures» per il nuovo millennio **9**

Bruno Reichlin
La bellezza del calcolo **29**

Rinaldo Capomolla
«Toys and games»: i ponti di Santiago Calatrava **43**

Luciano Cardellicchio
Vestiti d'alta moda, ossature prêt-à-porter: trends strutturali per il grattacielo contemporaneo **59**

Luca Guido
Italia 1990 - 2012: *Under-design*, ovvero un progetto di anonimato tecnico e politico **69**

Andrea Micheletti
Strutture Tensegrity **85**

J. K. Mauro Pierconti
Il bisogno di iniziare, il senso di appartenere: Itō Tōyoo alla prova della musica nel Matsumoto Performing Arts Centre (2000-2004) **97**

Giulio Barazzetta
Grandi opere di inizio millennio. Cronache di architettura integrata da due cantieri italiani **109**

APPARATI

Ilaria Palazzi
Opere di ingegneria dal mondo **124**

ENGLISH TEXTS **167**

BIOGRAFIE DEGLI AUTORI **171**

Author: T. Iori & S. Poretti
Title: «Pop Structures» per il nuovo millennio
Title of the monograph: Ingegneria oggi- Rassegna di architettura e urbanistica
Editor: T. Iori & S. Poretti
Date of publication: 01/11/2012

This paper was published in the framework of SIXXI Research

thanks to funding of

ERC ADVANCED GRANT 2011
P.I. SERGIO PORETTI

«Pop Structures» per il nuovo millennio

Tullia Iori, Sergio Poretti

«Barocco è lo stile che consapevolmente esaurisce (o vuole esaurire) tutte le proprie possibilità e che confina con la propria caricatura»[1]. L'osservazione con cui Borges sdrammatizza alcuni suoi giovanili esercizi letterari (raccolti nella *Storia universale dell'infamia*) svela un aspetto connaturato in un certo tipo di architettura: quella che si pone l'obiettivo prioritario di stupefare, che si offre come spettacolo direttamente al grande pubblico, sia esso composto da *flâneur* ante litteram nella città seicentesca o da turisti planetari del terzo millennio. L'argomento è di quelli adatti ad alimentare il vasto, incessante dibattito sul fenomeno dell'Archistar System. Qui lo usiamo invece per introdurre una domanda precisa e specifica: possiamo riconoscere uno stile barocco anche in una parte dell'ingegneria strutturale recente? Possiamo, cioè, parlare di una corrente d'ingegneria barocca?

A prima vista la locuzione appare come un ossimoro. L'ingegneria moderna nasce come uno dei frutti più genuini del razionalismo. E, per tutto il suo sviluppo adolescenziale, la corrispondenza della forma con il contenuto è apparso un principio incontestabile. La diga o il silos, per l'evidenza immediata che assume nella forma il cimento strutturale, vengono indicati come modelli spontanei di architettura razionalista. E se si vuole trovare un antenato del classico progettista strutturale moderno – il pioniere delle prime strutture in ghisa e ferro o il primo sperimentatore del cemento armato – bisogna risalire fino al costruttore della cattedrale medievale, figura giusto antitetica a quella dell'architetto barocco (e limitarci, per giunta, al gotico classico, lasciando fuori le prime contaminazioni della corrispondenza tra forma e struttura introdotte nel tardogotico).

Non possiamo escludere però che l'iniziale, lunga fase classica dell'ingegneria, sviluppata a fianco o in seno al movimento moderno, sia storicamente conclusa. (D'altra parte, non possiamo nemmeno affermarlo: la scarsità di studi storici specifici rende incompleta e lacunosa la stessa conoscenza dell'avventurosa vicenda dell'ingegneria moderna; la possibilità di un'interpretazione complessiva e di una collocazione nel contesto storico più generale è ancora lontana).

Resta il fatto che, dagli anni ottanta del Novecento in poi, numerose sono le esperienze in cui i principi etici ed estetici fondamentali dell'ingegneria classica risultano clamorosamente trasgrediti. E non ci riferiamo alla sperimentazione architettonica, comunque etichettata, basata sull'intenzionale indipendenza della forma rispetto al comportamento strutturale, contro la quale continua a sfogarsi una critica generica e ideologica. Ci riferiamo ad esperimenti provenienti dal mondo dell'ingegneria, nei quali a dare spettacolo non è la forma, più o meno libera, ma è la figura strutturale. Che però deve destare meraviglia non più per l'arditezza o la leggerezza o l'essenzialità, ma per l'eccentricità della configurazione di equilibrio: esito inaspettato, tutt'altro che naturale, tutt'altro che economico, di un inventivo, sofisticato e (perché no?) ridondante gioco di forze.

È anche vero che la possibile intrusione di un'inflessione barocca nella progettazione strutturale, di cui ci occupiamo in questa nota, riguarda solo una parte dell'ingegneria. In un quadro d'insieme, assumerebbe altrettanto rilievo una linea di continuità con l'ingegneria moderna classica. Una linea in cui prosegue l'inseguimento dei record dell'arditezza, che resta fedele alle tipologie strutturali classiche – il ponte sospeso per le

grandi luci, le tensostrutture per le grandi coperture – dove l'opera è il risultato spersonalizzato dell'équipe ultraspecialistica. Una linea che, al polo opposto, comprende anche alcuni interessanti tentativi di recuperare la dimensione locale e autoriale del progettista, come quelli di Jürg Conzett[2], o di Marc Mimram o di Jiří Stráský, nei quali si conservano i principi fondamentali della correttezza strutturale, approdando ad un neorazionalismo sobrio e minimale.

Tornando alla più eterodossa corrente di ingegneria barocca, si deve considerare che la priorità dell'aspetto iconografico è sempre più spesso imposta all'opera di ingegneria dalle esigenze di un mercato profondamente mutato. Il nuovo stadio per ospitare una manifestazione sportiva di visibilità internazionale deve risultare fotogenico dalle riprese in elicottero (prima ancora che utile nel futuro); il grande contenitore multifunzionale deve impressionare il turista richiamato dall'effetto Bilbao; il ponte deve dare subito un nuovo *appeal* al quartiere povero e malfamato.

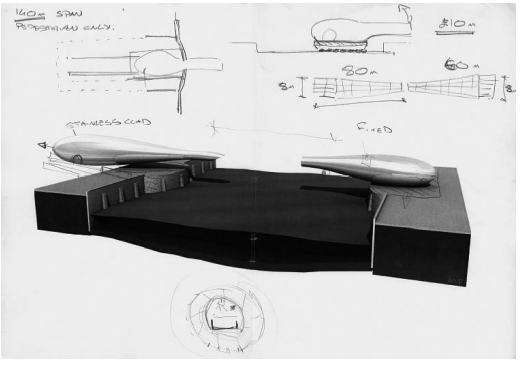
Trasformata in un'icona che deve essere apprezzata e «acquistata» da un pubblico straordinariamente vasto e multiculturale, la struttura entra (trionfalmente) nel grande mondo della pop-art: di questa particolarissima natura è lo stile barocco che investe l'opera d'ingegneria.



1/ C. Balmond, A. Kapoor, *Orbit*, Londra, 2012.



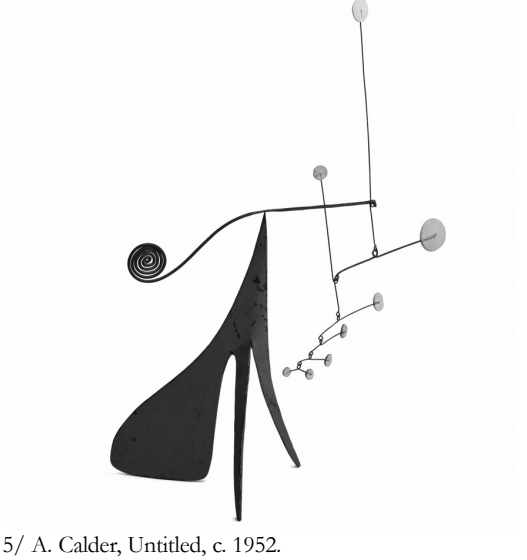
2/ C. Balmond, A. Kapoor, *Temenos*, Middlesbrough, 2010.



3/ C. Balmond, A. Kapoor, *Kissing Bridge*, 2004. Progetto.



4/ C. Balmond, A. Kapoor, *Marsyas*, Londra, 2002.



5/ A. Calder, Untitled, c. 1952.

Abbandonate le imprese da record (il ponte di tre chilometri di luce o la copertura di 400 metri di diametro) il nuovo «engin-artist» lavora preferibilmente su luci ordinarie, 150-200 metri. Ma qui, dimenticate le tipologie classiche (e sfruttando soluzioni strutturali definitivamente acquisite fin dalla metà del secolo scorso) si concentra sull'invenzione di meccanismi inediti, destinati a stupire il mondo intero. Nascono così le immagini più caratteristiche dell'ingegneria pop, replicabili, com'è tipico della pop-art, in un processo che agevola la riconoscibilità dell'opera e del suo autore. Al rischio, serissimo, che la ripetizione finisca per inficiare lo stupore che l'opera deve suscitare, ci si oppone sfruttando fino in fondo la versatilità figurativa delle invenzioni: il ponte strallato rotante con pilone inclinato in avanti di Calatrava, a Buenos Aires suggerisce il movimento della donna nel tango, a Dublino l'immagine di un'arpa celtica.

In questo nuovo quadro l'ingegneria recupera e rilancia il suo rapporto tradizionalmente privilegiato con la scultura. A progettare *Orbit*, il simbolo delle Olimpiadi di Londra 2012 con l'ambizione di divenire la Torre Eiffel del XXI secolo, la più splendente star dell'ingegneria internazionale, Cecil Balmond, è affiancata da Anish Kapoor, artista con una spiccata passione per i materiali. Ed è solo l'ultima di una serie di interessanti esperienze intraprese da Balmond con lo scultore, dopo le note collaborazioni con gli architetti più prestigiosi. Dobbiamo alla progettazione strutturale e alle ricerche sulla geometria avanzata del gruppo AGU da lui fondato e diretto all'interno di Arup, la realizzazione di molte affascinanti sculture strutturali tra cui il colossale iperboloide *Marsyas* collocato nel 2002 nello spazio centrale della Tate Modern e, più recentemente, il divertente Kissing Bridge (2004).

