



Università  
della  
Svizzera  
italiana

Accademia  
di  
architettura

Istituto  
di storia e teoria  
dell'arte  
e dell'architettura

# Form-Finding, Form-Shaping, Designing Architecture

a cura di / edited by  
Sonja Hildebrand, Elisabeth Bergmann

Mendrisio  
Academy  
Press

Questo libro trae origine dal SNSF-International Exploratory Workshop *Form-Finding, Form-Shaping, Designing Architecture. Experimental, Aesthetical, and Ethical Approaches to Form in Recent and Postwar Architecture* (Mendrisio, 10-11 ottobre 2013).

Coordinamento editoriale  
Tiziano Casartelli

Cura redazionale  
Elisabeth Bergmann

Redazione  
Michael Robertson (testi in inglese)  
Gabriele Neri (testi in italiano)

Progetto grafico  
Andrea Lancellotti

Impaginazione  
Florentin Duelli, Alberto Canepa

In copertina  
Elaborazione grafica da *Seifenblasen / Forming Bubbles* (Mitteilungen des Instituts für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart 18 / IL 18), Stuttgart 1987.

La pubblicazione ha avuto il sostegno  
del Fondo Nazionale Svizzero per la Ricerca Scientifica



e della Boner Stiftung für Kunst und Kultur.

L'editore è a disposizione di quanti vantassero diritti sulle immagini pubblicate.

© 2015 Accademia di architettura, Mendrisio  
Università della Svizzera italiana

# Form-Finding, Form-Shaping, Designing Architecture

Experimental, Aesthetical, and Ethical  
Approaches to Form in Recent  
and Postwar Architecture

Approcci sperimentali, estetici ed etici  
alla forma in architettura, dal dopoguerra ad oggi

a cura di / edited by  
Sonja Hildebrand, Elisabeth Bergmann

Mendrisio Academy Press / Silvana Editoriale

Sommario  
Table of contents

9	Pathways to Form. Frei Otto and Beyond <i>Sonja Hildebrand, Elisabeth Bergmann</i>	113	Le costruzioni in legno dell'IBOIS. Forme curvate, intessute, intrecciate: una conversazione con Yves Weinand <i>Elisabeth Bergmann</i>
17	«A man a-riding upon nawthin'». Light Structures and New Mobility Cultures Around 1900 <i>Kurt Möser</i>	131	Towards an Expanded Concept of Form. Gottfried Semper on Ancient Projectiles <i>Sonja Hildebrand</i>
33	Pensare in piccolo per costruire in grande. Teoria, prassi e cultura del modello in scala ridotta nella ricerca della forma strutturale nel XX secolo <i>Gabriele Neri</i>	145	Within the Technical Image. An Alternative Reading of Contemporary Swiss-German Architecture <i>Roberta Grignolo</i>
49	Capturing the Incalculable. Frei Otto's Experimental Models <i>Daniela Fabricius</i>	159	Rem Koolhaas and Oswald Mathias Ungers. A Plausible Relationship Between the Formal and the Social? <i>Lara Schrijver</i>
65	Anti-Monumental Anti-Nationalist National Monumentality. The Postwar Politics of Form-Finding <i>Sean Keller</i>	175	Indice dei nomi
77	La "filosofia architettonica" di Frei Otto. I concetti di forma, estetica ed etica e la loro ricezione <i>Elisabeth Bergmann</i>		
97	Stuttgart SmartShell. A Full-Scale Adaptive Shell Structure <i>Stefan Neuhäuser, Martin Weickgenannt, Christoph Witte, Walter Haase, Oliver Sawodny, Werner Sobek</i>		



Figura 1.  
Dettaglio del modello in  
scala 1:15 del grattacielo  
Pirelli (Archivio Storico  
ISMES).

Gabriele Neri

## Pensare in piccolo per costruire in grande

Teoria, prassi e cultura del modello in scala ridotta  
nella ricerca della forma strutturale nel XX secolo

Durante il XX secolo il modello in scala ridotta ha rappresentato per molti progettisti un mezzo indispensabile per affrontare la definizione della forma strutturale. Infatti, se anche nei secoli precedenti il modello fu utilizzato non soltanto per definire questioni di tipo compositivo ed estetico ma anche di tipo tecnico e strutturale,<sup>1</sup> i progressi scientifico-tecnologici avvenuti tra Ottocento e Novecento (messa a punto di nuove teorie fisico-matematiche, di nuovi strumenti di misura, nuovi materiali eccetera) hanno reso possibile lo sviluppo di sofisticate procedure sperimentali di verifica e gestione delle variabili statiche di strutture complesse, spesso sopperendo ai limiti delle coeve formulazioni teoriche della scienza delle costruzioni. Tra i numerosi ingegneri e architetti che nel Novecento ricorsero con frequenza al modello in scala ridotta in funzione della progettazione strutturale si possono citare Pier Luigi Nervi, Eduardo Torroja, Yoshikatsu Tsuboi (per gli edifici di Kenzo Tange, ma non solo), Heinz Hossdorf, Ove Arup, Frei Otto, Kenzo Tange, Sergio Musmeci e molti altri.

Analizzando queste sperimentazioni da diversi punti di vista,<sup>2</sup> si comprende che dietro alle differenziazioni di tipo tecnico del singolo esperimento – legate al materiale utilizzato, alla scala del modello e al compito specifico – vi sono diversi tipi di approccio al problema della forma strutturale, aiutati o favoriti proprio dalla pratica sul modello. Nei limiti del presente contributo, è possibile far emergere almeno due diversi modi di concepire la genesi e lo sviluppo della forma strutturale, che si rendono evidenti incrociando l'analisi di casi-studio peculiari con brani della produzione teorica di alcuni degli autori citati. Da un lato, infatti, è possibile rintracciare una concezione del modello come strumento di verifica di una forma strutturale già in buona parte definita a priori da parte del progettista; dall'altro, invece, emerge la volontà di superare questo tipo di logica utilizzando il modello per trovare (e non solo verificare) una forma ottimale.

In questa duplice visione della ricerca sperimentale e del ruolo del modello come strumento di lavoro – due visioni che spesso tendono a contaminarsi, piuttosto che restare freddamente distinte – il modello diventa dunque il veicolo privilegia-

to nel passaggio dalla mente alla materia reale: uno strumento tecnico, certamente, ma anche un manufatto simbolico nel quale si concentra la forza potenziale del progetto.

