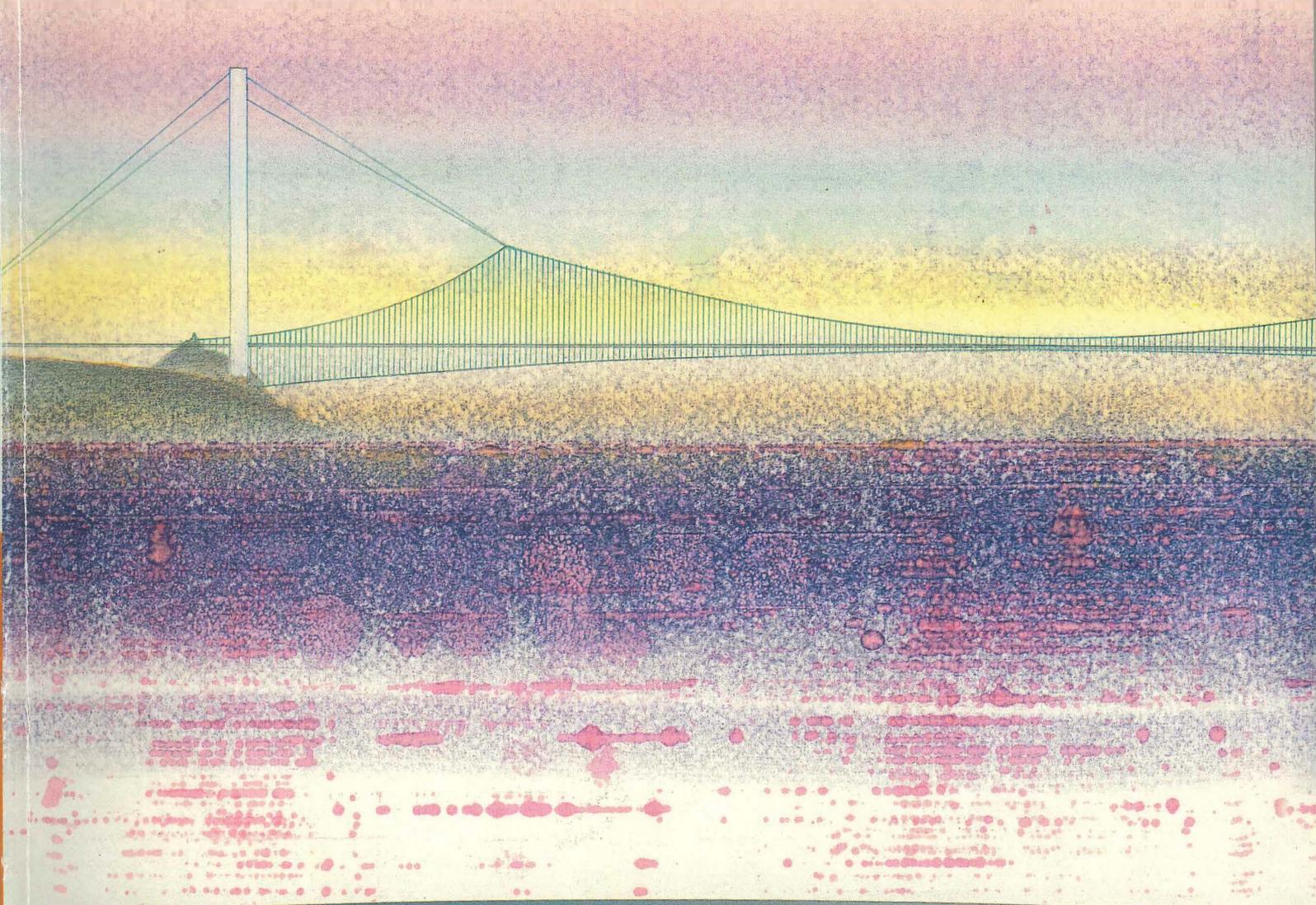


# forma e struttura: SERGIO MUSMECI

GURRIERI - POZZATI - NICOLETTI - DI PASQUALE - MANGONI - SPINELLI - MAJOWIECKI



## bollettino ingegneri

1999

Aprile  
Sped. abb. post. - 45% art. 2  
comma 20/b - Filiale Firenze

mensile di ingegneria ed architettura  
testo scientifico - notiziario - prezziario  
dei materiali e delle opere - edilguida

**aggiornamenti aprile 1999**

1999

## Redazione

Direttore: Gennaro **TAMPONE**

Direttore di Redazione: Piero **CALITERNA**

Direttore Amministrativo: Marco **BARTOLONI**

## Comitato di redazione

Alfredo **BOLOGNESI**, Antonio **BORRI**, Piero **CALITERNA**, Piero **CAMICI**, Vito **CAPPELLINI**, Paolo **CITTI**, Giuseppe **CRUCIANI FABOZZI**, Paolo **DEL SOLDATO**, Amelio **FARA**, Walter **FERRI**, Mario **FONDELLI**, Biagio **FURIOZZI**, Roberto **GENESIO**, Natale **GUCCI**, Francesco **GURRIERI**, George **LATOUR HEINSEN**, Enrico Maria **LATROFA**, Antonino **LIBERATORE**, Paolo **OSTI**, Maria Chiara **POZZANA**, Luciano **ROCCO**, Roberto **SEGONI**, Fabio **SELLERI**, Paolo **SPINELLI**, Gennaro **TAMPONE**

## Comitato prezzi:

Coordinatore: Giuseppe **PADELLARO**

Presidente: Mario **D'ACHILLE**

Segretario Redazione  
e Comitato Prezzi: Lucio **SCANTIMBURGO**

*I Componenti designati dagli Enti  
che collaborano alla compilazione del prezzario  
sono elencati all'inizio del Listino prezzi  
unitamente alla composizione delle Commissioni.*

## DIREZIONE REDAZIONE AMMINISTRAZIONE:

Tel. (055) 211.345 - Fax 219187

50125 FIRENZE  
Lungarno Guicciardini, 1

Concessaria generale:  
AD AGENCY GL

## COLLEGIO DEGLI INGEGNERI DELLA TOSCANA

### Consiglio Direttivo:

Presidente: Giuseppe **PADELLARO**  
Vice Presidente: Antonio **BORRI**  
Tesoriere: Luciano **CABRA**  
Segretario: Stefano **SANTI**

### Consiglieri:

Marco **BARTOLONI**, Piero **CALITERNA**, Susanna **CARFAGNI**, Mario **D'ACHILLE**, Paolo **DEL SOLDATO**, Alberto **GIORGI**, Stefano **LEGNAIOLI**, Mario **MAGINI**, Giovanni **MARTELLI**, Riccardo **REMORINI**, Carla **SANTONI**, Alessandro **SERAFINI SAULI**, Gennaro **TAMPONE**, Valerio **VALERI**

Segreteria: Giancarlo **TROVATELLI**  
Uffici: Tel. (055) 282.362 - Fax 219187  
50125 FIRENZE - Lungarno Guicciardini, 1  
Posta elettronica: [coling@fol.it](mailto:coling@fol.it)

Gli articoli pubblicati esprimono soltanto le opinioni dei singoli autori e non possono essere considerati come espressione del pensiero del Consiglio del Collegio e della Redazione del Bollettino. Le schede che riportano le notizie bibliografiche sono compilate sulla base di dati forniti dagli Autori. I manoscritti, anche se non pubblicati non si restituiscono.

# bollettino Ingegneri

mensile di ingegneria ed architettura  
*testo scientifico - notiziario - prezzario  
dei materiali e delle opere - edilguida*

anno XLV - aprile 1999 - n. 4

Il «bollettino ingegneri» è organo ufficiale del Collegio Ingegneri,  
fondato nel 1876

## Sommario

Numero monografico: "Sergio Musmeci: forma e struttura" a cura di Antonio MASSI .....	
Francesco GURRIERI Un atto dovuto .....	pag. 3
Piero POZZATI Il materiale, fonte e limite della progettazione strutturale: la lezione di Musmeci .....	» 4
Manfredi NICOLETTI Principi scientifico-architettonici dell'opera di Sergio Musmeci .....	» 7
Salvatore DI PASQUALE Sergio Musmeci e i problemi di ottimizzazione strutturale ..	» 10
Enrico MANGONI - Paolo SPINELLI I ponti di Sergio Musmeci: verso soluzioni ottime e robuste? ..	» 12
Massimo MAJOWIECKI Sullo stato dell'arte dei ponti di grandissima luce libera ...	» 17
diabitto .....	» 21
Sergio Musmeci .....	» 23
sintesi di tesi di laurea .....	» 24

## listino prezzi

Costi e prezzi della mano d'opera:  
edile, metalmeccanica e falegnameria

Prezzi dei noleggi

Prezzi dei materiali

Prezzi di prove ed indagini

Prezzi opere compiute per nuove costruzioni edili

Prezzi delle opere compiute per nuove costruzioni  
stradali

Prezzi opere compiute di ristrutturazione e recupero  
edilizio

Prezzi delle opere compiute di rifacimento stradale

Prezzi opere compiute di restauro

Prezzi impianti elettrici

Prezzi impianti termoidraulici e condizionamento

Prezzi opere di idraulica

Prezzi opere marittime

Costi sicurezza D.Leggs. 494/96

## edilguida

Progettazioni, consulenze, servizi

Macchine, attrezzature, noleggi

Materiali per costruzioni edili e stradali

Materiali per impianti tecnici

Costruzioni e finiture edili e stradali

Impianti tecnici

copertina di Roberto **SEGONI** - Documentazione gentilmente concessa da "Archivio Comunale della Tramvia di Lucca-Pescia-Monsummano" depositato presso la Biblioteca Comunale di Pescia.

# Sergio Musmeci: forma e struttura

*I presenti atti raccolgono i contributi dei relatori intervenuti alla giornata di studio "Sergio Musmeci, forma e struttura", svoltasi a Firenze il 9 novembre 1998.*

*L'incontro, nato per iniziativa del Professor Francesco Gurrieri, ha avuto il patrocinio della Facoltà di Architettura di Firenze, di quella di Roma "La Sapienza", e dell'IN/ARCH di Roma; è stato inoltre reso possibile dal generoso contributo economico del Collegio degli Ingegneri di Firenze, dall'ospitalità dell'Accademia delle Arti del Disegno, presso la cui sede di via Orsanmichele 4 la giornata si è svolta, e infine dalla partecipata disponibilità di Zenaide Zanini, moglie e collaboratrice di Sergio Musmeci.*

*L'iniziativa ha inteso sottolineare il particolarissimo ruolo assunto da Musmeci tra i grandi strutturisti di questo secolo, e la lezione che la sua opera e i suoi scritti hanno lasciato di unità, di forma e di struttura, della progettazione.*

*I lavori si sono aperti con i saluti del presidente dell'Accademia delle Arti del Disegno, Professor Francesco Adorno. Questi ha comunicato l'adesione di Bruno Zevi e di Giovanni Battista Bassi, i quali, impossibilitati a partecipare, hanno comunque voluto rievocare "genio creativo e straordinaria umanità dell'amico Sergio Musmeci" (Zevi).*

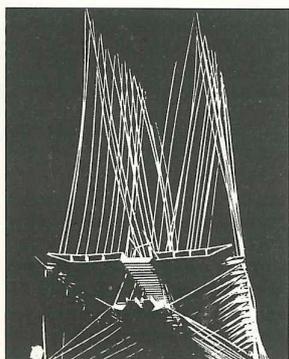
*Le relazioni hanno ben ricostruito l'opera e le intenzioni di Musmeci, colmando così un vuoto e un "silenzio... ingiusto e involontariamente colpevole", come ha ricordato Gurrieri; e sottolineando e ripercorrendo i temi centrali della sua progettazione: dall'impiego di materiali dissimili – dall'acciaio al calcestruzzo armato – pur nell'unità della progettazione (Pozzati), alla ricerca di forme minimali, quelle cioè che assolvono al loro compito strutturale impegnando la minima quantità di spazio e di materia, come Nicoletti ha esemplificato nella sua relazione.*

*Ampio spazio hanno avuto i temi della ottimizzazione strutturale. Salvatore Di Pasquale, tornando indietro nel tempo, ha ricordato le origini di tali ricerche, e il tentativo di Musmeci di capovolgere l'impostazione del progetto, portando la Scienza delle Costruzioni da strumento di verifica a strumento attivo nel disegno delle strutture. Paolo Spinelli ha ben distinto robustezza, stabilità e ottima forma; e, infine, l'ampia trattazione di Majowiecki sullo stato dell'arte dei ponti a grandissima luce libera ha messo in luce l'intrinseca debolezza delle attuali proposte per l'attraversamento dello stretto di Messina, comparandole con lo studio di un ponte sospeso in tensostruttura a doppio effetto, secondo un modello ispirato all'idea progettuale di Sergio Musmeci (modello che, progettato nel 1970, introduce tutte le innovazioni concettuali moderne allora non comprese).*

*Alla fine delle due sessioni, del mattino e del pomeriggio, è nato un intenso dibattito, coordinato da Mario Ducci. Gli interventi, qui raccolti insieme, hanno introdotto nella discussione temi di estremo realismo, affiancando alla ricerca dell'ottimo strutturale le problematiche inerenti i costi di realizzazione e l'economia di cantiere. All'intervento di Majowiecki vanno ricondotte le riflessioni sulla realizzazione dell'attraversamento dello stretto di Messina, e sulla opportunità di aprire a studi più avanzati quest'opera di ineguagliata rilevanza nazionale, capace di rilanciare l'ingegneria italiana nel mondo.*

*In ultimo vorrei ricordare la presenza al dibattito di due giovani laureati, Giovanni Catrano e Riccardo Sola, i cui interventi, pubblicati qui come sintesi di tesi di laurea, sono testimonianza di una presenza ancora viva nell'Università italiana dell'opera e degli studi di Sergio Musmeci.*

Antonio MASSI



## Un atto dovuto

Francesco GURRIERI

Sono passati diciassette anni dalla scomparsa di Sergio Musmeci; da quel marzo 1981 che privò la comunità scientifica di uno dei più trasgressivi "tecnici delle costruzioni" e dei più creativi costruttori-innovatori del Novecento.

Diciassette anni non sono passati invano, perché, in definitiva, se la cultura dei "ponti a grande luce libera" ha fatto apprezzabili passi avanti (citiamo un caso per tutti in Santiago Calatrava, architetto appena nel '74 e nell' '81 addottorato in scienze tecniche al Politecnico di Zurigo), se la "tensostruttura a doppio effetto" ha fatto notevoli passi avanti, il silenzio – almeno formale e istituzionale – su questo collega illustre è stato ingiusto e involontariamente colpevole.

Troppo episodici i ricordi nella letteratura tecnica per Musmeci; anche se, recentemente, il numero monografico del *Nuovo Cantiere* (aprile 1998), con importanti contributi di Borri, Majowiecki, Spinelli, Pinardi, ha riaperto una qualificata attenzione in coincidenza col riaccendersi dell'attenzione sul

problema del "ponte sullo Stretto di Messina". Sappiamo anche – e ci auguriamo di vederlo al più presto – che Manfredi Nicoletti (per anni vicino a Musmeci) sta curando una monografia nella snella collana "Universale di Architettura" coordinata da Bruno Zevi.

Ma la verità è che la bibliografia, soprattutto italiana, su questo genio della struttura, resta inadeguata.

Questa giornata di studio vuol dunque essere un primo atto di riparazione culturale, a cui – oggi ne siamo certi – altri e altrove ne seguiranno.

Ma perché a Firenze e perché nella sede dell'Accademia delle Arti del Disegno?

Perché il rapporto (la congruenza) "forma/struttura" è sempre stato vivo nell'insegnamento fiorentino; fors'anche per quella lontana seminazione dell'insegnamento di Riccardo Morandi che qui tenne i suoi primi corsi di "Ponti e grandi strutture", chiamato dal-

l'intelligente intuizione di Raffaello Fagnoni. In questa sede accademica perché qui, fin dal XVI secolo, l'arte del costruire si unì indissolubilmente nei tre cerchi, con la pittura e la scultura, in un ininterrotto e vivace dialogo sulla primazia delle tre arti.

Ma questa "giornata di studio" nasce anche dalla grande, trepida disponibilità di Zenaide Zanini Musmeci che, di Sergio fu compagna, moglie, collaboratrice in tanti progetti, sperimentatrice negli azzardati modelli, quando ancora il computer doveva arrivare nei nostri studi e nei nostri laboratori; nasce anche per la immediata disponibilità di tanti colleghi, pronti a corrispondere all'invito; e voglio qui ringraziare, uno per tutti, il prof. Pozzati, che credo sia una delle persone e dei colleghi più cari e più emblematici nel coacervo delle nostre discipline; infine, nasce con la Facoltà di Architettura di Roma "La Sapienza" e dell'IN/ARCH.

Diceva Musmeci: "Oggi dobbiamo inventare il futuro proiettando in esso quell'armonia fra ragione e

natura che è il più prezioso patrimonio ideale che ci ha lasciato la civiltà classica".

Potremmo ricordare Musmeci per molti affascinanti motivi che, ne sono certo, questa "giornata di studio" evoccherà. Ma ve ne sono almeno tre che qui voglio richiamare, per il loro costituirsi in capisaldi del pensiero tecnico contemporaneo.

1. L'impostazione concettuale del ponte a grande luce libera.

L'abbandono dello schema strutturale del ponte sospeso con l'eliminazione dei lunghissimi pendini vicino al pilone (con scarsa o nessuna rigidità verticale) e l'introduzione dell'idea di "tensostruttura a doppio effetto", con struttura autostabilizzante anche agli effetti del vento e degli effetti derivati in condizioni di esercizio.

2. Il coraggio di una ragione etica dei grandi ponti, che dai 3300 m dello stretto di Messina consente di postulare quello di 5000 m sullo stretto di Gibilter-

ra. "Sono ragioni di politica generale – diceva Musmeci – di psicologia sociale e di promozione civile e culturale; il ponte sullo stretto deve essere concepito come un'opera d'avanguardia da affrontare con lungimiranza, decisione e coraggio, perché alle soglie del Duemila è un'occasione unica per stimolare l'intraprendenza della nazione nel campo delle grandi realizzazioni costruttive e per qualificarne il rango fra i popoli di avanzata civiltà tecnica".

3. Ma Musmeci non vuol dire solo intelligenza e innovazione tecnica nel campo dei ponti di grande luce; vuol dire anche innovazione nell'idea, nell'organicità dell'idea di struttura.

La copertura del Cinema "Araldo" a Roma, l'Atomic Center di Bombay, la Casa Russo a Ischia (su progetto di Zenaide Zanini), la struttura per il Palazzo dello Sport a Firenze (2° classificato) nonché i suoi affascinanti studi di "strutture spaziali" danno conto dello spettro vasto e affascinante del suo pensiero e della sua professionalità.

Il Ponte sul Basento a Potenza (realizzato fra il 1967 e il '69, dopo le prove all'ISMES di Bergamo) resta, con la sua *membrana minimale* e polimorfa uno degli esempi più alti dell'intelligenza e della sensibilità umana. Resta una testimonianza di *linguaggio organico* che vorrei definire, qui a Firenze, "neumanistico".

Francesco GURRIERI, nato nel 1938 si è laureato in Architettura presso la Facoltà dell'Università fiorentina nel 1964. È Preside della Facoltà di Architettura di Firenze e Professore Ordinario di Restauro dei monumenti. È uno dei maggiori interlocutori internazionali dei non facili problemi della conservazione dei monumenti e delle città.

## Il materiale, fonte e limite della progettazione strutturale: la lezione di Musmeci

Piero POZZATI

Ringrazio vivamente il professore Francesco Gurrieri per le sue calorose espressioni di cordialità e salute, e per avermi invitato a questa Giornata di studio in cui la Facoltà di Architettura di Firenze, in collaborazione con quella dell'Università "La Sapienza" di Roma e con IN/ARCH, intende celebrare sul piano nazionale l'opera di Sergio Musmeci che con i suoi ammirevoli progetti ha onorato la Scienza e la Tecnica delle costruzioni nell'Università italiana. E sono lieto di partecipare a questo convegno anche per la presenza della Signora Architetto Zenaide Zanini Musmeci e dei suoi figli, nonché di numerosi amici.

1. Non ho conosciuto personalmente Musmeci; però ebbi occasione di ammirare alcune sue opere, rimanendo tra l'altro impressionato dalla sua alta capacità di progettare strutture tanto in acciaio quanto in calcestruzzo armato, confermandomi così nella mia radicata opinione che legami e criteri forti e generali sono di guida alla progettazione, per cui a mio avviso non è opportuno frammentarne nettamente l'insegnamento – in discipline non di specializzazione – a seconda del materiale impiegato.

Quindi sono rimasto soddisfatto che tale mia opinione abbia trovato forse una spontanea condivisione anche nel tema assegnato a questo nostro incontro, associando – con l'intento non del contrasto ma della confluenza – la forma e la struttura; opinione che ho voluto lasciare intravedere nello stesso titolo dato a questa mia conversazione, dando rilievo all'importanza che il materiale ha nella progettazione intesa nella sua totalità.

Ma il richiamo che ho fatto, per il materiale, di fonte e limite della progettazione va al di là della constatazione evidente di doverne conoscere le caratteristiche; intende piuttosto riferirsi a un senso più generale e riposto connesso alle opere dei grandi progettisti (quindi anche a quelle di Musmeci) in cui l'ispirazione chiama a sé la materia innalzandola a significato e a scopo.

E con ciò intendo dire più precisamente che qualunque creazione, sia nella tecnica, sia nell'arte, è confinata in limiti per quanto riguarda il suo manifestarsi, e che la libertà creatrice, come saggiamente

ammonisce Valgimigli, viene dal di dentro non dal di fuori. E che costituisce limite il materiale stesso, il quale giunge frequentemente – e non appaia un paradosso – a suggerire all'architetto o all'ingegnere la forma e la struttura della costruzione, e in genere all'artista la sua creazione.

Così, ad esempio, il limite della scarsa resistenza a trazione del calcestruzzo ha dato luogo all'invenzione della precompressione, quindi alle forme e alle strutture, tutte particolari, realizzate con tale tecnica.

Ma è ancor più generale la valenza di tale osservazione. Prendiamo, sempre a titolo di esempio, l'uso del linguaggio per un poeta: certe altezze sono raggiunte proprio per l'impiego della sua lingua, che non di rado consente espressioni in traducibili, ispirando e rendendo unica e inimitabile la sua creazione.

E ovviamente altrettanto può essere osservato per la scultura. Infatti alla figurazione dell'agonia di Cristo e alla necessità di usare asprezza di segni e intensi giochi chiaroscurali si presta mirabilmente il legno; mentre per la celebrazione della bellezza è in genere inarrivabile la levigata luminosità del marmo; basta pensare, tra opere d'arte di sterminato numero, alla perfezione compiutamente classica delle statue e dei pannelli di Fidia, alla purezza formale di Canova. Ma la grandezza dell'artista può affidare allo stesso materiale e allo stesso soggetto diversità di ispirazione, come per le due "Pietà" di Michelangelo;

oppure, nell'architettura "sacra", per le cattedrali gotiche in muratura e la chiesa, sempre in muratura, della *Sagrada Familia* di Gaudi.

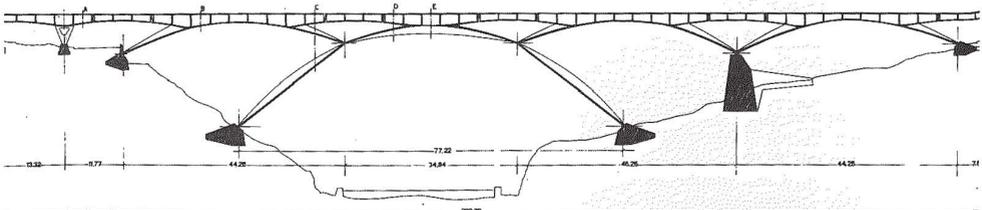
In conclusione, il materiale costituisce un forte limite, ma può diventare per l'artista vivificante, e fonte e stimolo di sue libertà creative. E ciò ho voluto ricordare – chiedendovi scusa dell'annoiato indugio – per accennare come si possa racciordare la tecnica (e addirittura la tecnologia) all'arte; e soprattutto per meglio penetrare l'opera vasta e importante di Musmeci, la cui documentazione è stata curata, illustrata e custodita con commovente impegno dalla Signora Zenaide Zanini, la quale diede al marito infaticabile, preziosa collaborazione.

2. Per dare concretezza alle mie parole, e per meglio mettere in luce quel che dicevo all'inizio sulla maestria di Musmeci nell'uso di materiali diversi come il calcestruzzo armato e l'acciaio, mi limiterò a citare quattro sue opere, ugualmente divise tra i due suddetti materiali.

– Il progetto del ponte in calcestruzzo armato sull'Astico, disegnato con un'elegante sequenza di arcate di oltre 70 m di luce, collegate, in corrispondenza delle loro reni, da archi minori, con il risultato di una notevole leggerezza e dell'attenuazione delle spinte delle stesse arcate (fig. 1).

– Il ponte, ancora in c.a., sul Basento a Potenza, citato in numerose pubblicazioni e in particolare nel volume *Conception des ponts* di Gely e Galgano: di concezione e disegno quanto mai originali, è costi-

Fig. 1 - Ponte sull'Astico



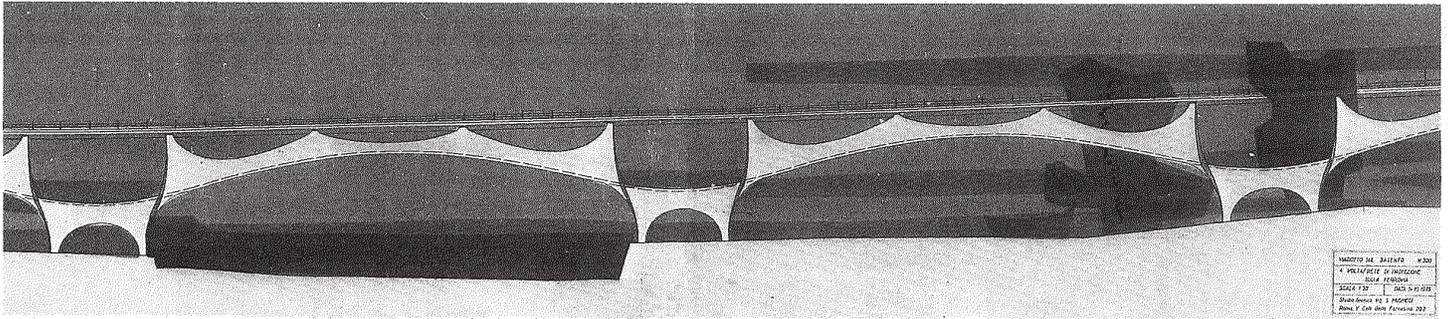


Fig. 2 - Ponte sul Basento.

Fig. 3 - Ponte sul Basento.

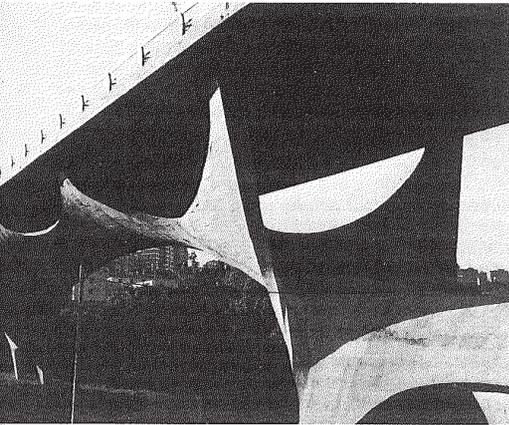


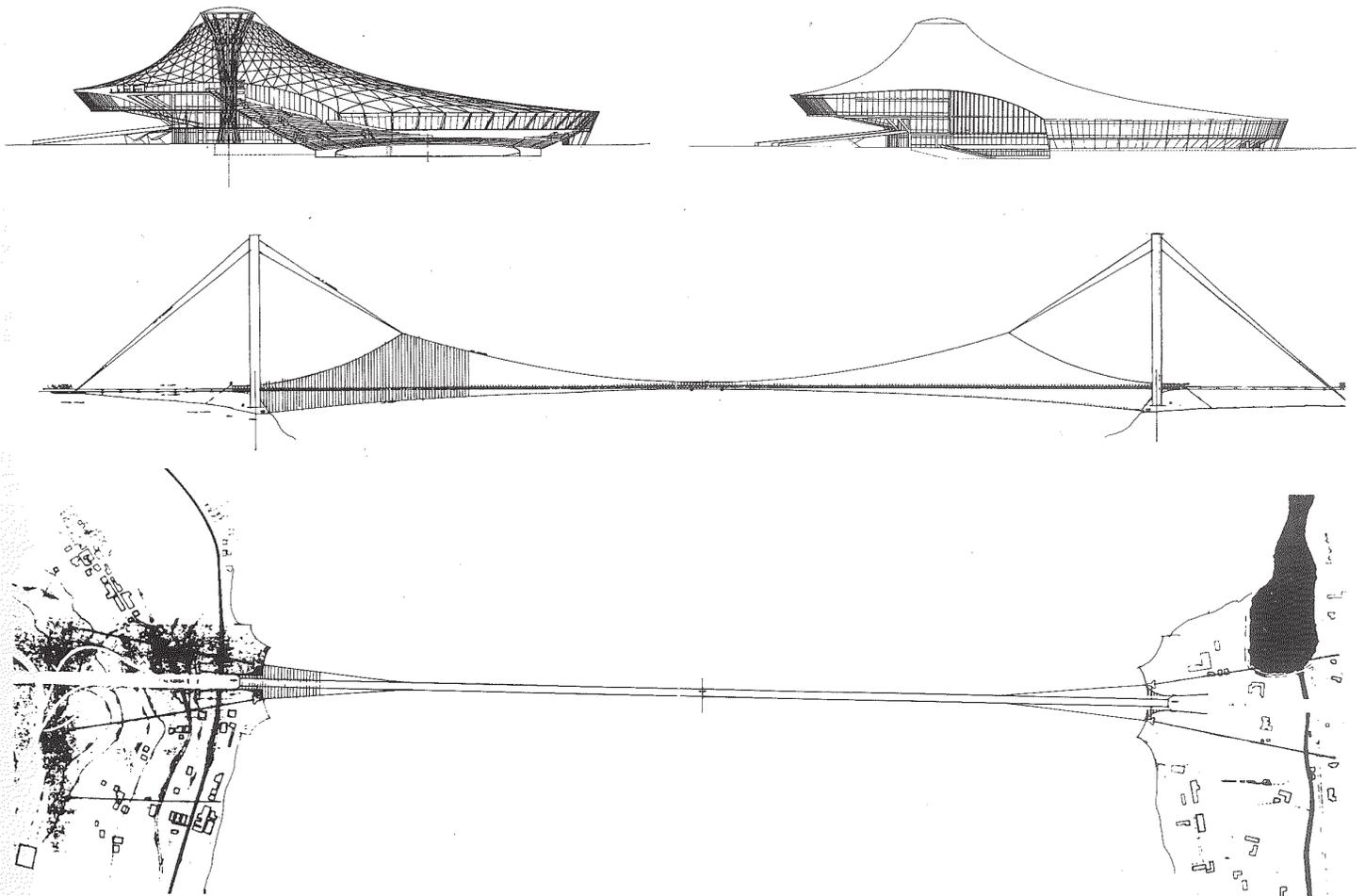
Fig. 4 - Progetto per il Palazzo dello Sport a Firenze.