La collaborazione tra i due è però solo la più lampante manifestazione del nuovo corso dell'ingegneria strutturale internazionale, in cui risulta straordinariamente accentuata la vocazione dell'opera strutturale verso la scultura, a scala urbana o addirittura territoriale. Vocazione innata, del resto e, in un certo senso, reciproca. Senza risalire alla Statua della libertà (1886) concepita dallo scultore Frédéric Bartholdi con la fondamentale collaborazione di Gustave Eiffel, basti pensare ai *mobiles* in equilibrio instabile di Alexander Calder (che non a caso ironizzava: «non sono uno scultore, sono un ingegnere»), o ai *Toros* in bilico di Calatrava e al suo obelisco in Plaza de Castilla a Madrid (o a quello identico offerto dalla Russell

Berrie Foundation al Technion di Haifa) o alla irrisolta contesa tra l'artista Kenneth Snelson e Bucky Fuller sulla paternità della tensegrity.

L'innumerevole catalogo di nuove forme strutturali, aggiornato di recente con il ponte che si snoda come un nastro di Moebius e con quello che si avvolge come l'elica del DNA o con la copertura che ricorda una schiuma di bolle di sapone, dimostra quale radicale trasformazione abbia subito la figura dello strutturista negli ultimi decenni. Una trasformazione che è certamente stimolata dall'esterno: dagli stessi cambiamenti di contesto che generano la rivoluzione in atto nel mondo dell'architettura. Ma il cui svolgimento si compie concretamente all'interno del mondo dell'ingegneria, dove resta in stretta interconnessione con il lungo corso di una lenta, sofferta storia di calcoli e calcolatori, di algoritmi per l'ottimizzazione, di materiali sempre più sofisticati, di geometrie extraeuclidee.

Accennare ad alcuni momenti cruciali di questa (meno conosciuta) storia interna all'ingegneria è l'obiettivo di questa nota.

Dai calcolatori umani al calcolo automatico

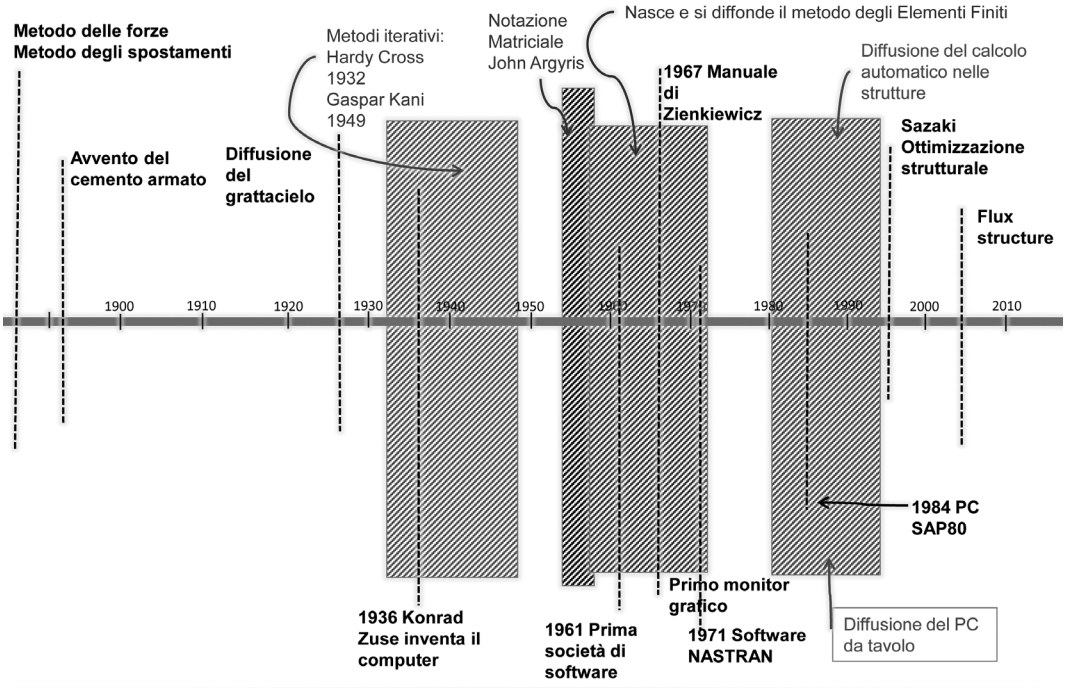
Lo sviluppo originale dell'ingegneria strutturale degli ultimi vent'anni è in larga parte conseguenza dell'esponenziale progresso nel settore dei computer e della loro applicazione alla teoria delle strutture: è, per essere più chiari, una delle più visibili conseguenze della terza rivoluzione industriale, quella informatica.

Saccheggiando l'appassionante e puntuale ricostruzione storica di Karl-Eugen Kurrer, in particolare il capitolo 10 del suo poderoso volume *The History of the Theory of Structures*[3] possiamo provare a sintetizzare alcuni passaggi chiave che evidenziano l'originalità della sperimentazione recente.

A partire dall'inizio del XX secolo, con l'avvento del cemento armato e la sua intrinseca peculiarità legata al modello del telaio a nodi rigidi, i principali metodi di calcolo delle strutture reticolari iperstatiche, messi a punto a partire dalla seconda metà del secolo precedente, vengono ridiscussi. Le potenzialità risolutive del metodo delle forze – ma anche del meno diffuso metodo degli spostamenti – mostrano tutti i loro limiti, in particolare negli anni venti del Novecento, con il boom dei grattacieli americani. Il crescente numero di equazioni e di incognite dei sistemi lineari per i telai staticamente indeterminati rende i calcoli, condotti da schiere di giovani matematici ordinati, appositamente reclutati, troppo lunghi, incerti e costosi. Nel 1932 viene pubblicato il metodo ideato da Hardy Cross, dedicato proprio alla soluzione iterativa di sistemi a molti gradi di iperstaticità: metodo che richiede l'applicazione di numerosissimi ma semplici procedimenti matematici, basati solo sulle quattro operazioni aritmetiche. Nel 1949 al metodo di Cross si affianca quello di Gaspar Kani e le due tecniche si affermano capillarmente negli studi professionali, giocando un ruolo fondamentale nella pratica dei calcoli delle strutture iperstatiche. Si tratta ancora di eseguire molte operazioni ripetitive, per le quali devono essere assoldati calcolatori umani, spesso anche donne, pagati a conto (e non pagati se sbagliano), che senza alcuna intelligenza del processo complessivo compilano a mano fogli di calcolo impostati dal progettista. Nel 1936 l'invenzione del computer da parte di Konrad Zuse, ingegnere civile tedesco, si propone proprio di meccanizzare questi calcoli di tipo ripetitivo ma avrà reale applicazione solo molti anni dopo.

Intanto, l'introduzione della teoria matriciale per l'analisi strutturale favorisce un cambiamento radicale. La soluzione dei sistemi di equazioni lineari grazie alle matrici era stata affrontata già intorno al 1850 e, in verità, la storia del «determinante» è assai più antica. La sistematizzazione della formulazione matriciale nell'Ottocento aveva fornito all'algebra lineare uno strumento di espressione di insuperata sintesi e chiarezza, ma il grande sviluppo applicativo si era avviato solo a partire dalla metà degli anni venti del Novecento, nel campo della meccanica quantistica. Nel 1924, pionieristicamente, Richard Von Mises testa l'applicazione dell'algebra matriciale alla meccanica dei corpi rigidi, ma è solo tra il 1954 e il 1957 che John H. Argyris sistematizza la notazione tensoriale applicandola all'intera disciplina della meccanica strutturale, mettendo in evidenza la forza delle operazioni espresse attraverso i simboli matriciali, che consentono di maneggiare relazioni preziose, impossibili da scrivere in modo tradizionale. Secondo Argyris, la formulazione matriciale non solo consentiva di configurare i calcoli in una maniera molto più chiara, ma era anche la forma ideale di notazione per i computer automatici digitali, che intanto si stavano sviluppando.

La rivoluzione scientifica della meccanica strutturale avviata dall'applicazione della notazione matriciale viene completata dall'ingegnosa invenzione del metodo degli elementi finiti. Se il nome FEM compare solo nel 1960, la nascita del meto-



6/ Evoluzione della teoria delle strutture.

do destinato a rivoluzionare la stessa impostazione dei problemi strutturali risale al 1956, anno della pubblicazione di un celebre articolo a quattro mani i cui autori sono spesso raccolti nell'acronimo TCMT[4]. Il lavoro di ricerca dei magnifici quattro è rivolto inizialmente alla soluzione di problemi complessi di ingegneria aeronautica, ma già nel 1967 Olgierd C. Zienkiewicz pubblica un manuale sull'applicazione del metodo agli elementi finiti nella meccanica delle strutture e del continuo, che fornirà il massimo impulso alla sua diffusione nei più disparati settori di applicazione. È un passaggio epocale: mentre il calcolo infinitesimale ideato da Leibniz si basa sull'idea di dividere il continuo in elementi ideali infinitamente piccoli, il nuovo metodo prevede di impiegare elementi di dimensioni piccole ma finite, in numero molto elevato ma non infiniti, per approssimare la superficie continua. Questo ritorno al finito e numerabile è fondamentale per sintonizzare il calcolo sul nuovo strumento del computer che, per quanto potente, non è proprio concepito per affrontare il concetto stesso di infinito.