### Form-checking

Rispetto alla prima categoria individuata appare emblematico il notevole sviluppo della modellazione strutturale nel corso del Novecento, una tecnica sperimentale basata sull'utilizzo di speciali modelli in scala ridotta sui quali era possibile riprodurre le condizioni che una determinata struttura avrebbe dovuto sopportare una volta costruita (ad esempio, peso proprio, carico del vento, azioni sismiche eccetera). Questi modelli infatti corrispondono all'opera da realizzare non soltanto dal punto di vista geometrico ma anche in relazione ad altri tipi di grandezze influenti per l'analisi del loro comportamento statico,<sup>3</sup> secondo una precisa e complessa similitudine tra modello e prototipo.<sup>4</sup> Tralasciando in questa sede le pionieristiche esperienze condotte negli Stati Uniti negli anni Venti per i grandi impianti idroelettrici,<sup>5</sup> un contributo decisivo per lo sviluppo di questa tecnica fu dato da due dei maggiori protagonisti dell'ingegneria strutturale del Novecento: Eduardo Torroja e Pier Luigi Nervi. Entrambi, infatti, all'inizio degli anni Trenta, trovandosi in difficoltà nella verifica delle loro complesse strutture, individuano nel modello in scala ridotta uno strumento capace di superare le limitazioni intrinseche nella teoria della scienza delle costruzioni, che a quei tempi sembrava inadeguata a restituire e governare in toto il comportamento di un materiale sorprendente ma anche complicato (in quanto non omogeneo) come il cemento armato.

Nel 1933 l'ingegnere spagnolo stava studiando la copertura del Gran mercado di Algeciras (progettato con l'architetto D. Manuel Sánchez Arcas), costituita da una calotta sferica di 47,6 m di luce in appoggio su otto supporti collegati da un anello poligonale post-teso. Come scritto nella relazione tecnica, oggi conservata al CEHOPU di Madrid (Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo), la complessità delle equazioni adatte a risolvere questo problema statico rendevano il processo di calcolo «praticamente casi inabordable» e comunque non esaustivo, dal momento che non sarebbe stato possibile tenere in considerazione le deformazioni non elastiche agenti nel cemento.<sup>6</sup> Torroja decise allora di affrontare il problema attraverso il metodo sperimentale, e lo stesso anno fondò a Madrid l'ICON (Investigaciones de la Construcción), un'impresa privata per ricerche sperimentali legate alle costruzioni. La copertura del mercato di Algeciras fu così riprodotta e verificata su un modello in scala 1:10, e negli anni successivi la stessa tecnica venne usata per verificare molti altri progetti, tra cui la copertura del Frontón Recoletos di Madrid (modello in microcalcestruzzo, scala 1:10, testato nel 1935), formata da una volta sottile cilindrica a due lobi disuguali con una luce di 55 m. Nel corso degli anni Torroja sarà sempre più coinvolto nel mondo della modellazione, e figurerà tra i fondatori di quello che oggi si chiama Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.<sup>7</sup>

In Italia, nel 1935, Pier Luigi Nervi stava invece progettando la complessa struttura delle sue celebri aviorimesse in cemento armato, scontrandosi con la difficoltà di tradurre in formule una struttura che si allontanava dalle tipologie strutturali allora utilizzate. Come ribadì in più occasioni, l'ingegnere aveva infatti progettato l'ardi-

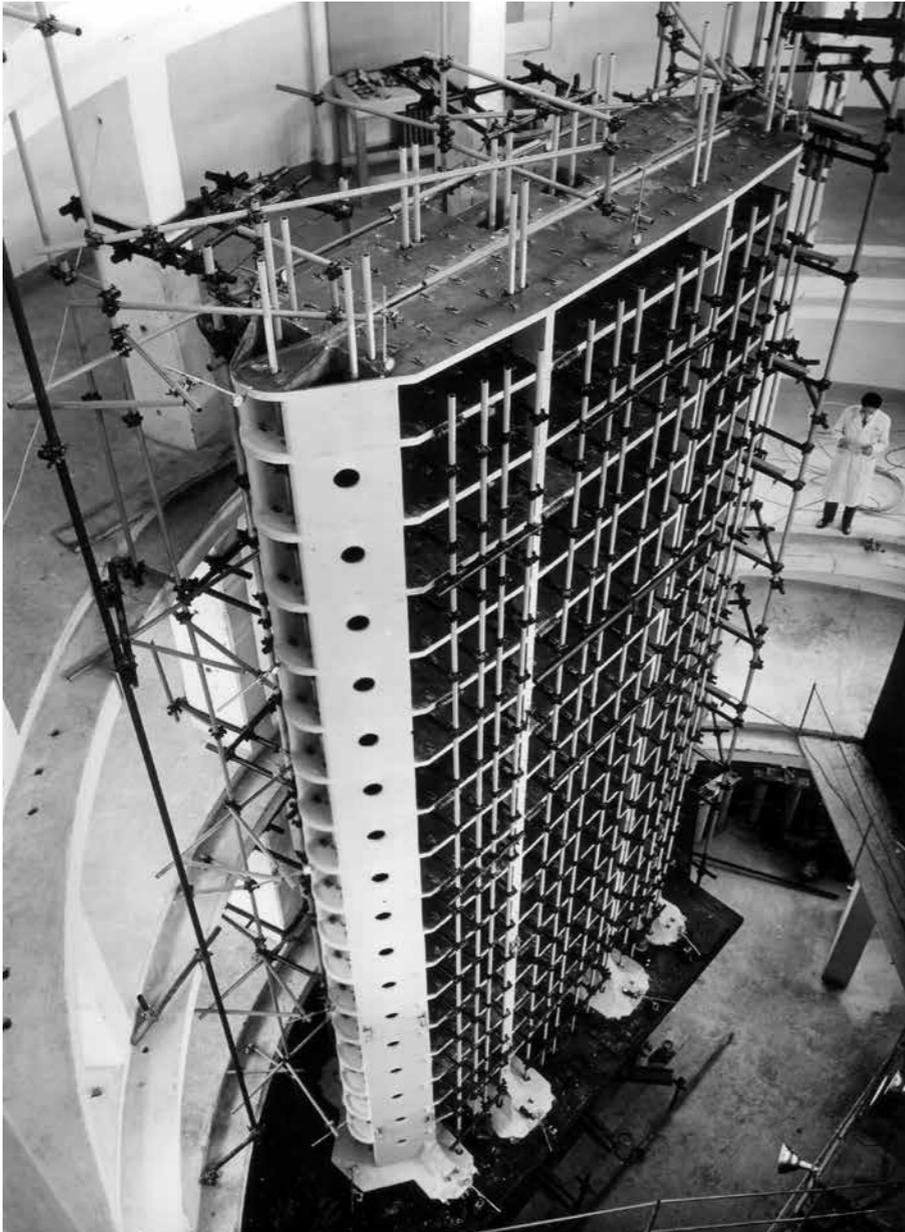
Figura 2.  
Pier Luigi Nervi, modello in  
celluloide in scala 1:37,5  
dell'Aviorimessa di Orvieto,  
1935-1936 (P.L. Nervi,  
*Scienza o arte del costruire?*,  
Roma 1945, tav. III).