Fig. 5 - Ponte sullo stretto di Messina, prospetto e pianta.

tuito da un guscio avente sezione aperta, arcuata e concava verso l'alto (fig. 2, 3).

– Il progetto di una grande copertura in acciaio per un palazzo dello sport di Firenze è stato concepito con l'impiego di un'ardita tensostruttura di vaste dimensioni, sostenuta all'interno da due piloni (fig. 4).

– Infine il progetto famoso del ponte sullo stretto di Messina, riconosciuto vincitore nella gara di idee promossa, verso il 1970, dalla Società Autostrade e dalle Ferrovie dello Stato (fig. 5, 6); ed è doveroso osservare – pur non entrando nel merito della questione generale riguardante l'opportunità attuale di valicare lo Stretto con un ponte – che è tale la sua rilevanza da rendere tale progetto esemplare per i ponti di grandissima luce in genere, dei quali parlerà, in questa stessa giornata, il prof. Majowiecki con la sua notevole competenza. Ho detto progetto esemplare: per cui ritengo pienamente centrate le osservazioni fatte in una recente interessante nota



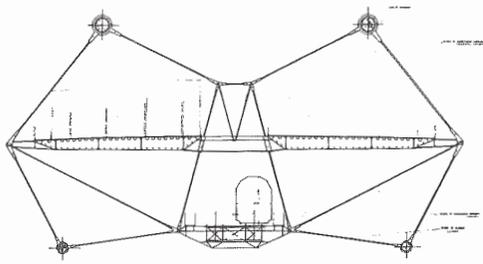


Fig. 6 - Ponte sullo stretto di Messina, sezione dell'impalcato

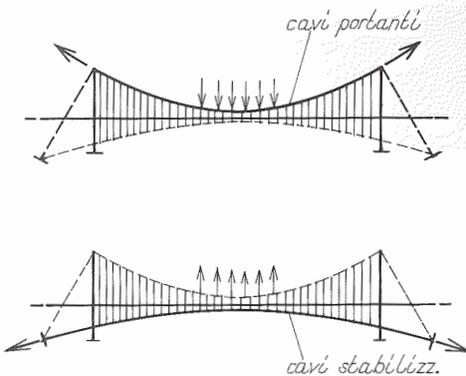


Fig. 8 - Ponte sullo stretto di Messina, sollecitazioni nei cavi portanti e stabilizzanti.

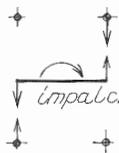


Fig. 7 - Ponte sullo stretto di Messina, plastico

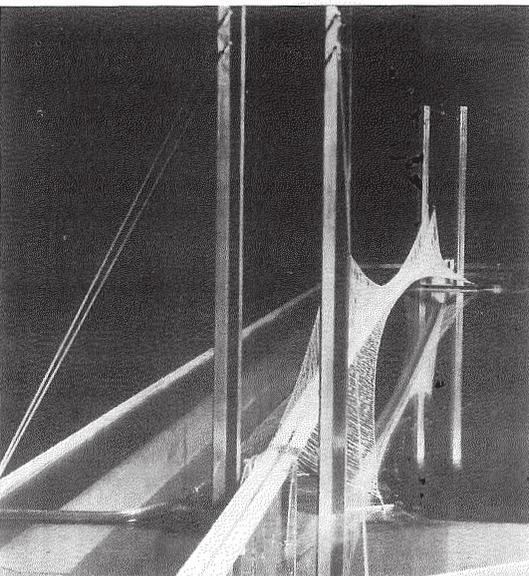
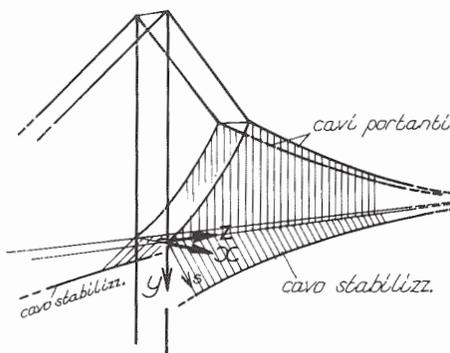


Fig. 9 - Ponte sullo stretto di Messina, resistenza alle sollecitazioni nei piani orizzontale e verticale



di Borri, Majowiecki, Spinelli; e in particolare ben legittimo il loro interrogativo se, passando dall'attuale record di 1990 m di luce (attinto per il ponte Akashi in Giappone) ai 3300 m del ponte sullo Stretto di Messina, sia opportuno proporre ancora lo schema "classico", pur con pregevoli accorgimenti; e se non convenga piuttosto ricorrere alla concezione strutturale di Musmeci, ricca di apporti originali e fortemente innovatori, e rispondente a quel suo impegno di dovere inventare, com'egli diceva, il futuro proiettando in esso la necessaria armonia tra ragione e natura. Tale concezione, sostenuta da una visione coerente ed organica dei vari problemi, applica genialmente ai ponti sospesi la prima idea, nata per le grandi coperture (Jawerth), di associare ai cavi portanti altri cavi stabilizzanti con curvature contrapposte (fig. 7, 8); e riesce a contrastare con efficacia le

oscillazioni ed i fenomeni di instabilità aerodinamica nei piani sia verticale, sia orizzontale mediante due cavi stabilizzanti correnti in piani obliqui e simmetrici rispetto all'impalcato (fig. 9). Per di più realizzando un'estetica notevole e rassicurante: perché con la soluzione irrigidita resta grave la deformabilità specialmente nel piano orizzontale (per il citato ponte di Akashi si prevedono, per velocità del vento di 60 m/sec, spostamenti in mezz'ora di circa 30 m); mentre con sezione a profilo affusolato, in grado di attenuare le spinte del vento, le prove su modello non sono da tutti ritenute con sicurezza esaustive, proprio per questioni aerodinamiche, assai difficili da riprodurre per modelli in scala ridotta fortemente. Inoltre è da tener presente che l'azione dei cavi stabilizzanti può essere rafforzata sensibilmente dotandoli, in corrispondenza dei loro attacchi, di smorzatori,

come viene notato nella nota predetta; e che la soluzione Musmeci elimina i lunghi e deformabili tiranti di appendimento dell'impalcato posti in vicinanza dei piloni, in grado, tra l'altro, di costituire un notevole schermo al vento.

3. Già ho detto che lascia ammirati la capacità di Musmeci di progettare egregiamente strutture costituite da materiali molto dissimili. Tale capacità gli derivò certamente anche dalla sua qualità di sapere cogliere certi criteri e aspetti generali comuni al funzionamento di tutte le strutture, come è testimoniato dai suoi studi e in particolare dal suo "teorema del minimo strutturale", al quale attese lungamente, esponendolo prima in pubblicazioni, poi compiutamente nel suo volumetto "La statica e le strutture" stampato nel 1971; teorema derivante dal problema di studiare per un dato sistema di forze le possibili configurazioni strutturali in grado di sostenerlo, e individuando quindi quella configurazione richiedente il minor peso. Ma non mi soffermerò su ciò, sapendo che il prof. Di Pasquale tratterà, con la sua maestria il tema "Sergio Musmeci e i problemi di ottimizzazione strutturale".

Può essere opportuno sottolineare anche che i quattro progetti d'anziti di Musmeci sono una piccola parte della sua migliore produzione che, detto per inciso, trovò sin dai primi tempi da parte del prof. Bruno Zevi autorevoli riconoscimenti e segnalazioni.

Ed è da tenere presente, nel considerare tali progetti, che essi sono il risultato di innumerevoli non palesi ansie e tentativi: in genere tanto più affascinanti, quanto più si avvicina alla perfezione la soluzione studiata per dar vita sia alla forma - ossia all'aspetto essenziale esteriore della costruzione dipendente soprattutto dall'intuizione -, sia alla struttura che, "riempiendo" quella forma, dipende principalmente da un processo razionale, con le necessarie verifiche mediante calcoli e modelli. Ma nel risultato finale tutto si trova compenetrato e fuso, non mostrando più percepibili confini tra le fasi ispirate - per usare la classica definizione di Pascal - all'*esprit de géométrie* o all'*esprit de finesse*.

E allora, ancora una volta, la mente corre ai grandi riferimenti, e molte delle cose dette si possono riassumere nel breve e compiuto giudizio che Socrate espone al discepolo Teeteto: occhi e orecchi sono strumenti che vedono e odono questa cosa o quella, ma è l'anima (o come altrimenti si possa chiamare) con la quale mediante questi sensi noi abbiamo la sensazione di ciò che è sensibile; ossia è l'anima che tutte le sensazioni raccoglie e coordina in unità e armonia.

Orbene a me sembra che ciò si attagli in qualche modo anche all'essenza della progettazione, che è un tutt'uno: ed è questa, a me sembra, anche l'essenza della lezione che scaturisce dalle migliori opere di Sergio Musmeci e dei grandi progettisti.

Piero POZZATI, nato a Bologna nel 1922, si è laureato in Ingegneria Civile, presso l'Università di Bologna, nel dicembre 1945. Titolare della cattedra di Tecnica delle costruzioni, presso la Facoltà di Ingegneria di Bologna, dal 1956 al 1992, è membro della Accademia delle Scienze di Bologna dal 1959. Professore emerito dell'Università di Bologna dal 1997. Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici dal 1992 al 1995. È autore di 4 volumi (2 in collaborazione) dell'opera *Teoria e tecnica delle strutture*, edita dalla UTET, e di numerose memorie scientifiche.

# Principi scientifico-architettonici dell'opera di Sergio Musmeci

Manfredi NICOLETTI

Nella mia formazione universitaria ho avuto dei meravigliosi maestri di strutture: Pier Luigi Nervi, Robert Le Ricolais e Buckminster Fuller, ma devo dire che il contatto di vari anni con Sergio Musmeci ha veramente aperto la mia mente come non era mai stato fatto prima.

Racconta Musmeci che quando nel 1954 stava dirigendo i lavori del Centro di Atletica a Formia, un progetto che aveva fatto insieme ad Annibale Vitelliozzi, a un certo punto si avvicinò alla copertura della palestra, una volta sottile corrugata, e vide che il disegno dei ferri di armatura seguiva dei percorsi nello spazio bellissimi. Quelle armature, destinate a scomparire nel calcestruzzo, erano veramente l'espressione del fluire delle forze nello spazio.

Penso che sia da quel momento che Sergio raggiunse la consapevolezza che la vera architettura strutturale doveva essere basata sulla ricerca della forma, una forma cioè che esprimesse il fluire delle forze nello spazio e non le richiudesse invece in forme preconette e sorde a quello che era il loro compito, il loro esistere strutturale.

Musmeci parte da un'osservazione: la forma è l'incognita, non sono le tensioni. In effetti noi abbiamo sviluppato un corpus della Scienza delle Costruzioni poderoso a confronto di quello che era in tempi non tanto lontani (pensiamo a come lavorava Hennebique, ad esempio, o Brunelleschi) e che cosa ne facciamo? Lo usiamo più o meno come gli architetti e gli ingegneri del Rinascimento; cioè noi "intuiamo" la forma della struttura e pensiamo che questa struttura vada abbastanza bene, poi usiamo la Scienza delle Costruzioni per verificare se le tensioni limite ammesse per il materiale che abbiamo impiegato effettivamente si adattano o no a questa forma. Questo, secondo Musmeci, è uno svilire la Scienza delle costruzioni, relegata al ruolo di verifica, non come strumento all'invenzione. Musmeci ribalta i termini: occorre che la forma, la geometria nello spazio sia l'incognita, e le tensioni limite, che ovviamente sono conosciute, siano i termini noti.

Ora il punto è come fare delle forme che non siano arbitrarie. Il suo approccio è un approccio scientifico, e il suo traguardo, il punto di confluenza delle sue ricerche è dato dalle forme limite. Cosa è una forma limite? Musmeci diceva che dato un certo sistema di forze esterne applicato ad una struttura, che noi dobbiamo scoprire, esiste una minima quantità di materia che risolve il problema strutturale, assieme a una forma che occupa il minimo ingombro nello spazio.

Quindi la non arbitrarietà della forma deriva dalla minimizzazione delle risorse di spazio e di materia: l'obiettivo di Musmeci è la più essenziale espressione formale delle forze in gioco nello spazio, la ricerca di forme minimali, quelle cioè che assolvono al loro compito strutturale impegnando la minima quantità di spazio e di materia. L'obiettivo non è soltanto l'economia intesa in senso lato, ma soprattutto una organica espressività architettonica. La struttura allora, attraverso la sua forma stessa, rivela con immediatezza i flussi delle forze interne che la percorrono e che non sono dunque rinchiusi e nascosti entro il volume di una morfologia concepita astrattamente secondo pregiudizi estetici e statici, in cui gran parte della materia e dello spazio impiegati sono del tutto superflui.

Questo processo progettuale è molto affine a quello che fa la natura, dove l'impiego delle risorse è legato a dei minimi assoluti, e molto probabilmente è questa la rara bellezza a cui approdano le forme

della natura. Bisogna dire che Sergio Musmeci si è cimentato alla ricerca di questo approdo.

Il corpus teorico a cui affida la ricerca della sua espressività, direi anche artistica, si basa sostanzialmente sulla scoperta di alcune invarianti.

La prima, che ho già accennato, è questa: dato un sistema equilibrato di forze applicate esiste una sola quantità minima di materia che risolve la struttura ottimale ed è espressa attraverso una forma ottimale, che è una forma di limite. Il sistema era basato su tre principi. Musmeci immaginava di fare un progetto utilizzando una materia teorica di resistenza infinita, e dunque dove le tensioni interne erano nulle. A questo punto poteva concentrarsi sulla forma e scoprire la forma ottimale per risolvere quel dato problema strutturale.

Il secondo punto è quello che lui chiamava l'azione statica, cioè la forza moltiplicata il percorso che deve percorrere all'interno della struttura. Secondo le equazioni della statica lo spostamento di una forza sulla sua direttrice non porta nessuna differenza. Musmeci pensava invece che questo determinasse una notevole differenza, perché evidentemente il percorrere una materia implica che questa materia occorra provvederla.

L'ultimo punto è la dimensione limite, un principio che certamente non ha inventato Musmeci, ma che lui teneva sempre presente. Diceva già Galileo che se noi prendessimo dei fabbricati o degli uomini e gli ingigantissimo in maniera spropositata tutte quante queste costruzioni non starebbero in piedi, perché evidentemente ogni cosa ha le sue dimensioni. La cosa è intuitiva: il peso cresce al cubo, le sezioni resistenti invece crescono al quadrato.

La seconda invariante è questa: egli aveva scoperto e dimostrato che in presenza di un sistema misto, dove si trova compressione e trazione, e quindi si hanno degli effetti flessionali, la differenza tra tutta la materia compressa e tutta la materia tesa è sempre la stessa, qualsiasi sia la struttura. Quando Musmeci era all'Università si divertì a calcolare un arco in calcestruzzo equicompresso (dove tutti gli sforzi hanno lo stesso segno), impiegando un calcestruzzo con una resistenza utile di 400 kg/cmq, con un peso di due tonnellate e mezzo a metro cubo, e scopri che la luce massima che si poteva raggiungere era 1600 metri. Questa struttura teorica era soggetta solo alla gravità e al proprio peso, quindi non a carichi accidentali dovuti a spinte laterali, al sisma, al vento, alle dilatazioni termiche, etc. Ora la scoperta di questo differenziale tra la materia compressa e la materia tesa facilita la ricerca di forme minimali che impieghino il minimo della materia compressa e il minimo della materia tesa.

La produzione di Musmeci può essere esaminata in due grandi gruppi, le strutture continue, dove c'è un flusso continuo di forze all'interno della struttura, e i sistemi discreti, dove invece c'è una struttura che è formata da un insieme di aste, come le travi reticolari, tra di loro congiunte da nodi. Poi ci sono i sistemi misti, dove non è ben chiaro quale delle due concezioni prevalga sull'altra.

Possiamo analizzare alcuni sistemi misti, come la già ricordata palestra del Centro di Atletica di Formia, dove Musmeci intuì come le armature di acciaio all'interno del cemento esprimessero il flusso delle forze molto meglio della forma finale, dove il getto nascondeva il disegno dei ferri.

Successivamente, nel progetto per la copertura del Cinema "Araldo" a Roma, Musmeci perfezionò il

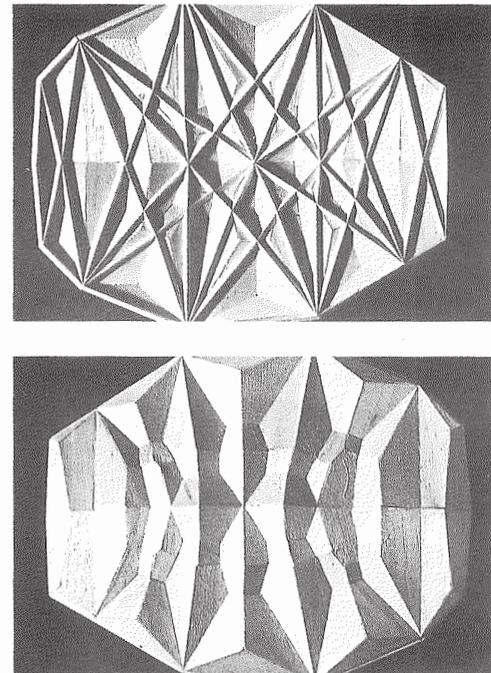


Fig. 1 - Copertura del Cinema Araldo a Roma (1955), vista dell'intradosso e dell'estradosso.

disegno delle coperture pieghettate, cercando di porre queste pieghe laddove effettivamente si manifestavano le forze con maggiore intensità. Questo sistema ha avuto il suo culmine nel Teatro Regio di Torino, dove è impiegato con risultati non solo strutturali, ma anche estetici, di indubbio, grande valore.

Tra i sistemi misti ho messo il progetto per il Ponte sullo Stretto di Messina, perché essendo una struttura complessa probabilmente attiene più a questa categoria.

In quel periodo io ero molto vicino a Sergio, e so benissimo il suo sgomento nell'affrontare un tema di queste proporzioni con dei mezzi che sino allora erano stati sviluppati soltanto in parte. Era assolutamente impossibile pensare di attraversare 3300 metri con un sistema strallato. Sergio pensò inizialmente ad un ponte sospeso, non di 3300 metri, ma di 2000 metri con i piloni nell'acqua. Ma i piloni nell'acqua erano impossibili. In quel periodo il Comandante Cousteau aveva fatto le sue esplorazioni sottomarine nello Stretto ed aveva rivelato le grandissime difficoltà per realizzare delle fondazioni in quei fondali.

Il problema della ottimizzazione delle strutture sospese tramite una catenaria è che ci deve essere una proporzione ottimale tra la luce e la freccia. Sergio aveva individuato questo rapporto ottimale intorno a 1/6. Ma se prolunghiamo la catenaria della struttura centrale di 2000 metri otteniamo dei piloni a terra impostati sulle due opposte sponde con un'altezza di 1700 metri! Da qui l'idea di sostituire i piloni con dei cavi strallati. Quindi un misto tra un ponte strallato ed un ponte sospeso. E questa è stata la grande intuizione di Musmeci per questa struttura.

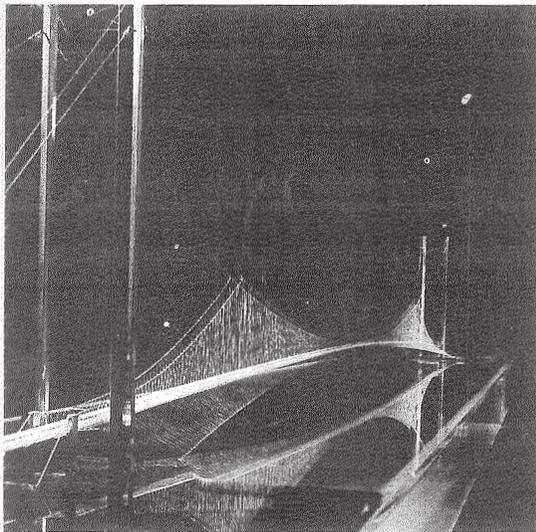
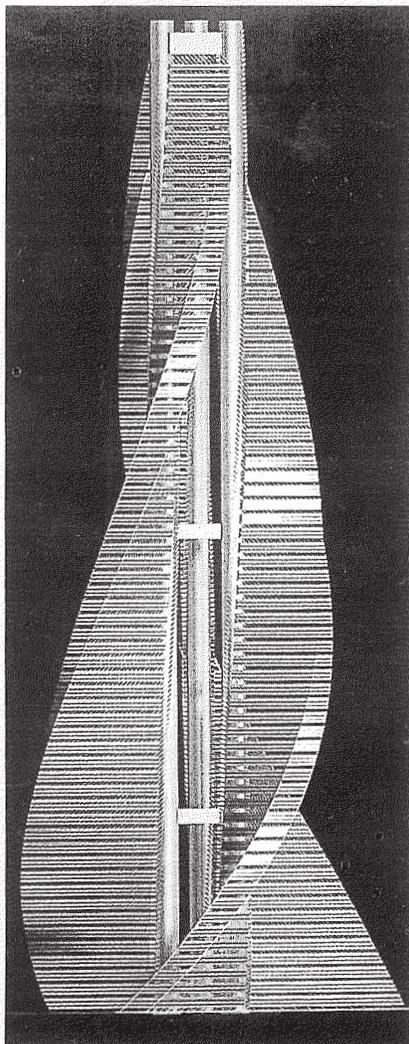


Fig. 2 - Ponte sullo Stretto di Messina: plastico del progetto dello Studio Sergio Musmeci, risultato tra i vincitori del concorso internazionale del 1970.

Fig. 3 - Grattacielo Elicoidale (1968-1971), progetto di M. Nicoletti, analisi strutturale di S. Musmeci.



Osservando la sezione dell'impalcato è chiaro come il sistema della sospensione e il controarco inferiore stabilizzante giacciono in piani diversi. Musmeci aveva l'idea di conquistare lo spazio, attraverso strutture che non derivassero da processi automorfici di simmetria, ma che fossero effettivamente tridimensionali nella loro concezione. Ad esempio una cupola è una struttura che ha la sua origine nel piano, da una forma bidimensionale: è sostanzialmente un arco ruotato su se stesso. Questo ponte, diversamente, non deriva da una trasformazione automorfica, ma è una conquista tridimensionale dello spazio.

Nel concorso internazionale per l'attraversamento dello Stretto, Musmeci fu l'unico a proporre una luce unica di 3300 metri. E per questa sua audacia fu sbeffeggiato per anni. Il prof. Morandi disse che la scienza non fa salti: abbiamo fatto ponti con una luce massima di 1300 metri, qui è quasi tre volte superiore! Il trionfo di Musmeci è arrivato adesso, quando la società dello Stretto ha adottato un ponte a luce unica, ma ahimè non "muscoloso" e geniale come questo, dove effettivamente il flusso delle forze nello spazio è manifestato in tutta la sua bellezza, ma proponendo un ingigantimento di un normale ponte sospeso.

Nel 1968 avevo ideato un grattacielo elicoidale, e portai un modello ad una mostra delle mie opere alla Galleria Arco Farnese di Roma. Il Comandante Cousteau mi aveva regalato in quel periodo un libro di cui aveva redatto la prefazione, *Le chaos sensible*, dove io vidi come l'acqua o i fluidi quando si compenetrano assumono delle forme che sono spiraliiformi, elicoidali. Mi ero basato inoltre per questa mia intuizione sugli studi di Frei Otto, e pensavo che un nucleo centrale rigido, che fosse compresso da funi di bordo, con dei piani compressi, effettivamente potesse dare stabilità a quest'opera.

Musmeci si offrì di fare l'analisi strutturale di questo grattacielo. Calcolò la geometria come una spirale parabolica sviluppata nello spazio, quindi propose che tutti i piani funzionassero come dei ponti strallati: il cavo di bordo non bastava, ma degli stralli a 45 gradi dovevano comprimere i piani contro i tre piloni centrali.

La cosa stupefacente fu che Sergio mi chiarì il funzionamento di questa struttura da un punto di vista aerodinamico: con un diagramma polare circolare. Una struttura che reagisce al vento alla stessa maniera da qualsiasi direzione; questa struttura subisce il minimo della spinta del vento perché è come la vela di una barca prima di andare in banda; è quindi una forma pessima per navigare, ma ottima per un grattacielo. Dopo qualche anno degli allievi di Giulio Pizzetti a Torino scelsero come tema di tesi il Grattacielo Elicoidale, e facemmo tutte le prove alla galleria del vento della FIAT, a Torino, e le intuizioni di Sergio furono tutte puntualmente confermate.

Entriamo nel campo dei sistemi discreti. Sergio Musmeci era un grande matematico, e stabili che esistono soltanto 5 poliedri, di cui 3 regolari e 2 semi-regolari che permettano la convergenza delle aste della *spaceframe* nel punto di nodo. Queste figure sono il tetraedro, che ha 4 facce triangolari, il cubo o esaedro, l'ottaedro con 8 facce triangolari, la bipiramide triangolare e il rombododecaedro. Non esistono altri solidi atti a poter recepire le aste in un sistema *spaceframe*.

Musmeci rivoluzionò quindi uno dei punti più delicati nella realizzazione della *spaceframe*, i nodi. Abbiamo il sistema Wachsmann, o quello Mero. Ma questi nodi sono molto costosi, e vogliono un impegno tecnologico ed economico notevole. Musmeci pensò semplicemente di abolire i nodi. Capì che le varie aste potevano convergere in un punto vuoto dello spazio, che idealmente formava l'involucro di un poliedro, e una volta che questo punto fosse stato riempito di calcestruzzo, eventualmente armato, la cerniera avrebbe assunto caratteristiche diverse, abolendo anche le difficoltà della costruzione stessa.

Musmeci allestì una grandissima mostra di queste sue *spaceframes* in piazza S. Salvatore in Lauro a

Roma, grazie al fatto che veniva usato per la prima volta il calcestruzzo polimerizzato, cioè rinforzato attraverso dei polimeri per acquistare notevole resistenza e altre doti di impermeabilità e resistenza. Le aste della *spaceframe* non erano più realizzate in elementi metallici, ma formate da elementi di calcestruzzo polimerizzato, con dei risultati che lui così descrisse:

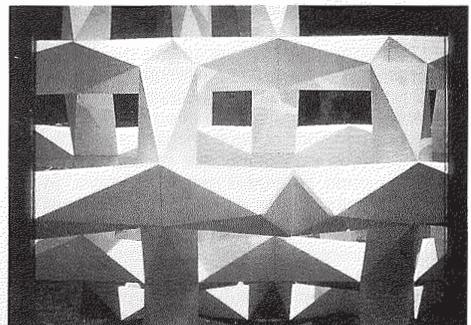
"Per queste strutture l'espressività si spostava dai singoli elementi al sistema di relazioni tra essi, dipendendo quindi sia dalla geometria del poliedro modulo, sia dal numero di coordinazione tipico di ognuno dei cinque sistemi, cioè dal massimo numero di sbarre che possono convergere in un nodo".

Mentre Musmeci progettava questi sistemi reticolari, fu talmente preso dall'entusiasmo per la geometria, che inventò l'antipoliedro. Se prendiamo degli elementi triangolari equilateri, raccogliendone 3 intorno ad ogni vertice otteniamo un tetraedro. Con 4 elementi triangolari vicini facciamo una bipiramide con base quadrata (ottaedro), e con 5 otteniamo un icosaedro. Con 6 facce triangolari equilateri raccolte intorno ad ogni vertice si ottiene un piano e non si può racchiudere più un volume. Dopo di che se ne raccogliamo 7, cominciamo ad avere delle deformazioni, che sono quasi incontrollabili: un eccesso di poligoni attorno ad ogni vertice immettono infatti una curvatura negativa. Tuttavia le superfici a curvatura negativa possono essere delle superfici minimali, poiché sviluppano la minima area per ogni possibile assegnato contorno. Inoltre permettono la trasmissione di forze con un regime caratterizzato da sforzi uniformi. Nel caso di *spaceframes* disposte secondo una simile superficie, come nel viadotto sul Lao, in Calabria, la convergenza delle aste doveva essere mediamente superiore a 6, per mantenere così una curvatura d'assieme negativa, ed ottenere delle superfici equicomprese, con sforzi normali identici in tutte le aste.