Dagli anni sessanta in poi, gli sviluppi della teoria delle strutture vengono direttamente correlati con i calcoli assistiti dal computer, oramai molto evoluti dai tempi di Zuse e della pionieristica macchina di Turing. Nel 1961 nasce in Germania ovest la prima società di software per l'ingegneria strutturale. Nel 1963 Alfred Zimmer scrive il primo programma per il computer destinato all'analisi strutturale meccanica nel campo della progettazione automobilistica, eseguito su un IBM 1620. In questo avanzato settore industriale si eseguono, in questo stesso periodo, i primi calcoli automatici per ottimizzare la carrozzeria, cioè per minimizzarne il peso a parità di rigidezza. Il linguaggio di programmazione Fortran IV, presentato nel 1961, e il nuovo IBM 360, messo in commercio nel 1965, stimolano lo sviluppo dell'analisi strutturale aiutata dal calcolatore partendo dalla scrittura di un software denominato ESEM, basato sugli elementi finiti. Il programma commissionato nel 1968 dalla NASA per progettare veicoli spaziali più efficienti viene sviluppato con il nome NASTRAN (NASA Structural Analysis) e commercializzato nel 1971. Nei paesi più avanzati si avviano corsi di aggiornamento sull'uso del computer per soluzioni pratiche di problemi di rigidezza, calcolo delle tensioni, ottimizzazione del strutture. Nel frattempo entra in commercio il primo monitor grafico, l'IBM 2250 Display Unit, con cui si interagisce attraverso una penna luminosa. Si può dire che i progressi successivi riguardino principalmente lo sviluppo

delle prestazioni, con processori sempre più potenti miniaturizzati in dimensioni sempre più contenute.

La progressiva diffusione dei computer da tavolo, a partire dal 1984, ha trasformato i calcoli strutturali assistiti dal calcolatore in realtà quotidiana in tutti gli studi di progettazione. La principale conseguenza è proprio che i calcoli, trasferiti alla macchina, assumono un ruolo marginale nella pratica professionale, mentre fino a pochi anni prima costituivano il cuore del lavoro dell'ingegnere strutturista. Per anni, però, almeno nell'applicazione costruttiva, l'impiego del calcolo elettronico è stato limitato alla verifica di stabilità delle strutture, anche molto complesse, anche così complesse da non consentire determinazioni rigorose per altra via.

Sebbene sempre più amichevoli come interfaccia e capaci di interagire con i più diffusi programmi di CAD, fino alla metà degli anni Novanta i software non hanno consentito molte incursioni nel processo ideativo, limitando il loro ruolo alla verifica del comportamento della struttura già progettata.

Proprio negli ultimi due decenni, invece, l'esponenziale crescita delle prestazioni dei processori ha ampliato energicamente le possibilità applicative e l'interesse dei progettisti si è spostato verso nuovi obiettivi: in particolare, quello della ricerca della forma ottimale per certe condizioni al contorno e per certi carichi, in base a parametri di razionalizzazione del volume o, equivalentemente, del peso. Ricerca non nuova in sé, ma finalmente ora affrontabile con nuovi potenti strumenti.

Breve storia dell'ottimizzazione strutturale

Nei procedimenti convenzionali della progettazione strutturale, il primo passo consiste nel fissare una soluzione ragionevole per tipo e per forma: il progettista, in base alla sua esperienza e alle sue preferenze, predimensiona gli elementi, valuta i carichi esterni possibili e, infine, applica le regole di calcolo della meccanica delle strutture per verificare la stabilità e per valutare le sollecitazioni e le deformazioni. Questa sequenza di operazioni serve a prevedere il comportamento strutturale. Di grande interesse è da sempre il procedimento inverso: trovare la forma e la tipologia strutturale ottima per soddisfare parametri progettuali definiti a priori per quello spazio.

Nell'evoluzione dell'ingegneria moderna, dall'inizio dell'Ottocento ad oggi, si riconoscono alcuni passaggi fondamentali riconducibili all'ottimizzazione strutturale, o più in particolare al problema galileiano del «solido di uguale resistenza». Razionalizzare l'impiego del materiale riducendone il consumo, e quindi il peso, e quindi il costo, è da sempre un obiettivo per il progettista strutturale più ambizioso.

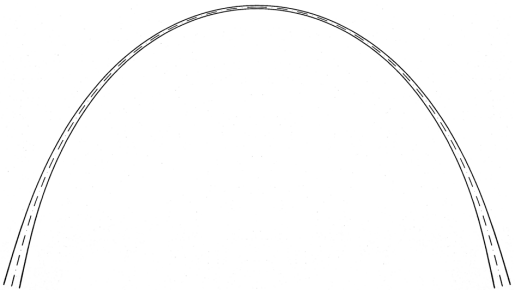
Abbandonato l'architrave, già la trave appoggiata-appoggiata in ferro puddellato di inizio Ottocento viene sagomata a doppio T per sfruttare al meglio la sezione, adattandola all'andamento triangolare a farfalla della sollecitazione di flessione. Proprio la flessione è, però, subito riconosciuta come la «peggiore» delle tensioni, visto che la presenza ineluttabile dell'asse neutro (dove il materiale certamente non lavora) rende il concetto stesso di ottimizzazione poco applicabile. Quando nella seconda metà dell'Ottocento si sviluppano le strutture reticolari, la possibilità di dimensionare le singole aste ad una sollecitazione assiale rigorosamente costante consente un approccio di massimizzazione nell'impiego del materiale decisamente più razionale: differenziare la sezione trasversale dell'elemento, soggetto a trazione o a compressione, sfiorando il limite della resistenza del materiale, è la sfida dell'ingegnere-imprenditore alla Eiffel, che stimola enormemente il calcolo delle strutture, chiamato a raggiungere livelli di precisione con ricadute immediate sull'economia della costruzione. È la statica grafica, capace tra l'altro di rendere drammaticamente visibile, attraverso potenti diagrammi, la distribuzione delle sollecitazioni, a favorire un ulteriore processo di ottimizzazione progettuale sulla forma generale.

L'alternativa, nei tentativi di ottimizzazione, tra sistemi continui e sistemi discreti si fa più interessante all'inizio del Novecento. L'avvento del cemento armato, infatti, riporta in auge la flessione, affrontata questa volta con un materiale eterogeneo, approssimativamente ottimizzato per la distribuzione a farfalla: nello strano matrimonio tra acciaio e calcestruzzo, la spartizione dei compiti consente all'armatura di lavorare esclusivamente alla sollecitazione più congeniale, la trazione, lasciando al composto cementizio il ruolo di assorbire la compressione. Nonostante la capacità di progettisti come Maillart di sagomare ponti ottimizzandone il comportamento rispetto al diagramma del momento o di disegnare travi reticolari secondo principi di equisollecitazione, è presto chiaro che con il cemento armato non si raggiungerà mai l'ottimo della massima sollecitazione contemporanea dei due materiali e i tanti

paradossi del materiale composito spingeranno a soluzioni alternative assai più razionali ma comunque di imperfetta ottimizzazione (come il cemento armato precompresso). Sono le volte sottili a recuperare, ancora una volta, la ricerca galileiana dell'ottimo strutturale: superfici di cemento armato a comportamento membranale, così sottili da rifiutare la rigidezza flessionale, vengono sagomate per rispondere per forma alle sollecitazioni. Se la resistenza deve essere garantita dalla forma invece che dalla massa, occorre allora ricercare la «forma resistente» ottima. Una volta esperite le sagome tradizionali (cupole e volte e le loro combinazioni sinclastiche), Torroja e poi Baroni e Candela provano le superfici a doppia curvatura inversa (le rigate, in particolare, come gli iperboloidi di rotazione ad una falda e i paraboloidi iperbolici), assemblate in molteplici composizioni che introducono nell'architettura strutturale forme inedite anche se, per il momento, riconducibili a rigorose formule matematiche.

Nella seconda metà del Novecento si assiste ad un nuovo successo delle strutture discrete: le strutture reticolari spaziali, a nodi tridimensionali identici e industrializzati, riavviano le ricerche sul calcolo e sull'ottimizzazione almeno della sollecitazione assiale. Successivamente, dopo oltre un decennio di dominio dei tanti sistemi brevettati ad aste e nodi, prevale l'orientamento a preferire la trazione rispetto alla compressione, per via del noto fenomeno dell'instabilità a carico di punta che impedisce di sfruttare il materiale compresso fino alla sua effettiva resistenza ultima. Lo sviluppo delle tensostrutture si inserisce in questo processo, riportando al centro dell'attenzione anche le ricerche di ottimizzazione delle forme resistenti continue: le tensostrutture, prima assemblate con reti di funi, poi tesando membrane, richiedono infatti di individuare superfici minime equitese e a doppia curvatura inversa. Le strategie di *form finding* messe a punto in questi anni (da Frei Otto, soprattutto) sono esclusivamente basate su modelli fisici in scala ridotta, sui quali per tentativi individuare la forma ottimizzata ai carichi esterni e verificare direttamente la resistenza con prove di carico miniaturizzate e indagini in galleria del vento.

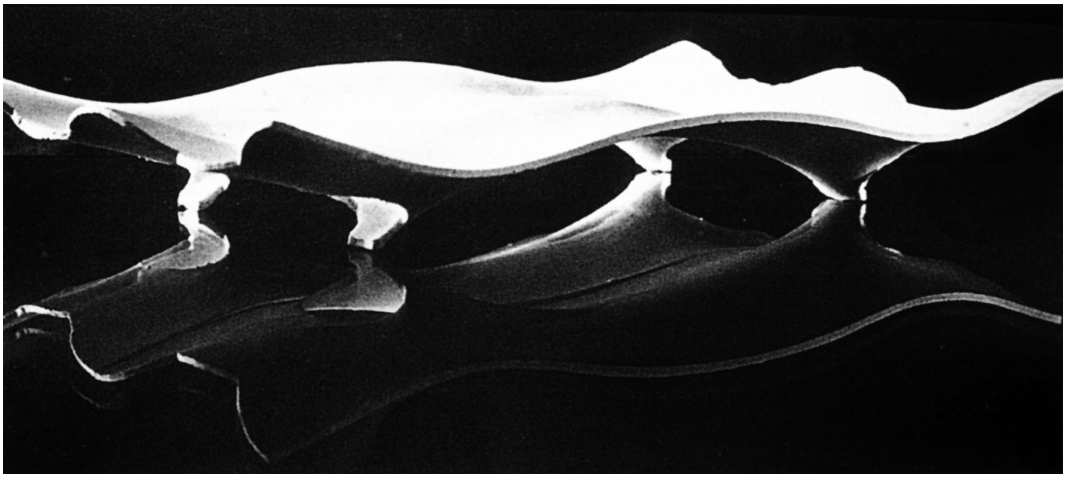
Analoghe sperimentazioni sono condotte contemporaneamente sulle volte sottili, abbandonando la prigione delle regole matematiche e spaziando nell'inesauribile campo delle forme libere. Quando nel 1959 Heinz Isler si presenta a Madrid al primo congresso dell'International Association for Shell Structures con la proposta di



7/ S. Musmeci, La forma dell'arco limite, il Logcos.