ta volta a padiglione – formata da una doppia orditura di travi ad arco in cemento armato (alte circa un metro per 10 cm di spessore), incrociate a 90 gradi, fortemente iperstatica – utilizzando soprattutto il proprio “intuito statico” e pochi calcoli orientativi dai quali sarebbe stato imprudente passare alla fase esecutiva.<sup>8</sup> La soluzione arrivò da Arturo Danusso, celebre ingegnere e professore che aveva da poco (1930-1931) inaugurato al Politecnico di Milano un piccolo laboratorio dedicato alla sperimentazione su modelli in scala ridotta, attraverso i quali era possibile analizzare geometrie difficilmente schematizzabili con la sola teoria, ad esempio quelle delle grandi dighe. Nel 1935-1936 fu così realizzato a Milano un modello in celluloide in scala 1:37,5 sul quale si esaminò il comportamento statico in regime elastico della struttura, sotto l'azione del peso proprio e dei sovraccarichi accidentali.<sup>9</sup> Come affermò Danusso: «Anche qui il calcolo – come la materia dantesca – era sordo a rispondere. Non fu sordo il modello, anzi fu prezioso consigliere di utili adattamenti».<sup>10</sup>

Assodata l'efficacia del modello strutturale, Nervi, come Torroja, non lo abbandonò più. Al primo modello delle aviorimesse seguì un secondo, e nel decennio successivo furono riprodotti e testati al Politecnico di Milano diversi altri suoi progetti. Il legame tra Nervi e la modellazione strutturale si intensificò poi a partire dal 1951, quando Arturo Danusso fondò a Bergamo l'ISMES (Istituto Sperimentale Modelli e Strutture), centro presto famoso in tutto il mondo in questo settore. Capendo le potenzialità delle moderne attrezzature dell'ISMES, Nervi intensificò i rapporti con Danusso e con i suoi allievi (in particolare con l'ingegnere Guido Oberti) e negli anni successivi fece testare su modello in scala ridotta il Grattacielo Pirelli, la Torre della Borsa di Montreal, l'Arena di Norfolk in Virginia, la Cattedrale di San Francisco e molte altre strutture.<sup>11</sup> Dal 1964 egli divenne addirittura presidente dell'Istituto.

Analizzando il pensiero dei due ingegneri – entrambi ci hanno lasciato numerosi scritti da cui si evince la loro particolare “filosofia delle strutture”<sup>12</sup> – si comprende come dietro al favore per il modello in scala ridotta vi sia un preciso atteggiamento nei confronti del ruolo della teoria della scienza delle costruzioni all'interno del processo progettuale, dell'ingegneria in generale e di conseguenza nei confronti del peso che formule e calcoli matematici avrebbero dovuto avere nel processo di definizione di una forma strutturale. Ad esempio, già nel 1931, in un articolo dall'emblematico titolo interrogativo *Scienza o arte dell'ingegnere?*, Nervi ragionava sull'evidente distanza tra la realtà e la presunta esattezza delle teorie matematiche, insegnate nelle università come foriere di dati certi e inoppugnabili ma in realtà ben lontane dalla realtà dei fatti, specie in un settore così pieno di variabili come quello del cemento armato. Scriveva infatti: «E allora che valore possono avere quei numeri che si raggiungono dopo formule che trattano con esattezza cose inesatte, se non quello di indici di ordine di grandezza, di risultati di larga approssimazione da interpretarsi con un criterio tutto personale dove elementi di giudizio siano il sentimento e l'intuito, uniche facoltà capaci di valutare le cose non valutabili con metro e

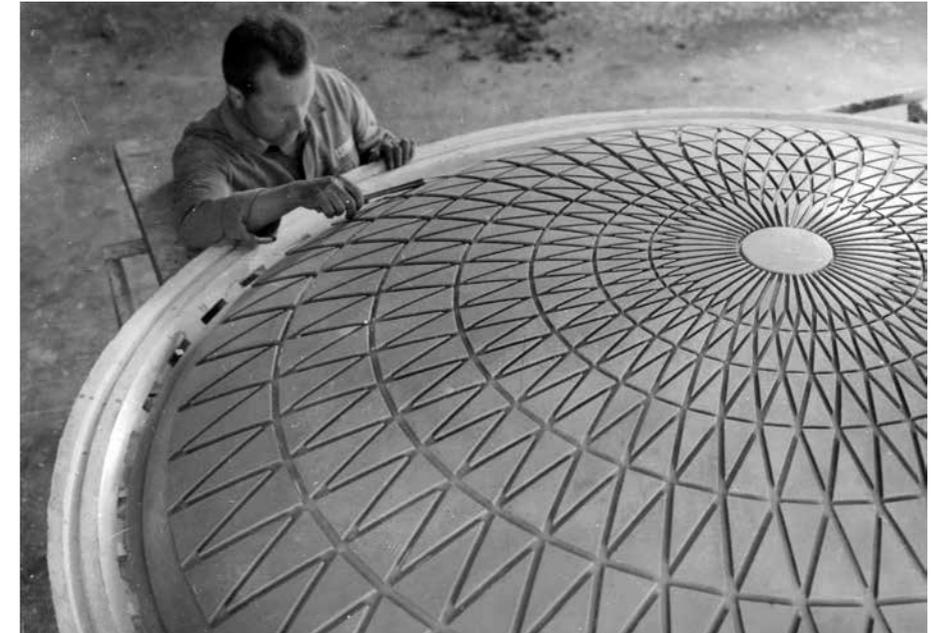


\_ Figura 3.  
Pier Luigi Nervi, modello in  
scala 1:15 del grattacielo  
Pirelli, 1955-1956 (Archivio  
Storico ISMES).

36

bilancia?»<sup>13</sup> E in un altro scritto: «Non si possono fare regole se non di larghissima massima, e perciò l'opera dell'ingegnere ha sempre qualche cosa di assolutamente personale, frutto più dell'intuito che dell'anonimo ragionamento... Troppo spesso si confonde l'ingegneria con i procedimenti matematici di calcolo che le sono propri e la espressione buon calcolatore o buon matematico è molte volte, e non solo da profani, confusa con quella di buon ingegnere».<sup>14</sup>

\_ Figura 4.  
Il confezionamento del  
modello della Norfolk Scope  
Arena all'ISMES, 1967  
(Archivio Storico ISMES).



37

Tali riflessioni, frutto di anni di pratica nei cantieri, portarono Nervi all'elogio della sperimentazione – vista come strada maestra nella comprensione dei fenomeni statici e del comportamento dei materiali – e all'esaltazione dell'intuito, preziosa facoltà umana capace di individuare e definire una forma strutturale. Simile il pensiero di Torroja: «La mente che concepisce una struttura – scriveva nel 1957 –, o la mano che la traccia, non ricevono aiuto di sorta da sviluppi matematici astrusi e complessi».<sup>15</sup> E ancora: «L'atto di progettare, anche una struttura molto semplice, pur avendo molti rapporti con la scienza e con la tecnica, rimane sempre legato all'arte, al senso comune, all'inclinazione, alla predisposizione, alla soddisfazione professionale di realizzare un progetto adeguato; al quale, poi, il calcolo non apporterà che pochi ritocchi atti a garantire la capacità resistente dell'opera».<sup>16</sup>