La *spira mirabilis*, formata da due spirali logaritmiche che si intrecciano, è un sistema equiangolo, nel senso che ogni segmento incontra l'altro sempre con lo stesso angolo. Musmeci scoprì che tale disegno rispondeva perfettamente all'equazione del minimo strutturale, e il sistema ispirò i progetti della Chiesa del Villaggio del Sole a Vicenza e del palazzo dello Sport di Firenze.

Arriviamo ai sistemi continui, dove la vera invenzione è il metodo con cui Musmeci utilizza tecniche già sperimentate. Gaudì era stato il primo a fare un modello rovesciato delle strutture della *Sagrada Família*, in modo che le tensioni di trazione, cambiando di segno, potessero essere trasformate in elementi a compressione uniforme. Queste strutture caratterizzate da sforzi omogenei, cioè dello stesso segno, Musmeci le applicò in molti progetti, come nel concorso per un ponte a Tor di Quinto. Qui, una membrana elastica tesa suggerisce la forma ottimale da usare quando, cambiati i segni degli sforzi, da tesa diventa compressa.

Fig. 4 - Mostra delle *space frames* in piazza San Salvatore in Lauro a Roma (1979).



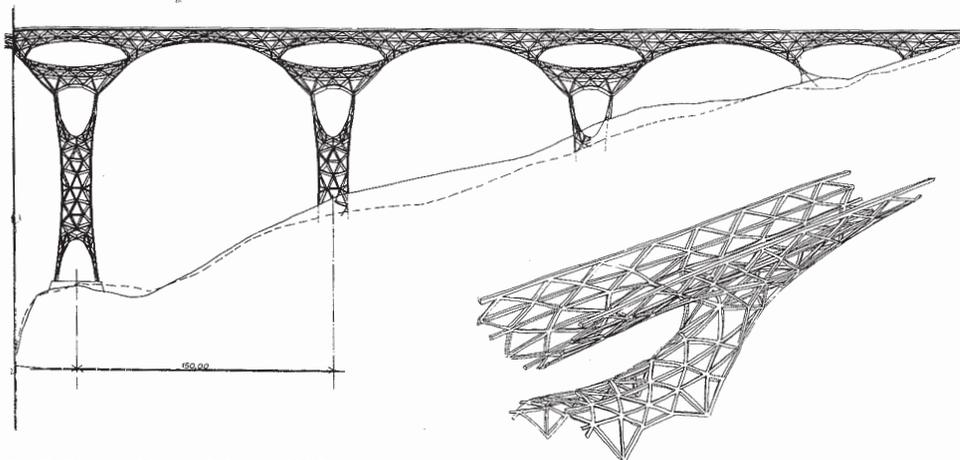


Fig. 5 - Ponte sul Lao in Calabria (1964): reticolo di aste a sezione costante, e a maglia triangolare. La realizzazione avverrebbe mediante posa in opera di involucri con sezione a C, accoppiati, e successivo getto di riempimento, cui sarebbe assicurata anche la continuità nei nodi.

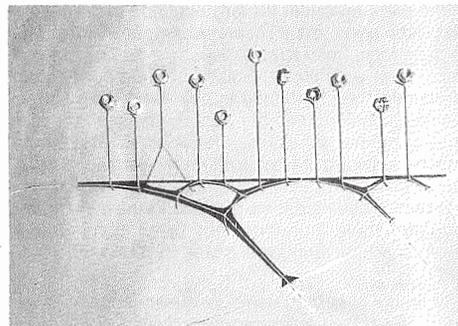


Fig. 9 - Modello (da vedere rovesciato) per il Ponte sull'Astico, Vicenza (1956): i carichi in trazione sono disposti dove saranno localizzate le forze di compressione.

Fig. 10 - Ponte sul Basento, Potenza (con Aldo Livadiotti, 1967-69).

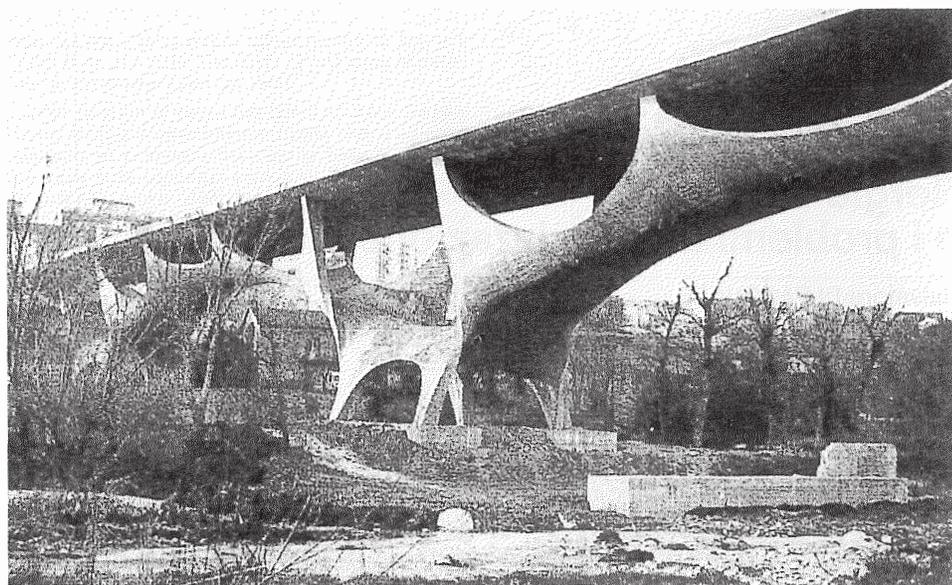
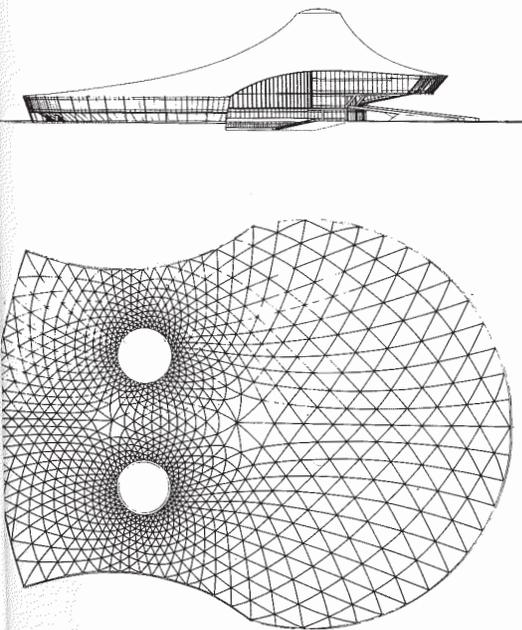


Fig. 6 - Progetto di concorso per il Palazzetto dello Sport di Firenze (2° premio), 1965. La *spira mirabilis* è descritta da cavi d'acciaio equitesi.

Nello studio del ponte sull'Astico un modello è appeso a quelli che sono in realtà i punti di appoggio sul terreno, mentre i pesi sono i carichi, cambiati di verso, gravanti sull'impalcato. Da questo modello nasce una struttura che si avvicina molto al criterio del minimo strutturale. Musmeci diceva che è impossibile realizzare una struttura che veramente rappresenti il minimo strutturale. È un po' come il ciclo di Carnot, irrealizzabile, ma a cui tendono tutti i processi di macchine termiche.

Ancora, la membrana elastica è utilizzata per lo studio del ponte sul Basento. Era per Musmeci la prima di una serie di forme assolutamente innovative. Forme - diceva - che non hanno ancora un nome: "è una forma non definibile come un arco, ma come una volta a compressione uniforme, è forse il primo degli oggetti tridimensionali creato veramente come tale, senza gratuità. Non è un sistema di ele-

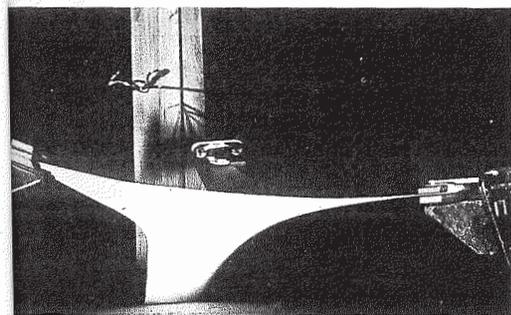


Fig. 7 - Ponte a Tor di Quinto, Roma (1959): un modello in gomma, messo in trazione, disegna la forma statica più efficiente.

Fig. 8 - Ponte a Tor di Quinto, Roma (1959): veduta del plastico.

menti piani accostati tra loro secondo uno schema stabilito a priori, ma è l'espressione dell'effettivo fluire delle forze nello spazio, assorbito da una materia necessaria e minimale. Solamente una concezione strutturale che sfrutti tutte le possibilità dello spazio tridimensionale, punto per punto, attraverso un continuo comporsi di forze e di tensioni può veramente essere considerata una struttura moderna. In realtà, quello che si progetta non è la forma, ma è l'equilibrio statico della struttura da cui la forma discende, il fatto strutturale è un fenomeno unico in cui forze e geometria intervengono insieme in modo inestricabile".

Quando Musmeci entrò in questo mondo di espressione, l'espressione della fluidità delle forze nello spazio, non vi seppe più rinunciare, e quando progettò un viadotto a Shiraz, un ponte semisommerso a Fogliano, i mercati generali di Roma e, insieme a Zenaide Zanini, il ponte sull'Appia, fece ricorso a queste forme straordinarie.

Vorrei concludere citando un'intervista che io gli feci negli ultimi mesi della sua vita: "La concezione dello spazio che possiamo avere noi oggi, come di

un campo di forze con proprietà geometriche completamente nuove, e con rapporti di contenuto fisico un tempo inimmaginabili, è una sorta di sintesi tra lo spazio geometrico dei Greci e quello fisico di Galileo e Newton. L'unità che si è raggiunta dovrebbe essere espressa in forme che rappresentino questa sintesi e la esprimano in maniera percepibile. Allora soltanto si potrà dire di lavorare in uno spazio moderno, dove le forze, gli equilibri statici siano talmente legati allo spazio stesso da coincidere con questo. Io credo che esprimere tutto ciò significhi fare opera di aggiornamento culturale a livello scientifico e anche in parte filosofico. Ogni epoca dovrebbe avere il suo spazio tipico in cui operare. Nella nostra epoca l'architettura dovrebbe essere fatta innanzitutto di tensioni, di forze, di equilibrio. Non di uno spazio astratto dove sia dominante il fatto geometrico fine a se stesso e non il fenomeno fisico. Alla base di tutto occorre un tipo di cultura che abbia recepito i contenuti significativi della scienza moderna. Una serie di colonne con sovrapposte delle banali trabeazioni rappresenta una operazione elementare di giustapposizione. Una forma continua, al contrario, è una forma organica e moderna proprio perché rappre-

senta la soluzione, in un'unica struttura, di forze e di equilibri che discendono da un complesso molto più ampio di eventi. Secondo me l'intelletto umano ha proprio bisogno di questo, di vedere il molteplice dissolto nel singolo, la complessità risolta in un'unica idea centrale molto potente. L'architettura, e non soltanto quella strutturale, è un campo dove oggi occorre rischiare. Chi non rischia vuol dire che sta imitando oppure ripetendo. Se vuole invadere un campo nuovo deve affrontare l'ignoto".

*Manfredi NICOLETTI, Docente all'Università "La Sapienza", inizia la sua attività di progettista dopo una intensa collaborazione con P.L. Nervi, W. Gropius, M. Yamasaki. Ha vinto importanti concorsi nazionali e internazionali, fra cui: il Nuovo Museo dell'Acropoli di Atene (con L. Passarelli), la Città Universitaria di Udine, i palazzi di Giustizia di Roma e Reggio Calabria e ha prodotto numerosi contributi scientifici.*

## Sergio Musmeci e i problemi di ottimizzazione strutturale

Salvatore DI PASQUALE

Quando arrivai a Firenze, poco meno che trenta anni fa, era da poco uscito il libro di Musmeci dedicato alle strutture; ricordo bene che lo consigliai ai miei allora giovani assistenti, ma devo anche dire che quel piccolo testo, oggi difficile da reperire, presenta difficoltà di lettura quasi insormontabili.

Musmeci voleva liberare la Scienza delle Costruzioni dal metodo di calcolo, ormai codificato e apparentemente non più modificabile, secondo il quale assegnata una struttura, e assegnati il peso proprio e i carichi che è chiamata a sopportare, bisogna determinare le tensioni interne. Il procedimento suggerito da Musmeci parte dall'analisi critica dell'apparato fisico-matematico su cui l'abituale analisi strutturale è stata fondata, a partire dai due postulati concernenti l'equilibrio delle parti infinitesime pensate e stratte dal continuo che le ospita e la congruenza delle deformazioni che in esse si generano, insieme eventualmente a quelle dovute a variazioni termiche o a difetti di montaggio, per far sì che non risultino né sovrapposizioni di materia né sconnessioni (che significano fratture). In ogni caso, scrive Musmeci, "il problema è ricondotto ad un problema matematico di integrazione di equazioni differenziali... alle quali sono associate determinate condizioni ai limiti che consistono nell'assegnare le forze che agiscono sulle superfici esterne della struttura e le deformazioni, nulle o non nulle che siano, nei punti dove la struttura è vincolata". Orbene, nota sempre Musmeci, i termini noti del problema sono rappresentati dalle leggi che esprimono il comportamento del materiale impiegato nella struttura e la sua stessa forma, mentre sono incognite le tensioni interne, le relative deformazioni e gli spostamenti conseguenti; in realtà però è giocoforza limitarsi al controllo delle massime tensioni e delle corrispondenti deformazioni che si verificano all'interno della struttura: sono questi valori che occorre controllare per poter effet-

tuare le due basilari verifiche che vanno sotto il nome di *verifica di resistenza* e *verifica di agibilità*, ossia controllare che le massime tensioni e deformazioni-spostamenti risultino inferiori ai valori assegnati per quel determinato materiale. Vedremo più avanti che Musmeci accenna anche all'altra possibilità – di cui non vi è cenno nelle abituali trattazioni generali del problema – in cui compaiono, come fattori capaci di modificare la risposta di un determinato problema, le distorsioni e i conseguenti stati di coazione; il fatto che tensioni e deformazioni debbano risultare inferiori, o al più eguali, a valori predeterminati suggerisce a Musmeci l'idea di capovolgere l'impostazione del problema considerando come dati noti le tensioni e come incognite le grandezze che descrivono la forma della struttura: "in tal modo – scrive Musmeci – compiamo un passo verso un nuovo modo di utilizzare la scienza delle costruzioni. Tanto più se le grandezze geometriche non sono solo quelle che individuano il dimensionamento delle sezioni resistenti, ma sono anche quelle che rappresentano le proporzioni dell'intera struttura o che, addirittura, ne individuano la forma generale... In tal modo si arriva ad una filosofia della progettazione strutturale ben diversa da quella che generalmente presiede al lavoro dello strutturista... che comporta il controllo del processo progettuale; lo strumento matematico viene usato non come mezzo per verificare un oggetto preassegnato... ma per consentire o aiutare scelte progettuali consapevoli spinte in profondità verso la radice dei fatti che caratterizzano e qualificano il comportamento statico...".

Come si vede, dunque, tutto il processo viene completamente trasformato rendendo il lavoro dello strutturista assai più simile a quello del progettista perché a lui viene chiesto di determinare la forma ottimale capace di risolvere il problema assegnato: qualcosa del genere era stato suggerito da Eduar-

do Torroja nella sua celebre opera dedicata alla filosofia delle strutture, ma con un taglio completamente diverso, mirando alla scelta che risultasse in grado di soddisfare il maggior numero di esigenze che l'ideazione di una architettura pone al progettista.

Il problema della ottimizzazione strutturale emerge per la prima volta con Galileo Galilei nell'ultima sua opera *Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638); una di queste è la resistenza dei materiali, che segna la nascita della Scienza delle Costruzioni; l'altra riguarda invece il moto dei proiettili. Quando Galilei inizia il suo discorso sulla resistenza delle travi e delle colonne, il primo problema che gli viene in mente è quello della trave appoggiata; elaborando una sua teoria (che poi si rivelerà non essere esatta, poiché è sbagliata la posizione dell'asse neutro) egli arriva alla conclusione che la trave incastrata in un estremo e libera nell'altro, per essere di uniforme resistenza deve avere forma parabolica. E gli sembra così importante questa osservazione da fargli concludere che l'idea di tagliare la trave in forma parabolica, eliminando un terzo del suo peso proprio, potrà essere un risultato di grande interesse nelle navi, nelle quali evidentemente il rapporto tra peso proprio della struttura e stazza della nave è un fattore di cui si deve tener conto.

Dopo due secoli ineliminabili, alla luce della Storia della scienza delle costruzioni, perché Galilei fonda la resistenza dei materiali, ma solo con Navier (1823) possiamo dire che è nata una teoria delle strutture, James Clerk Maxwell, celeberrimo padre dell'Elettromagnetismo, scrive una nota *Sulle figure reciproche, telai e diagrammi delle forze* (1869). Le figure reciproche sono meglio note come i diagrammi Cremoniani; ricordo che quando si assegnava una struttura reticolare e occorreva determinare le sollecitazioni nelle aste, un metodo, insie-

me a quelli di Ritter e di Cullman, era quello di Luigi Cremona (Ministro della Pubblica Istruzione nel Regno d'Italia, e professore di Geometria Proiettiva all'Università di Roma). Maxwell si occupa delle relazioni geometriche esistenti tra lo schema di una struttura reticolare e il diagramma delle sollecitazioni nelle sue aste; per inciso devo segnalare che a Maxwell è dovuta anche l'osservazione che la reciprocità tra la struttura assegnata e il diagramma degli sforzi trova riscontro nella teoria del continuo elastico tra la funzione di Airy e la descrizione della forma cui le equazioni sono riferite, e sono proprio questi studi a suggerire ad A.G.M. Michell di stabilire una connessione tra la forma della struttura e la quantità di materiale strettamente necessario per il suo corretto funzionamento.

Nei disegni che si trovano nella nota di Michell, *I limiti dell'economia del materiale nelle strutture intagliate* (1904), viene posto il seguente problema: sono dati due punti fissi A e B, che possono essere gli appoggi di una trave, è dato il punto nel quale è applicata una forza F, si vuole conoscere il disegno della struttura ottimale, cioè la struttura nella quale il peso del materiale impiegato risulti il minimo possibile.

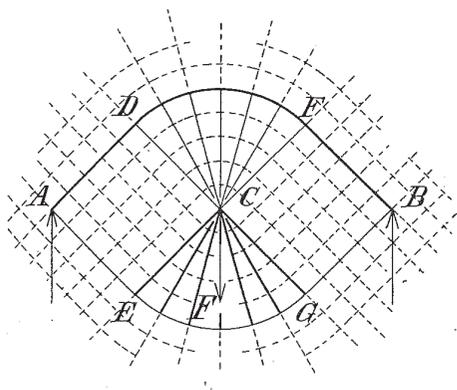


Fig. 1 - "Centrally-loaded Beam. A single force, F, is applied at C, the middle point of the line AB, and is balanced by equal parallel forces at A and B. The minimum frame is composed of the two quadrantal bers DF and EG, having their common centre at C, of all the radii of these quadrants, and their four tangents AD, AE, BF, and BG." A.G.M. Michell, *The Limits of Economy of Material in Frame-Structures* (1904).

La figura 1 mostra il risultato cui si perviene con l'applicazione delle idee esposte nella nota di Michell; devo tuttavia segnalare che si tratta di una soluzione matematica del problema, nella quale non è nemmeno presa in considerazione la realizzabilità di una tale struttura in termini di nodi e di tecnologie esecutive; vedremo tra breve la presenza di tali strutture in tutt'altro campo di ricerche: per il momento è sufficiente segnalare che questo fu il primo tentativo mirato a determinare una forma che scaturisca direttamente dalla funzione che la struttura sarebbe stata chiamata ad assolvere.

Sergio Musmeci è affascinato dalle idee espresse da Michell e le rielabora in una sua personalissima interpretazione partendo dalla considerazione che tutta la Statica è dominata dal fatto che non può esistere, in natura, una sola forza applicata in un punto, ma che devono sempre esistere almeno due forze eguali e contrarie: devono cioè esistere, come nel magnetismo, due poli eguali e contrari; da qui l'idea del *dipolo statico*, sul quale costruisce tutta la sua teoria delle strutture.

A considerazioni analoghe era giunto anche Michell che aveva posto, tra gli altri, il problema della determinazione della struttura ottimale che deve essere disegnata su una superficie sferica affinché essa abbia il minimo volume, e conseguentemente il minimo peso, dovendo sopportare due momenti torcenti autoequilibranti ed applicati alle estremità di un

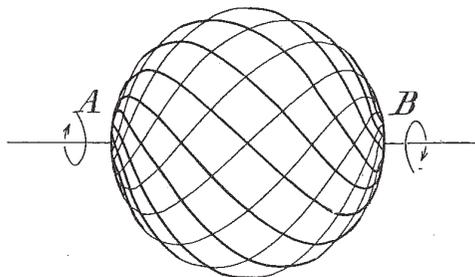


Fig. 2 - "Equal and opposite couples applied at points A, B on the straight line AB. The minimum frame consists of the series of rhumb-lines inclined at 45° to the meridians of the sphere having its poles at A and B. All the rhumb-lines of one series and all similar lines on spheres concentric with the spherical frame are uniformly and equally extended, all the lines orthogonal to these on the sphere equally compressed." A.G.M. Michell, *The Limits of Economy of Material in Frame-Structures* (1904).

suo diametro orizzontale, come mostra la figura 2 tratta dalla sua nota *The limits of economy of material in frame-structures* del 1904.

Vale la pena di segnalare che il risultato cui perviene Michell è praticamente quello che si sarebbe ottenuto se si fossero ricercate le linee isostatiche tracciate sulla superficie sferica supposta come guscio sottile; e che risultati analoghi erano stati ottenuti in modo del tutto autonomo dal Ritter che aveva sottolineato la corrispondenza tra le linee lungo le quali si trasmettono le pressioni esercitate sulla testa del femore e la conformazione delle trabecole ossee che ne costituiscono la spongiosa, struttura cellulare o porosa già riconoscibile nei neonati e che con la crescita diventa sempre più evidente, come è mostrato nella figura 3.

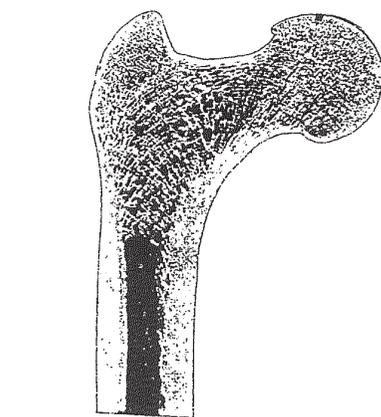


Fig. 3 - W. Ritter, *Anwendungen der Graphischen Statik nach Professor Dr. C. Culmann* (1875).

Singolare coincidenza, questa, che non poca importanza ebbe, sul finire del secolo scorso, nel far ritenere che tutti i fenomeni naturali dovessero trovare spiegazione nelle leggi della Meccanica; da ciò a ritenere che anche le discipline morali potessero, e dovessero essere regolate da analoghi principi, il passo fu breve: il positivismo ne fu l'espressione tanto concreta quanto effimera, come dimostreranno più tardi la crisi dei fondamenti della Geometria, della Fisica (classica, naturalmente), e delle Scienze europee, per dirla con Husserl.

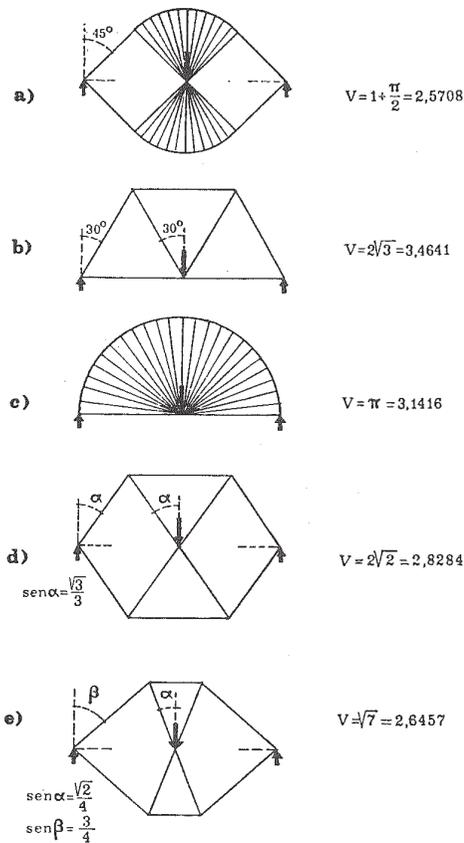


Fig. 4 - S. Musmeci, *La statica e le strutture* (1971).

La filosofia che sostiene la nuova teoria di Sergio Musmeci, sviluppata ne *La statica e le strutture* (1971), è esemplificata da un esempio didatticamente assai efficace (figura 4): abbiamo due appoggi, la forza è applicata in un punto, si vuol conoscere qual è il disegno della struttura ottimale. La forma della trave è lasciata libera nell'esercizio, in modo da determinare quella alla quale compete il minimo volume, che significa il minimo peso. Abbiamo 5 soluzioni alle quali competono volumi completamente diversi, alla prima soluzione compete il minor volume; l'obiettivo era dimostrare che c'era una possibilità matematica di arrivare alla soluzione.

Le equazioni alle quali si arriva con questa formulazione sono a mio parere belle da vedere ma impossibili da integrare; sono equazioni alle derivate parziali, e sono le stesse equazioni che governano il problema dei solidi murari nei quali c'è solo la resistenza a compressione, non c'è resistenza a trazione. È questo uno degli scopi che si prefiggevano prima Maxwell, poi Michell, e poi Sergio Musmeci. Per il teorema di Michell una struttura di minimo peso è tale se la differenza tra il volume delle aste tese e delle aste compresse, prese come valori assoluti, è la minima possibile. E allora si capisce subito che uno dei due termini deve annullarsi, cioè o devono sparire le aste tese, o devono sparire le aste compresse, se il materiale può sopportare solo compressioni o solo trazioni: naturalmente compatibilmente con lo schema dei carichi e dei vincoli assegnati: ciò risulta dalla Meccanica dei materiali a vincoli unilateri.

Musmeci pubblicò il suo testo nel 1971; questo è il disegno che dovrebbe avere una trave con un incastro e sottoposta ad una forza F, secondo le ricerche

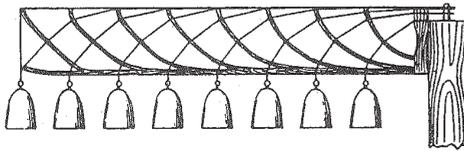


Fig. 5 - W. Ritter, *Anwendungen der Graphischen Statik nach Professor Dr. C. Culmann* (1875).

pubblicate da W. Ritter nel 1875 (figura 5): il materiale dovrebbe essere strutturato secondo la disposizione delle trabecole (così le chiama anche Musmeci rammentando l'origine ossea). Se si dovesse progettare una trave che avesse un tale significato strutturale, occorrerebbe una tecnologia capace di seguire queste ricerche, per cui questo "tessuto" venisse fornito automaticamente da qualche macchina, a meno che non si pensi alla rivalutazione dell'artigianato.

Siamo nel 1991; dalle ricerche del danese Olhoff il disegno della figura 6 rappresenta la trave sulla quale è appoggiata la struttura di sostegno negli aerei e che fa da telaio per il piano di camminamento dei passeggeri. La forma è il rettangolo, e il lavoro di ricerca, che richiede ovviamente l'impiego dell'elaboratore elettronico, si svolge tutto all'interno della forma assegnata, togliendo il materiale in funzione delle sollecitazioni che si generano: le modificazioni della forma della struttura sono rappresentate dalla successione delle immagini che indicano la situazione di partenza e quella di arrivo.

Se non ho tradito il suo pensiero mi pare che questo sia stato il grande insegnamento che Sergio Musmeci ci ha lasciato.

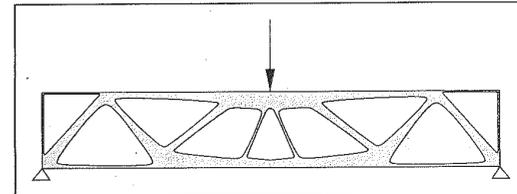
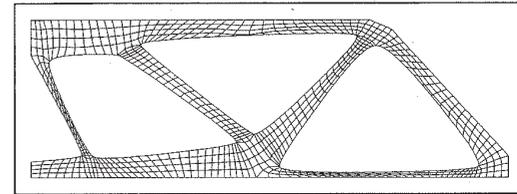
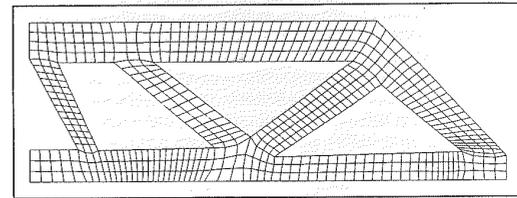
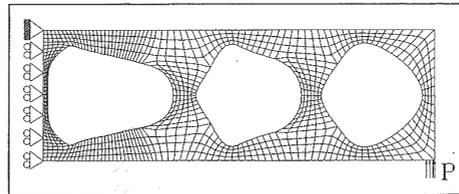
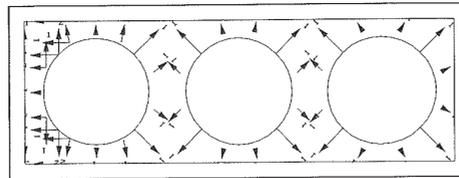
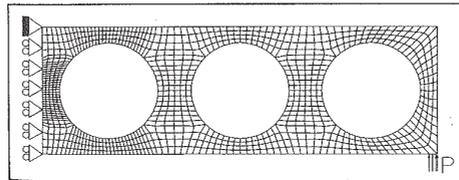
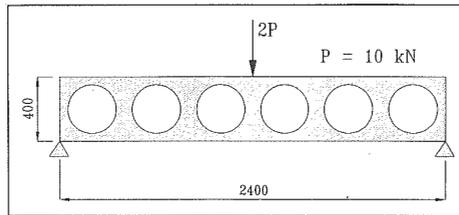


Fig. 6 - N. Olhoff (1991): processo di ottimizzazione della trave di supporto di un aeroplano.