Nuove forme per le volte sottili, scatena un vivace dibattito: sulla fattibilità costruttiva, per l'eccessivo costo delle casseforme; sui rischi di una simulazione statica condotta solo su eccitanti modelli in scala; infine, sulla compatibilità architettonica di forme generate, per esempio, appendendo tessuti sottili irrigiditi con il gesso o lasciando che pellicole saponose suggeriscano la superficie minima equitesa dato un perimetro di vincolo. Isler, che pur recuperava la pionieristica attività di Antoni Gaudì, lancia con troppo anticipo una sperimentazione che solo gli elaboratori elettronici avrebbero promosso a soluzione credibile: nonostante le 1400 volte sottili realizzate in Svizzera, con forme originali e uniche, la sua ricerca è rimasta ai margini, marchiata dal giudizio di arbitrarietà espresso in anni di maggiore rigore etico ed economico di quelli attuali. Giudizio che è in fase di postuma revisione, soprattutto alla luce delle sperimentazioni degli ingegneri più in voga del momento.

Un approccio coevo molto simile, anche in termini di fortuna critica, è quello di Sergio Musmeci, che sagoma il ponte sul Basento a Potenza assecondando la stessa ricerca di superficie sottile equicompressa, aiutandosi con modellini confezionati con fili di cotone e membrane saponose, poi con membrane plastiche poste in trazione e infine con modelli in grande scala di microcemento: la forma strutturale per Musmeci non è arbitrariamente estetica ma rigorosamente frutto del principio di minimo strutturale. L'ingegnere italiano non ha a disposizione altro che soluzioni analitico-matematiche, non potendo ancora accedere agli elaboratori elettronici che pure cominciavano in quegli anni a diffondersi in Europa. La passione per le soluzioni minime lo porta, per esempio, a definire matematicamente la forma dell'arco limite, ribattezzato il *logcos* (y=log cos x),



8/ S. Musmeci, Progetto per i nuovi mercati generali, Roma, c. 1960.

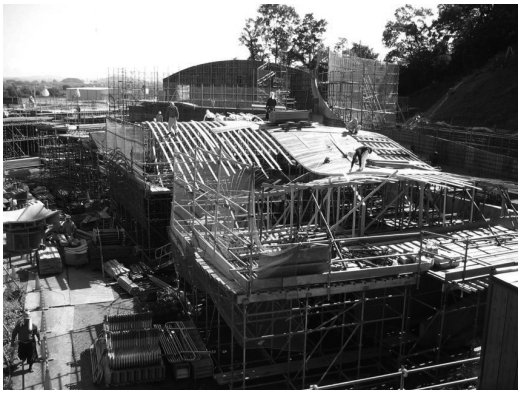
soggetto al solo peso proprio. Le suggestioni lanciate da Musmeci, completamente inascoltate nell'Italia degli anni '70 ormai avviata al declino dell'ingegneria strutturale dopo un periodo di splendore, sono oggi un'incredibile riscoperta che stupisce per modernità e sintonia con le nuove generazioni di progettisti strutturali mondiali.

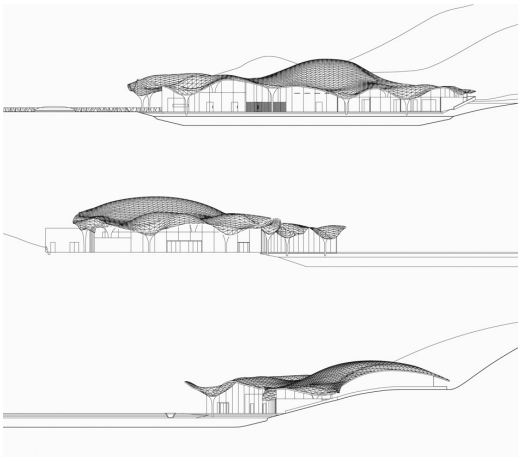
Sorprendentemente, infatti, Musmeci anticipa da progettista considerazioni oggi largamente condivise dai suoi colleghi esperti di ottimizzazione strutturale intesa come ottimizzazione della forma. In un saggio del 1971, intitolato *Il calcolo elettronico e la creazione di nuove forme strutturali*, Musmeci immagina soluzioni, prefigura possibilità, è capace di intuire ricerche sviluppate oltre trent'anni dopo, rammaricandosi di non avere a disposizione computer più veloci ed efficienti di quel calcolatore IBM 7090, messo in commercio nel lontano 1959 che chissà come aveva potuto utilizzare per fare qualche semplice calcolo (una breve sequenza di operazioni matematiche che avevano richiesto circa 15 minuti).

Ripartendo da un articolo di Anthony G.M. Michell del 1904[5], Musmeci affronta in particolare il caso in cui il criterio di ottimizzazione consista nel rendere minimo il peso della struttura, mentre le forze da sostenere sono fissate insieme ai loro punti di applicazione. La soluzione che si ottiene è una forma, già che il problema del minimo strutturale assegnato un determinato sistema di forze è un'invariante: cioè, se anche cambiano i valori di tutte le forze (purché rimangano in proporzione e conservino i punti di applicazione) e se si modifica il materiale (e quindi lo sforzo massimo ammissibile), cambierà solo la sezione resistente degli elementi ma non il disegno generale della struttura.

Musmeci dedica anche gran parte del volumetto *La Statica e le strutture*, pubblicato a marzo del 1971, proprio al tema «La qualità di una struttura e il minimo strutturale», riconoscendo che la riduzione dell'impiego di materiale debba essere ricercata sia per ridurre gli ingombri e migliorare l'efficienza della struttura, che per più importanti ragioni di carattere estetico, che spingono il progettista verso strutture il più possibile «essenziali ed espressive». «È chiaro che la massima capacità di espressione del contenuto statico, ossia la massima aderenza della forma al fatto strutturale, si raggiunge quando ogni parte è necessaria nella stessa misura di ogni altra parte. Il nostro bisogno di tradurre in fatti sensibili la nostra comprensione del fenomeno statico, e il desiderio stesso di dominarlo, ci portano a dosare le parti in proporzione alla sollecitazione che ciascuna deve sostenere. Nello stesso senso è naturale ricercare fra tutti i possibili, lo schema statico più efficiente, ossia la configurazione spaziale degli elementi resistenti che più di ogni altra risulti giustificata dall'utilizzazione strutturale della materia»[6]. Nel tentativo di giustificare scientificamente la ricerca del minimo strutturale, Musmeci non dimentica che «nei casi concreti possono legittimamente farsi sentire, in modo più o meno importante, altre istanze non direttamente connesse con il contenuto strutturale ed anche eventualmente del tutto estranee ad esso», come per esempio i costi del cantiere. Il sogno è chiaro: «io penso che un giorno, forse non molto lontano, sarà questo il modo di progettare di uno strutturista creativo. Il calcolo automatico, lungi dal limitare le sue possibilità di immaginazione, ne rappresenterà un efficiente supporto, oltre che un poten-







9-10-11/ M. Sasaki, T. Ito, Crematorio «Foresta della meditazione», Kakamigahara, Gifu, 2006. Veduta, cantiere, prospetti.

te mezzo di amplificazione della loro portata e della loro presa sulla realtà»[7].

Le ricerche compiute dagli strutturisti attuali gli danno ragione: purtroppo non sono gli ingegneri italiani a raccogliere il suo messaggio (per altro del tutto sconosciuto all'estero) e a sfruttare le potenzialità del calcolatore nell'invenzione di forme nuove.

Dalla tipologia alla topologia

Nei ultimi due decenni, la ricerca del minimo strutturale è tornata al centro dell'attenzione dell'architettura costruita. Il fenomeno coinvolge sia le forme discrete che le forme continue.

Nel campo del continuo, all'inizio del millennio si rilancia in grande stile, questa volta anche a livello mediatico, l'approccio dell'ottimizzazione strutturale attraverso il nuovo strumento della modellizzazione digitale: il fine dello sfruttamento ottimo del materiale viene raggiunto attraverso forme resistenti modellate non più attraverso artigianali, empirici, modellini fisici ma attraverso complessi modelli digitali, resi possibili dall'inarrestabile crescita della potenza di calcolo dei computer, anche i più economici da tavolo.

A dire il vero non è bastato, come ipotizzava Musmeci, solo lo sviluppo dei processori: sono servite anche teorie complesse di ricerca operativa, in particolare lo sviluppo degli approcci di ottimizzazione e di simulazione.

Per affrontare il complesso passaggio dall'ottimizzazione della sezione all'ottimizzazione della forma generale si ricorre infatti ad algoritmi evolutivi, ovvero a tecniche informatiche derivate dalla biologia e dalla teoria darwiniana: l'idea è imitare i passaggi genetici che hanno condotto all'evoluzione delle strutture presenti in natura (dalla complessità del corpo umano a quella delle forme vegetali) e che si basano in parte su meccanismi casuali e in parte sul concetto di sopravvivenza del più adatto. L'algoritmo evolutivo più semplice è quello genetico, che imita il DNA, caratterizzato dalla combinazione di poche basi.

Protagonista principale del rilancio è Mutsuro Sasaki, già affermato strutturista della celebratissima Mediateca di Sendai di Toyo Ito (progettata però con soluzioni più «ordinarie»). Riconoscendo l'influenza di Gaudi e di Isler, Sasaki spiega dettagliatamente[8] il suo avvicinamento all'impiego dei calcolatori elettronici per la progettazione di forme a curvatura libera: il suo primo approccio è legato al progetto del 1998 per il Gran Teatro Nazionale di Pechino, con Arata Isozaki, la cui copertura, di 150 x 225 metri, sostenuta irregolarmente dai volumi delle sale dei concerti, da pozzi di luce e da una serie di pilastri distribui-





12-13/ M. Sasaki, SANAA, *Rolex Learning Center*, Losanna, 2004-2010. Cantiere.