Partendo da questi presupposti, appare chiaro come la tecnica della modellazione strutturale fosse – almeno in linea di principio, dal momento che assumerà molteplici significati e valenze nelle carriere dei due ingegneri<sup>17</sup> – uno strumento particolarmente in sintonia con questa visione dell'ingegneria e della progettazione. Da un lato, infatti, costruire e testare un modello in scala ridotta significava operare sulla realtà concreta (seppur “in miniatura”) e non su astratte teorie, in accordo con la convinzione di Nervi che ogni contatto con la realtà fisica portasse necessariamente «ad un atteggiamento mentale di modesta ammirazione di fronte alla misteriosa e complessa saggezza delle cose, ben più appropriato e proficuo che non la semplicistica sicurezza, cui può condurre l'assolutismo formale delle schematizzazioni matematiche».<sup>18</sup> Dall'altro lato, è necessario osservare come la costruzione e la verifica di un modello strutturale presupponesse la definizione, o “l'invenzione”, a priori di una forma strutturale: una forma che nasce quindi nella mente del progettista grazie al suo “intuito” e viene poi, in un secondo tempo, passata al vaglio di un procedimento sperimentale

che ne confermerà gli assunti di base e al massimo potrebbe suggerire qualche piccola modifica, come accadde per le aviorimesse di Nervi o per il mercato di Torroja. Questo processo è stato spiegato bene da Giulio Carlo Argan, che nei suoi fondamentali scritti sull'opera dell'ingegnere italiano diede parecchio rilievo proprio alla sperimentazione su modello e al ruolo dell'intuizione:

Avendo constatato l'insufficienza del calcolo matematico, Nervi lo sostituisce e lo integra con la sperimentazione: costruisce il modello di una forma e lo sottopone a una serie di sollecitazioni fisiche che riproducono con la maggior fedeltà possibile quelle che la struttura dovrà, nella realtà, sostenere. Sulla base di queste prove di carico, procede alle necessarie modifiche e determina la forma finale della sua struttura di cemento. Ma perché una forma possa essere sperimentata,

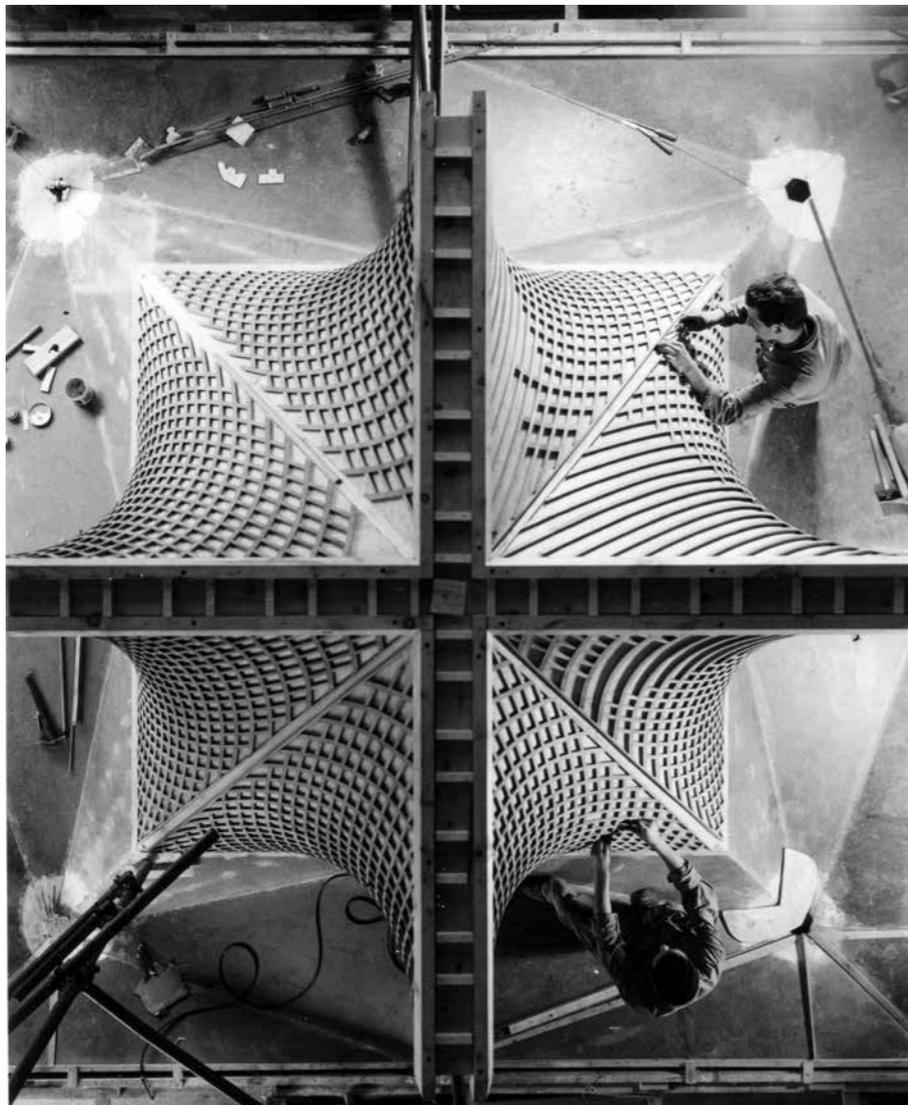
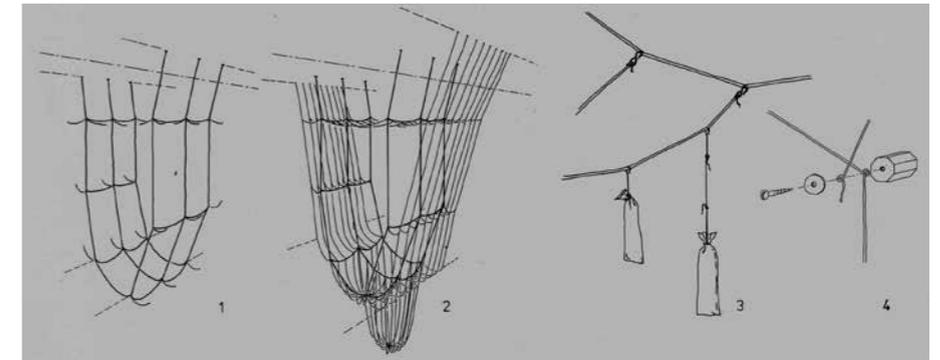


Figura 5. Fasi del confezionamento del grande modello cementizio della Cattedrale di San Francisco all'ISMES, 1964 (Archivio Storico ISMES).

Figura 6. Fasi costruttive del modello funicolare di Gaudí: 1. Realizzazione della struttura primaria; 2. Aggiunta della struttura secondaria; 3. Dettaglio degli uncini utilizzati per collegare i fili e i sacchetti riempiti di pallini di piombo; 4. Dettaglio dei dischi in legno collegati ai fili (J. Tomlow, *Das Modell*, Stuttgart 1989, p. 55).