Salvatore DI PASQUALE, nato a Napoli nel 1931, si è laureato in Architettura nel 1955. Nel 1964 ha conseguito la libera docenza in Scienza delle Costruzioni, e dal 1973 è professore ordinario della stessa disciplina; insegna Statique et stabilité des monuments à l'Université Catholique de Louvain e dal 1981 presso la Scuola di Perfezionamento in Restauro dei Monumenti della Università di Napoli. È stato preside della Facoltà di Architettura di Firenze dal 1985 al 1991; attualmente è preside della Facoltà di Architettura di Siracusa. Si occupa di Meccanica delle murature e delle relazioni tra l'Arte e la Scienza del costruire.

## I ponti di Sergio Musmeci: verso soluzioni ottime e robuste?

Enrico MANGONI - Paolo SPINELLI

### 1. INTRODUZIONE

Ogni volta che ci troviamo a dover discutere o a commentare una costruzione, qualunque sia la sua importanza, si è coinvolti in annose e spesso futili discussioni circa il prevalere dell'aspetto formale su quello tecnico, o comunque sul loro rapporto. Così vengono distinti in modo netto anche gli operatori del mondo delle costruzioni, considerando gli architetti come i creatori della forma, gli inventori, e gli ingegneri come portatori di una cultura astratta e complessa. Continuando con questo atteggiamento, si è addirittura fissato un ordine temporale secondo cui fare intervenire i due contributi. Il primato sembra spettare alla fase d'impostazione formale, secondariamente si progetta la struttura.

Fra le cause di questa contrapposizione, sicuramente una posizione di rilievo è occupata dal processo formativo e culturale cui vengono sottoposti gli architetti da una parte, e gli ingegneri dall'altra.

In una direzione vi sono spesso discipline che stimolano la creatività, e la libertà progettuale, spesso senza porsi neppure il problema della realizzabilità della soluzione scelta, dall'altra teorie e procedure di calcolo di enorme generalità, capaci di affrontare problemi fisici anche molto complessi, che hanno bisogno però di un progetto cui poter essere applicate. In questo senso le due posizioni contrapposte sono anche straordinariamente vicine. Non è infatti facile decidere se sia più astratta ed incompiuta una progettazione senza riferimenti esecutivi, quasi una semplice esercitazione grafica, oppure un metodo di calcolo che ha bisogno di una base di partenza per poter sprigionare tutta la sua potenza.

La prevalenza netta di una posizione rispetto all'altra, spesso dettata da logiche economiche e di mercato, e comunque da fattori che non hanno niente a che fare con la progettazione sia essa architettonica o strutturale, ha portato inevitabilmente a costruzioni mal riuscite. Tutti noi abbiamo esempi

di opere apprezzabili esteticamente, ma che hanno manifestato nel corso degli anni enormi problemi statici o quantomeno di durabilità; altresì conosciamo anche costruzioni ben eseguite e di indubbe proprietà resistenti, che ci causano un forte disagio intimo anche solo nel guardarle o nell'accostarle al contesto in cui sono inserite.

In questo senso all'aspetto formale e strutturale deve riconoscersi pari dignità, ed uguale importanza nella definizione di un'opera, né devono stabilirsi gerarchie ed ordini di intervento temporale. Nessuno può sminuire l'efficacia e l'importanza dello scheletro all'interno del corpo umano, anche se nascosto e non visibile, ancorché inserito in una creazione di straordinario effetto esteriore, qual è appunto l'essere umano. Allo stesso modo, nei ponti di grandissima luce l'unica soluzione possibile è rappresentata dal "ponte sospeso", ma l'architettura dei piloni di ormeggio, la forma dell'impalcato, la cura nella scelta dei dettagli possono far apparire una

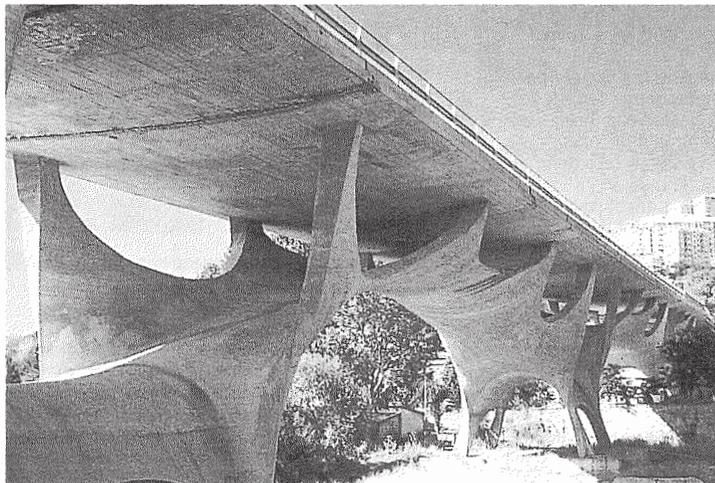


Fig. 1 - Il ponte sul Basento a Potenza [3].

stessa soluzione statica in modo profondamente diverso a chi la osservi, così come connotare l'ambiente in cui si inseriscono con altrettanta efficacia.

Non vi è creazione soltanto nella definizione della forma di un'opera, ma anche nella scelta delle sue proporzioni e del sistema resistente che la caratterizzerà. Ad ogni espressione formale possiamo in generale associare diverse scelte strutturali, tutte ugualmente valide se viste come sistema capace di trasferire al terreno delle forze, ma profondamente diverse se analizzate dal punto di vista della funzionalità della costruzione, della sua durabilità, del suo inserimento nell'ambiente circostante.

La scelta di un tipo o dell'altro, è in sostanza un atto di libera scelta che non può farsi derivare solo da rigide deduzioni logiche. In questo senso l'esame delle opere dei grandi progettisti, cui senz'altro Sergio Musmeci appartiene, ha non solo significato celebrativo, ma è di straordinario esempio per tutti noi, nel ricordo di personaggi in cui il rapporto forma-struttura pur secondo le personali inclinazioni di ognuno, è frutto di notevole capacità di sintesi progettuale.

## 2. LA FILOSOFIA STRUTTURALE DI SERGIO MUSMECI

L'analisi ragionata delle opere di Sergio Musmeci (figure 1 e 2) conduce senza esitazione ad individuare il filo conduttore della sua impostazione progettuale. Tutti i progetti principali sono rivolti a determinare per un certo problema costruttivo, lo schema resistente d'insieme che ottimizza sotto le azioni esterne il volume di materiale impiegato. I riflessi di tale filosofia progettuale sono diversi, da un lato scaturiscono strutture i cui elementi resistenti sono straordinariamente snelli ed esaltano anche a prima vista le proprietà resistenti del materiale, senza parti visibilmente ridondanti e forzatamente estranee all'armonia dell'insieme strutturale, dall'altro realizzazioni di forte spazialità e di formidabile capacità espressiva. Proprio quest'ultimo aspetto è una diretta conseguenza dell'impostazione di Musmeci. Ogni realizzazione costruttiva, sia di grande che di piccola scala, sia nel campo dei ponti che in quello degli edifici, costituisce infatti un problema tridimensionale che non necessariamente prevede per geometria del complesso, per tecnologie costruttive e per la natura delle azioni esterne che dovrà sopportare, caratteristiche di simmetria. Ne consegue che lo schema resistente più appropriato per tale problema, non potrà anch'esso che essere di tipo spaziale.

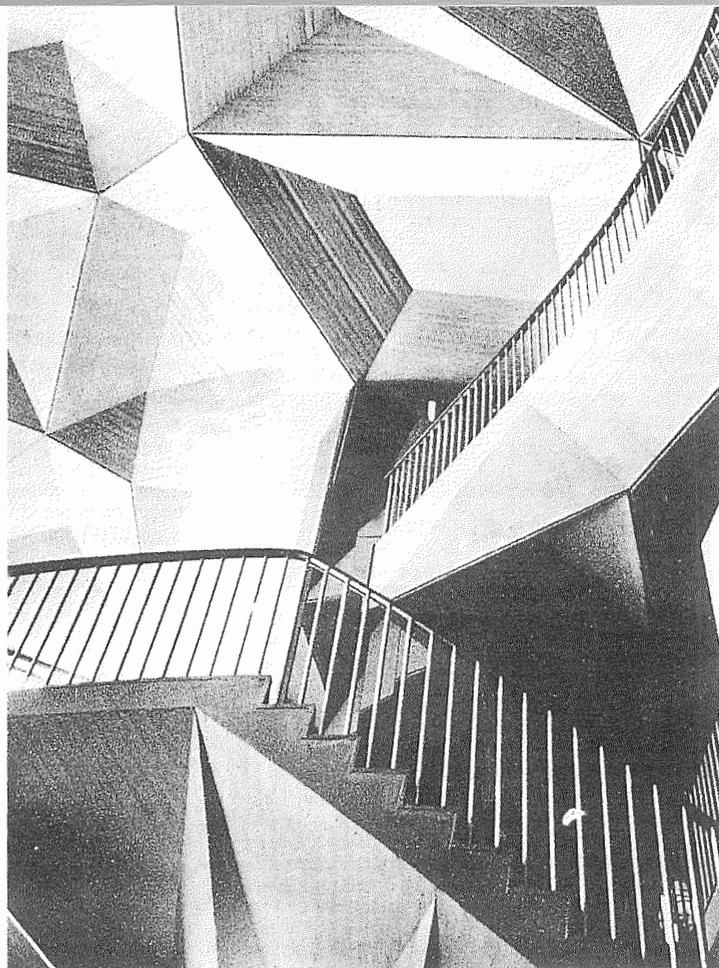


Fig. 2 - La copertura del nuovo Teatro Regio a Torino [4].

Questo è evidente nelle opere di Musmeci, i suoi elementi portanti non fanno riferimento a schemi piani, sono delle superfici nello spazio, mutevoli di volta in volta per classificazione geometrica, ma tutte volte in modo unitario a connotare con caratteristiche peculiari le tre dimensioni spaziali.

In Musmeci la "terza" dimensione non è ottenuta come ripetizione seriale di schemi tipicamente piani, ma arricchisce la realizzazione di nuove ed inusitate caratteristiche, ampliando in modo inaspettato la visione dell'oggetto progettuale.

Una testimonianza diretta di questo si ha quando osservando le strutture in esame, su stampe o rappresentazioni fotografiche, si avverte il bisogno di esaminare l'opera sotto diversi punti di vista per coglierne appieno la globalità.

Appare evidente in tali progetti un elevato senso della geometria, inteso non tanto come qualità di rappresentazione, quanto piuttosto come strumento che partendo da forme anche elementari riesce per "composizione strutturale" a collocare l'opera in modo originale nello spazio.

## 3. L'OTTIMIZZAZIONE STRUTTURALE: CONCETTI DI BASE, RECENTI APPLICAZIONI, PROSPETTIVE.

In tutte le opere di Musmeci come già evidenziato, appare dominante sull'intera filosofia di progetto, la tendenza ad "ottimizzare" il volume occupato dagli elementi resistenti al fine di ottimizzare lo sfruttamento delle capacità resistenti del materiale. Ma che cosa s'intende in generale per "ottimizzazione strutturale", e quali attualmente sono le sue applicazioni più importanti?

Ogni progetto risulta vincolato da tutta una serie di aspetti come per esempio la funzionalità della struttura, il comportamento meccanico dei materiali con cui questa sarà realizzata, le tecnologie di esecuzione, il risultato estetico, i costi etc, che possono divenire di volta in volta l'uno preponderante rispetto all'altro, fino a determinare soluzioni anche molto diverse fra di loro, relative ad un unico problema di

partenza. È evidente pertanto che una struttura può definirsi "ottima" solo con riferimento ad una funzione obbiettivo, e non naturalmente nei riguardi di tutti i requisiti che deve possedere. In particolare quando si affronta l'ottimizzazione strutturale, si utilizza usualmente un processo sequenziale, il cui obbiettivo è quello di distribuire il materiale in una struttura, in modo che questo risulti sollecitato per quanto possibile uniformemente ed attingendo pienamente a tutte le sue proprietà resistenti. Le scelte dovute a tale processo pur avendo lo stesso obbiettivo possono essere in riferimento alla struttura che il progettista sta esaminando di tipo **globale**, di tipo **locale**, di tipo **materiale**. Le scelte globali riguardano la tipologia strutturale. Ad esempio nella figura 3 si riportano quattro soluzioni statiche per una trave inflessa modellata con elementi finiti; al diminuire del materiale fa riscontro un aumento della tensione massima e delle frecce significativamente inferiori alla riduzione di sezione operata, e questo indica che la tipologia strutturale verso cui si tende con le successive soluzioni (trave reticolare) sfrutta meglio il materiale rispetto alla tipologia di partenza (trave inflessa ad anima piena). In particolare ogni soluzione riportata, è ottenuta dalla precedente per eliminazione del materiale meno sollecitato, modificandone in modo affine il contorno delle cavità presenti. Si indica con F il rapporto fra l'area della superficie occupata da una qualunque delle travi rappresentate e quella occupata dalla trave di partenza senza cavità. Si indica invece con S il rapporto fra la tensione massima nel materiale ottenuta in una qualunque delle travi successivamente rappresentate e la tensione massima nella trave di partenza.

La spiegazione di tale comportamento risiede nel fatto che tanto più le tensioni divengono uniformi nelle varie parti della struttura, tanto più il materiale risulta meglio sfruttato; naturalmente in un processo reale di ottimizzazione si arriverebbe infine a spessori delle parti rimanenti differenziati secondo la posizione, con un'ulteriore amplificazione degli effetti positivi.

Le scelte di tipo locale riguardano la distribuzione del materiale nell'ambito del singolo elemento strutturale. A testimonianza dell'importanza di tale fattore

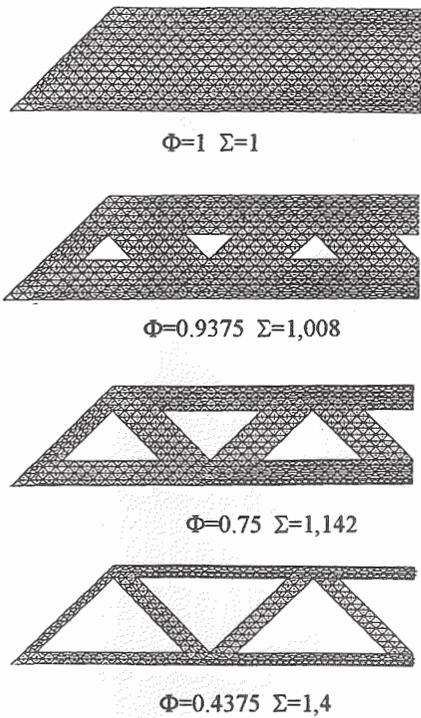


Fig. 3 - Ottimizzazione di una trave inflessa per eliminazione del materiale meno sollecitato [7].

per lo sfruttamento ottimale delle proprietà resistenti del materiale, per un'asta compressa in acciaio (figura 4), a parità di area della sezione trasversale e pertanto di peso per unità di lunghezza dell'elemento, nel caso in cui si considerino due diverse tipologie di sezione, viene fornito il valore del raggio d'inerzia minimo, e quindi l'efficacia dell'elemento strutturale stesso nei confronti dei fenomeni d'instabilità dell'equilibrio. È evidente infatti che a causa dell'instabilità dell'equilibrio per compressione centrata, una delle due sezioni è esuberante, ovvero insufficiente per resistere all'azione data, nonostante entrambe presentino la stessa area.



HE 100 A = 21.2 cm<sup>2</sup>, ρ<sub>min</sub> = 2.51 — Tubolare φ120 (sp. 12 mm) A = 21.2 cm<sup>2</sup>, ρ<sub>min</sub> = 4.06

Fig. 4 - Distribuzione ottimale del materiale nella sezione trasversale di un'asta compressa.

Le scelte di tipo materiale riguardano la scelta del materiale con cui realizzare una determinata tipologia strutturale.

È chiaro che i tre tipi di scelta predetti, oltre a tenere conto dei vincoli imposti alla struttura possono anche non essere contemporanei, come si verifica ogniqualvolta uno di questi costituisca già un vincolo di partenza del problema di ottimizzazione (ad esempio nell'ottimizzazione del peso di una trave reticolare in acciaio di tipologia assegnata, le scelte globali e materiali costituiscono un dato di partenza).

La possibilità di ottimizzare una struttura relativa ad un dato problema statico, potendo effettuare tutti e tre i tipi di scelta, conduce a minimizzare il peso strutturale, e pertanto ha inevitabili ripercussioni economiche.

Storicamente l'ottimizzazione strutturale è nata come problema legato all'esigenza di ridurre il peso strutturale perché la quantità di materiale impiegato

nelle costruzioni, aveva un'importanza decisiva sul costo complessivo della realizzazione, e quindi in sostanza la struttura di minimo peso, veniva a coincidere anche con quella di minimo costo. Tale posizione è andata lentamente mutando nel tempo, tanto che attualmente non è più sostenibile in ogni caso. Basti pensare all'influenza attuale del costo della tecnologia esecutiva su quello complessivo della costruzione, per rendersi conto che in molti casi le strutture di peso minimo non sono assolutamente le più economiche. Nondimeno esistono tuttora anche casi in cui l'ottimizzazione del peso strutturale ha riflessi economici positivi, (si pensi alla realizzazione di elementi prefabbricati in grande serie) o addirittura determinanti per la realizzazione dell'opera stessa (si pensi ai ponti di grandissima luce).

Le più recenti applicazioni dell'ottimizzazione strutturale riguardano i problemi di ottimizzazione della forma.

Per ottimizzazione della forma di una struttura si intende la determinazione di alcuni parametri della sua geometria, fissati che siano altri, al fine di ottimizzare alcune variabili di progetto. Ad esempio, nella figura 5 viene determinato il contorno interno ed esterno di un organo di trasmissione, fissati che siano i raggi dei pezzi da questo collegati (circonferenze superiore ed inferiore) e l'intensità di una forza applicata, avendo come obiettivo quello di minimizzare il peso dell'organo.

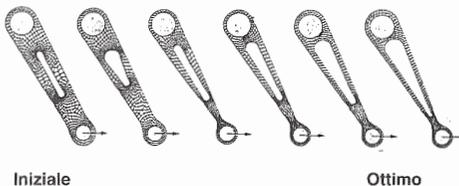


Fig. 5 - Ottimizzazione di un organo di trasmissione [1].

Talvolta l'ottimizzazione della forma viene chiamata anche ottimizzazione topologica. Per ottimizzazione topologica si intende la determinazione della geometria di una struttura in un dato spazio di progetto, avendo come obiettivo quello di sfruttare al meglio le caratteristiche del materiale strutturale. La topologia di una struttura è definita attraverso un insieme di elementi strutturali, nodi e vincoli interni. L'ottimizzazione strutturale interviene sulla topologia variando la configurazione di aste e nodi, ma anche il loro numero nel caso di strutture discrete, nel caso di strutture continue rimodellando, eliminando o aggiungendo domini materiali (figura 6).

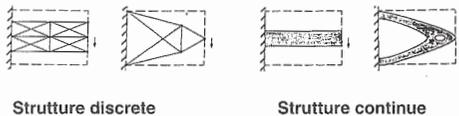


Fig. 6 - Variazione di topologia per strutture discrete e continue [1].

Per le strutture continue la geometria strutturale può essere descritta in prima approssimazione attraverso una distribuzione di materiale arbitraria e discontinua. Ad esempio, con riferimento alla figura 7, per una struttura semplicemente incastrata ad una estremità e soggetta ad un carico concentrato all'altra, lo spazio di progetto inizialmente viene discretizzato in una serie di elementini di dimensioni opportune. All'interno di questo la struttura resistente può essere descritta assegnando a ciascun elemento la presenza di materiale oppure no. In termini analitici questo concetto può definirsi attraverso una funzione  $c$ , i cui valori indicano la presenza o l'assenza di materiale (ad esempio  $c=0$  indica assenza di materiale,  $c=1$  presenza di materiale).

$$\chi(x) = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{no material} \\ 1 & \rightarrow \text{material} \end{cases}$$

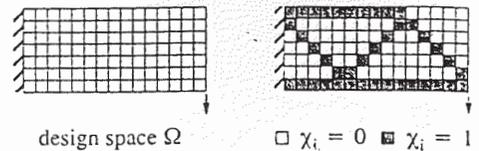


Fig. 7 - Distribuzione di materiale di tipo discontinuo [1].

È chiaro che in tale contesto ad ogni struttura resistente (nella figura 7 viene rappresentata una possibilità) corrisponde una diversa distribuzione di materiale, ovvero dei valori assunti dalla funzione  $c$ , per cui la variabile del processo di ottimizzazione in questo caso risulta essere proprio la distribuzione dei valori di  $c$  che persegue l'obiettivo di partenza.

Tale formulazione del problema dell'ottimizzazione topologica non è ben posto, e per altro risulta anche matematicamente non convesso, essendo troppo legato alla discretizzazione fatta per lo spazio di progetto (potrebbero esservi infatti zone dello spazio di progetto, ovvero elementini di discretizzazione, non completamente riempiti da materiale in base al processo di ottimizzazione. Questo non è possibile nella formulazione proposta, in quanto ogni elemento è completamente riempito di materiale, oppure è vuoto.)

Questa formulazione dell'ottimizzazione topologica può essere regolarizzata introducendo il concetto di materiale poroso con densità variabile  $r$ . In questo modo la distribuzione discreta di tipo "0-1", viene trasferita in un problema di tipo continuo, all'interno del quale durante i vari passi del processo di ottimizzazione sono possibili distribuzioni materiali di tipo intermedio. (il generico elemento di discretizzazione dello spazio di progetto può essere caratterizzato da valori di  $c$  compresi fra 0 ed 1). I materiali porosi con densità variabile esistono in natura, basti pensare ad esempio alla struttura delle ossa, oppure alle leghe metalliche.

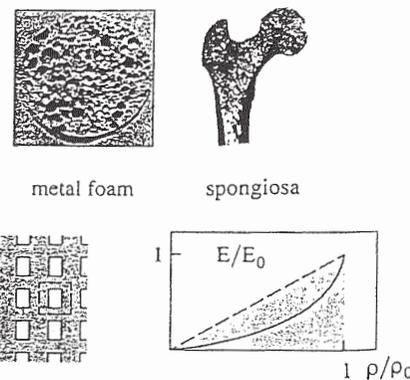


Fig. 8 - Materiali di tipo poroso: modello geometrico e legge modulo di Young-densità. [1].

Nella figura 8 viene riportato il modello secondo cui si simula la porosità del materiale, e la legge modulo elastico-densità del materiale (l'indice 0 si riferisce al materiale con assenza di porosità) assunta di tipo non-lineare. In sostanza come si vede il mezzo poroso può essere schematizzato attraverso una "rete" con il materiale distribuito secondo le rette generatrici della "rete" stessa. Il grado di porosità è al-

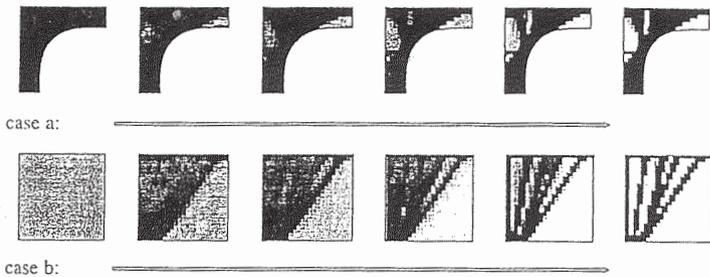


Fig. 9 - Ottimizzazione topologica applicata ad un semiarco [1].

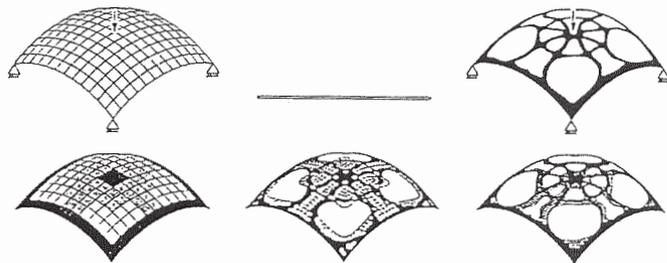


Fig. 10 - Ottimizzazione topologica di tipo evolutivo applicata ad una struttura a guscio [1].

loro associato all'ampiezza delle cavità che si vengono a determinare all'interno di ogni maglia della "rete".

In questo caso, le variabili del processo di ottimizzazione divengono le densità di tutti gli elementi del modello secondo cui è stato schematizzato lo spazio di progetto.

Nella figura 9 vengono evidenziate le potenzialità dell'ottimizzazione topologica come strumento di guida per individuare la struttura resistente "ottima", pur partendo da spazi di progetto casuali.

Infatti nel caso contrassegnato con la lettera *a*, ci si pone il problema di ottimizzare la distribuzione del materiale all'interno di un semiarco sottoposto a carichi verticali. Nel caso contrassegnato con la lettera *b* invece si parte come dominio materiale, dal rettangolo entro cui può iscriversi il semiarco, arrivando comunque ad una distribuzione di materiale che approssima il semiarco del caso precedente.

Sempre dalla medesima figura è ben evidente anche che la bontà dei risultati ottenuti, è fortemente dipendente dalla raffinatezza della discretizzazione adottata per lo spazio di progetto. Aumentare il numero degli elementi del modello, conduce inevitabilmente a risultati migliori, ma porta anche a degli oneri computazionali a volte insostenibili. Per questo motivo molto spesso, soprattutto quando deve determinarsi il dominio resistente ottimale per una struttura complessa, viene adoperata una ottimizzazione topologica di tipo evolutivo, nel senso che ai vari passi del processo di ottimizzazione vengono eliminate le zone dello spazio di partenza a bassa densità di materiale, ed il processo viene applicato al passo successivo al dominio così modificato.

I risultati di tale procedimento applicato alla ottimizzazione di una struttura a guscio, sono mostrati nella figura 10.

Vengono evidenziate le varie fasi del processo a partire dalla discretizzazione iniziale, fino alla determinazione della struttura "ottima". Nelle fasi intermedie risulta ben evidente la presenza di zone a diversa densità di materiale. Le parti bianche e nere indicano rispettivamente assenza di materiale e materiale non poroso, le parti in grigio la presenza di materiale poroso con la densità rappresentata dalla tonalità del colore.

L'ottimizzazione topologica sembra uno strumento di grandi potenzialità anche per lo studio delle strutture in cemento armato. Infatti con tale procedimento come già visto, si determinano dei percorsi ottimali entro cui possono incanalarsi le sollecitazioni in

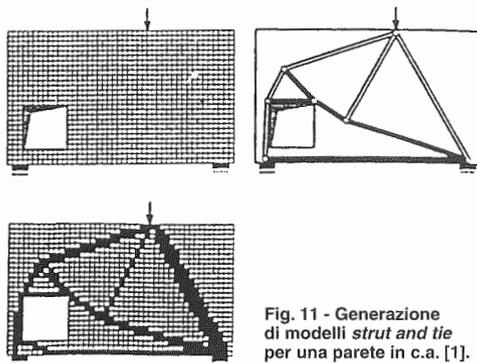


Fig. 11 - Generazione di modelli *strut and tie* per una parete in c.a. [1].

una struttura. Sembra naturale pertanto utilizzare questi procedimenti per generare i modelli tirante-puntone nella struttura (*strut and tie models*). Ad esempio nella figura 11 viene riportata l'applicazione di tale processo ad una parete forata sottoposta ad un carico concentrato. Attraverso l'ottimizzazione topologica si giunge alla definizione del modello ottimale, concentrando il materiale secondo determinate direzioni, in modo da rendere massima la rigidità della struttura. Nella prima immagine della figura è rappresentata la discretizzazione della struttura, nella seconda una fase del processo di ottimizzazione, nella terza immagine è evidenziato infine il modello tirante-puntone ottenuto alla fine del processo. In quest'ultimo le aste tese sono rappresentate in nero, le aste compresse in bianco.

#### 4. I PONTI DI SERGIO MUSMECI: VERSO SOLUZIONI OTTIME E ROBUSTE?

Introdotti i concetti fondamentali dell'ottimizzazione strutturale, appare evidente come le due soluzioni strutturali più note proposte da Musmecci nel campo dei ponti, ovvero il progetto per il ponte sullo stretto di Messina, ed il progetto per il ponte sul Basseto a Potenza, rappresentino soluzioni allo stesso tempo "ottime" e "robuste". L'ottimizzazione strutturale viene intesa da Musmecci come procedimento atto a determinare il minimo impiego di materiale possibile nel determinare lo schema resistente per un dato oggetto progettuale. In questa impostazione dimostra grande padronanza degli strumenti matematici, nonché della sperimentazione su modelli (figura 12), requisito essenziale quest'ultimo per indagare il comportamento di strutture complesse, stante le potenzialità degli strumenti di calcolo dell'epoca.

Ma le soluzioni presentate da Musmecci non mostrano soltanto le sue elevate qualità di matematico, ma anche grande senso ingegneristico, perché accanto al concetto di "ottimo" per la soluzione di un dato problema progettuale, vi è sempre quello di "robustezza" della soluzione. Ma che cosa s'intende per soluzione strutturale robusta?

Similmente ai problemi di analisi numerica, dove un algoritmo risolutivo si dice "robusto" se è insensibile a variazioni perturbative delle condizioni iniziali, non divergendo e conducendo alla soluzione, una soluzione strutturale si definisce "robusta" quando a variazioni anche non piccole del sistema di carichi agente su questa, corrispondono piccole variazioni del sistema degli spostamenti corrispondente. Ad esempio una "funne" costituisce una soluzione "ottima" per portare un dato carico esterno (p.e. carico uniforme), ma non "robusta" perché cambiando il sistema di carico la struttura ritrova il suo equilibrio solo a prezzo di variazioni non trascurabili della sua configurazione (figura 13).