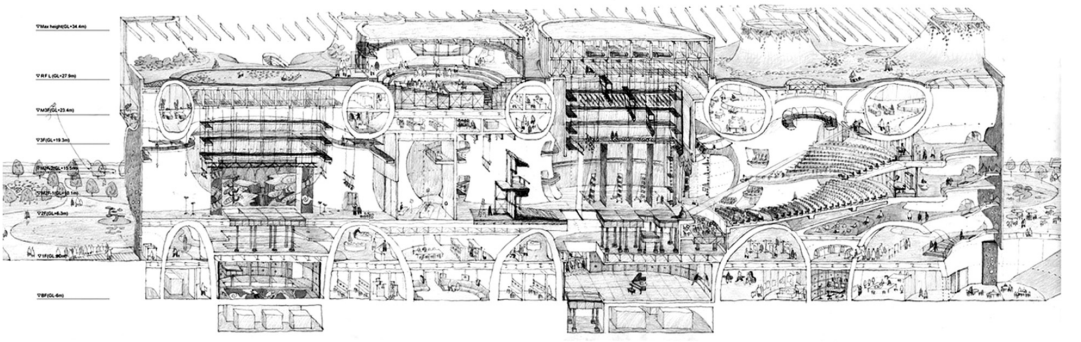


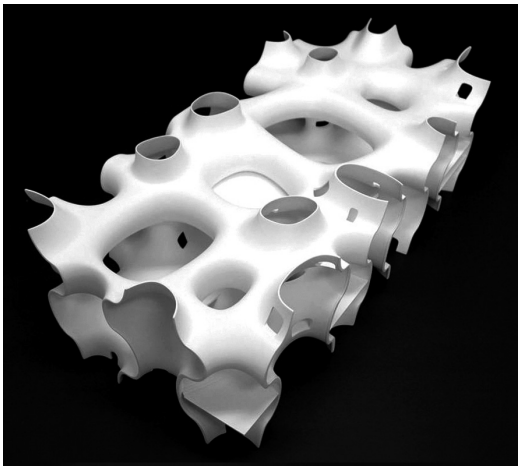
14/ M. Sasaki, Rei Naito, Ryue Nishizawa (SANAA), *Art Museum*, Teshima, 2010.

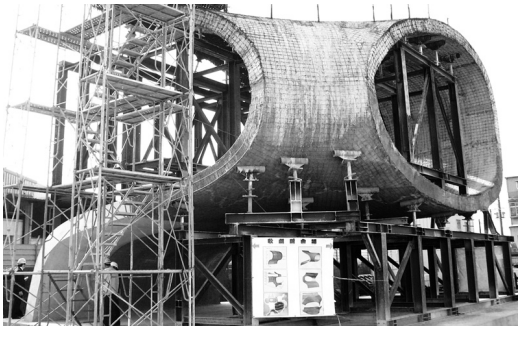
ti sul perimetro, era stata immaginata dall'architetto come una forma casuale, quasi un drappo di tessuto liberamente abbandonato sui supporti. Sasaki aveva approssimato con qualche difficoltà questa geometria libera attraverso *spline*, simili alle curve di Bezier; poi con il metodo agli elementi finiti questa forma era stata verificata strutturalmente e, con un lungo processo di tentativi ed errori, corretta localmente dove presentava eccessi di sollecitazione, fino a renderla razionale staticamente. Un processo lungo, definito noioso e senza alcuna scientificità, nella speranza arbitraria di convergere ad un risultato stabile: processo responsabile però della ricerca successiva, avviata a partire dal 2000, che lo conduce ad applicare il noto metodo della «Sensitivity Analysis» alla modellizzazione strutturale.

L'idea di partenza è che la forma perfetta coincida con quella che stabilisce nella copertura la minima energia di deformazione, riconoscendo in questa condizione la soluzione meccanicamente ottimale. Data una superficie di progetto, rendere minima l'energia di deformazione facendo variare un parametro è una operazione relativamente semplice, se viene affidata ad un potente processore elettronico e a software capaci di calcolare e ricalcolare rapidamente l'energia grazie al metodo agli elementi finiti (Sasaki dichiara di usare il già citato solutore Nastran). La prima applicazione, per il Kitagata Community Center di Gifu, consente ad Isozaki di scegliere una «forma attraente» con una rigorosa base meccanica tra quelle individuate alterando uno alla volta alcuni parametri progettuali della copertura già sostanzialmente disegnata e portando al minimo l'energia di deformazione. Nella seconda sperimentazione, il giardino botanico di Ito a Fukuoka, la grande copertura di 190 metri di lunghezza, 50 metri di larghezza e 40 centimetri di spessore viene girata come l'involto di una caramella per due volte: correggendo i parametri geometrici in modo da farla funzionare il più possibile come una membrana (minimizzando quindi le sollecitazioni di flessione), in *46 step* la forma schizzata dall'architetto evolve verso una configurazione a minima sollecitazione globale, sfruttando l'analisi delle variazioni differenziali dell'energia potenziale.

Forti di queste pionieristiche esperienze, con lo stesso metodo vengono strutturalmente ottimizzate la poetica copertura del crematorio *Meiso no Mori* (Foresta della Meditazione) a Kakamigahara (Gifu), completato nel 2006, ancora di Ito, e l'originalissima struttura dell'EPFL Rolex Learning Center di Losanna (2004-2010), progettata da SANAA. In quest'ultimo, mentre la copertura è sostenuta da una sottile e ben distribuita intelaiatura di acciaio e legno lamellare, il piano di calpestio, perfettamente parallelo alla copertura stessa (166 x 121 metri di ingombro a terra), come un tappeto traforato dolcemente ondulato (o una fetta di svizzero Emmentaler caduta a terra, come più cinicamente è stato detto), è una volta sottile di forma libera in cemento armato, ottimizza-







15-16-17/ C. Balmond, T. Ito, *Metropolitan Opera House*, 2010. Progetto, plastico, cantiere.

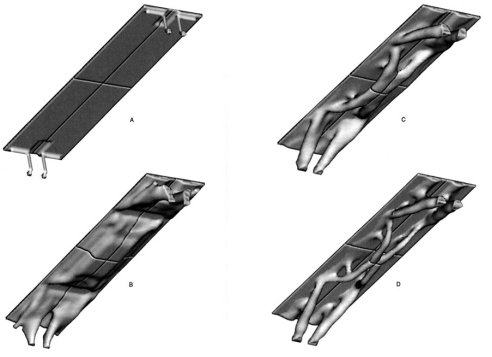
ta attraverso la Sensitivity Analysis.

Forme libere che, naturalmente, come era già capitato molti anni prima a Musmeci, si scontrano con le difficoltà costruttive. Le complesse casseforme implicano costi molto alti e anche l'armatura di tondini di acciaio deve essere ripensata: nel caso del Kitagata Center viene usato un sistema Trusswall, con l'armatura assemblata in tralicci resistenti, una specie di sistema Melan moderno; nel piccolo crematorio, invece, è stata montata una cassaforma usando 3700 punti di controllo, ed effettuando 5 getti distinti per evitare che il cemento a presa veloce scivolasse lungo le superfici più ripide e non garantisse alla copertura i 20 centimetri di spessore costante progettati. A Losanna, per sagomare la precisa cassaforma di legno sono stati tagliati con il laser 1400 pannelli, da 2,5x2,5 metri, ed effettuato il getto in continuo per due giorni di seguito, dall'11 al 13 luglio 2010.

Pur non avendo ancora potuto mettere in opera la tecnica per ragioni economiche, Sasaki ritiene che la soluzione migliore sarebbe una versione più costosa del ferrocemento di Nervi: lastre di acciaio sagomate immerse nel getto di conglomerato, a formare un materiale composito ma globalmente omogeneo. Non ha potuto sperimentarla nel Teshima Art Museum (2004-2010), progettato con Ryue Nishizawa di SANAA, quasi una goccia di cemento caduta sulla collina, che contiene l'installazione di vere gocce d'acqua dell'artista Rei Naito: guscio di forma libera, con due grandi aperture ovali, realizzato gettando i 25 centimetri di cemento bianchissimo su una controforma di terra lisciata con intonaco.

Forse invece Ito sta usando un procedimento siimile al ferrocemento nella Metropolitan Opera House di Taichung, attualmente in costruzione, progettato con la collaborazione di Balmond: oggetto fiabesco che – come segnala Marco Biraghi[9]– era anticipato dalle misteriose sculture esposte nella mostra del 1956 «This is Tomorrow», alla Whitechapel Art Gallery di Londra.

Sasaki non è però ancora soddisfatto: si tratta di processi di ottimizzazione delle prestazioni di una forma già data, già pensata dall'architetto, molto simili a quelli compiuti con i modellini fisici nella seconda metà del Novecento, anche se supportati dai calcoli dei computer. Per generare



18/ M. Sasaki, Generazione di forme ottimizzate mediante Extended ESO, 2005.

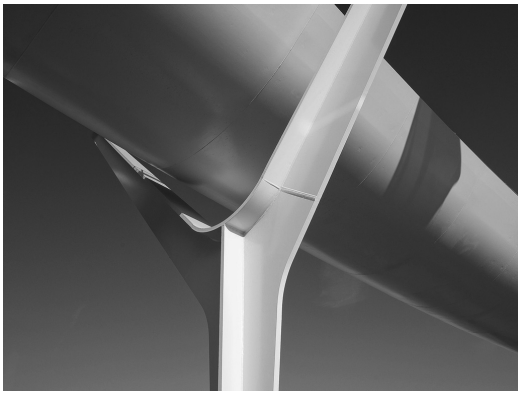


19/ M. Sasaki, A. Isozaki, *Qatar National Convention Center*, Doha, 2004-2011.