è necessario averla "inventata"; ... Così si comprende meglio perché il calcolo matematico raramente conduca alla determinazione di una giusta forma spaziale: infatti quel calcolo dà per postulata un'idea o una struttura geometrica dello spazio e in relazione ad essa computa le possibilità di resistenza e funzionali dei materiali e delle strutture.<sup>19</sup>

Queste considerazioni, scritte nel 1955, ribadivano la tesi di Argan già enunciata dieci anni prima secondo cui l'opera nerviana poteva essere inserita a pieno titolo all'interno di un "modo artistico" del costruire, e addirittura essere paragonata a quella dei grandi costruttori del Rinascimento. Questi infatti utilizzavano il modello allo stesso modo di Nervi, dimostrando una tesi di cruciale importanza: «La forma è la determinante della forza, e non l'inverso».<sup>20</sup>

### Form-Finding

A partire dal secondo dopoguerra, punti di vista come quello di Argan – e di conseguenza anche il *modus operandi* seguito da Nervi nella sua attività – cominciarono a essere criticati da più parti. Se uno dei problemi fondamentali della scienza delle costruzioni era sempre stato, come si è visto, quello di poter verificare un elemento o un sistema di elementi strutturali dati a priori, selezionati a partire da un catalogo di forme codificate nel tempo oppure "intuiti" in base alla sensibilità e all'esperienza del singolo progettista, dagli anni Cinquanta in avanti si è invece potuto assistere alla definizione di un approccio al problema strutturale completamente opposto, in cui al centro non sta la verifica ma la ricerca della forma strutturale (*form-finding*), delegata molto spesso proprio al modello fisico, che entra dunque in campo fin dalle prime fasi della progettazione.

L'idea di poter determinare una forma strutturale deducendola (e non solo "intuendola") da procedimenti empirici trova diversi antecedenti nella storia delle costruzioni. Il caso più celebre è forse quello di Antoni Gaudí (1852-1926): il suo progetto per la Chiesa della Colonia Güell a Santa Coloma de Cervelló, nei pressi di Barcellona, commissionato da Eusebio Güell nel 1898, fu infatti portato avanti usando un particolarissimo *modelo colgante*: un modello composto da un sistema di fili ai quali erano appesi dei piccoli pesetti. Il principio è quello noto della catenaria invertita, già sfruttato ad esempio da Christopher Wren per definire il profilo del-

Fig. 6

la cupola della St. Paul's Cathedral a Londra alla fine del Seicento: se la catenaria è soggetta a sforzi a trazione, ribaltando di 180 gradi il sistema si ottiene una struttura soggetta a compressione. «Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum»,<sup>21</sup> aveva enunciato Robert Hooke.

Per Gaudí il ribaltamento del sistema veniva fatto ponendo uno specchio sotto il modello, così da visualizzare in anteprima il profilo delle volte da costruire. In qualche modo tale metodologia rappresentava un'evoluzione, o quantomeno una declinazione, della statica grafica, che l'architetto catalano conosceva bene e che aveva utilizzato nei suoi progetti precedenti. Fu un processo molto lungo e laborioso: la costruzione e gli esperimenti sul modello cominciarono nel 1898 e durarono dieci anni. Se esperimenti simili furono sviluppati anche in passato – sono conosciuti i modelli funicolari di Heinrich Hübsch e in particolare le prove effettuate da Giovanni Poleni sulla cupola di San Pietro –,<sup>22</sup> il modello di Gaudí li superava però per dimensione e complessità:<sup>23</sup> il modello della chiesa, allestito all'interno del cantiere, era infatti in scala 1:10, lungo circa 6 m e alto 4 m.

Nel campo del *form-finding* nel corso del Novecento è ben nota l'attività sperimentale di Frei Otto, svolta in proprio e dal 1964 presso l'Institut für leichte Flächentragwerke dell'Università di Stoccarda, al fine di studiare e governare membrane sottili, strutture pneumatiche e tensostrutture,<sup>24</sup> che ancora negli anni Sessanta e Settanta erano difficilmente gestibili dal computer. Si possono citare ad esempio gli studi di schemi strutturali in tensione che ribaltati di 180 gradi diventano soggetti a compressione pura, realizzati con sottili catene metalliche; modelli di gomma sottoposta a tensione uniforme; modelli di tessuto; reti di diverso tipo e modelli realizzati con bende di gesso, che indurendo, una volta bagnate, possono



Figura 7.  
Heinz Isler, esperimenti con membrane appese e congelate (gta Archivio, ETH Zurigo, fondo Heinz Isler).

Figura 8.  
Heinz Isler, modello pneumatico per la determinazione di forme strutturali (gta Archivio, ETH Zurigo, fondo Heinz Isler).



mantenere la forma assunta anche quando vengono invertite.<sup>25</sup> Celebri sono anche i suoi esperimenti sulle “superfici minimali” – cioè superfici che sviluppano l'area minima ottenibile per un contorno prefissato, con un minimo impiego di materiale – condotti ad esempio su modelli di pellicole di sapone, anche di dimensioni notevoli, realizzati con una speciale *soap film machine*.

Di grande interesse sono anche gli esperimenti condotti tramite modelli in scala ridotta da Heinz Isler nel campo delle volte sottili in cemento armato,<sup>26</sup> con l'obiettivo di creare una genealogia di *ideal shells*. A partire dagli anni Cinquanta, Isler sondò numerose tecniche sperimentali: il primo metodo, definito “preistorico”, consisteva nel dare forma a una piccola collina artificiale lasciando che la terra si disponesse liberamente secondo il proprio peso, fino a ottenere un profilo ottimale. Un secondo sistema prevedeva esperimenti fatti con membrane messe in tensione da un congegno pneumatico: fissando a un piccolo telaio a pianta rettangolare una membrana di gomma e insufflando aria dal basso, essa infatti diviene soggetta soltanto a sforzi di tensione. Una volta sottile della stessa forma sarà quindi soggetta solo a sforzi di compressione, relativi al peso proprio e all'eventuale carico della neve.<sup>27</sup> Le coordinate della forma ottenuta grazie alla pressione dell'aria venivano quindi misurate, e lo schema era pronto per essere rifinito in base agli altri dati del problema statico e funzionale.<sup>28</sup> Una terza tecnica si affidava al cosiddetto *flow method*, che consisteva nell'ottenere forme strutturali dall'espansione e dall'indurimento di una schiuma poliuretanicata costretta in un contenitore cavo. Poiché la velocità di espansione della schiuma è variabile da un minimo in corrispondenza dei bordi a un massimo nel centro del contenitore, ciò che si ottiene è una cupola: «This natural function produces lovely shapes, as seen in the hill».<sup>29</sup>

Il metodo preferito dall'ingegnere svizzero era tuttavia quello della *hanging reversed membrane*, accostabile agli esperimenti di Frei Otto con tessuti e reti. Isler era solito spiegare questa tecnica raccontando dell'esperimento da lui fatto nel gelido febbraio del 1957, quando appese in giardino un telo sottile a un incrocio di pali, lo spruzzò con acqua e ne attese l'indurimento causato dalla temperatura invernale. Una volta "congelata", la forma ottenuta fu ribaltata: «Thus I got a very elegant and light shell structure, resting on four points and being in equilibrium. It had obtained its perfect and natural shape by its own weight. In its final position the dome part had only compressional forces, as the cloth itself, when hanging, evidently had only tensional forces».<sup>30</sup>