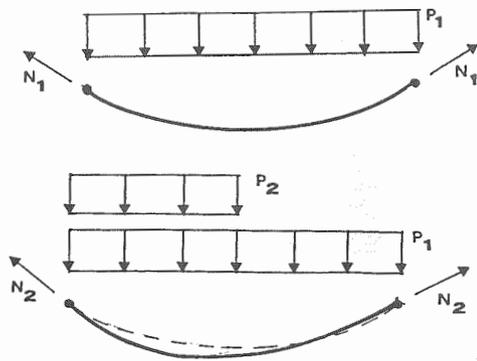
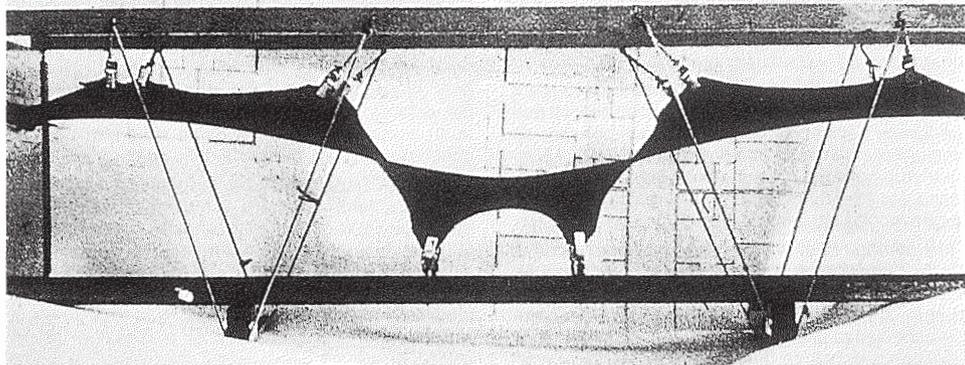


Fig. 13 - Comportamento statico di una fune per diversi tipi di carico.

Fig. 12 - Sperimentazione su modelli per il ponte sul Basseto [3].



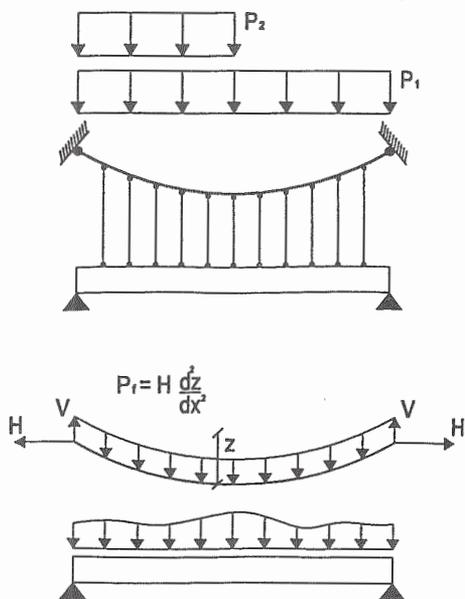
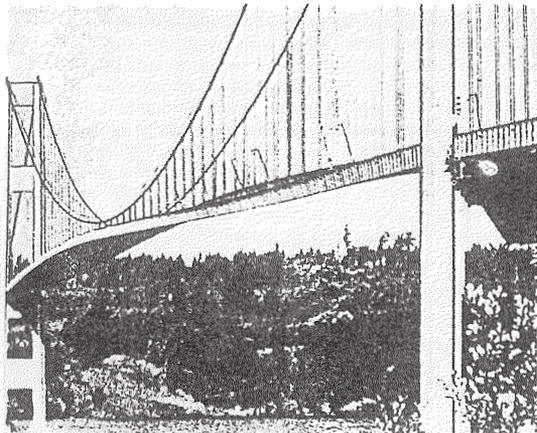


Fig. 14 - Comportamento statico del sistema fune+travata irrigidente

Fig. 15 - Comportamento torsionale in prossimità del collasso per il ponte di Tacoma [2].



Nella figura 14 viene mostrato invece un sistema "robusto" ma non "ottimo", la fune con travata irrigidente. In questo caso la variazione del sistema di carico non comporta variazioni consistenti nel sistema degli spostamenti, grazie alla rigidità flessionale della trave è evidente come non si ha invece uno sfruttamento completo del materiale, e pertanto non si arriva ad una soluzione ottima.

Lo schema riportato, che è lo schema base di un ponte sospeso, se è robusto per carichi verticali non lo è invece per carichi orizzontali, basti pensare ad esempio al crollo del ponte di Tacoma (1940). Il ponte arrivò a collasso raggiungendo l'instabilità aeroelastica per effetto di vibrazioni dinamiche di tipo torsionale indotte dal vento (figura 15).

Nel perseguire oltre che l'ottimizzazione anche la robustezza della soluzione strutturale, sicuramente Musmeci avvertiva la possibilità che nella vita di una struttura si potevano verificare dei cambiamenti anche abbastanza importanti delle condizioni di carico e di vincolo, rispetto a quelle di partenza.

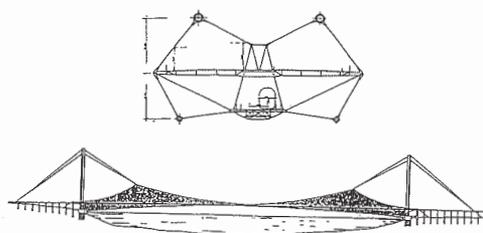


Fig. 16 - Progetto per il ponte sullo stretto di Messina [8].

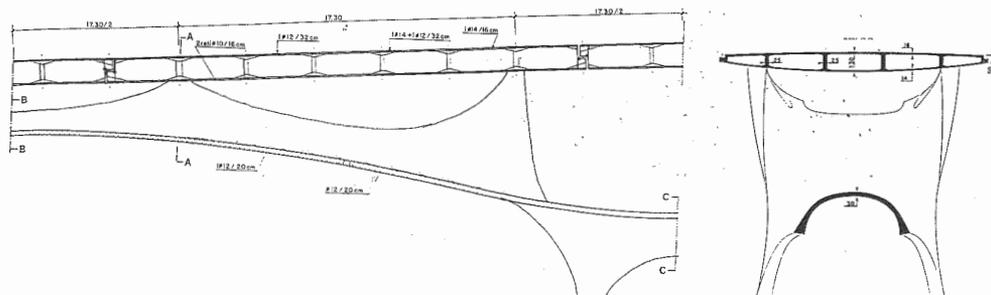


Fig. 17 - Sezione strutturale longitudinale e trasversale per il ponte sul Basento [3].

È tipico dell'ingegnere dominare questa incertezza riferendosi spesso a delle situazioni limiti, per vincoli e condizioni di carico, in modo da determinare un intervallo per la risposta strutturale entro cui con elevata probabilità cadrà quella della struttura indagata in qualsivoglia momento della sua vita.

Musmeci infatti ha adottato nei due progetti ricordati un "doppio" sistema strutturale: accanto ad un sistema principale, "ottimo" per le condizioni di carico ricorrenti per la struttura, ne esiste un altro che per azioni di tipo particolare limita l'impegno di quello principale, che altrimenti vedrebbe aumentare di molto il suo cemento, fino a lambire situazioni assai pericolose per la stabilità globale della struttura. Questo è evidente ad esempio nel ponte sul Basento, dove la membrana in cemento armato protetta dalle caratteristiche dell'impalcato. Infatti quest'ultimo ha una struttura scatolare, con elevata rigidità flessionale (in direzione trasversale) e torsionale, anziché soltanto di tipo flessionale in senso longitudinale come avviene comunemente nei ponti a travata. In senso longitudinale poi, l'impalcato è stato realizzato secondo uno schema di tipo Gerber, come ben evidenziato dalla sezione relativa al ponte in esame (figura 17). Questi accorgimenti testimoniano da un lato la volontà del progettista di rendere rigido l'impalcato nei confronti di carichi eccentrici, dall'altro quella di limitarne l'impegno statico sotto l'azione delle variazioni termiche, avendo comunque come fine ultimo in entrambi i casi, quello di rendere più uniforme possibile la distribuzione dei carichi sulla membrana di appoggio. È evidente infatti che quanto più si realizza tale comportamento, tanto più la struttura tende a funzionare in regime membranale e rende uniforme l'impegno statico del materiale, potendo quindi ridurre al minimo lo spessore delle singole parti.

Nella medesima ottica, nel progetto per il ponte sullo stretto di Messina, la struttura portante è realizzata attraverso una tensostruttura, che si sviluppa nello spazio attraverso funi a curvatura contrapposta, dotando così il ponte di rigidità nei confronti di qualsiasi tipo di carico, incidente sulla struttura secondo qualsivoglia direzione dello spazio.

In conclusione questi due progetti testimoniano la natura da vero ingegnere di Musmeci che lungi da perseguire solo un obiettivo analitico, ricercava infatti la forma delle sue strutture in un atto di mirabile sintesi progettuale, in modo che avessero insieme la qualità della leggerezza estetica dell'ottimo e nel contempo la forza di una soluzione statica pronta a resistere con la sua "robustezza" a variazioni imprevedibili del carico.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] Ramm E.: "Structural Optimization", IASS Symposium, "Current and emerging technologies of shells and spatial structures", Madrid, 1997.
- [2] Pozzati P.: *Teoria e tecnica delle strutture*, Vol.1, Utet, Torino, 1972.
- [3] Musmeci S.: "Ponte sul Basento a Potenza", *L'industria italiana del cemento*, n.2, Roma, 1977.
- [4] Musmeci S.: "Le strutture del nuovo Teatro Regio di Torino", *L'industria italiana del cemento*, n.11, Roma, 1977.
- [5] Bendsoe M.P.: *Optimization of structural topology, shape, and material*, Springer, Berlino, 1995.
- [6] Ramm E.: "Shape finding methods of Shells", *IASS Bulletin*, n.33, 1992.
- [7] Rozvany G.: "Shape and layout optimization of structural systems and optimality criteria methods", *Pubblicazioni CISM*, n.325, 1992.
- [8] Borri C., Spinelli P., Majowiecki M.: "Ponti a grande luce libera: stato dell'arte e possibili evoluzioni", *Nuovo cantiere*, n.4, 1998.

Paolo SPINELLI nato nel 1950, è ingegnere e professore ordinario di Progetto di Strutture presso la Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Firenze, dove è anche presidente del Corso di Laurea in Ingegneria Civile e Direttore del Centro di Ricerca Interuniversitario in ingegneria del vento (CRIACIV). È delegato toscano dell'AICAP. Ha svolto ricerche sugli effetti del vento sulle strutture e sul comportamento di strutture in cemento armato.

Enrico MANGONI, nato nel 1967 si è laureato in ingegneria civile presso l'Università di Firenze nel 1993. Ha conseguito il titolo di Dottore di ricerca in ingegneria delle strutture nel 1998. Attualmente collabora attivamente con il Dipartimento di Ingegneria civile dell'Università di Firenze, occupandosi in particolare di strutture in cemento armato e cemento armato precompresso, sia in ambito teorico che sperimentale.

# Sullo stato dell'arte dei ponti di grandissima luce libera

Massimo MAJOWIECKI

Nel campo della progettazione dei ponti sospesi di grande luce è ormai evidente il conflitto, nella scelta progettuale, tra la soluzione di impalcato aerodinamicamente "trasparente" e quella, alternativa, di impalcato con alta rigidezza e conseguente alta resistenza all'azione del vento; ciò è conseguenza della necessità di dotare l'impalcato stesso di una forte rigidezza torsionale e contemporaneamente minimizzare l'effetto di "trascinamento" (drag), molto rilevante per le grandi luci.

In occasione del simposio ISALB '92 [1], che può essere considerato il riferimento più aggiornato sullo stato dell'arte e sulle tendenze odierne nel settore della aerodinamica dei ponti di grande luce, sono emersi risultati, confermati nel Congresso IASS di Toronto del luglio 1992 [2], totalmente differenti nella concezione progettuale delle opere più imponenti recentemente realizzate, e cioè:

- il ponte sospeso sullo Storebelt (DK), con luce centrale di 1624 m e dall'impalcato aerodinamicamente molto efficiente;
- il ponte Akashi Kaikyo (Giappone), con luce centrale di 1990 m e struttura di impalcato reticolare ad altissima rigidezza.

Sembra dunque di essere pervenuti ad una vera e propria "biforcazione" dei criteri guida di progettazione: seguendo il primo ramo si tende verso la riduzione delle azioni sofferte dalla struttura, mentre con il secondo si cerca di incrementarne la resistenza. In aggiunta, appare sempre più legittimo chiedersi se sia opportuno riproporre lo schema classico del ponte sospeso a doppia fune portante e pendini verticali anche per le grandissime luci senza introdurre elementi innovativi nella concezione strutturale.

L'evoluzione delle problematiche progettuali dei ponti sospesi di grande luce

I due ponti sospesi di grandissima luce sopra citati sono stati concepiti, per quanto riguarda il sistema strutturale principale, riproponendo lo schema classico del ponte ad impalcato "appeso" a due funi portanti, contenute in piani verticali paralleli, mediante pendini verticali di lunghezza variabile. Nell'ambito della tipologia classica del ponte sospeso ed in funzione delle note problematiche relative ai fenomeni

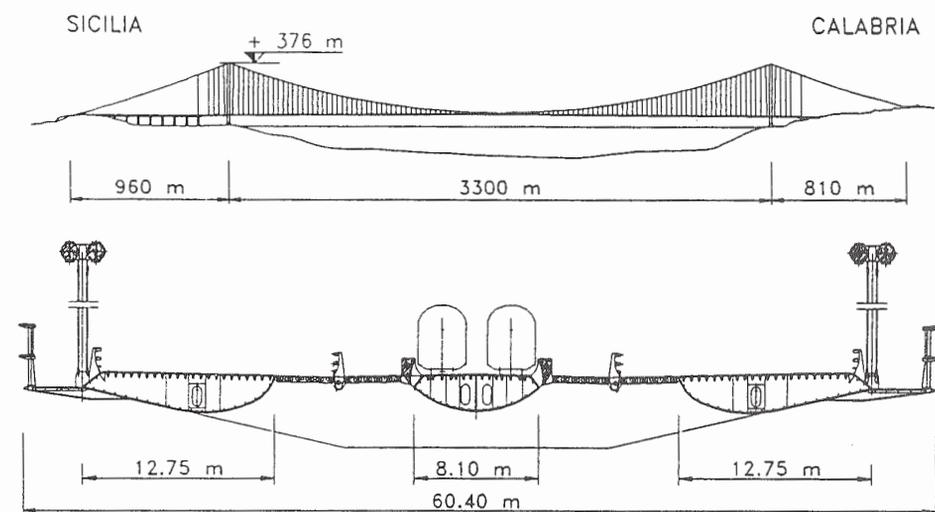


Fig. 2 - Il progetto della società "Stretto di Messina S.p.A.".

di instabilità aerodinamica, la ricerca teorico-sperimentale è stata indirizzata principalmente verso la determinazione di impalcato aerodinamicamente efficienti. Infatti, dopo l'esperienza storica del crollo del ponte sullo stretto di Tacoma del 1940 (avvenuto per effetto di instabilità aeroelastica), a partire dagli anni '60 è stata approfondita l'analisi progettuale del profilo di impalcato.

Una prima tendenza è stata quella di dotarlo di una forte rigidezza torsionale (vedi le grandi travature reticolari dei ponti sul Verrazzano Narrow, sul Tay e del Firth of Forth). Una seconda strada concettuale venne introdotta alla fine degli anni '60: la strategia di base è quella di ridurre, giocando esclusivamente sulla forma del profilo, le azioni aerodinamiche. Gli impalcato così progettati vengono definiti, per la loro forma ed il loro comportamento al vento, come "affusolati" (*stream-lined*) o "aerodinamicamente traspa-

renti". Essi sono usualmente caratterizzati da sezioni scatolari singole e/o multiple, mono o pluricellulari, con lastra ortotropa quale superficie di supporto e trasmissione dei carichi. In questo modo le azioni aerodinamiche, in particolare quella di *drag* trasversale, sia pseudo-statico che turbolento, vengono ridotte, mentre un significativo contributo alla rigidezza torsionale globale continua ad essere fornito dall'impalcato.

Attualmente ci si domanda quali siano gli schemi di impalcato da impiegare per le grandissime luci, ossia a partire dai 2000 m. La prima risposta è stata data dai progettisti giapponesi dell'Akashi Kaikyo, che assicurano la stabilità aerodinamica riproponendo un profilo d'impalcato reticolare rigido.

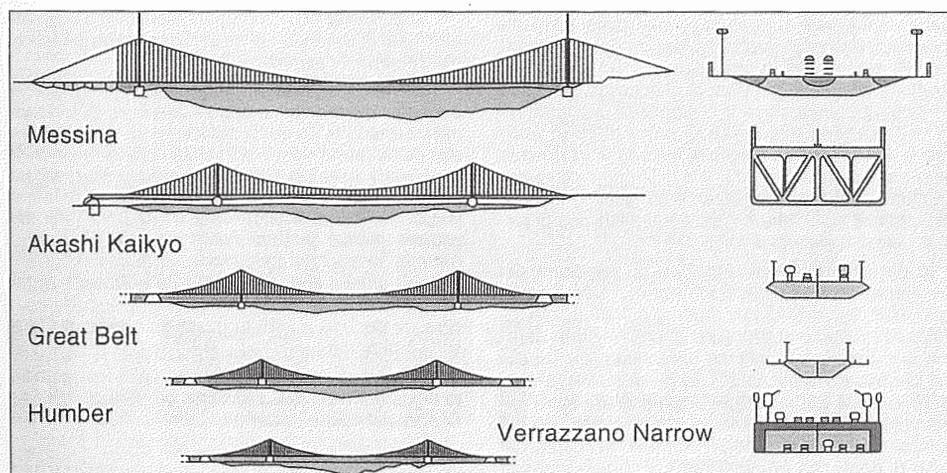
L'impalcato rigido, soddisfacente per la resistenza e la stabilità aerodinamica, porta all'incremento dei pesi propri e quindi dei costi, ed inoltre, una maggiore resistenza alle azioni orizzontali del vento (*drag*) e quindi delle fortissime inflessioni laterali dell'impalcato (nel caso dell'Akashi Kaikyo, ad una velocità di progetto di 60 m/s, si prevedono spostamenti fino a 30 m in orizzontale [5]); da non trascurare, infine, il problema della onerosa manutenzione ed ispezione di questo tipo di manufatti.

Questa scelta, effettuata in corrispondenza di un "salto" repentino dai 1624 m di luce ai 1990 m, ha rappresentato un punto critico di biforcazione, di significato storico, nello sviluppo della progettazione dei ponti sospesi e pone notevoli interrogativi per le applicazioni future. Queste prevedono, come è noto, salti di scala ancora più impressionanti: 3300 m per il ponte sullo stretto di Messina e 5000 m per il ponte a più campate sullo stretto di Gibilterra.

Nel caso del ponte di Messina [6] (fig. 2), la soluzione proposta dai progettisti è affidata all'idea di un impalcato cosiddetto "ventilato", ossia formato da tre cassoni separati da settori grigliati che consentono l'attraversamento, in direzione verticale, del flusso d'aria; ciò implica una drastica riduzione dei coefficienti quasi statici di resistenza aerodinamica al sollevamento ed alla coppia (momento).

Aspetti decisamente innovativi nella concezione strutturale globale sono riscontrabili negli schemi di larga massima frutto degli studi iniziali di fattibilità

Fig. 1 - Evoluzione dei ponti sospesi di grande luce.



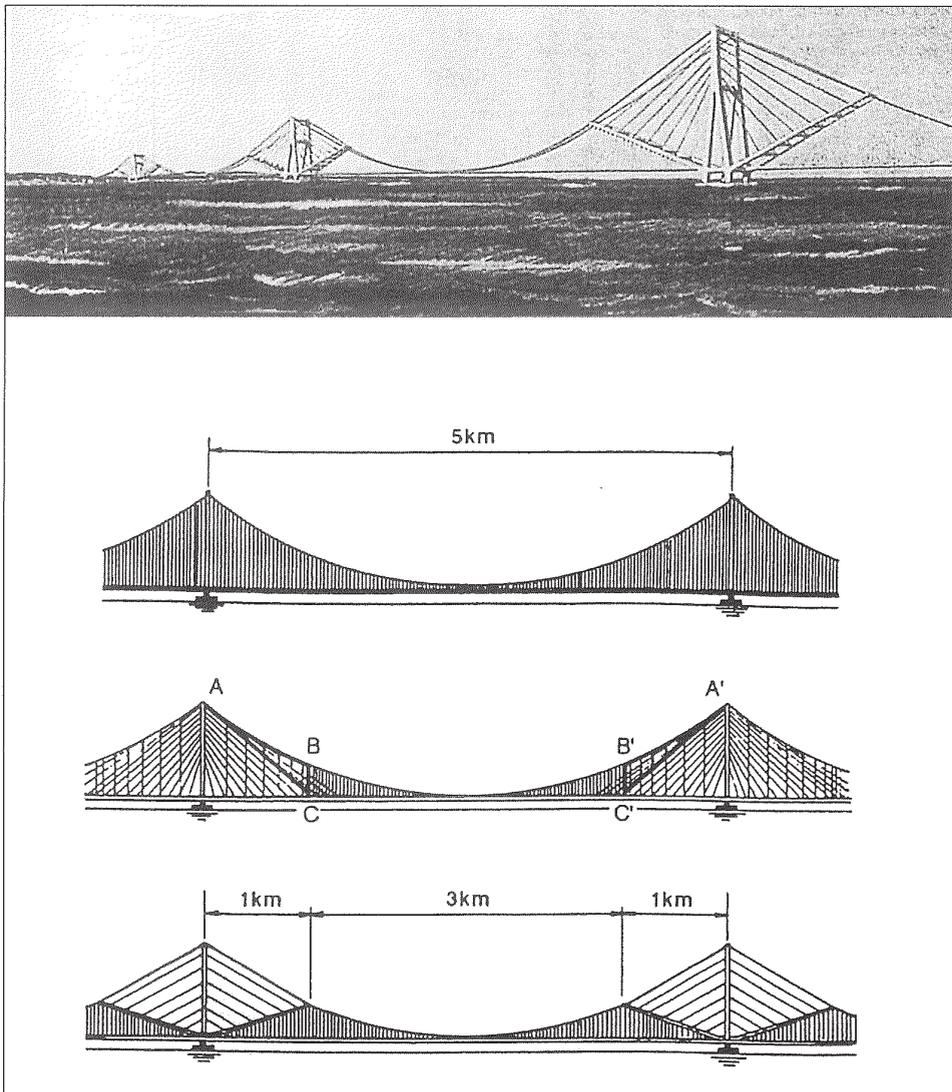


Fig. 3 - Progetto del ponte sullo stretto di Gibilterra.

dell'attraversamento dello stretto di Gibilterra (fig.3) [4]; l'attenzione risulta qui non più esclusivamente concentrata sulle prestazioni aerodinamiche dell'impalcato, bensì è principalmente rivolta all'introduzione di ulteriori risorse prettamente strutturali che, trasformando lo schema classico, ne incrementino la resistenza per poter compiere il "salto" qualitativo richiesto.

Dalle considerazioni sopra riportate, la conflittualità decisionale risulta dunque chiara: con la soluzione di impalcato rigido si ottengono le caratteristiche aerodinamiche per garantire l'efficienza e la stabilità a scapito di un maggiore peso e, conseguentemente, di un maggiore costo strutturale; con la soluzione "trasparente" si diminuiscono al contrario le azioni trasversali.

La mancata sintesi unitaria nelle scelte progettuali risiede principalmente nelle incertezze legate soprattutto alla modellazione fisica del sistema ed in particolare delle azioni; questa ancora non permette di valutare la sensibilità ed il grado di affidabilità del processo globale di progetto e di analisi per i ponti di grandissima luce, per i quali il vento è senza dubbio l'azione dominante.

L'incertezza relativa all'incompleta conoscenza delle proprietà stocastiche delle azioni, della modellazione e del comportamento dei materiali, della modellazione numerica delle proprietà strutturali (massa, smorzamento e rigidità), rende necessario il controllo e l'affidabilità complessiva di tutto il processo di progetto ed esecuzione [7]. Tramite un'indagine svolta sul ponte sull'Humber, sono state controllate le incertezze del modello matematico aerostatico in base alle incertezze dei parametri strutturali e di quelli aerodinamici [8]; è stato così possibile for-

nire, per ponti tipologicamente simili, un'indicazione globale delle incertezze del modello analitico per mezzo della determinazione della velocità critica di flutter.

A seguito dell'interessante dibattito sviluppatosi nel corso dei lavori del Simposio ISALB '92, si è ricavata la sensazione "ingegneristica" che l'affidabilità del processo globale di progetto e verifica del sistema strutturale classico di ponte "semplicemente" sospeso abbia un limite attuale per luci fino a 2000 m. In uno studio condotto nel 1988 su vari tipi di impalcato per l'Akashi-Kaikyo Bridge, Ohashi indica in 1700 m il limite massimo per gli impalcati a sezione scatolare. Al fine di rimuovere parte di queste incertezze, sono state progettate e realizzate apposite gallerie del vento di larghezza tale da poter ospitare modelli aeroelastici in scala fino a 1:100 dell'intera struttura, ivi compresi i viadotti di accesso. Nel caso del progetto giapponese si è raggiunta una larghezza della sezione trasversale di prova di 43 m. Solo così è stato possibile diminuire il grado di incertezza delle caratteristiche strutturali e di interazione vento-struttura (frequenze, smorzamento, scaling inerziale), oltreché sulla "fedeltà" della modellazione di torri, impalcati e sistemi di funi.

In particolare, la seconda via di soluzione del problema, ovvero quella di affrontare il "lato azioni", cercando di ridurre drasticamente queste ultime attraverso lo studio appropriato di una sezione aerodinamicamente trasparente o ventilata, presuppone, per essere applicabile, che le metodologie di estrapolazione dal modello all'opera intera siano oltremodo certe, ovvero con incertezze valutabili dal confronto con casi reali già costruiti. In realtà, nel caso di ponti con grandissime luci, i paragoni con

casi simili non sono possibili o immediatamente estrapolabili. D'altra parte le metodologie teorico numeriche di estrapolazione dal modello alla realtà sono affette da numerose incertezze di cui è opportuno rendersi conto.

Una prima serie di incertezze risiede nella stessa significatività delle prove su modello in galleria del vento. Secondo Scanlan [9], "...il numero di Reynolds della prova sarà in genere 2 o 3 ordini di grandezza minore... L'argomento usuale che effetti del numero di Reynolds sono trascurabili per elementi strutturali con spigoli vivi, resta da essere dimostrato completamente..."

Del resto il problema dell'affidabilità delle prove eseguite alla galleria del vento è stato in tempi recenti sottolineato durante le fasi di costruzione dello Storebelt.

"Sono state condotte prove alla galleria del vento, sia su modelli di sezioni che su quello dell'intero ponte, che hanno fornito interessanti dati a riguardo della risposta strutturale e delle relative azioni. Questi dati sono stati tuttavia contraddetti dalle osservazioni delle vibrazioni che sono in realtà avvenute nella prima parte dell'impalcato, quando il sistema di smorzamento non era stato ancora installato, e allorché si sono verificati venti di intensità diversa da quella prevista dalle prove eseguite nella galleria del vento. Tali discrepanze sono state attribuite alle considerevoli differenze nei numeri di Reynolds fra i modelli su cui sono state eseguite le prove, e la sezione vera" [11].

Ancora Scanlan mette in luce alcuni limiti della sua trattazione teorica dell'instabilità aeroelastica: "...È ipotizzato nelle trattazioni sopra riportate che le forze di flutter e di buffeting siano essenzialmente separabili e non interagenti... Dal momento che i fenomeni fisici attorno ai corpi tozzi e la loro interazione con essi sono effetti intrinsecamente lineari, questa separazione analitica, fatta per analisi ingegneristiche, è conveniente ma non comprende in principio, certe complessità dell'interazione fluido-struttura..."

Infine si deve sottolineare che anche se le analisi su modello e la trattazione fossero esatte, l'estrapolazione numerica attraverso algoritmi di simulazione di tempeste di vento nel tempo porta essa stessa, con se, alcune incertezze:

- prima di tutto il fatto che, per essere statisticamente significative, le simulazioni devono comprendere numerose storie (più di 20-30) di durata opportuna (10-20 minuti);
- secondariamente, il fatto che tutti gli algoritmi di generazione di storie nel tempo, non tengono conto dello spettro in quadratura del vento. Ciò significa che le fasi non possono essere simulate correttamente. Quindi, nel caso di fenomeni di scia, provocati dalla forma stessa dell'oggetto investito e dalla presenza di traversi o risalti anche nel caso di venti obliqui, il distacco dei vortici che corrono longitudinalmente su tutto il ponte e che possono innescare eccitazione di modi superiori al primo non può essere, allo stato attuale di sviluppo dei metodi di generazione, correttamente simulato.

Tutte le considerazioni sopra esposte legittimano dunque il dubbio se sia opportuno proporre lo schema classico del ponte "semplicemente" sospeso anche per le grandissime luci senza introdurre elementi innovativi nella concezione strutturale; se, cioè, sia possibile dipanare tutti i problemi che sorgono attraverso una sorta di accanimento "analitico" nel migliorare uno schema per così dire antico, senza rivedere, in "sintesi", la concezione strutturale. Muovendosi su questa linea direttrice, Lin e Chow [4] propongono ad esempio di aumentare il rapporto freccia-luce da 1/10 a 1/15 in modo da ridurre gli sforzi sulle funi portanti.

L'incremento di costo derivante dalle torri più alte sarebbe compensato, secondo i proponenti, dalle riduzioni del diametro delle funi.