la forma perfetta dati i vincoli e i carichi, per creare da zero cioè la forma ottima, sceglie allora di affidarsi ad un algoritmo genetico: affronta con questo nuovo approccio, insieme ad Isozaki, il progetto presentato al concorso per la stazione della TAV a Firenze (2002), apparentemente facendo creare la forma dei supporti della copertura piana (di dimensioni generali pari a 400x40 metri), da un calcolatore. Il metodo di morfogenesi, ideato da Sasaki, è complesso da spiegare: si tratta dell'estensione del metodo ESO (Evolutionary Structural Optimization), l'ottimizzazione topologica che si basa sull'eliminazione progressiva delle parti della struttura che non lavorano, inefficienti, e che quindi risultano inutili[10]. Come tutti gli algoritmi genetici di ottimizzazione, il processo consiste nell'evoluzione, per un numero di generazioni necessarie fino a stabilizzare la specie risultante, di una popolazione di soluzioni che vengono via via selezionate in base all'idoneità alla sopravvivenza. Si tratta comunque di un approccio euristico, in cui serve l'indirizzamento dell'uomo, ma gli esiti sono interessanti: l'Extended ESO Method di Sasaki consente anche di aggiungere materia, oltre che di eliminarla, e lavora per isosuperfici (le superfici a sollecitazione omogenea). Per concretizzare le *flux structure*, come le ha definite Isozaki, frutto di questo spinto procedimento di evoluzione che punta all'uniforme resistenza e che si basa principalmente sulla forza di gravità come carico prevalente, sono serviti gli investimenti del paese con il più alto PIL pro capite del mondo, il Qatar, e il suo deserto architettonico. La forma del Qatar National Convention Center, inaugurato a Doha nel 2011, lungo 250 metri, sembra ripetere quella di un albero tradizionale locale (che forse aveva attecchito anche a Firenze, visto che a tutti gli effetti si tratta di una versione ridotta del progetto per la stazione). Per realizzare il contorto albero, però, in fase di costruzione, è stato necessario scomporre la struttura portante dalla pelle esterna: all'interno, infatti, c'è un complesso intreccio di tubi ottagonali di acciaio mentre l'esterno è assemblato con lamine di acciaio sagomate a semplice o a doppia curvatura. L'ingegnerizzazione del progetto, per rendere minime le difficoltà di trasporto – visto che i pezzi sono stati realizzati in Malesia e solo assemblati a Doha – è stata affrontata da Buro Happold, in particolare dal gruppo SMART (Software Modeling Analysis Research Technologies), utilizzando tre classi di software: Rhino, il modellatore 3D ideato da Robert McNeel & Associates; ANSYS, per il calcolo agli elementi finiti e Smartform, software di produzione interna del gruppo, che dialoga con i precedenti, ottimizza il numero di pannelli a curvatura semplice e invia l'informazione direttamente alle macchine per il taglio.

Anche se gli esempi più convincenti sembrano legati al cemento armato (e quindi ai cultori di





20-21/ L. Ney, Passerella pedonale *De Lichtenlijn*, Knokke, 2004-2007. Veduta, dettaglio.



22/ L. Ney, *De Oversteek bridge*, Nijmegen, 2010. Cantiere.

questo materiale, come sono i giapponesi), le strategie di sagomatura informatizzata sarebbero più adatte all'acciaio, con cui infatti lavora il giovane progettista belga Laurent Ney, incantato anche lui dall'ottimizzazione topologica. Per progettare la passerella pedonale *De Lichtenlijn* di Knokke, si è affidato ad un algoritmo capace di ottimizzare il peso proprio della struttura in funzione della deformazione e della tensione di snervamento. La routine di ottimizzazione si combina ovviamente con il metodo agli elementi finiti e usa il metodo dell'iterazione di punto fisso. Oltre ad ottenere la distribuzione migliore del materiale, l'algoritmo ha suggerito la forma ottimale, individuando le parti inutili – e quindi da eliminare – e migliorando il comportamento meccanico complessivo della struttura.

Nei procedimenti di ottimizzazione topologica, i risultati possono risultare addirittura incompatibili con la costruzione: nel caso del ponte di Knokke, un attento studio che mirava ad ottimizzare la variazione dello spessore della lastra di acciaio per massimizzare la rigidezza, suggeriva spessori minimi troppo bassi, pari a 3 millimetri. Nell'opera realizzata lo spessore della lastra di acciaio oscilla più ragionevolmente tra 10 e 30 millimetri.

«Designing a bridge for a city is like creating a scene for the urban environment», spiega Ney in merito ad un altro ponte progettato per la piccola città di Nijmegen, nei Paesi Bassi, la cui amministrazione ha deciso di impostare il bando vincolando rigidamente il costo ma fornendo la precisa indicazione di essere alla ricerca di un «city bridge», un nuovo simbolo per la città. Nonostante il riferimento alla scenografia, anche questo ponte di Ney è frutto di un articolato processo progettuale di ottimizzazione statica.

Nel recente volume *Shaping Forces*[11], Ney suggerisce ai progettisti di rinunciare alle tipologie note, quelle messe a punto negli ultimi due secoli e che costituiscono il vocabolario predefinito delle strutture. Secondo Ney esiste un numero infinito di forme che sono compatibili con la trasmissione ottimale delle forze in una data struttura: la libertà creativa è proprio garantita dal fatto che le soluzioni sono infinite. Il punto di partenza della sua ricerca è dunque la definizione di una topologia. L'obiettivo è individuare strutture modellate dalle forze, «shaped by forces», che sono l'opposto delle strutture arbitrariamente modellate dall'uomo.

L'approccio è lo stesso adottato da Musmeci che abbandona la tipologia del ponte ad arco per



23/ S. Calatrava, Ponte della Pace, Calgary, 2007-2012.

cercare il ponte a superficie minimale equicompressa: l'ambizione di individuare una forma inedita ma ottimale è la stessa. E gli esiti analoghi. A parte il vizio di Musmeci di affidarsi comunque al cemento armato, materiale di elezione anche in Italia, l'originalissima sagoma del ponte sul Basento gioca con la variazione topologica in modo molto simile alla lastra di acciaio continua del ponte di Knokke: il ponte di Potenza è solo più drammatico, e sulla sua superficie è impressa indelebilmente la fatica della costruzione, leggibile nella complessità dell'assemblaggio delle tavole di legno della cassaforma che hanno lasciato la loro impronta sul getto.

Geometrie particolarmente complicate

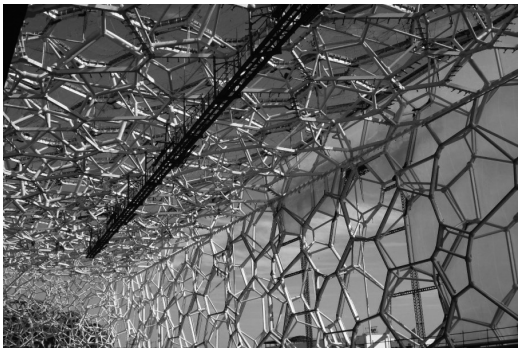
Se la ricerca sul continuo appassiona per le potenzialità delle trasformazioni topologiche ottimizzate, la ricerca recente sulle strutture ha sorpreso per le sperimentazioni anche nel campo del discreto.

L'attrazione della geometria complessa ha coinvolto, per esempio, le strutture reticolari spaziali, completamente rinnovate rispetto alle noiose versioni del secondo dopoguerra.

Il primo processo di ottimizzazione è stato la fusione delle strutture reticolari con le tensostrutture: la consapevolezza che la trazione da sola non riesca a risolvere l'intero sistema costruttivo (richiedendo comunque importanti vincoli di ritenuta a terra) ha spinto a reintegrare nel gioco delle forze ideali anche la compressione. Le nuove «tensegrity», derivate dalle ricerche di inizio anni '60 di Snelson e divulgate da Fuller, adottano il meccanismo di combinare aste compresse con funi tese (nella migliore strategia dell'ottimizzazione strutture), definendo una configurazione complessiva che evoca quella di una nuvola di elementi tesi continui nella quale galleggiano pochi discontinui elementi compressi. Attraverso il lavoro di rielaborazione e fattibilità di David Geiger, prematuramente interrotto, oggi alcune tra le più grandi coperture del mondo sono tensegrity e il vocabolario tradizionale delle costruzioni soffre nel tentativo di descrivere il meccanismo di *aspension* a più livelli di queste gigantesche impalcature in equilibrio instabile.

Ma la moda della geometria complessa ha influenzato tutti e per capirne la diffusione basta osservare le ultime strutture di Santiago Calatrava: dopo averci abituato a soluzioni ostinatamente asimmetriche, perfettamente omogenee dal





24-25/ *Water Cube*, Pechino, 2003-2008, progetto strutturale: T. Carfrae (Arup Australia). Dettaglio, cantiere.



26/ Stadio Nazionale, Pechino, 2003-2008, progetto strutturale: Arup Sport.

punto di vista cromatico, risolte con pochi raffinati candidi elementi in equilibrio precario, a volte dinamico, si è recentemente fatto tentare da geometrie simmetriche e reticolate.

La doppia vela a copertura dello Stadio del nuoto a Roma Tor Vergata, progettata nel 2003 e ancora non completata, o il ponte della pace a Calgary (2008-2012) sono espressione di questa nuova passione.

Il ponte di Calgary, di 130 metri di luce, per esempio, è una trave reticolare appoggiata sulle sponde, configurata come un tubo parzialmente chiuso da «foglie» trasparenti, la cui geometria si può sintetizzare con un intreccio simmetrico di eliche di acciaio saldato che si avvolgono intorno ad una sezione ellittica che, solo per ragioni costruttive è stata poi trasformata in una sequenza di archi a curvatura costante. Un ponte rosso e bianco, simmetrico, reticolare: una rivoluzione copernicana nel lavoro di Calatrava.

Si tratta comunque di forme generate in modo arbitrario, ideazioni astratte di carattere matematico, come gli hypar di cemento armato in spessore sottile del suo tardo amico Candela o le superfici rigate usate per cambiare dinamicamente la sezione dei pilastri di Nervi. Nulla a che fare, per esempio, con l'Helix Bridge di Arup realizzato nella Marina Bay di Singapore (2010), ispirato alla struttura a doppia elica del DNA.

Dai tempi delle sperimentazioni di Robert Le Ricolais sull'ottimizzazione per analogia naturale, si è diffuso sempre di più nella progettazione strutturale un approccio biomimetico, che sfruttando le potenzialità della morfogenesi digitale mira a ricalcare l'ottimizzazione già compiuta dalla natura, imitandone le soluzioni.