All'interno di questo filone sperimentale si distinse in Italia la figura di Sergio Musmeci, autore di progetti singolari come il ponte sul Basento a Potenza (1967-1975). Molto vicine alle ricerche di Frei Otto sono le sue indagini sulla geometria del continuo e in particolare sulle superfici minimali, nelle quali i modelli non si limitano ad essere la visualizzazione tridimensionale di speculazioni teoriche, ma assumono un ruolo attivo determinante nella genesi della forma, complementare e a volte prioritario – data la complessità di descrivere analiticamente certe geometrie – rispetto all'analisi matematica. Nel modello di studio utilizzato per il ponte sull'Astico vicino a Vicenza (1956), costituito da fili a cui sono appesi semplici bulloni e poi capovolto in modo da ottenere il profilo corrispondente all'andamento dei carichi, troviamo una consapevole citazione di Gaudí; in altri casi invece è diretto il legame con quanto sarà sviluppato, poco più tardi, nei laboratori di Stoccarda con Otto. Per stabilire il profilo dei sostegni del ponte di Tor di Quinto a Roma (1959), pensati come volte a membrana a compressione uniforme e isotropa (il suo obietti-

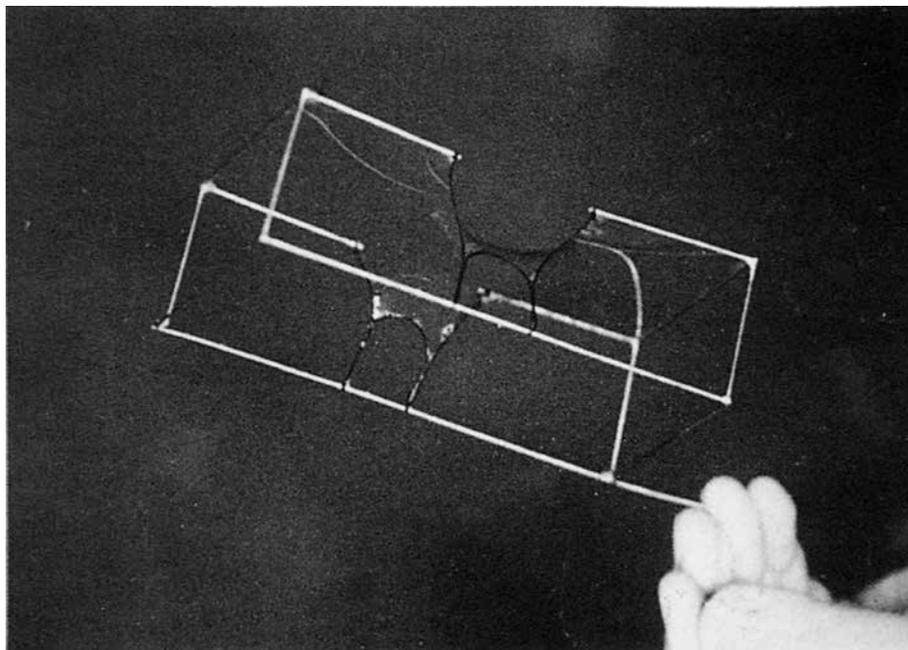


Figura 9.  
Sergio Musmeci, modello di soluzione saponata e fili di cotone per una prima determinazione della forma del Ponte sul Basento ("L'industria italiana del Cemento", n. 2, febbraio 1977).

Fig. 7

Figura 10.  
Sergio Musmeci, modello in neoprene del Ponte sul Basento, messo in tensione con uno speciale dispositivo di prova ("L'industria italiana del Cemento", n. 2, febbraio 1977).

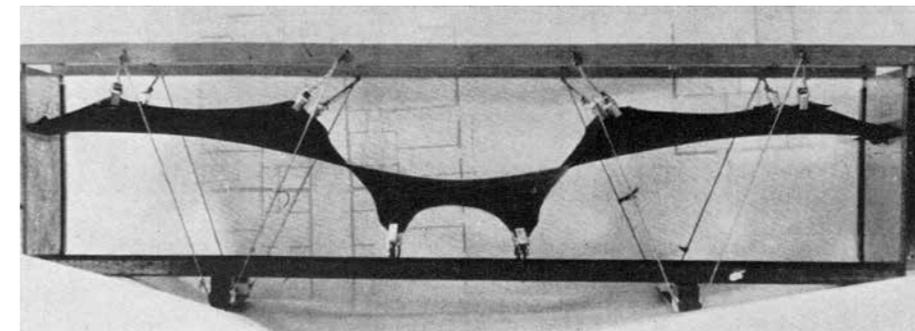


Fig. 9

Fig. 10

vo era di far lavorare il calcestruzzo a compressione pura), Musmeci ricorre infatti a un modello di gomma fortemente tesa e ad esperimenti fatti con una pellicola di sapone.<sup>31</sup>

Degno di nota è il processo progettuale seguito per trovare e, successivamente, verificare la forma strutturale del ponte sul Basento. Per trovare la forma della "sottilissima" membrana in calcestruzzo armato (circa 30 cm), pensata come superficie a compressione uniforme ma non isotropa, egli fece innanzitutto esperimenti con soluzione saponata fatta formare tra fili di cotone e filo di ferro, elaborando poi i dati ottenuti con vari processi di calcolo.<sup>32</sup> Ottenuti i primi risultati, ancora approssimati, Musmeci fa realizzare un modello in neoprene, materiale che rispetto alla pellicola di sapone dava diversi vantaggi: oltre a essere più stabile e a consentire la formazione di tensioni differenziate in due direzioni perpendicolari (così come previsto per la volta del ponte), esso permetteva un rilievo preciso, attraverso una quadrettatura della sua superficie, della forma ottenuta in risposta alle forze applicate. Constatata la corrispondenza tra il rilievo della superficie di neoprene e la forma ottenuta con il calcolo,<sup>33</sup> Musmeci dispone finalmente di una prima vera superficie di progetto, dalla quale procedere per studi, calcoli e verifiche più specifiche. Pur trovandosi ancora in uno stato embrionale, la forma strutturale – una forma «ancora senza nome»<sup>34</sup> – era stata individuata, e la fase della creazione cede progressivamente il passo a quella della verifica, condotta utilizzando modelli simili a quelli usati da Pier Luigi Nervi: uno in metacrilato (scala 1:100) e uno in cemento armato (scala 1:10), lungo 14 m, realizzato all'ISMES nel 1970-1971.