N.J. Gimsing [3] ha indicato, con alcune suggestive proposte, come apportando alcune sostanziali

modifiche alla classica disposizione piana delle funi e/o stralli, il comportamento statico e dinamico possa essere controllato ben oltre le luci attualmente raggiunte. K. Ostefeld e A. Larsen [10] (fig. 4) hanno proposto sistemi inclinati di funi che riescono a stabilizzare trasversalmente l'impalcato ed hanno addirittura suggerito alcuni sistemi di controllo attivo che portino a una diminuzione delle azioni sollecitanti.

Sembra comunque importante che, nell'ambito delle luci libere oltre i 2000 m, l'affidabilità del processo di analisi (teorica e sperimentale), di produzione, montaggio e manutenzione non può che essere fondata su chiare concezioni progettuali che rimuovano, o almeno sensibilmente riducano, le incertezze rilevate da molti autorevoli esperti.

### OSSERVAZIONI CIRCA UNA PROPOSTA PROGETTUALE CON TENSOISTRUTTURA A DOPPIO EFFETTO

Nella direzione di una revisione della concezione strutturale, va considerata la proposta di un ponte sospeso in tensostruttura a doppio effetto, secondo un modello ispirato all'idea

progettuale di Sergio Musmeci per l'attraversamento dello stretto di Messina.

I punti salienti dell'idea di Musmeci sono essenzialmente due:

- 1) l'introduzione della fune traente (o fune stabilizzante) con curvatura contrapposta a quella della fune portante;
- 2) l'adozione dello strallo che permette di eliminare i pendini più lunghi (quelli in prossimità delle pile).

La presenza, accanto al sistema dei cavi portanti, di un sistema di cavi stabilizzanti porta ad avere una vera e propria tensostruttura, e i benefici che derivano da tale nuova concezione strutturale sono:

- 1) effetto stabilizzante, nei confronti dei movimenti verticali: il ricorso a sistemi tensostrutturali nelle coperture di grande luce dimostra come questa soluzione rappresenti il sistema di stabilizzazione migliore rispetto ad altri (incremento delle masse, irrigidimento mediante elementi strutturali secondari) perché economico, leggero e con ottime prestazioni dinamiche;
- 2) incremento della rigidità torsionale: la coppia di funi stabilizzanti si sostituisce all'impalcato nella funzione di garantire una sufficiente rigidità torsionale della struttura. La larghezza dell'impalcato rappresenta ora il braccio dell'azione stabilizzante esercitata dai due sistemi di cavi;
- 3) ulteriore riduzione dei pesi propri dell'impalcato a cui compete ora il meno impegnativo ruolo di struttura portante secondaria con il compito di trasferire i carichi ai pendini e quindi alla tensostruttura. Una prima importante conseguenza di ciò è la possibilità di adottare box di altezza minore e quindi soggetti ad una azione di drag di minore intensità.

Il sistema di cavi traenti così ipotizzato può diventare non solo un sistema per introdurre ulteriore rigidità nella struttura (sistema che al contrario di quello classico non perde la sua efficacia all'aumentare della luce), ma anche sede di smorzamento strutturale se si prevede l'inserimento, in corrispondenza dei punti d'ancoraggio di tali cavi, di smorzatori viscosi o isteretici (figura 5).

Il sistema strutturale così concepito dovrebbe quindi garantire una migliore prestazione aerodinamica: all'introduzione di queste riserve strutturali di rigidità e smorzamento dovrebbe corrispondere un incremento della velocità critica per flutter e una riduzione della risposta statica e dinamica all'azione del vento soprattutto in termini di spostamenti verticali e torsionali.

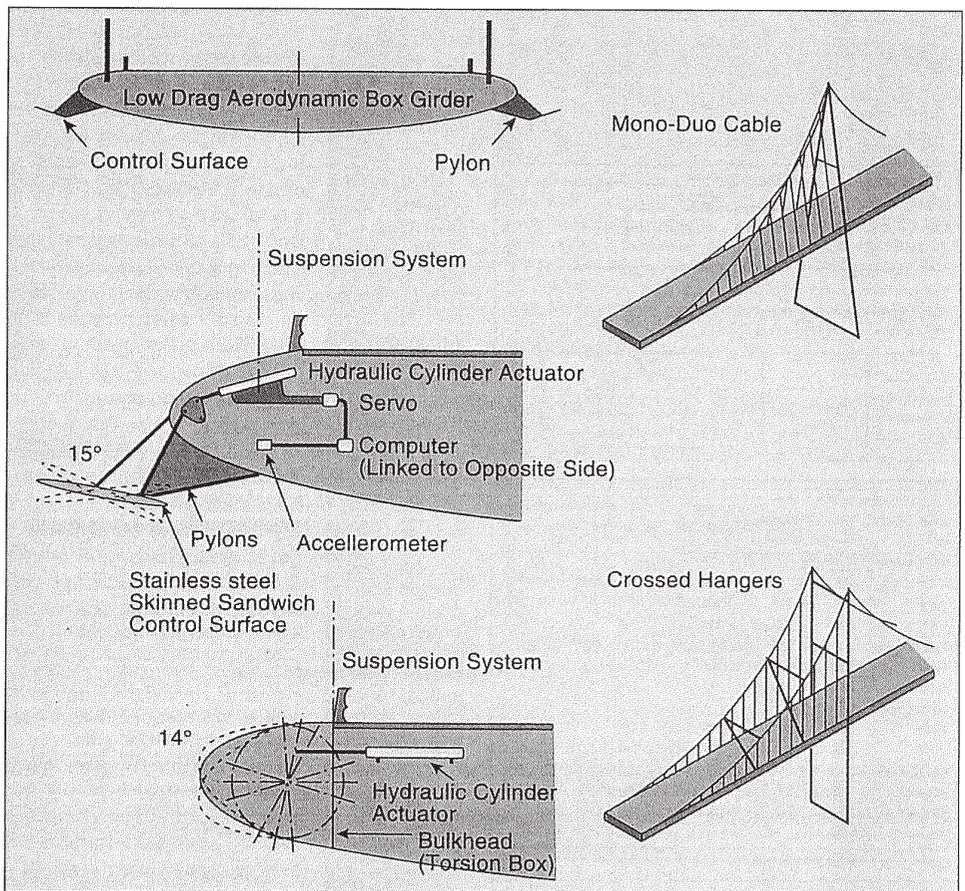


Fig. 4 - Schema dei controlli attivi proposti per la diminuzione delle azioni sollecitanti.

Per quanto riguarda la resistenza al drag si può riscontrare, nella soluzione in tensostruttura, un primo consistente beneficio in termini di azioni di minore intensità grazie alla possibilità di adottare ora, per l'impalcato, box di altezza minore e quindi di minore ingombro e maggiore "trasparenza".

L'obiettivo di incrementare la resistenza in termini strutturali può essere invece raggiunto con due soluzioni:

- 1) la separazione delle tre corsie (due stradali e una ferroviaria) in tre distinti impalcato, ciascuno dei quali dotato di un proprio sistema di cavi portanti e stabilizzanti. Si prevede poi di collegare fra loro, a livello d'impalcato, i tre ponti, che così si vengono a delineare, mediante puntone trasversali e aste diagonali in modo da realizzare nel piano dell'impalcato stesso uno schema di trave reticolare la cui altezza (pari alla distanza tra gli impalcato esterni) può essere dosata in modo da garantire una sufficiente rigidità nei confronti dell'azione di drag (figura 6). Lo spazio compreso tra gli impalcato consente inoltre quella ventilazione della struttura che le prove in galleria hanno mostrato essere necessaria per ridurre l'azione del vento, in particolare quella di lift;
- 2) la disposizione dei cavi stabilizzanti su piani non più verticali (come era stato ipotizzato fino ad ora) ma su piani inclinati in modo che la rigidità tensostrutturale (prima attiva solo in direzione verticale) acquisti ora anche una componente orizzontale tale da contrastare direttamente le azioni di drag.

### I MATERIALI COMPOSITI HI-TECH NEL CAMPO DEI PONTI SOSPESI

Attualmente il superamento delle luci che le realizzazioni dei ponti sospesi di Messina e di Gibilterra implicano, sembra eseguibile agendo principalmente sulla riduzione delle masse strutturali e progettando nuovi sistemi di sospensione.

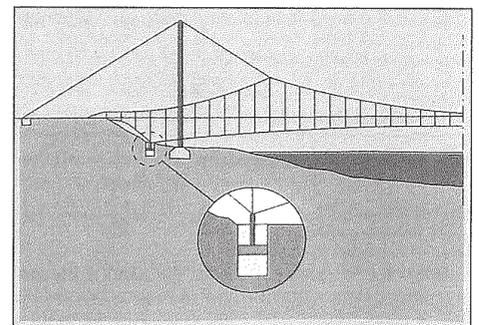
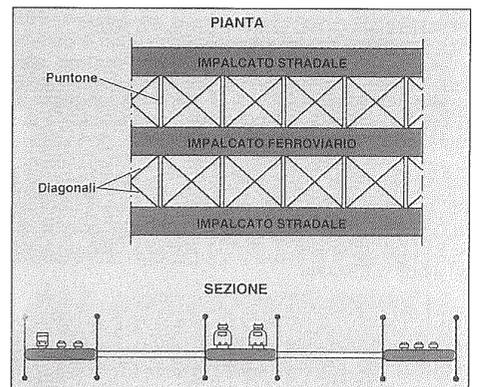
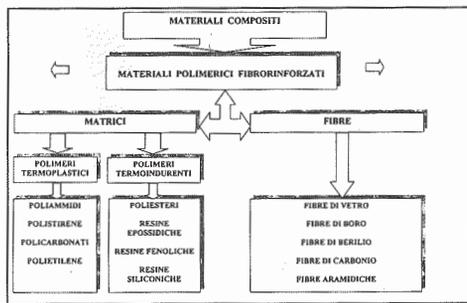


Fig. 5 - Inserimento di smorzatori nei punti di ancoraggio dei cavi traenti.

Fig. 6 - Proposta di separazione delle tre corsie (due stradali e una ferroviaria) in tre distinti impalcato, ciascuno dotato di un proprio sistema di cavi portanti e stabilizzanti.





Fibre	Diametro tipico (micron)	Peso specifico (g/cm <sup>3</sup> )	Modulo Elastico (GPa)	Tensione di rottura (GPa)	Allungamento a rottura (%)
<b>PAN-CARBON</b>					
T-300	7	1.76	231	3.65	1.4
As	7	1.77	220	3.1	1.2
T-40	6	1.81	276	5.65	2.0
HSB	7	1.85	344.5	2.34	0.58
Fortafil 3	7	1.80	227	3.80	1.7
Fortafil 5	7	1.80	345	2.76	0.8
<b>PITCH-CARB.</b>					
P-555	10	2.0	380	1.90	0.5
P-100	10	2.16	758	2.41	0.32
<b>FIBRA ARAM.</b>					
Kevlar49	11.9	1.45	131	3.62	2.8
Twaron	12.0	1.45	127	3.6	2.5
Techmona	12.0	1.39	74	3.5	4.6

Materiale	XA-S High Performance	EXAS-HSI	Apollo IM43-600	Magnamite IM7X	Tonyma T700S	Acciaio
Produttore	Hysol Grafili	Hysol Grafili	Hysol Grafili	Hexcel	Toray	Bridon
Densità (g/cm <sup>3</sup> )	1.57	1.61	1.57	1.60	1.61	7.85
Sforzo a rottura (kN)	30.3	36.6	46.7	59.1	53.9	35.7
Sforzo realizzato*	70%	66%	79%	78%	85%	-
$\sigma_r$ (MPa)	1610	1800	2310	2930	2750	1820
Modulo Elastico (GPa)	136	159	194	193	153	200
Modulo Elastico realizzato*	94%	104%	98%	93%	98%	-

Fig. 7 - Materiali polimerici fibrorinforzati: caratteristiche e comparazione con l'acciaio.

Nell'ottica di questa filosofia "dell'alleggerimento" si pongono i nuovi materiali per la realizzazione delle funi di sospensione, che sono in grado di lavorare a tensioni quasi doppie rispetto all'acciaio e gravano la struttura di un peso proprio cinque volte inferiore (a parità di sezione della corrispondente fune in trefoli di acciaio). Questi materiali, utilizzati nell'ambito delle costruzioni civili dopo anni di sperimentazione e impiego nei più svariati settori (aerospaziale, navale, automobilistico, militare), sono costituiti da fibre sintetiche. Le più pregiate sono quelle di carbonio e le aramidiche, impregnate da materiali plastici, per lo più resine termoidurenti o termoplastiche (figura 7).

### I MATERIALI COMPOSITI PER IL PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA

La progettazione a cui si fa riferimento è quella di massima, ultimata nel luglio 1990 da parte della società concessionaria di stato "Stretto di Messina S.p.A.", che prevedeva lo studio di attraversamento dello stretto con una costruzione "classica" sospesa del ponte, a luce unica, con torri di estremità di altezza notevole atte a fornire la freccia necessaria alle funi per ottenere la dovuta stabilità, abbassando gli sforzi di trazione.

La creazione dell'opera con l'impiego di funi in trefoli d'acciaio è penalizzata dal forte peso strutturale, essenzialmente fornito proprio dall'apparato di sospensione. Infatti le quattro funi sospese previste, di sezione complessiva di 4,8 m<sup>2</sup>, assieme ai pendi-

ni distribuiti in campata centrale con passo costante pari a 30 m e di sezione complessiva per campo di 0,027 m<sup>2</sup>, sviluppano un peso per metro lineare di estensione longitudinale pari a 40 t/m. Il peso apporato dall'impalcato, formato da tre cassoni a sviluppo alare collegati da fasce grigliate, comprensivo di tutte le infrastrutture, pavimentazioni, guard-rail, profili alari, che lo rendono idoneo al servizio, risulta di 30 t/m. In definitiva l'apparato di sospensione grava la struttura di un peso circa pari a quello che l'intero impalcato caricato dai carichi accidentali, valutabili in maniera approssimata sulle 10 t/m, sviluppa.

Questo alto peso strutturale limita in duplice maniera l'opera: vengono coinvolti sia il comportamento statico che quello dinamico, ed entrambi sono altamente influenzati dalle masse in gioco.

Sotto l'aspetto statico il problema della struttura a sé stante viene risolto introducendo una maggiore sollecitazione nelle funi portanti, ma poi questo maggiore sforzo deve essere necessariamente scaricato a terra attraverso fondazioni adeguate, sia per le pile che per le zone di ancoraggio delle funi di ripa. Il problema dello scarico a terra di queste enormi sollecitazioni riveste aspetti molto delicati poiché interessa terreni direttamente a contatto con zone marittime, ed ovviamente la realizzazione delle fondazioni implica la costruzione di opere rilevanti.

Sotto l'aspetto dinamico le enormi masse in gioco presuppongono modi di vibrare che interessano anche singolarmente le funi, e comunque movimenti che se innescati sono caratterizzati da ampiezze elevate.

Quindi il poter ridurre l'entità delle masse delle funi non può che migliorare il comportamento della struttura, diminuendo sia le sollecitazioni presenti nei propri elementi, soprattutto funi e torri, che gli sforzi da scaricare in fondazione.

La tecnologia dei materiali polimerici fibrorinforzati si è notevolmente evoluta sviluppando prodotti dalle alte prestazioni meccaniche; si pensi che tali prodotti presentano un modulo elastico longitudinale pari a quello dell'acciaio, con tensioni di rottura più che raddoppiate, associate ad un peso specifico che si aggira al di sotto delle 2 t/m<sup>3</sup>.

La proposta di costruire il ponte con un sistema di funi e pendini realizzati con funi in fibra di carbonio o in fibra aramidica mira in primo luogo a diminuire l'entità dei pesi strutturali, per migliorare il comportamento statico e dinamico del ponte, ma anche ad introdurre materiali che hanno rilevato, alle ultime analisi scientifiche, un ottimo comportamento a fatica sotto carichi ciclici, oltre a bassi coefficienti di dilatazione termica.

### L'ESAME COMPARATIVO

L'analisi è stata sviluppata per tre diverse tipologie di ponte; la prima, già illustrata, costituita dalla proposta di massima della "Stretto di Messina S.p.A.", la seconda rappresentata dalle stesse soluzioni strutturali della prima ma con funi polimeriche fibrorinforzate CFRP (figura 8), e l'ultima, il progetto proposto, secondo lo schema aggiornato della soluzione Musmeci, con nuova conformazione delle funi e realizzazione delle stesse in materiale CFRP.

Questo tipo di analisi di confronto ha permesso di

Fig. 8 - Caratteristiche del materiale CFRP.

PROPRIETÀ	FUNI PORTANTI	PENDINI
Modulo elastico E (kg/cm <sup>2</sup> )	1.900.000	1.900.000
Tensione di rottura $\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	27.000	27.000
Coeff. espansione termica (°C <sup>-1</sup> )	1.10 <sup>-6</sup>	1.10 <sup>-6</sup>
Peso specifico $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1660	1660
Sezione equivalente (m <sup>2</sup> )	4,8	0,02
Peso per u.l. (kg/m)	8.000	40

rilevare l'adattabilità del nuovo materiale sia alla soluzione classica sia a un modello mirato.

Lo schema strutturale della "Stretto di Messina S.p.A." prevede la presenza di due torri alte 390,45 m distanti fra loro 3360 m con la classica disposizione delle funi di sospensione a catenaria e con pendini verticali disposti a passo costante.

Le zone di riva risultano antisimmetriche proprio a causa del loro raccordo con la situazione topografica esistente. La riva prospiciente alla Sicilia presenta una lunghezza sull'orizzontale del cavo di 928 m, mentre la riva che si collega alla Calabria risulta più corta, pari a 800 m.

Il progetto proposto in questa sede adotta una soluzione con torri più alte, 440 m, per consentire l'inserimento di un elemento a "crocetta" che permette di ridurre la lunghezza dei pendini di estremità, che a causa della loro lunghezza risultano molto deformabili.

Questo elemento risulta tenso-inflesso, e per ridurre i momenti agenti lungo la sua estensione, causati dalle forze concentrate scaricate dai pendini di impalcato, si sono inseriti degli stralli che partono dalla travata e vanno ad applicare il carico sulla sommità della torre. Questa soluzione, come si vedrà, se da un lato incrementa lo sforzo normale nelle torri, per l'accresciuta quantità di materiale occorrente per la realizzazione delle torri e della travata di supporto, permette però di ridurre i tiri da scaricare agli ancoraggi e i momenti in fondazione, oltre a diminuire le frecce in campata.

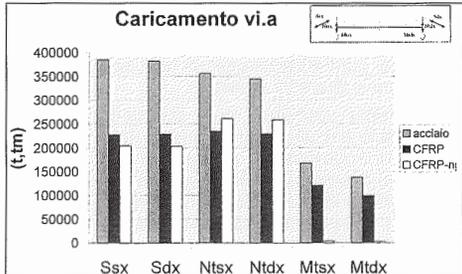
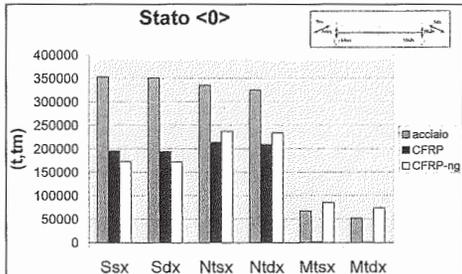
### COMPARAZIONE TRA ACCIAIO E MATERIALI COMPOSITI

I dati tabellati (figure 9, 10) mettono in rilievo la notevole disparità degli sforzi presenti negli elementi.

Peso elementi in tonnellate	Ponte con funi in acciaio soluzione S.M. S.p.a.	Ponte nuova geometria CFRP	Differenza %
Torri	180'530	160'956	10.8
Cavi	203'727	40'227	80.2
Totale sovrastrutture	480'050	339'522	29.2
Fondazioni	741'800	555'430	25.1
Ancoraggi di ripa	1'908'084	1'082'436	43.2
Peso totale opera	3'129'934	1'977'388	36.8

Fig. 9 - Confronto del peso delle strutture tra la proposta della "Stretto di Messina S.p.A.", e il progetto ispirato alla soluzione Musmeci, con nuova conformazione delle funi e realizzazione delle stesse in materiale CFRP.

Fig. 10 - Confronto, nelle tre soluzioni studiate, degli sforzi presenti nei diversi elementi strutturali.



La riduzione delle sollecitazioni, apportata dall'introduzione del materiale in fibra rispetto alla soluzione che adotta trefoli in acciaio, è valutabile approssimativamente intorno al 40-50% a seconda della condizione di carico esaminata. Si è concentrato il monitoraggio degli sforzi presenti, soprattutto negli elementi di fune e di colonna, dato che i pendini risultano essenzialmente tesi con la stessa sollecitazione in tutti e tre i progetti esaminati.

Per quello che riguarda, invece, la determinazione delle sollecitazioni presenti nell'impalcato, si può dire che questo studio di massima non è adatto ad esaminare il comportamento specifico di questa sottostruttura. Occorre uno studio mirato sulle distribuzioni locali del carico per eseguire un'analisi che abbia come oggetto la determinazione delle molteplici sollecitazioni a cui l'impalcato risulta assoggettato.

## CONCLUSIONI

Nel settore della progettazione di ponti sospesi di grande luce le incertezze insite nella modellazione delle azioni derivanti dai metodi d'indagine (sperimentali e non) attualmente disponibili e la carenza strutturale delle soluzioni tradizionali che si tenderebbe ad applicare pur in presenza di consistenti salti di scala, sottolinea la necessità di una nuova impostazione progettuale in grado di compensare tali incertezze attraverso il conferimento di nuove risorse strutturali atte a garantire la necessaria "riserva" di sicurezza.

La rimozione "forte" delle incertezze progettuali è indispensabile per poter procedere all'esecuzione di un ponte che, rispetto all'ultimo realizzato, fa un salto di scala di più del 30% sulla luce libera, passando dai 1990 m dell'Akashi-Kaikyo ai 3300 del ponte di Messina. Il rischio storico può essere dedotto dalla brillante illustrazione dello sviluppo dei ponti sospesi nel tempo [12]: "...rileggo la storia. Osservo che il punto di separazione tra crescita e stasi si colloca

sempre esattamente nell'anno di un grande collasso di cui il vento è stato l'artefice (Wheeling, 1854; Tay, 1879; Tacoma, 1940). Vuol dire che l'uomo, non certo il solo ingegnere, periodicamente si lascia carpire dal proprio istinto lanciando sfide terribili alla natura. Questa per un po' le subisce, poi vi impone un arresto violento. L'uomo dapprima si ferma a riflettere, poi, corregge gli errori, dimentica il passato, riparte daccapo. Sarà un caso, ma l'inizio dei rami costanti, o la fine dei rami crescenti, si succede a intervalli pari circa a mezzo secolo, quanto in media è la memoria di una generazione". Il rischio è quello di essere, dopo 50 anni dal crollo del Tacoma (1940), i responsabili dell'arresto violento invece che gli iniziatori di un periodo di crescita e di innovazione tecnologica, che rilanci l'Ingegneria Italiana nel mondo.

Altri risultati, riguardanti l'impiego di materiali ad alta tecnologia, dimostrano le ampie possibilità tecnico-economiche ottenibili nel campo delle tipologie di ponti sospesi di grandissima luce libera.

Tali risultati mettono in evidenza l'esistenza di ampi margini di miglioramento nella attuale concezione strutturale del ponte sospeso sullo stretto di Messina.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Proc. of Int. Symp. on *Aerodynamics of Large Bridges*, Copenhagen, 19-21 feb. 1992, A. Larsen Ed.; A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 1992.
- [2] IASS - CSCE International Congress, *Innovative Large Span Structures: Concept, Design, Construction*, Toronto 1992.
- [3] Gimsing N.J., "Large Bridges of the Future", Proc. of Int. Symp. on *Aerodynamics of large bridges*, Copenhagen, 1992.
- [4] Lin T.Y. - Chow P., "Gibraltar Strait Crossing - a Challenge to Bridge and Structural Engineers", *Structural Engineering International*, 2/1991.
- [5] Miyata T. et al., "Aerodynamics of Wind Effect on the

Akashi Kaikyo Bridge", Atti del Convegno ANIV *IN-VENTO-92*, Capri.

[6] Finzi L. - Castellani A., "Innovative Structural Systems for a 2 Miles Span Suspension Bridge", IASS - CSCE International Congress, *Innovative large span structures: concept, design, construction*, Toronto 1992.

[7] Madgen H.O. - Ostenfeld Rosenthal P., "Wind Criteria for Long Span Bridges", Proc. of Int. Symp. On *Aerodynamics of large bridges*, Copenhagen, 1992.

[8] Diana G. - Falco, "Indagine analitico sperimentale su un ponte sospeso di grande luce soggetto all'azione del vento", Atti del Convegno ANIV *IN-VENTO-90*.

[9] Scanlan R.H., "Wind Dynamics of Long-Span Bridges", Proc. of Int. Symp. On *Aerodynamics of large bridges*, Copenhagen, 1992.

[10] Ostenfeld K. - Larsen A., "Bridge Engineering and Aerodynamics", Proc. of Int. Symp. On *Aerodynamics of large bridges*, Copenhagen, 1992.

[11] "Some Aspects of the Erection of the Storebelt East Bridge", Mario De Miranda, Michel Petrequin, C.T.A., Giornate italiane delle costruzioni in acciaio, Ancona, ottobre 1997.

[12] Solari G., "I ponti e il vento nel corso dei secoli", XV Congresso C.T.A., Riva del Garda, 15-18 ottobre 1995.

Massimo MAJOWIECKI, Professore associato in Tecnica delle Costruzioni all'Università di Bologna ha avuto il Premio Europeo CECM per strutture metalliche 1991 per lo Stadio di Torino. Membro del IASS Working Group n. 6 *Tension Structures n. 16 Retractable roof structures*.

Progettista strutturale di diverse realizzazioni in Italia e all'estero quali il palazzo dello sport di Atene, la copertura del piazzale Italia della Fiera di Milano, lo stadio Olimpico di Roma, il nuovo stadio di Torino, il nuovo sistema di copertura dello stadio Olimpico di Montreal, il palazzo dello sport di Pesaro, il padiglione espositivo 36 della Fiera di Bologna, il ponte strallato sul Oxhåissundet in Svezia, la copertura del padiglione San Cristovao a Rio de Janeiro.

# dibattito

## Mario DOCCI

Ringrazio l'amico Gurrieri per avermi invitato a questa giornata, un dovere importante per tutti noi che abbiamo conosciuto, abbiamo lavorato e abbiamo in qualche modo apprezzato Sergio Musmeci. È sempre difficile parlare di un amico che non c'è più, ed è ancora più difficile quando si tratta di un amico geniale.

Io mi sono trovato in una fortunata circostanza. Ho conosciuto Sergio sotto diversi aspetti. Prima sono stato suo allievo, quando lui era assistente alla cattedra di Statica Grafica e Meccanica Razionale; poi, intorno agli anni '60 fino verso gli anni '70, ho avuto la fortuna di lavorare con lui, io architetto, lui strutturista; e devo dire che proprio lì ho conosciuto le sue capacità, e soprattutto ho scoperto la possibilità, che poi stranamente nella mia attività professionale ho perduto, di avere un rapporto molto particolare con un progettista di strutture. Lavorare insieme a Sergio era un continuo dialogo. La prima cosa che faceva era cercare di capire quello che voleva l'architetto. Era una vera collaborazione, di idee, di contributo, che portava lontano.

Devo dire che in quel periodo ho avuto modo anche di ascoltarlo spesso, e mi ricordo di un viaggio fatto in macchina da Roma a Napoli e ritorno, in cui abbiamo parlato del progetto del ponte sullo Stretto, delle problematiche di stabilità orizzontale, che lui spiegava in modo chiarissimo per chi come me non

è della disciplina, e ricordo anche tante osservazioni su un altro ponte, quello in calcestruzzo sul Basento. In questa sua ricerca Musmeci cercava di utilizzare i materiali secondo la loro natura, e quindi la forma dell'architettura derivava da questo impiego, trovando quindi l'ottimizzazione tra forma, struttura, e comportamento del materiale.

Voglio ricordare Sergio come una persona straordinaria anche da molti altri punti di vista, e ricca di interessi. Due o tre anni fa sono stato invitato a casa di amici, sono entrato in una casa che sta fuori Roma, ed ho visto una strana torretta-osservatorio. Allora ho capito che quella era stata la casa di Sergio Musmeci. Appena ho visto l'osservatorio mi sono ricordato del suo interesse per l'astronomia.

Ecco, io volevo portarvi questa testimonianza.

## Fabio SELLERI

Vorrei fare una piccola osservazione, che può essere motivo di riflessione nel dibattito. È chiaro che il progettista ha per scopo quello di realizzare la struttura migliore, e l'intervento che ha fatto Paolo Spinelli, con quella divisione molto chiara e molto precisa, coinvolgendo robustezza e stabilità e ottima forma, mi induce a questa considerazione: il problema di ottimizzazione sta molto a cuore al teorico delle strutture, e molto bene Salvatore Di Pasquale ha fatto questa cronologia, perché è la metodologia nobile

di dare una giustificazione alla forma delle nostre strutture. Diversamente lo strutturista resterebbe sempre lontano dall'unicità della soluzione, intesa come momento unico tra l'idea e la realizzazione, lontano da quella visione globale in cui deve essere vista e valutata l'opera finale, come il professor Pozzati ha detto in maniera da maestro quale è.

Allora se lo strutturista, inteso come colui che propone una struttura che abbia certe prerogative di impiego, non si pone il problema di creare la migliore delle strutture possibili, a mio avviso non è un buon progettista, e sicuramente l'ottimizzazione intesa in questo senso ha un suo profondo significato. Ma quando si parla di minimo volume e di minimo materiale, occorre non illuderci troppo che questo significhi la struttura migliore, la realizzazione migliore. Bisogna chiedersi come mai i procedimenti di ottimizzazione non siano proceduti se non in campi molto particolari, cioè o nelle produzioni di grande serie (come l'esempio di Salvatore Di Pasquale dimostra, chiudendo il suo intervento con la sezione trasversale di un aereo), oppure nelle grandissime opere, laddove l'aspetto eccezionale dell'intervento deve richiedere uno studio che vada al di là di altri parametri.