Emblematico di questo orientamento fondato sulla geometria complessa è il Water Cube (2003-2008) di Pechino (un prisma di 177x177x31 metri). Tristram Carfrae, ingegnere capo del progetto strutturale, in forza presso lo studio Arup Australia, lo definisce una scatola fatta di bolle (alcune però grandi anche 9 metri). L'intelaiatura tridimensionale di 22000 tubi d'acciaio circolari, saldati a 12000 nodi sferici, genera un motivo apparentemente casuale: a suggerire l'idea della schiu-

ma è il doppio strato di membrana ETFE (materiale simile al Teflon) da 0,2 millimetri, costantemente in pressione, vincolata ai lati dei poligoni perimetrali, che crea, sia all'interno che all'esterno, 4000 cuscini d'aria che indifferenziatamente risolvono sia le pareti (15 tipi di bolle) che la copertura (7 tipi di bolle). Come prevedibile, la copertura è stata inquadrata in tutte le riprese aeree olimpiche ed è diventata iconica della costruzione almeno quanto i prospetti, se non di più.

La geometria delle aste, però, è frutto di una ricerca scientifica con origini antiche nel campo della tassellazione dello spazio e soprattutto della superficie minima. Ricerca che, in tempi moderni, parte dalla questione aperta da William Thomson (più noto come Lord Kelvin) che cercava di caratterizzare l'etere, il fluido che si credeva consentisse la propagazione della luce, e che si domandava quale fosse il modo per dividere lo spazio in celle di uguale volume e minima estensione superficiale. Kelvin risolve il problema nel 1887 combinando poliedri di 14 facce (8 esagonali e 6 quadrate) ma la sua congettura è stata smentita nel 1993, dai fisici irlandesi Denis Weaire e Robert Phelan. La nuova schiuma ideale è individuata nella combinazione di 2 dodecaedri (poliedro platonico a 12 facce pentagonali regolari) e 6 poliedri a 14 facce (2 esagonali e 12 pentagonali), con una riduzione dell'estensione superficiale necessaria di circa il 3 per mille: non è dimostrato che sia la soluzione ottima, ma è certamente migliore di quella proposta da Kelvin.

Nel progettare la struttura della piscina, Carfrae ha generato una schiuma Weaire-Phelan modificata (le celle non sono tutte di uguale volume) molto più grande delle dimensioni necessarie, l'ha ruotata di 60 gradi e poi ha ritagliato i poliedri con piani ortogonali in modo da ricavare il pacchetto continuo pareti-copertura. Questa rotazione conferisce alla trama un aspetto più disordinato ma, nonostante l'apparente casualità, la combinazione riprodotta con una struttura reticolare spaziale è ad altissimo grado di ripetizione: solo quattro lunghezze diverse di aste e tre tipi diversi di nodi. La struttura è dunque ottimizzata in termini di costruibilità ma anche di leggerezza e si rivela straordinariamente antisismica: per realizzare gli elaborati esecutivi e i calcoli si è fatto ricorso a software appositamente implementati, grazie ai quali, completata la fase progettuale ideativa, in una settimana sono stati stampati automaticamente tutti i disegni tecnici utili per la realizzazione dei pezzi e per la costruzione.

L'approccio morfogenetico non deve però ingannare: in alcuni casi, si tratta di forme arbitrarie che, se anche evocano l'imitazione di modelli naturali, come il nido d'uccello, sono al contrario straordinarie scenografie barocche. Lo Stadio Nazionale di Pechino (2003-2008), disegnato da Herzog & De Meuron con ArupSport (come l'Allianz Arena di Monaco), gioca con la geometria ingannando l'osservatore: nell'intreccio complicato degli elementi, tutte le sezioni hanno dimensioni 1,2x1,2 metri, sia quelle principali portanti che definiscono i 24 telai incernierati che incrociandosi generano una struttura tridimensionale, sia gli elementi secondari portati che hanno un ruolo solo «decorativo» di facciata, per sostenere le scale e definire la geometria dell'insieme. Le strutture portanti le tribune sono infine del tutto autonome e celate dall'intreccio. Il software Catia si è rivelato uno strumento utilissimo nella modellazione della geometria, essendo basato su un sistema parametrico per componenti: questo significa, per esempio, che alcuni valori dimensionali possono essere modificati anche a modellazione molto avanzata ed essendo il programma associativo, i cambiamenti si propagano in tutta la struttura. Per le analisi statiche è basato un comune SAP2000 e Oasys LS-DYNA, un software sviluppato in proprio da Arup.

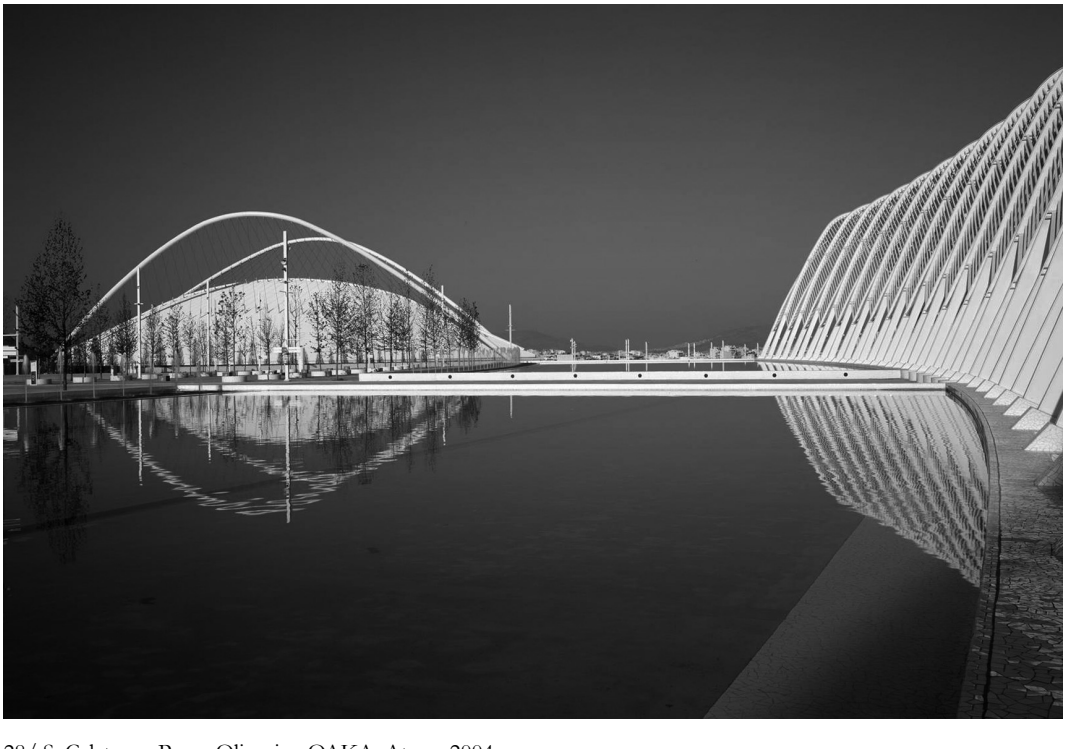
Acrobatiche evoluzioni del principio di minimo

Se volessimo cercare un fondamento comune all'ingegneria strutturale moderna, nella sua fase al tempo stesso iniziale e classica, lo troveremmo in un assunto che ha conservato a lungo l'autorità indiscutibile di un assioma: il principio di minimo. Nella cultura ingegneristica, di chiara e univoca impostazione positivista, il progetto strutturale è inteso essenzialmente come ricerca della soluzione migliore di un problema: ad orientare, in ogni fase, tale ricerca è la tensione verso il polo del minimo.

Per l'ingegnere, il minimo è razionalità (sia che ne ritrovi il paradigma nella natura oppure, all'opposto, nella scienza). È economicità (che si riferisce alla soluzione strutturale e quindi al materiale impiegato, ma anche al modo di costruire e ai suoi costi). È bellezza (intesa come essenzialità, minimezza figurativa). Ecco perché, con diverse interpretazioni, in contesti anche molto differenti, la stessa assoluta fedeltà al principio di minimo si potrebbe riscontrare nell'opera di Telford, di Eiffel, di Torroja, di Maillart, di Freyssinet, di Nervi. Nel mondo dell'ingegneria classica, scien-



27/ S. Calatrava, Stadio del nuoto, Tor Vergata, Roma, 2012.



28/ S. Calatrava, Parco Olimpico OAKA, Atene, 2004.



29/ Buro Happold, *Infinity Loop Bridge*, Zhuhai Shizimen, Cina, progetto 2012.

za applicata per antonomasia, due valori – di natura e livello diverso – sono tenuti in eguale considerazione: la qualità dell'opera sul piano artistico; la correttezza della soluzione sul piano pratico-professionale. Etica ed estetica coincidono e il principio di minimo sancisce l'identificazione.

È legittimo, dunque, di fronte alle varie esperienze riconducibili nella nuova prospettiva di un'ingegneria pop, porre questa domanda: con l'esigenza di spettacolarità posta dalla committenza (e dall'utenza) all'opera strutturale, da una parte, e con le radicali trasformazioni intervenute all'interno dell'ingegneria, nelle teorie scientifiche, negli strumenti di calcolo, nell'elaborazione progettuale, nelle tecnologie, dall'altra, come si è modificata l'influenza del principio di minimo? Vale ancora?

Sommario e lacunoso, l'excursus svolto non può darci risposte; solo qualche indicazione, che ricapitoliamo senza formulare conclusioni.

Su un primo fronte il principio di minimo resta al centro della progettazione, che anzi tende a risolversi interamente come operazione di ottimizzazione strutturale. È una sperimentazione che si riallaccia alla storica, ininterrotta linea tematica dell'uniforme resistenza; linea che trova già nel lavoro di Musmeci un punto di accelerazione: eliminando la variabile contaminante della tecnica costruttiva, il problema della ricerca della forma resistente minima aspira alla purezza scientifica. Così impostato, il problema non solo è ancora ritenuto attuale, ma può essere molto più agilmente esplorato (come del resto aveva profetizzato lo stesso Musmeci) con l'ausilio possente della modellazione digitale e utilizzando le teorie della ricerca operativa. Per questa via le forme continue libere di Sasaki (risultanti dalla Sensitivity Analysis o dalla applicazione di un algoritmo genetico) o quelle di Ney, modellate dalle forze attraverso appositi algoritmi, o in modo diverso le tensegrity, risultano generate attraverso un procedimento di sfruttamento ottimale del materiale. Qual è la differenza tra questi impieghi (strumentali) del principio di minimo e il ruolo di faro della progettazione che esercitava nella fase classica? Paradossalmente, la strategia del minimo spreco di materiale, in queste nuove esperienze è destinata non a ridurre i costi i quali, al contrario, nella difficoltà di costruzione di forme complesse, lieviteranno incontrollabilmente, ma a rispondere alle esigenze di spettacolarità. Che è in gran parte affidata al carattere del tutto inedito delle figure. Per applicare il procedimento in tutta la sua purezza, infatti, oltre a prescindere dai condizionamenti costruttivi, occorre anche liberarsi di qualsiasi memoria delle tipologie strutturali tradizionali. Alla continuità storica ricercata nell'impostazione scientifica fa riscontro il radicale antistoricismo nei riferimenti formali e tipologici.