Sarà proprio Musmeci a spiegare le ragioni alla base di questa ostinata ricerca della forma strutturale.<sup>35</sup> Scriveva infatti all'inizio degli anni Settanta:

Il fatto che il calcolo sia in genere impiegato solo nella fase di verifica, fa sì che esso possa essere di aiuto solo quando le decisioni veramente importanti sono ormai prese. Quando le prende, il progettista è in realtà solo con la sua esperienza individuale, fondata su fatti non quantizzabili e che difficilmente possono essere posti fra loro in un rapporto dialettico. Ed è così che può succedere che tutte le nostre raffinate e approfondite conoscenze di scienza delle costruzioni non ci siano di alcuna utilità, se non indiretta, quando si tratta di dare una forma alle nostre strutture. ... La materia viene formata con un atto che è, in ultima analisi, una versione superficiale di quello con cui agisce uno scultore, senza avere di questo né il programma né l'intenzione; che si usi o no la creta, l'atto mentale è sempre, più o meno, quello che corrisponde a dare forma a della creta. In tal modo i fatti più propriamente strutturali restano fuori dalle nostre possibilità, prima ancora che di controllo razionale, di immaginazione e di scelta inventiva.<sup>36</sup>

Per l'ingegnere romano, che all'inizio degli anni Cinquanta aveva lavorato proprio da Nervi<sup>37</sup>, il diverso grado di "razionalità" tra la fase della creazione e quella della verifica era il risultato di un modo ormai anacronistico di pensare la scienza delle costruzioni, la quale era stata «essenzialmente concepita come l'insieme di tutte le teorie e metodi di calcolo che consentono la verifica di strutture già progettate»,<sup>38</sup> lasciando però fuori, "per definizione", la fase creativa della forma strutturale. «Bisogna pensare – precisava Musmeci – che la scienza delle costruzioni si era andata sviluppando, nei secoli XVIII e XIX, come figlia della fisica e della meccanica dell'epoca, strettamente deterministiche. Per i fisici la natura era data e il loro compito era quello di analizzarla, e in modo analogo, per la scienza delle costruzioni dell'Ottocento, la struttura doveva essere data, perché la si potesse "calcolare". Da allora molte cose sono cambiate».<sup>39</sup>

### Dal modello fisico a quello virtuale

Nella pratica, la distinzione proposta è ovviamente molto più articolata e sfumata. La complessità del processo di creazione, gestione e verifica della forma strutturale non permette infatti di confinare in compartimenti stagni una fase analitica e una sintetica, il processo intuitivo e quello deduttivo, l'invenzione e la verifica; appare inoltre superfluo sottolineare come qualsiasi esperimento, di un tipo o di un altro, sia già in se stesso il frutto di una precisa progettualità che indirizza le premesse ancor prima dei risultati. Se tali questioni ci porterebbero nei meandri della storia della filosofia della scienza – dalla quale peraltro non si può prescindere nello studio di tali temi – richiedendo molto più spazio di quello qui concesso, l'analisi dei significati sottesi a questi modelli sembra poter essere un valido punto di partenza per interrogarsi su quanto è successo nel campo dell'ingegneria e dell'architettura strutturale dagli anni Sessanta a oggi. L'avvento di nuovi procedimenti di analisi strutturale, resi operativi dall'incredibile sviluppo degli strumenti informatici, ha infatti causato un profondo stravolgimento delle modalità operative all'interno degli studi di progettazione, non soltanto dal punto di vista pratico ma anche teorico, con notevoli conseguenze sulla produzione architettonica e ingegneristica contemporanea.

Rispetto alla categorizzazione avanzata in questo saggio, è possibile evidenziare due strade principali: da un lato, la modellazione strutturale, così come intesa da Arturo Danusso, è stata profondamente ridimensionata (in alcuni settori fatta addirittura sparire) dallo sviluppo di metodi di analisi come il *Finite Element Method* (FEM) e dal connesso ricorso a modelli virtuali generati da software nati nel mondo dell'industria aeronautica e adattati all'ingegneria strutturale; modelli che in breve si sono dimostrati più rapidi ed economici, sebbene non proprio equivalenti,<sup>40</sup> rispetto ai loro corrispettivi tridimensionali.<sup>41</sup> Dall'altro lato, come già intuito da Musmeci e da molti altri tra gli anni Sessanta e Settanta, il calcolo elettronico e in generale gli strumenti informatici si sono ben presto dimostrati straordinariamente efficaci per i processi di *form-finding* – come l'odierno ampio utilizzo di software parametrici in molteplici settori progettuali (tra cui ovviamente anche quello strutturale) dimostra con evidenza – andando prima a completare e poi a sostituire

pratiche sperimentali "fisiche" come quelle condotte da Frei Otto e da Heinz Isler. Senza voler cadere in una sterile difesa dell'analogico sul digitale, c'è da chiedersi quali conseguenze abbia avuto un simile passaggio storico-tecnico sul processo di elaborazione della forma strutturale e sul concetto stesso di modello; quali nuovi orizzonti siano stati aperti e quali, eventualmente, siano stati chiusi. Queste domande, che oggi non trovano ancora risposte sufficienti, appaiono assolutamente decisive per poter valutare con cognizione di causa una rilevante parte della progettazione strutturale contemporanea, e soprattutto rendono evidente la necessità di procedere a uno studio consapevole e approfondito degli strumenti attraverso cui il processo progettuale è andato mutando negli ultimi decenni, sulla scia di ricerche come quella alla base della mostra *Archaeology of the Digital*, andata in scena al CCA di Montreal nel 2013.<sup>42</sup> Ciò non per portare a una sopravvalutazione dei mezzi rispetto ai fini cui il progetto tende, ma con la consapevolezza che le tecniche di rappresentazione, analisi, gestione, verifica eccetera, messe a disposizione dell'architetto e dell'ingegnere, o da lui create appositamente, siano foriere di significati e valori inscindibili dalla complessità del progetto, qualunque esso sia.

## Abstract

Thinking small to build great

For many twentieth-century designers, the reduced-scale model represented an essential device for defining and controlling structural forms — one need only think of the work of Arturo Danusso, Pier Luigi Nervi and Sergio Musmeci in Italy; Eduardo Torroja in Spain; Heinz Isler and Heinz Hossdorf in Switzerland; and Frei Otto in Germany, etc. In addition to technical variations associated with the choice of material, scale and task, it is possible to identify two main approaches behind the experiments conducted with these models. On the one hand, the model was initially regarded as a device that was useful for checking the precision of a structural form that had already been conceptually defined; while on the other, many designers found that the modelling process was a perfect way of finding or determining the form of a structure. When these two different perspectives — which in fact include countless nuances and connections — are analysed, many questions emerge, especially in relation to the ‘structural architecture’ of the last 50 years, in which the physical model has gradually been replaced by new methods and new devices.