In un'opera eccezionale e di pericolosità estrema quale è il Ponte sullo Stretto di Messina, il veramente bisogna percorrere quella strada (e la proposta di Musmeci era geniale per l'epoca, a tal punto che forse non fu nemmeno intesa), ma laddove questo tipo

di discorso si dovesse estendere ad ogni tipo di struttura, allora forse bisognerebbe fare un'analisi in cui non sia quello l'unico parametro. Ci deve essere almeno la considerazione del confronto dei costi, altrimenti non si spiegherebbe come mai certe strutture come le travi reticolari, così di moda nella fine Ottocento e per tutti i primi anni del Novecento siano state abbandonate. Non è che gli ingegneri non le sapessero più immaginare o costruire, ma erano andate fuori del mercato.

Questo volevo dirlo perché, mentre per le opere di Musmeci che qui si sono ricordate questo mio discorso, che non vuole essere di polemica, può essere fuori tema, in un discorso più generale in cui si pensasse che la via dell'ottimizzazione, del minimo peso e del minimo volume, sia la via maestra, mi sentirei di richiamare l'attenzione, perché potrebbero esserci delle controindicazioni.

### Francesco GURRIERI

Il professor Sella ha introdotto una componente di estrema concretezza, che riapre e vivacizza credo responsabilmente la discussione. Anch'io vorrei sottolineare questo aspetto, ovviamente del costo della realizzazione, perché quando siamo davanti ad opere complesse e geniali, pur con una imprenditoria ed una organizzazione di macchine di cantiere estremamente avanzata, certamente l'influenza dell'impostazione del cantiere e della movimentazione delle macchine, così come il problema della quantità dei pezzi, diventa importante. Per esempio, sul problema della quantità, non c'è dubbio che le ultime immagini che il professor Di Pasquale ha mostrato sono state di grande suggestione, cioè il passaggio, nell'orizzontamento del piano di calpestio di un aereo, da una geometria assolutamente banale con un rettangolo allungato da fori di sezione circolare, ad una forma più complessa, risultato della ricerca di ottimizzazione. Ma è evidente, e questo lo deve sapere bene la Boeing, che il passaggio alla forma complessa è applicabile dove il numero di orizzontamenti, e dunque il numero di aerei, è un numero economicamente valido. Siccome si tratta di lega e di estruso, allora c'è un costo additivo rispetto alle geometrie tradizionali.

Ma questa è solo una riflessione aggiuntiva che arricchisce la valutazione e la discussione, e che nulla sposta del problema.

### Antonio Maria MICETTI

Io e Sergio ci siamo formati nell'immediato dopoguerra, in un'epoca in cui tutta la ricerca, in tutto il mondo, era polarizzata verso il risparmio dei materiali. Oggi le cose non stanno più in questi termini. Questo derivava dai costi delle materie prime e dai costi di manodopera, che specialmente in certe parti del mondo erano in rapporti completamente diversi da quelli che abbiamo oggi. Mi ricordo che nel 1956, con la prima crisi di Suez e l'aumento del petrolio, l'acciaio, pur aumentando ulteriormente, arrivò a costare 160-170 lire al chilo in fornitura, e un operaio costava circa 70-80 mila lire al mese. Questi erano i rapporti. Oggi l'acciaio in fornitura è a 5-600 lire al chilo, però siamo a 36 mila lire l'ora per la manodopera.

Quindi si facevano lavori orientati verso un impiego minimo dei materiali, e massimi maestri come Torroja realizzavano coperture a guscio sottilissime. Solo più tardi si è visto il tallone di Achille di queste strutture estremamente sottili, ma a quei tempi le conoscenze a livello di deterioramento dei calcestruzzi non erano sviluppate.

Occorre chiarire come la ricerca di ottimizzazione strutturale, o più in generale la componente strutturale, in certe opere che noi facciamo assume necessariamente un ruolo secondario. In un ospedale, ad esempio, la struttura si deve adattare alla complessità degli impianti ed alla funzionalità dei caratteri di-

strutturali, magari con strutture che non sono né ottimali né di massima economia. In ogni problema esiste una gerarchia delle componenti che intervengono, e ci sono problemi in cui è una sola la componente: se uno vuole fare un ponte di cinque chilometri l'impatto ambientale non si può considerare, altrimenti non si fa il ponte.

Sta dunque ai progettisti ricercare il valido criterio di ottimizzazione, pena una ricerca esasperata o finalizzata a se stessa.

### Guido SARÀ

Alcune considerazioni sulle relazioni finora presentate. In riferimento a quanto ha detto il professor Pozzati, osservavo un aspetto che mi è sembrato significativo: la ricerca di una suddivisione delle funzioni nelle strutture di Musmeci, ad esempio tra gli elementi che hanno funzione resistente e gli elementi stabilizzanti, mi sembra che sia un aspetto interessante, che porta ad una ricerca dell'essenzialità. Tale razionalità inoltre porta a soluzioni più economiche e più leggere, con una linea guida che è il flusso delle azioni. Allora capisco quello che diceva Pozzati, come a questo punto la suddivisione fra calcestruzzo armato e acciaio diventa quasi insignificante: abbiamo visto costruzioni in c.a. in cui se andiamo ad individuare i flussi delle sollecitazioni, le varie isostatiche, in realtà troviamo una sorta di struttura reticolare, con elementi in acciaio nascosti all'interno.

Le strutture di Musmeci mostrano una chiara suddivisione di compiti, di ruoli delle varie parti della struttura, con eliminazione di tutto quanto è superfluo. Mi veniva da pensare allo scultore. Sapete che una delle definizioni di scultore, che risale più o meno all'epoca di Michelangelo, è come colui che elimina ciò che è superfluo e fa uscire la scultura. La personalità di Musmeci mi sembra un misto fra uno scultore, che va togliendo ciò che è superfluo, e certamente un razionalista, che forse non è una definizione per un artista. Credo che emerga una personalità ibrida anche per ciò che può essere il messaggio attuale; quando la ricerca spinta dell'economia di spazio e di materia si scontra evidentemente con i tempi moderni delle costruzioni; e quando i costi della manodopera, per mettere delle casseforme (e penso a quelle bellissime coperture pieghettate), sono notevoli. Sono d'accordo con Sella, quando dice che non sono più i tempi in cui si cerca l'economia di materiale, ma diviene fondante l'economia di cantiere. Forse Musmeci è uno degli ultimi romantici, o degli ultimi poeti delle costruzioni, e nel futuro si andrà verso soluzioni più razionali, direi proprio nel senso più deterioro del termine.

Accanto agli aspetti che possono essere superati dall'incalzare dell'economia delle costruzioni, ce ne sono alcuni che invece trovo di grande attualità. Tra questi la ricerca di una costruzione che parta dalle tensioni (cioè le tensioni non come verifica ma come punto di partenza) come nelle moderne concezioni di progettazione strutturale, o nel metodo degli stati limite, in cui si fa riferimento a situazioni finali, a meccanismi di crisi, e poi si deduce qual è il tipo di struttura.

Infine, anche quando la ricerca della economia degli spazi e della materia non fosse più fattibile, la razionalità che c'è dietro la separazione delle funzioni degli elementi strutturali, questa certamente rimane di attualità. Gli anni, i decenni passano e ci sono delle cose che sono superate dai tempi, ma ci sono alcuni messaggi di fondo che mi sembra si possano estendere anche al prossimo millennio.

### Salvatore DI PASQUALE

Voglio leggere alcuni passaggi di uno scritto di Musmeci, perché credo che il problema sia tutto lì, e Musmeci lo aveva individuato in modo perfetto. Si chiama questo articolo *Le tensioni non sono inco-*

*gnite*, e lui vi traccia una linea generale abbastanza sintetica, la quale dice che in fondo i problemi delle strutture sono così fatti: si assegna la struttura, si determinano i carichi che essa deve sopportare, magari anche carichi sismici, e poi il compito del progettista è di trovare le tensioni. Ma, leggo le parole di Musmeci per evitare di dare interpretazioni che possano apparire arbitrarie, "questi valori debbono essere inferiori a certi valori assegnati e quindi già noti, ed è però auspicabile, per ragioni di economia, che si avvicinino ad essi il più possibile. Il calcolo di una struttura è, in questo senso, un calcolo di verifica. Anche quando si analizzano gli stati limite, seguendo la struttura fino alle varie fasi di collasso, ciò che si cerca è il moltiplicatore dei carichi che corrisponde a queste fasi e si deve verificare che il suo valore sia vicino, senza superarlo, ad un valore noto a priori". Quindi, dice Musmeci, le tensioni non sono incognite perché noi sappiamo che queste tensioni devono comunque essere inferiori a certi limiti. "Si arriva allora ad una filosofia della progettazione strutturale ben diversa da quella che generalmente presiede al lavoro dello strutturista. Questa nuova filosofia comporta anzitutto la riappropriazione del progetto. Non si tratta più di svolgere un servizio tecnico, ma di assumere il controllo del processo progettuale".

Noi, quando ci troviamo di fronte a problemi strutturali, in genere cerchiamo di far rientrare il problema in uno degli schemi che già conosciamo a memoria, e solo dopo cerchiamo di applicare le formule e i metodi per risolvere quello schema che ha già una soluzione.

Il messaggio di Musmeci è un altro, ed è chiarissimo quando nello scritto parla di cazioni e di deformazioni impresse. Allora io mi chiedo qual è il corso di Scienza delle Costruzioni nel quale si dia alle coazioni e alle deformazioni impresse lo stesso peso che si dà alle forze. Secondo me non esiste. Questo è quello che chiede Musmeci.

### Guido SARÀ

A proposito dei problemi di ottimizzazione, mi collego all'intervento del professor Majowiecki.

Notavo la grande analogia che c'è con il problema delle costruzioni in zona sismiche, di cui personalmente mi occupo. Anche lì c'è il problema di scegliere strutture rigide o non rigide, che vadano o meno in risonanza con l'azione del terreno. È necessario avere una linea progettuale che comprenda tutto il processo di risposta della costruzione, dall'inizio in cui c'è l'input delle azioni esterne, via via che vengono filtrate attraverso la costruzione, fino a che si va allo scontro finale della resistenza degli elementi strutturali. Anche lì bisogna sposare una strategia, che sia la filosofia della resistenza, la filosofia della dissipazione, o la filosofia dell'isolamento, e seguirla in maniera coerente, altrimenti si corre il rischio di arrivare a soluzioni ibride e poco efficaci.

### Francesco GURRIERI

Sono rimasto effettivamente impressionato dalla lucidità della trattazione, nel confronto delle tipologie, che Majowiecki ha fatto, e direi che non ci si possa sottrarre, direi nemmeno eticamente, da riflettere su quello che sta accadendo.

Questo paese ha creato una società per il ponte sullo Stretto, e ha messo a punto gruppi di progettazione e di verifica. Ricordo che ormai più di 15 anni fa c'era addirittura una sede con tanto di targa vicino a Italstat a Roma, e che questo gruppo di lavoro si vedeva anche con frequenza abbastanza intensa. Poi c'è stata una lunga interruzione, e certo se adesso le premesse sono quelle di andare verso una tipologia si collaudata, ma non caratterizzata dall'intelligenza del progresso tecnico, dall'intelligenza dell'intuizione, come mi pare è venuto fuori dai lavori di questa nostra giornata, non c'è dubbio che ha ra-

gione chi ha detto che qui siamo di fronte ad un passo indietro per la tecnica italiana. Occasioni come queste devono invece esprimersi per riaffermare la necessità di dare spazio all'intelligenza della tecnica, non per fare stupidi ed inutili nazionalismi, ma perché credo che la crescita civile, europea ed internazionale, passi attraverso la strada del confronto.

C'è stata una sorta di continuità, di filigrana nei lavori di questa giornata. Salvatore Di Pasquale, è andato indietro nel tempo partendo dal metodo sperimentale galileiano per riportarci attraverso errori e considerazioni fino alla contemporaneità. Ma certo una cosa sostanzialmente ci ha detto: del gusto e del piacere ma anche del dovere di sperimentare, e del dovere di non appoggiarci ed imprigionarci in schemi e schematismi che ci riportino indietro nel tempo.

A me è piaciuta molto anche la sollecitazione del professor Selleri, anche se, forse perché più affascinati dal tema della innovazione tipologica, le riflessioni sui costi e sull'approntamento di cantiere sono rimaste un po' ai margini. Ma nella relazione che a questi confronti ci ha riportato voi avete visto che il ponte di Sergio Musmeci, con una tipologia più avanzata, ha in definitiva una stabilità generale del sistema non inferiore, e sicuramente superiore a quella del tradizionale tipo di ponte sospeso; non solo, ma costa anche meno. E il costar meno non è solo una questione di ottimizzazione di materiali, ma è una questione di realizzabilità concreta.

#### Salvatore DI PASQUALE

Guardando il ponte di Musmeci mi viene in mente di fare un paragone con altri viadotti ferroviari che vediamo quotidianamente, e che hanno tagliato in due la penisola italiana a partire da Roma per andare fino a Firenze Sud.

Siamo tutti d'accordo nel ritenere che, nel tema del ponte sullo Stretto, la soluzione, le idee, debbano essere eccezionali.

Il suddetto viadotto ferroviario è interrotto tra Roma e Firenze in un solo punto, con un arco, per il resto si tratta di un viadotto di 250 chilometri, fatto di travi tutte uguali (e questo certamente ha la sua logica), compresi anche i tralicci metallici, di cui ricordo bene comparve la prova di carico sulla rivista dell'Accai quando cominciò la costruzione. Si era fatta questa prova evidentemente per decidere circa la convenienza della soluzione in relazione al costo, trattandosi di un oggetto da ripetere decine di migliaia di volte. Quello che chiedo è perché un tema di questo genere non richiede un'invenzione. Non si poteva fare diversamente? Solo perché si è riusciti a trovare una soluzione sicura, è questa l'unica possibile? Io non ci credo. Anzi, a maggior ragione, pensando al segno così netto che quell'oggetto lascia nel territorio, secondo me andava fatta qualche altra cosa. Ora, se ciò non è stato, perché? Non sarà stato che per giungere a quella soluzione si è seguita una sola logica, e sicuramente è così, che doveva

essere l'oggetto meno costoso possibile, compatibilmente con la sicurezza.

Tra gli anni '50 e '60 il tratto dell'autostrada Firenze-Bologna era un "expo mondiale" di tutti i possibili ponti che si potessero immaginare. Ma quelli furono prodotti dalle condizioni sociali ed economiche del momento, quando la manodopera non costava niente, ed i materiali costavano molto. Questa era la logica.

Ma se il risultato deve essere un viadotto ferroviario di 250 chilometri tutto uguale, perché adesso le travi conviene "comprarle al supermercato", allora mi chiedo la qualità dove è andata a finire. Sembra che non interessi più a nessuno, che si possa mettere da parte perché altre qualità, forse quantità, urgono.

#### Fabio SELLERI

Sollecitato dagli interventi, ho fatto prima una osservazione che poteva anche suonare riduttiva, e, per colpa della mia esposizione, poteva quasi sembrare che il costo fosse il parametro del ragionamento finale della progettazione. Se così è stato sono felice di cogliere l'occasione per rimediare a questo. Il mio intendimento era un altro, ed era quello di ricordare che quando si fanno degli schemi, soprattutto così elaborati quali sono le strutture ad uniforme resistenza, di minimo volume o di minimo peso, quindi con algoritmi così matematicamente consistenti, allora bisogna tenere presente quale è il parametro finale del discorso.

Poco fa si è fatto riferimento ad una tesi di laurea dove, con gli elementi finiti e agli stati limite, si verificavano le intuizioni di Musmeci. Ma la conferma non poteva non arrivare. Perché se una struttura è concepita bene, è realizzata bene, è disegnata bene, non può essere che perfetta nel suo tipo di soluzione. Il ponte Risorgimento a Roma è un ponte di un'arditezza unica, e quell'ingegnere che, con i metodi di calcolo di allora, lo varò, lo firmò e se ne responsabilizzò, fece veramente un salto nel futuro.

Sono questi esempi mirabili, e tali restano, perché dietro c'è una mente preveggenze. Quando i fiorentini vollero coprire il loro Duomo chiamarono una persona, e noi oggi cerchiamo ancora di capire come fece. Quindi non mi sorprende che un ingegnere del livello di Musmeci abbia intuito 25 anni fa qualcosa che si riscopre solo adesso. Lui lo ha intuito perché ha colto quello che altre persone, procedendo per analogie, che sono pericolose quando il problema assume dimensioni grandiose, non recepiscono. Il problema dell'attraversamento dello Stretto di Messina è talmente grande che non è detto che l'andare per analogia sia l'idea migliore. E soprattutto, ed ecco perché il professor Pozzati ci ha ricordato che la visione di un progetto deve essere unitaria, se si guarda soltanto l'aspetto di rendere il profilo della sezione del ponte il più aerodinamico possibile, se si cerca con quell'unica soluzione, per quell'unica via, di risolvere l'intero problema, vengono fuori gli assurdi di cui parlava Majowiecki.

È stata giustamente usata per questa giornata di studio un'espressione molto elegante, cioè "forma e struttura". Non è stato usato quel binomio, terrificante, che è "ingegnere-architetto". Perché io non riesco a capire dove finisce l'architetto e inizia l'ingegnere quando un'opera è la Cupola o è il progetto di attraversamento dello Stretto proposto da Musmeci.

#### Piero POZZATI

Abbiamo ormai svolto e concluso questo convegno che ha trattato di un grande progettista, grande non soltanto per le cose che ha fatto, ma per il profilo generale che ci ha dato. E oltre al grande progettista abbiamo trattato un grande tema, o almeno ci siamo soffermati per trattare un grande tema, quello dei ponti sospesi di grandissima luce. Un tema che ha disseminato la storia dell'ingegneria di grandissime tappe, perché tutto sommato riflette le maggiori innovazioni, ma ha raccolto anche degli episodi di grandissima preoccupazione, basti pensare a quello di Navier, quando fece un famoso ponte a Parigi. Lui, con tutta la sua saggezza, insegnante celebre ormai non solo a Parigi ma in Europa, trasferì le esperienze fatte in un lungo viaggio, in una lunga peregrinazione in tutta l'Europa, e in particolare già negli Stati Uniti (dove avevano fatto i primi grandi ponti sospesi), in un ponte sospeso, e purtroppo quel ponte lentamente cominciò a declinare. Questo lo accenno per dire che è un tema, quello dei ponti di grande luce, al quale ci dobbiamo avvicinare con grandissimo rispetto. E rispetto vuol dire non chiudere la porta alle innovazioni, ma anche raccogliere le cose passate.

Questo convegno, a mio avviso, ha messo a fuoco un fatto: che negli ultimi tempi, ho così sentito dire da Majowiecki, si sono manifestate in ordine sparso certe innovazioni nei ponti sospesi. E, a guardar bene le cose, queste innovazioni per gran parte si trovavano nella proposta fatta da Musmeci. Quindi questo è il risultato forse centrale di questo nostro incontro: di aver avuto la possibilità di fissare le caratteristiche di questo ponte che nella sua unità accoglie molte cose nuove. Ecco, sottolineo nella sua unità di progettazione. E questo, come stamattina ho accennato, mi sta profondamente a cuore. Perché sono profondamente preoccupato della polverizzazione della cultura, e della polverizzazione anche di quelle che sono le fasi della progettazione, in un dedalo di piccole materie che anziché chiarire le cose al giovane, molto spesso le confondono. L'opera di Musmeci ci dà una lezione di unità della progettazione.

E vorrei sperare che proprio nell'eco e nel ricordo di questa lezione, specialmente noi insegnanti ed ex insegnanti delle facoltà di ingegneria, tenessimo presente il suo insegnamento, nell'allevare delle generazioni di ingegneri che non si sperdano nei particolari, ma sappiano cogliere le linee fondamentali delle loro idee, e delle loro progettazioni.

## Sergio MUSMECI

*Sergio Musmeci è nato a Roma nel 1926. Si è laureato a 22 anni in ingegneria civile ottenendo la medaglia d'oro della Fondazione Almagià per il miglior laureato nel 1948.*

*Ha iniziato la sua esperienza di progettista di strutture negli studi di Riccardo Morandi e di Pier Luigi Nervi. Nel 1953 ha conseguito anche la laurea in ingegneria aeronautica e ha iniziato l'attività professionale in proprio. Alla fine dell'anno ha sposato Zenaide Zanini con la quale ha collaborato in molti progetti.*

*Dal 1956 è docente nella Facoltà di Architettura dell'Università di Roma, dove nel 1968 ha ottenuto l'incarico di insegnamento di Meccanica Razionale e, nel 1969, quello di Ponti e Grandi Strutture. Nel 1973-74 ha tenuto un corso di Ponti e Grandi Strutture anche nella Facoltà di Ingegneria dell'Università di Ancona.*

*È autore di varie pubblicazioni scientifiche tra le quali il volume "La statica e le strutture" contenente impostazioni e sviluppi originali sul problema delle strutture di minimo peso assoluto.*

Ha collaborato con molti architetti, curando fra l'altro gli aspetti strutturali del Palazzo della Regione a Trento, del Tempio Mariano a Trieste, dell'Auditorium del Centro per le Ricerche Atomiche di Bombay, della Biblioteca Nazionale di Roma, del Nuovo Teatro Regio di Torino, del Padiglione Italiano all'Esposizione di Osaka nel 1970.

Si è affermato in molti concorsi nazionali, fra i quali quello per la Stazione di Napoli, per il Palazzo Italia 61 a Torino, per il Palazzo dello Sport di Firenze, per il Monumento ai Mille e per il Monumento alla Resistenza a Cuneo. Tutta la sua attività è stata imperniata intorno all'interesse per la creazione di una nuova architettura basata sulle possibilità espressive di nuove forme strutturali.

Un suo progetto per un ponte è stato esposto alla XI Triennale di Arte Contemporanea a Milano e, successivamente, all'EXPO di Bruxelles del 1958. A partire da questo progetto, ha sviluppato una serie di proposte per nuove tipologie di ponti. Una di esse è stata premiata in un concorso di idee dall'Istituto Nazionale di Architettura.

Questa ricerca si è concretizzata nella realizzazione di un ponte sul Basento a Potenza sostenuto da una membrana in cemento armato che costituisce un'unica volta sottile uniformemente compressa grazie alla sua particolare forma.

Nel 1970 è risultato fra i vincitori del concorso internazionale per l'attraversamento dello stretto di Messina con un progetto di un ponte sospeso ad una sola campata di 3000 metri di luce libera.

Negli anni successivi l'attività professionale di Sergio Musmeci ha trovato espressione in altre opere, tra le quali un progetto su incarico per un ponte a Bolzano (1974), ricerche geometriche su poliedri e antipoliedri (per conto di Italcementi, 1975), il progetto del padiglione Oikos a Bologna (1975), un progetto su incarico per un ponte a Cividale (1978), studi e ricerche per la copertura del foro romano (1980), il progetto e la realizzazione del ponte sull'Appia Antica (1980).

Sergio Musmeci è scomparso il 5 marzo 1981.

## sintesi di tesi di laurea

Università degli studi di Bologna – Facoltà di Ingegneria  
STRUTTURE IN REGIME DI MEMBRANA:  
RICERCA DI STATO "0" CON TECNICA C.A.D.

Laureando: Riccardo Sola

Relatore: prof. Massimo Majowiecki

Correlatore: prof. Giuseppe Matildi

A.A. 1997/98

Data della discussione: 31 Ottobre 1998

In questo intervento presenteremo sinteticamente alcuni risultati ottenuti in un lavoro di tesi svolto presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna sotto la guida del Prof. Majowiecki.

Scopo della tesi era quello di analizzare il rapporto tra esigenze statiche e forma strutturale in una classe particolare di sistemi strutturali, le strutture funzionanti in regime di membrana. Per tali classi strutturali si ha infatti una intima connessione tra forma ed equilibrio (reti di funi e tensostrutture in genere) o quanto meno tra forma e regime statico (gusci). Caratteristiche comuni a queste strutture è dunque il rapporto di identità (o quanto meno di dipendenza stretta), tra la legge geometrica e quella statica, per cui la conformazione della struttura dipende fortemente dalla legge geometrica che la permea.

Queste tipologie strutturali si propongono dunque come una risposta ideale all'esigenza di sintetizzare in un unico momento ideativo gli aspetti strutturale ed architettonico in cui solitamente viene scomposto il processo progettuale. Sembra dunque possibile, nel caso di strutture di questo tipo, proporre un approccio progettuale capace di superare questa scomposizione, poiché la sintesi della forma avviene sulla base di un esplicito giudizio di valore quale è quello relativo al comportamento statico o all'intrinseca economia nell'uso del materiale.

Come si vede, si tratta di una filosofia di progetto molto vicina allo spirito con cui operava Sergio Musmeci. Non sembra opportuno soffermarsi ulteriormente sull'attività di progettazione del Maestro, già autorevolmente ed esaurientemente commentata nel corso dei precedenti interventi. Appare invece interessante presentare i risultati di Ricerca della Forma conseguiti nel lavoro di tesi.

Il problema della Ricerca della Forma è stato essenzialmente applicato a due classi di strutture: discrete (reti di funi) e continue (gusci sottili).

Metodi al discreto: procedura di "appianamento iterativo" (*iterative smoothing method*) per reti di funi.

In molte situazioni di progetto il controllo degli sforzi è di primaria importanza. Può essere necessario ad esempio imporre forme semplici alla distribuzione degli sforzi per adeguarsi alle limitazioni della tecnologia di fabbricazione delle membrane. Oppure considerazioni di economia possono richiedere che gli sforzi siano contenuti entro certi limiti. In casi di questo tipo è opportuno sacrificare il controllo sulla forma per ottenere il controllo sugli sforzi.

Questo metodo permette al progettista di specificare gli sforzi direttamente e di risolvere il problema nella incognita forma di equilibrio.

Nel metodo della matrice di rigidità il progettista assegna la matrice di rigidità geometrica della configurazione di equilibrio di Stato "0" direttamente. Ciò rende il sistema di equilibrio lineare.

Se soltanto invece vengono assegnati gli sforzi interni, il sistema non è più lineare dal momento che la matrice di rigidità geometrica è la funzione delle coordinate incognite,  $\{x\}$ . Per ogni dato set di coordinate nodali, cioè per ogni forma della struttura, è però univocamente determinata la matrice di rigidità, e il sistema di equilibrio

$$[K]_G \{x\} = \{F\}$$

diviene lineare. Una soluzione efficiente di tale sistema lineare può essere raggiunta utilizzando un metodo iterativo, ad esempio Jacobi o Gauss-Seidel. Nelle equazioni risolutive di esso, che sintetizzano le iterazioni, ciascuna coordinata nodale incogni-

ta può essere espressa come media pesata delle forze agenti nel nodo e delle coordinate dei nodi adiacenti:

$$x_i = (F_i - \sum_j ([K]_{G})_{ij} x_j) / ([K]_{G})_{ii}$$

dove  $j$  è il numero delle coordinate nodali. Il termine  $([K]_{G})_{ij}$  è diverso da 0 soltanto per valori di  $j$  corrispondenti a nodi adiacenti al nodo  $i$ -esimo.

Per risolvere il sistema di equilibrio occorre stabilire in primo luogo una forma di tentativo che soddisfi le condizioni geometriche al contorno. La distribuzione degli sforzi è inoltre definita in quanto è quella assegnata dal progettista, cioè quella che si vuole ottenere. La matrice di rigidità geometrica viene ricalcolata basandosi sul valore corrente delle coordinate, ossia sui valori trovati come soluzione del sistema lineare avente matrice di rigidità corrispondente alla forma iniziale di tentativo; quindi viene risolto nuovamente il sistema lineare per ottenere una nuova soluzione approssimata per le incognite coordinate. Questo passo viene ripetuto finché la soluzione converge a una configurazione di equilibrio, cioè fintanto che le coordinate correnti sono tali da soddisfare l'equilibrio. Dal momento che questa procedura iterativa di media tra le coordinate può essere vista con una tecnica di "appianamento" della superficie, questo metodo viene chiamato di "appianamento iterativo" (in inglese *iterative smoothing method*<sup>1</sup>), cioè di "liscio" della superficie dalle asperità e dalle irregolarità.

Il metodo può essere sintetizzato nel modo seguente. Le variabili specificate direttamente dal progettista sono:

1. Topologia della struttura
2. Forze esterne

3. Condizioni geometriche al contorno
4. Distribuzione degli sforzi interni.

L'incognita è:

1. la geometria della struttura (coordinate dei nodi).

In aggiunta, il progettista deve specificare anche una forma iniziale di tentativo.

Questo metodo può essere applicato tanto a strutture discrete quali reti di funi che a membrane potendosi usare per esse qualunque tipo di elemento finito.

Inoltre si può tenere conto facilmente, anche, di carichi che dipendano dalla forma stessa: è sufficiente aggiornare il vettore dei carichi ad ogni iterazione, basandosi sulla geometria corrente.

Sebbene il metodo di soluzione sia non lineare, possono essere sviluppati efficienti codici per valutare le coordinate soluzione. Tipicamente la convergenza iniziale del metodo è rapida mentre quella finale è lenta. Per salvare la convergenza negli ultimi passi del processo iterativo, occorre fissare una tolleranza in modo da trascurare piccoli errori sull'equilibrio. In alternativa è possibile usare metodi di sovrarilassamento, che però sono a rischio di instabilità nella soluzione.

Un apparente problema di questo metodo è che la forma della struttura è difficile da prevedere in base agli sforzi assegnati. Questo problema è superato se il metodo è implementato in un ambiente di computer grafica interattivo. I risultati di ciascuna iterazione infatti possono essere istantaneamente visualizzati e il progettista può interrompere la soluzione per modificare gli sforzi assegnati o qualunque altro parametro di progetto. La possibilità di osservare e valutare i risultati di ogni iterazione accresce enormemente la forza di questo metodo. Se le prime iterazioni indicano una tendenza a raggiungere forme indesiderate, il progettista può correggere i dati iniziali del problema e avvicinarsi così a forme più accettabili per la geometria finale. Un uso ripetuto di questo metodo aiuta il progettista a sviluppare un intuitivo senso delle relazioni tra sforzi, carichi, e forma della struttura (figure 1, 2).