Su un fronte per certi versi opposto, la spettacolarità della figura strutturale sembra far leva proprio sull'inosservanza del principio di minimo.

Gli esempi più emblematici di questa linea sperimentale sono i ponti tipici di Calatrava. Qui l'immagine evidenzia, prima ancora della forma, il gioco delle forze con cui sono risolti l'equilibrio, la stabilità e la resistenza. Ma la figura non rispetta le regole dell'essenzialità, della semplicità, dell'ovvietà, della naturalezza che distinguono la

struttura classica. Al contrario l'equilibrio appare improbabile, ambiguo, misterioso; il percorso delle forze tortuoso e ridondante. E proprio da questi spiazzamenti nasce la meraviglia dello spettatore, messo di fronte a novelli «complessi plastici per la ricostruzione futurista dell'universo».

Anche per questi marchingegni si può trovare un precedente in un prodotto dell'ingegneria italiana: il ponte strallato omogeneo di Riccardo Morandi. Qui il peso dell'impalcato è portato su, fino a quasi cento metri, prima di essere riportato a terra da un gigantesco cavalletto. E tutte le aste – compresse, tese, inflesse – sono modellate in cemento armato precompresso secondo un criterio di omogeneità di comportamento (che Calatrava in seguito tradurrà in omogeneità cromatica). La differenza è che qui la struttura è ancora simmetrica: e questo ne consente la costruzione senza impalcature provvisorie. Il principio di minimo, almeno in parte, è ancora rispettato. (Per quanto, già nel viadotto della Magliana, la soluzione asimmetrica, giustificata dal terreno in frana, trasforma il portale in una moderna, monumentale porta di accesso a Roma dando soddisfazione alle richieste della committenza, in cerca di simboli ed icone).

C'è poi una terza area dove il principio di minimo è liberamente reinterpretato come ottimizzazione, non più della struttura, ma della forma. Qui l'ingegneria torna a più stretto contatto con l'architettura. È la strada in cui si provano i più sofisticati strumenti della modellazione digitale (e questo è terreno dell'ingegneria), ma per generare in prima battuta forme geometriche ultracomplesse, con procedimenti ispirati al mondo biologico (e questo riporta il progetto sul terreno dell'architettura). Messo in secondo piano l'aspetto strutturale, torna al centro dell'attenzione il rapporto tra la forma e la sua costruibilità. La combinazione di poliedri del Water Cube o gli informi grovigli di innumerevoli aste del Bird's Nest, a prima vista di impossibile realizzazione, sono invece gestiti da processi di ottimizzazione che riducono il numero degli elementi diversi e da macchine a controllo numerico che rendono possibile, se non addirittura agevole, la traduzione materica delle complicatissime forme nello spazio.

Le modificazioni che il principio di minimo subisce nel passaggio dalla fase classica (peraltro, lo ripetiamo, tenuta viva da esperienze tutt'altro che secondarie) alle attuali ingegnerie pop appaiono in una luce particolare se considerate dal punto di vista dei costi.

Nell'opera di Nervi, che più di ogni altra rappresenta e prolunga la tradizione moderna, il principio di minimo, pur sostenuto da un alto significato filosofico, ispira anche, banalmente, la ricerca della soluzione meno costosa e più semplice da eseguire.

Nelle Pop Structures, al contrario, l'intenzione di realizzare l'opera appariscente e attrattiva giustifica soluzioni costose. Ed è proprio questo atteggiamento che riconduce alcuni ingegneri sotto l'etichetta dell'Archistar System. Come valutare questa propensione verso i costi elevati? Da una parte bisogna tener conto dell'attuale mercato.

Come la grande opera di architettura, anche la struttura ingegneristica di rilevanza internazionale è destinata ad entrare in una dinamica di fruizione mediatica di portata planetaria. In questo caso il sistema di riferimento per valutare i costi cambia radicalmente. Lo dimostra il cosiddetto «effetto Bilbao». L'antieconomicità delle scenografiche superfici di titanio e delle complicatissime impalcature nascoste sono state ampiamente ripagate dal milione di visitatori che ogni anno, dal 1997, visita il museo (nel 2000 l'impatto economico sull'area basca era già sette volte superiore all'investimento iniziale; anche se è sempre difficile dire in questi casi quanto abbia inciso la gestione illuminata del museo e quanto la forza di attrazione dell'architettura).

D'altra parte, però, numerosi casi più recenti dimostrano che l'effetto Bilbao si ripete sempre più raramente. Gli impianti per le olimpiadi di Atene del 2004, per citare il caso più eclatante, rientrano in un colossale investimento infrastrutturale urbano, pericolosamente basato su un debito spostato nel futuro (operazione finanziaria nota come cross-currency swap). In questo caso l'ipotesi di un rientro attraverso l'incremento del turismo è stata clamorosamente smentita ed è difficile stabilire in quale misura lo stato di abbandono delle fantasmagoriche strutture di Calatrava e di altri sia una conseguenza dell'attuale crisi o quanto il loro costo esagerato abbia viceversa contribuito a determinarla.

Un'ultima notazione sul ruolo dell'Italia nell'evoluzione postmoderna dell'ingegneria. Più volte abbiamo sottolineato[12] come la scuola italiana, che conosce uno straordinario successo negli anni del boom economico, sia frutto dell'anacronistico prolungamento della tradizione ottocentesca, in un paese che, dopo un persistente, cronico ritardo, arriva di colpo alla modernizzazione. Nella generazione di Nervi, Morandi, Musmeci,

Zorzi rivive in un'ultima, gloriosa rappresentazione la figura dell'ingegnere polivalente ottocentesco. Su questo punto la prospettiva storica non lascia dubbi: l'ingegneria Made in Italy degli anni sessanta non è l'inizio di una nuova stagione, ma è il momento culminante e conclusivo di un lungo processo sviluppato nei decenni precedenti. Subito dopo, a parte qualche strascico, l'ingegneria italiana scompare dalla scena.

Il sondaggio sugli sviluppi successivi a quella stagione, necessariamente allargato al panorama mondiale, conferma questa visione d'insieme, ma ci fa scoprire anche che nella sperimentazione dei progettisti italiani degli anni sessanta si nascondono alcune sorprendenti, profetiche anteprime di linee sperimentali dell'attuale ingegneria pop: gli studi, non solo teorici, di Musmeci prefigurano le odierne ricerche sull'ottimizzazione strutturale di superfici continue; il cavalletto strallato di Morandi anticipa i giocattoli futuristi di Calatrava ed altri.

Intravista questa nascosta vena innovatrice, suscita ancor più rammarico la constatazione che, all'interno del fronte sperimentale – inevitabilmente sovranazionale – che negli anni seguenti raccoglie le ispirazioni dell'ingegneria italiana, proprio questa brilli per la sua assenza.

Note

[1] J.L. Borges, *Storia universale dell'infamia. Prefazione all'edizione del 1954*, in D. Porzio (a cura di), *Jorge Luis Borges. Tutte le opere*, serie I Meridiani, Arnoldo Mondadori Editore, Milano 1984, p. 443.

[2] Sul lavoro di Conzett, cfr. M. Mostafavi (a cura di), *Structure as Space. Engineering and Architecture in the Works of Jürg Conzett and His Partners*, AA Publications, Londra 2006 e il saggio di Bruno Reichlin in questo stesso volume.

[3] K.E. Kurrer, *The History of the Theory of Structures. From Arch Analysis to Computational Mechanics*, Ernst & Sons, Berlino 2008.

[4] M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin, L.J. Topp, *Stiffness and deflection analysis of complex structures*, «Journal of the Aeronautical Sciences», 23, 1956, pp. 805-824.

[5] Michell affrontava la teoria del minimo strutturale nel piano riferendosi a sua volta ad uno scritto di James Clerk Maxwell del 1869 sulle strutture reticolari. Cfr.: A.G.M. Michell, *The limits of economy of materials in frame-structures*, «Philosophical Magazine», 47, 1904, pp. 589-597; C. Maxwell, *On Reciprocal Figures, Frames, and Diagrams of Forces*, in *Scientific Papers*, II vol., Cambridge University Press, 1890, pp. 161-207.

[6] S. Musmeci, *La Statica e le strutture*, Cremonese, Roma 1971, p. 83.

[7] S. Musmeci, *Il calcolo elettronico e la creazione di nuove forme strutturali*, in M. Zevi (a cura di), *Architettura & Computer*, Bulzoni editore, Roma 1972, pp. 147-166.

[8] M. Sasaki, *Flux Structure*, TOTO, Tokyo 2005.

[9] M. Biraghi, T*his Was Really Tomorrow*, www.gizmoweb.org, articolo del 28 aprile 2011.

[10] L'ESO Method, molto diffuso oggi, è lo stesso usato dal BLACK BOX group dei SOM di Chicago che lo hanno adattato ai grattacieli.

[11] S. Adriaenssens, S. Devoldere, L. Ney, I. Strauven, *Shaping Forces. Laurent Ney*, A+Editions, Bruxelles 2010.

[12] Per un quadro sul tema, cfr. S. Poretti, *Un tempo felice dell'ingegneria italiana. Le grandi opere strutturali dalla ricostruzione al miracolo economico*, «Casabella», 739-740, 2006, pp. 6-11; T. Iori, *L'ingegneria del «miracolo italiano»*, in T. Iori, S. Poretti (a cura di), *Ingegneria italiana*, numero monografico di «Rassegna di architettura e urbanistica», 121-122, gennaio-agosto 2007, pp. 33-59.