## Note

- 1. J. Guillerme, *Il modello nella regola del discorso scientifico*, “Rassegna”, 1987, n. 32, pp. 29-37; B. Addis, *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*, Phaidon, London 2007.
- 2. Cfr. G. Neri, *Capolavori in miniatura. Pier Luigi Nervi e la modellazione strutturale*, Mendrisio Academy Press-Silvana Editoriale, Mendrisio-Cinisello Balsamo 2014.
- 3. Per una definizione “ufficiale” si rimanda a: H.G. Harris, G.M. Sabnis, *Structural Modeling and Experimental Techniques*, CRC Press, Boca Raton FL (USA) 1992 (1983), p. 2.
- 4. Neri 2014 (vedi nota 2), pp. 21-24.
- 5. *Ibidem*, p. 24.
- 6. Archivio Torroja-CEHOPU (Madrid), *Gran Mercado de Algeciras. Memoria*, pratica n. 158.302, dicembre 1933, pp. 19-20.
- 7. Per un approfondimento su queste vicende: F. Arredondo et al., *La obra de Eduardo Torroja*, Instituto de España, Madrid 1977; P. Cassinello (a cura di), *Félix Candela. Centenario 2010. La conquista de la esbeltez*, Universidad Politécnica de Madrid y Fundación Juanelo Turriano, Madrid 2010, pp. 82-87.
- 8. Neri 2014 (vedi nota 2), p. 37.
- 9. G. Oberti, *La modellazione strutturale*, in S. Ceccato (a cura di), *Pier Luigi Nervi e la sua opera*, incontro di studio organizzato dal Comitato Pre-

mio Ingersoll Rand Italia, Circolo della Stampa, Milano 1980.

- 10. A. Danusso, *Note introduttive*, in A. Danusso, G. Oberti, *Il Laboratorio Prove modelli e costruzioni dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni del R.° Politecnico di Milano*, “Il Cemento Armato – Le Industrie del Cemento”, 1941, n. 5, pp. 1-5, p. 3.
- 11. Neri 2014 (vedi nota 2).
- 12. Per una panoramica sul pensiero teorico di Nervi si veda: P.L. Nervi, *Ingegneria, architettura, costruzione. Scritti scelti 1922-1971*, a cura di G. Neri, CittàStudiEdizioni, Torino 2014.
- 13. P.L. Nervi, *Scienza o arte dell'ingegnere?*, “L'Ingegnere. Rivista Tecnica del Sindacato Nazionale Fascista Ingegneri”, 5, 1931, n. 7, pp. 473-474.
- 14. P.L. Nervi, *Pensieri sull'ingegneria*, “Quadrante”, 1933, n. 6, p. 20.
- 15. E. Torroja, *La concezione strutturale*, UTET, Torino 1996<sup>2</sup> (1957), p. 14.
- 16. *Ibidem*, p. 12.
- 17. Neri 2014 (vedi nota 2).
- 18. P.L. Nervi, *Corretto costruire*, “Strutture. Rivista di scienza e arte del costruire”, 1947, n. 1, pp. 4-5.
- 19. G.C. Argan, *Pier Luigi Nervi*, Il Balcone, Milano 1955, pp. 12-14.
- 20. G.C. Argan, *Architettura e tecnica costruttiva (Pier Luigi Nervi)* (1945), in id., *Progetto e destino*, Il Saggiatore, Milano 1965, pp. 258-263, p. 260.
- 21. R. Hooke, *A Description of Helioscopes, And Some Other Instruments*, London 1676, p. 31. Come è noto, Hooke era solito esprimere le leggi da lui definite riassumendole in anagrammi. La legge citata fu infatti espressa con l'anagramma “abcccddeeeefggiiiiiii-illmmmmnnnnnoo-prrrsstttttuuuuuuux” che stava appunto per *Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum*.
- 22. G. Poleni, *Memorie storiche della Gran Cupola del Tempio Vaticano*, Padova 1748.
- 23. J. Tomlow, *Das Modell. Antoni Gaudis Hängemodell und seine Rekonstruktion - Neue Erkenntnisse zum Entwurf*, Institut für Leichte Flächentragwerke, Stuttgart 1989, p. 20.
- 24. F. Otto, *Tensile Structures*, MIT Press, Cambridge MA 1979.
- 25. R. Barthel, *Natural Forms - Architectural Forms*, in W. Nerdinger (a cura di), *Frei Otto. Complete Works. Lightweight Construction Natural Design*, Birkhäuser, Basel-Boston-Berlin 2005, pp. 17-30; B. Burkhardt, *The Institute for Lightweight Structures University Institute and Spinners' Centre*, *ibidem*, pp. 91-100.
- 26. H. Isler, *New Shapes for Shells - Twenty Years After*, in “Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures”, 1979, n. 71, pp. 9-26.
- 27. «In this analogy, an error arises from the fact that pneumatic pressure is perpendicular to the

membrane surface whereas gravitation forces are vertical. If the shell is shallow and its rise small, this error can be neglected», *ibidem*, p. 13.

- 28. E. Ramm, *Heinz Isler - The Priority of Form*, in “Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures”, 52, 2011, n. 3, pp. 143-154, p. 147.
- 29. Isler 1979 (vedi nota 26), p. 17.
- 30. *Ibidem*, p. 19.
- 31. G. Neri, *Stahlbeton, Seifenblasen und Modelle*, in “TEC 21”, 138, 2012, n. 18, pp. 28-31.
- 32. S. Musmeci, *Ponte sul Basento a Potenza*, “L'Industria italiana del cemento”, 1977, n. 2, pp. 77-98, pp. 82-83.
- 33. *Ibidem*, p. 84.
- 34. R. Capomolla, *Il ponte sul Basento, ovvero l'invenzione di una forma “ancora senza nome”*, “Casabella”, 2005-2006, n. 739-740, pp. 13-19; sul ponte sul Basento si veda anche M. Guccione (a cura di), *Il ponte e la città. Sergio Musmeci a Potenza*, Gangemi Editore, Roma 2003.
- 35. Sull'opera di Musmeci si veda il saggio di R. Capomolla, *Le “forme organiche strutturali”. Materia e spazio nelle opere di Sergio Musmeci*, “Rassegna di Architettura e Urbanistica”, 2007, n. 121-122, pp. 135-148.
- 36. S. Musmeci, *Il calcolo elettronico e la creazione di nuove forme strutturali*, in M. Zevi (a cura di), *Il computer nella progettazione*, Bulzoni, Roma 1972, pp. 147-166, pp. 148-149.
- 37. Musmeci lavora presso lo studio dell'impresa Nervi & Bartoli appena laureato, tra il 1949 e il 1951. In seguito lavorerà con Antonio Nervi presso lo Studio di Architettura e Tecnica edilizia e con Pier Luigi Nervi in veste di consulente.
- 38. Musmeci 1972 (vedi nota 36), p. 149.
- 39. *Ibidem*.
- 40. Su questo tema è interessante la posizione di Heinz Hossdorf spiegata nel suo libro *Modellstatik*, Bauverlag GMBH, Wiesbaden-Berlin 1971.
- 41. Un esempio emblematico di questa transizione fu il progetto strutturale della Cattedrale di San Francisco, sviluppato da Pier Luigi Nervi in collaborazione con l'ingegnere californiano Leonard Robinson: cfr. Neri 2014 (vedi nota 2), cap. IV, pp. 219-273.
- 42. G. Lynn (a cura di), *Archaeology of the Digital*, catalogo della mostra (Canadian Centre for Architecture di Montréal, 7 maggio-27 ottobre 2013), CCA, Montréal 2013.