#### METODI "AL CONTINUO": RICERCA DI FORMA PER GUSCI SOTTILI.

Nello sviluppo della tesi abbiamo discusso ampiamente diverse metodologie per aggredire il problema della ricerca di Stato "0" di gusci sottili, dapprima in modo analitico basandoci sulle equazioni differenziali che descrivono il problema, e poi invece basandoci sulla riduzione al discreto direttamente del modello strutturale oggetto di studio. Nel primo caso le difficoltà analitiche sbarrano rapidamente la strada a chi intenda cercare soluzioni in forma chiusa, e d'altro canto il ricorso ad una discretizzazione "a posteriori" del modello via differenze finite congela eccessivamente la gamma delle forme manipolabili. Nel secondo caso si è invece in presenza di metodi molto più versatili e potenti. Questi ultimi però, se sono indubbiamente ideali per manipolare strutture realmente discrete, quali le reti di funi e più in generale le reti di funi e aste, appaiono maggiormente "macchinosi" quando li si debba applicare a superfici continue discretizzate ad elementi finiti.

In questi casi l'idea di fondo è quella di ricondurre il campo di tensioni di membrana, effettivamente in atto nella struttura, ad un set di sforzi fittizi appartenenti ad un immaginario sistema di aste coincidente con i lati degli elementi finiti stessi in cui si è divisa la superficie. A questo punto è possibile applicare uno dei metodi di Ricerca di Stato "0" validi per i sistemi discreti, risolvere il problema nelle incognite coordinate nodali ovvero sforzi fittizi (o simultaneamente entrambi, a seconda della natura del problema), e poi trasformare i risultati nuovamente al continuo.

Per ciascun "passaggio" dal continuo al discreto, e viceversa, è necessaria una opportuna operazione di trasformazione delle variabili in gioco; allo scopo è stata costruita una matrice, generalmente indicata

#### TAV. 1 - Metodi al discreto: procedura di "appianamento iterativo" per reti di funi.

Le immagini si riferiscono a tre diverse condizioni assegnate come input sugli sforzi. Sono visualizzate anche le geometrie intermedie corrispondenti alle diverse iterazioni; è possibile notare come la convergenza sia assai rapida.

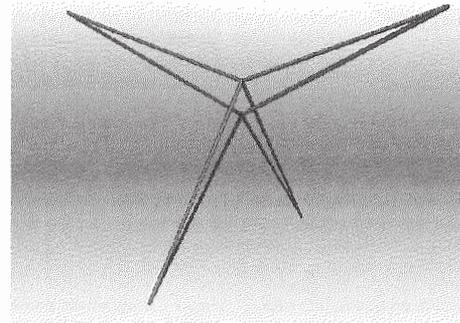
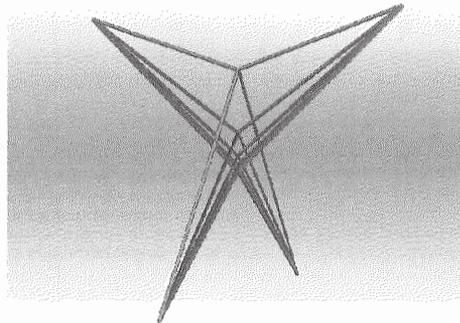


Fig. 1 - Lo sforzo assegnato alla fune superiore è 2/3 rispetto allo sforzo della fune inferiore. Ovviamente ciò che determina la posizione di equilibrio non è il valore assoluto degli sforzi, bensì il loro rapporto.

Fig. 2 - Rispetto all'esempio precedente, il rapporto tra gli sforzi si è sbilanciato a favore della fune inferiore, e il punto di equilibrio si è spostato verso il basso. Si osservino anche i risultati delle iterazioni intermedie: il valore di tentativo per la quota del nodo libero era di poco inferiore a quello dei nodi fissi più alti, ma con sole cinque iterazioni il sistema ha trovato l'equilibrio. Testimonianza questa della potente convergenza del metodo. Si osservi anche che le configurazioni intermedie sono più "addensate" in prossimità della configurazione di equilibrio: infatti, come avviene tipicamente nei casi di iterazione per "appianamento", la convergenza è molto rapida nei primi steps per poi rallentare gradualmente quando ci si avvicina alla soluzione.



con [T], che effettua proprio questa conversione di variabili. La sua espressione è riportata in numerosi testi<sup>2</sup>, e non appare importante ripeterla in questa sede; più utile è invece ricordare la relazione che lega le variabili da essa trasformate, cioè il campo di tensione del regime di membrana con gli sforzi fittizi:

$$\{s\} = [T] \{s\}.$$

Viceversa si avrà:

$$\{s\} = [T]^{-1} \{s\}.$$

Ora si deve osservare che ogni qualvolta sia richiesto il passaggio da un insieme di variabili all'altro, è richiesta l'esecuzione di tali operazioni, con tutti gli oneri computazionali che ne derivano (si pensi che già la costruzione della matrice stessa è operazione piuttosto laboriosa, e che inoltre è richiesto il calcolo dell'inversa con tutte le difficoltà ben note insite in tale operazione).

Se poi si richiede l'adozione di una procedura iterativa, ad ogni passo è necessario eseguire la trasformazione di variabili sia in un senso che nell'altro, tanto che la macchinosità del procedimento e l'one-

re computazionale associato crescono a dismisura. Ecco perché appare interessante, più che perfezionare procedure di calcolo associate a tale modo di procedere, esplorare strade diverse, che si fondino su considerazioni di tutt'altro genere.

Ramm, Bletzinger e la loro équipe nell'Università di Stoccarda da tempo stanno esplorando soluzioni alternative a questo problema, inserendo il problema di Stato "0" in un più vasto ambito di ottimizzazione strutturale, associata a tecniche C.A.G.D. (*Computer Aided Geometrical Design*). Più interessante appare l'approccio del brasiliano Vizotto, che intuisce la possibilità di percorrere una strada fondata sulla deformazione sotto carico di membrane modellate ad elementi finiti. Da questi suggerimenti, ma soprattutto dalla riflessione critica sull'insieme dello Stato dell'Arte analizzato in questo lavoro di tesi, con particolare riguardo ai metodi sperimentali (i quali, per essere a diretto contatto con la realtà fisica, permettono spesso di cogliere l'essenza dei problemi meglio di qualunque trattamento di carattere teorico), nasce la seguente idea. Se veramente stiamo cercando forme modellate dalla Meccanica, cioè forme "naturali", forme che guidino i carichi a terra nella maniera più diretta e naturale possibile, lasciamo che siano le forze stesse ad indicarci la forma più opportuna.

Viene subito alla mente il caso delle strutture ipostatiche: non potendo queste equilibrare i carichi con sforzi diversi da quelli assiali di trazione, esse si dispongono automaticamente secondo una funicolare, cioè secondo un canale in cui viaggino soli sforzi di trazione. E infatti abbiamo visto il principio di funicularità essere un potentissimo criterio di ricerca di forma.

Tornano allora alla mente gli esperimenti di Heinz Isler, che appendeva un telo per congelarne (letteralmente!) la forma funicolare; oppure le tecniche sperimentali H.M.T. (modelli omeostatici), in cui sostanzialmente si faceva un'operazione analoga, lasciando che i carichi agissero su una struttura che perdeva sempre più rigidità a flessione (a causa del riscaldamento nel forno), e si avvicinava quindi sempre più ad una membrana ipostatica.

Nasce allora l'idea di simulare tali esperimenti fisici per via computazionale. Abbinando così la grande potenza e precisione del mezzo di calcolo automatico con la aderenza alla realtà fisica tipica di un esperimento.

Si è così intrapresa una serie di sessioni di simulazione presso il laboratorio di Meccanica Computazionale della nostra Facoltà. Si è fatto uso di un potente programma di Analisi delle Strutture basato su modellazioni ad elementi finiti di qualunque tipo, denominato *Samcef*. Si tratta di un programma sviluppato presso l'Università di Liegi, dedicato a strutture di qualunque tipo ma in particolare a quelle meccaniche, aeronautiche, nucleari. Bene si presta comunque anche all'analisi tensionale e deformativa di elementi quali lastre, piastre e membrane.

Il problema che ci siamo posti è stato il seguente: come poter simulare il fenomeno che avviene in un forno H.M.T. quando una piastra viene deformata progressivamente dal carico e dallo "scioglimento" della sua rigidità flessionale?

La risposta è stata l'applicazione ripetuta di un carico distribuito ad una piastra inflessa, in corrispondenza delle progressive deformazioni conseguenti al carico stesso, fino ad ottenere una distribuzione di momenti trascurabile e quindi ad ottenere un regime membranale. Sono state effettuate diverse applicazioni del metodo a diverse situazioni strutturali, in particolare a piastre appoggiate su appoggi puntiformi. È questo infatti il caso più interessante, conduttore a strutture a guscio dai bordi liberi e quindi veramente a forma libera (figure 3, 4, 5).

Osserviamo inoltre che questa via, che potremmo chiamare "deformativa", non è la sola possibile tra quelle fondate su un approccio "meccanico". Innanzitutto vi è la possibilità di deformare, anziché una piastra inflessa, una membrana ipostatica pretesa al

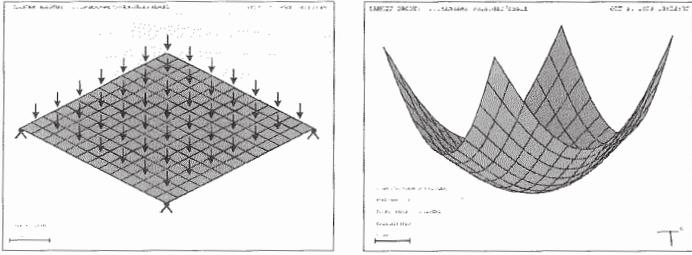


Fig. 3 e 4 - La situazione statica di partenza e la forma risultante al termine del processo deformativo. Quest'ultima è resistente al carico con le sole risorse di cui dispone, cioè le sollecitazioni interne di membrana (di cui sono richiamate quelle di trazione); ribaltando la forma di 180° rispetto all'orizzontale, diviene per quel carico resistente in regime di compressione pura.

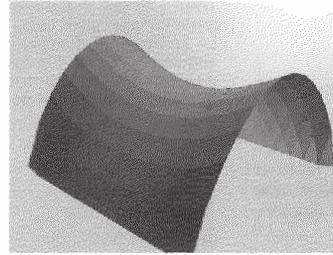


Fig. 7 - Diagramma dei momenti flettenti  $M_x$ .

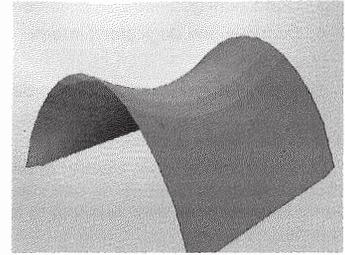
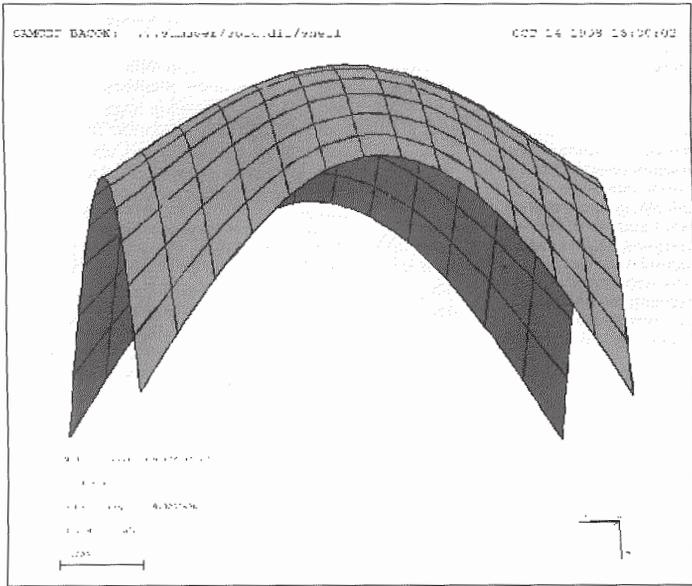


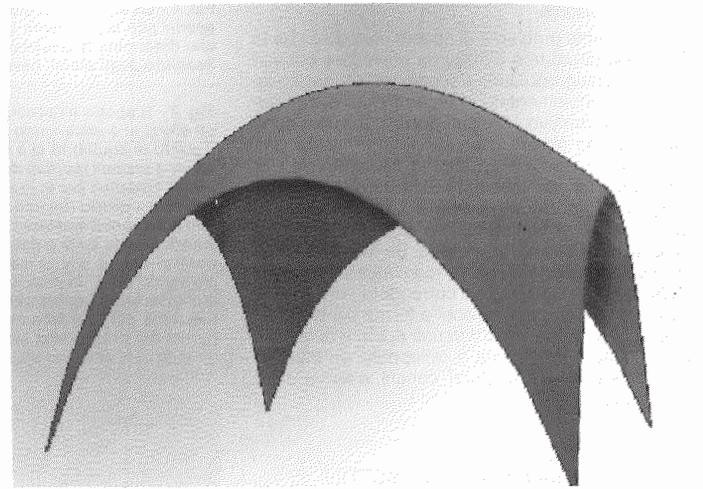
Fig. 8 - Diagramma dei momenti flettenti  $M_y$ .

Fig. 5 - La forma precedente, resistente in trazione, è stata ribaltata ed è divenuta una forma in pura compressione.

Fig. 9 - Diagramma somma dei momenti  $M_x$  ed  $M_y$ . La forma è molto simile a quella trovata per via deformativa.



Tav. 2 - Metodo "deformativo" applicato a lastre inflesse. Riportiamo il metodo applicato ad una lastra quadrata appoggiata sui punti di vertice angolare.



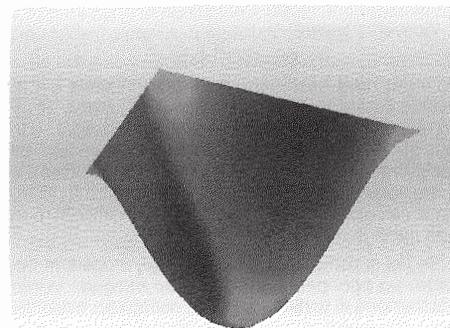
TAV. 4 - Metodo "statico" applicato a lastre inflesse. Risultati dell'analisi statica della stessa piastra quadrata letti col diagramma delle sollecitazioni; riportiamo prima il diagramma dei momenti flettenti in direzione  $x$ , poi di quelli in direzione  $y$ , e infine della somma dei due. Quest'ultimo assomiglia inequivocabilmente alla forma trovata per via deformativa, confermando così una sorprendente convergenza dei due metodi, assicurazione della validità dei risultati ottenuti.

contorno. Anche questa simulazione, che si ispira in qualche modo alle metodologie sperimentali di Isler (ricordiamo i teli ipostatici appesi, o la membrana sottoposta a pressione radiale aerea), è stata effettuata (figura 6).

Infine vi è un altro tipo di approccio, che potremmo chiamare "statico" anziché deformativo: ricordando che in generale in una struttura la linea di passaggio dell'azione interna, cioè la curva delle pressioni, coincide col diagramma dei momenti flettenti, è possibile costruire il diagramma dei momenti relativo ad una certa situazione statica (ad esempio una lastra inflessa) e assegnare su quel dominio alla struttura la geometria stessa del diagramma. La struttura risultante sarà, per quel determinato carico in base al quale abbiamo determinato il diagramma dei momenti (che potrebbe ragionevolmente rappresentare i carichi permanenti agenti sulla struttura), una configurazione funicolare e quindi avrà regime di membrana puro. La verifica, condotta caricando la nuova geometria col carico originario, ha confermato questo fatto originandosi una distribuzione di momenti trascurabile (figure 7, 8, 9).

TAV. 3 Metodo "deformativo" applicato a membrane presollecitate.

Fig. 6 - La deformata è ottenuta caricando una membrana ipostatica pretesa al contorno, con un carico uniformemente distribuito sull'orizzontale.



### Conclusioni.

Abbiamo voluto proporre queste riflessioni per mostrare come lo spirito e la filosofia che animavano la ricerca del Maestro Sergio Musmeci siano ancora vive all'interno della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna (dove per tradizione, nel campo strutturale, si pone l'accento più sul momento progettuale che su quello puramente analitico), in particolare nell'ambito di ricerca che fa capo all'insegnamento di "Strutture Speciali" tenuto dal Professor M. Majowiecki.

<sup>1</sup> R.B. Haber, J.F. Abel, "Initial Equilibrium Solution Methods for Cable Reinforced Membranes - part I - Formulations", *Computer method in applied mechanics and Engineering* 30/1982, 263-284.

<sup>2</sup> Cfr. M. Majowiecki, *Tensostrutture: progetto e verifica*, C.I.S.I.A., Milano 1985.

**Politecnico di Torino – Facoltà di Architettura**  
**LA PROPOSTA STRUTTURALE DI MOLINO, BORDOGNA E MUSMECI**  
**PER LA COPERTURA DEL PALAZZO DEL LAVORO DI ITALIA '61**

Laureando: Giovanni Catrano  
 Relatore: prof. Paolo Napoli  
 A.A. 1997/98

*Il movimento moderno puntando sul riscatto espressivo delle nuove strutture, ha determinato un'osmosi tra ingegneria e architettura, sì che tecnica e fantasia spaziale convergono oggi nella creazione di fabbricati [...], ne è prova la serie di progetti presentati al concorso-appalto bandito dal Comitato "Italia '61" per la costruzione del Palazzo del Lavoro a Torino.*

Così l'architetto Bruno Zevi scriveva nel suo articolo "Un Concorso a Torino. Palazzi tessuti in acciaio", comparso su *L'Espresso* del 15 novembre 1959.

In occasione delle celebrazioni per il primo centenario dell'Unità d'Italia (1861-1961) veniva infatti indetto a Torino nel 1959 un Concorso-Appalto per la costruzione del Palazzo del Lavoro destinato ad ospitare l'Esposizione Internazionale del Lavoro: erano in lizza i migliori strutturisti italiani, da Pier Luigi Nervi a Sergio Musmeci e Riccardo Morandi, e un gruppo di architetti assai noti, da Carlo Mollino a Gino Levi-Montalcini, da Sergio Nicola e Aldo Rizzotti a Roberto Gabetti e Aimaro d'Isola. Vinse il concorso l'ing. Pier Luigi Nervi.

Non crediamo che i progetti, rimasti purtroppo sulla carta, perdano la loro qualità e i loro meriti: potenzialmente essi esprimono un'idea sempre attuale; vale a dire, e ci sia perdonata l'apparente ironia nel citare una frase di Nervi, che "l'architettura si fa con i pensieri".

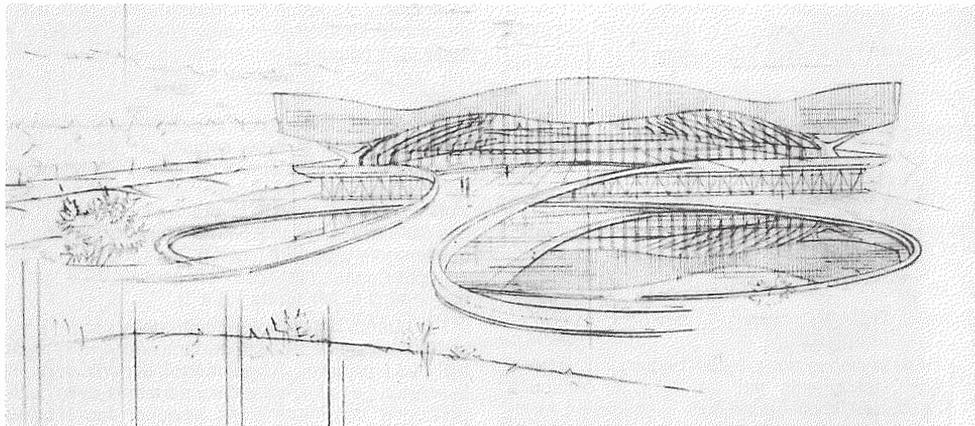
Le tre soluzioni presentate al concorso da Mollino, Bordogna e Musmeci esprimono ancora oggi una totale aderenza delle strutture al gusto spaziale e plastico; per citare ancora Zevi: "raggiunta un'assoluta integrazione tra invenzione strutturale e invenzione architettonica, è perfino difficile precisare se il motivo di partenza d'un progetto è di natura tecnica o artistica".

Questa osmosi tra architettura e ingegneria, intesa come concezione del progettare in cui anche la struttura partecipa a creare il contenuto estetico di una architettura, ha costituito un ideale riferimento e un continuo stimolo per lo studio di questa tesi.

Preso in esame il Palazzo del Lavoro proposto da Mollino, Bordogna e Musmeci nella sua "soluzione A", è stata condotta un'analisi strutturale agli elementi finiti, e una verifica della capacità portante delle sezioni secondo la teoria agli stati limiti ultimi.

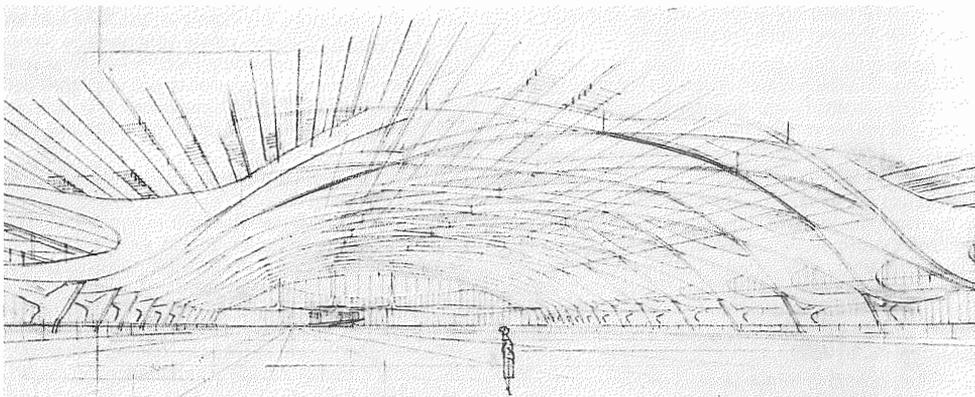
La struttura, integralmente in cemento armato, consiste in grandi archi incrociati tra loro e continui nelle sezioni di incastro con telai di forma speciale; questi sono destinati a sostenere, oltre alla copertura su di essi, il solaio a quota +11.25, dove trovano posto le gallerie di esposizione richieste dal bando "a piani interni diversi". Una simile struttura è spingente e il comportamento dei telai è praticamente a sbalzo verso l'esterno; le sezioni hanno da punto a punto dimensioni variabili in modo da realizzare l'uniforme resistenza.

Al fine di ricostruire la precisa geometria della struttura si è compiuta una fase di ricerca nell'Archivio "Carlo Mollino", presso la Biblioteca Centrale di Architettura del Politecnico di Torino, dove si è potuto attingere oltre ai preziosi disegni e relazioni del progetto, anche alla documentazione riguardante l'Appalto-concorso, ritenuta utile per capire le caratteristiche del manufatto vincolate dalle richieste del



**Fig. 1 - Il progetto di Carlo Mollino, Carlo Bordogna e Sergio Musmeci presentato al Concorso Italia '61 per la costruzione del Palazzo del Lavoro a Torino.**

**Fig. 2 - La "soluzione A" proposta per la copertura, integralmente in cemento armato ad archi incrociati con spinta portata al terreno.**



bando e per inquadrare la realtà di un progetto così particolare.

L'intero complesso strutturale ha dimensioni in pianta di 170x147 metri, si caratterizza longitudinalmente per la presenza di un asse principale di simmetria, come ben evidenziato nel giudizio della Commissione Esaminatrice, trasversalmente è scandito ogni 10 metri dagli archi-telaio, ruotati dell'angolo  $j=15,46^\circ$  e con interasse pari a 9,63 metri. Dal ripetuto incrociarsi degli archi-telaio si determina, insieme alla mutua funzione di organismo strutturale, un efficace effetto spaziale.

L'interpretazione del problema strutturale è stata compiuta per mezzo del codice di calcolo COSMOS/M, attraverso la definizione di un "modello agli elementi finiti", una rappresentazione cioè della struttura resistente nello spazio, vincolata e sollecitata dalle azioni, che ha lo scopo di fornire una descrizione del suo comportamento meccanico.

Per giungere alla fedele definizione del "modello" della struttura in esame, si è operata una sua attenta ricostruzione attraverso successive fasi:

- la precisa rappresentazione, per mezzo di scanner e programmi CAD, delle forme sinuose conferite dalla mano di Mollino all'arco-telaio;
- l'impostazione delle proprietà fisiche del materiale costituente;
- la definizione delle "costanti geometriche" da attribuire agli elementi finiti (aree, momenti d'inerzia attorno ai tre assi nello spazio, altezze e spessori delle sezioni, vincoli interni, fattori di taglio), calcolate per le tre sezioni caratteristiche dell'arcone, già individuate dall'ing. Musmeci nella sua relazione, e per le rimanenti sezioni, ricavate invece in base ai particolari costruttivi depositati in archivio;
- la scelta della tipologia più adeguata dell'elemento finito, orientatasi su elemento trave cosiddetti "Beam3D";
- l'adozione degli stessi valori delle azioni agenti utilizzati da Musmeci, dedotti dalle formule del suo studio statico e raggruppati secondo le cinque "condizioni di carico" da noi considerate;

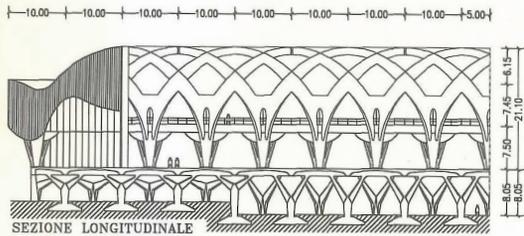


Fig. 3 - Sezione longitudinale e sezione trasversale della struttura di copertura.

• infine la disposizione delle "condizioni di vincolo" agli spostamenti, per garantire la continuità strutturale, in quei punti dove s'interrompe il modulo e laddove si verifica l'intersezione con un altro arco-telaio.

L'intersezione di un arcone con il successivo, è stata interpretata come simmetria rispetto a un piano passante per quel punto e ruotato dell'angolo  $\beta$  rispetto al piano contenente l'arcone: per le condizioni di simmetria sono consentiti i soli spostamenti appartenenti al piano stesso di simmetria.

Il passaggio dalla geometria reale della struttura alla geometria del modello di calcolo coincide con una fase delicata: l'asse geometrico della struttura viene discretizzato nella maglia degli elementi finiti, "mesh"; il manufatto perde le sue dimensioni reali e assume una geometria "filiforme".

A causa di questo procedimento viene a mancare in corrispondenza delle reni degli arconi, che in quel punto sono ormai divaricati e distinti, l'appoggio costituito dall'unico pilastro inferiore. Per non pregiudicare la precisa geometria di intersezione degli archi-telai, si è deciso di modellare il pilastro con due bracci, che sostengono, nei precisi punti di contatto, gli arconi soprastanti.

Inoltre, poiché la forma sinuosa dell'arcone in corrispondenza delle reni si allarga, acquistando una rigidità molto grande, per poi dividersi e continuare nel telaio laterale, costituente le gallerie, si è reso necessario interpretare questa parte terminale dell'arcone per mezzo di tre elementi trave chiusi a triangolo, così da rispettarne convenientemente la geometria e conferire ad essa la giusta rigidità.

Ad un primo approccio alla modellazione compiuto attraverso il modello ad arco-telaio doppio, compreso nel modulo di 10 metri, ne è seguito un secondo che prende in esame un solo arco-telaio nello spazio, modellato e vincolato opportunamente tanto da rendere la sua risposta strutturale assimilabile al primo modello.

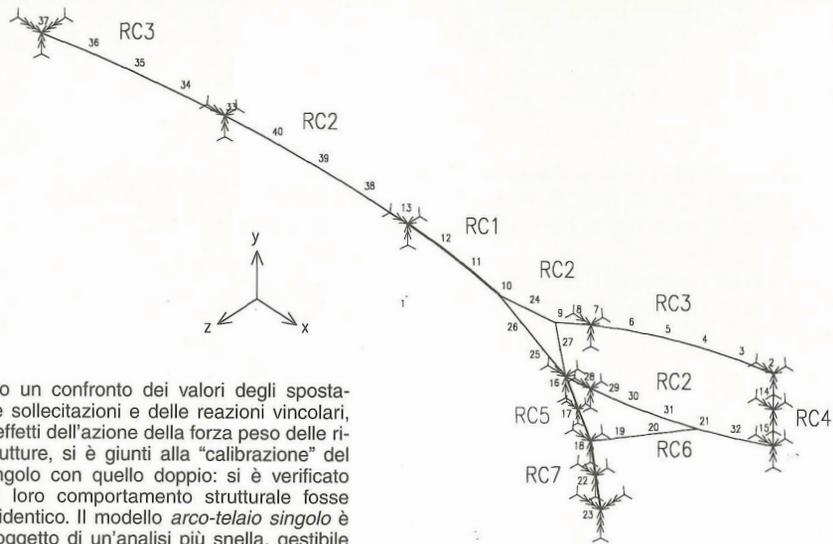


Fig. 4 - Modellazione di un singolo arco-telaio, vista nello spazio 3D.

Attraverso un confronto dei valori degli spostamenti, delle sollecitazioni e delle reazioni vincolari, dovuti agli effetti dell'azione della forza peso delle rispettive strutture, si è giunti alla "calibrazione" del modello singolo con quello doppio: si è verificato cioè che il loro comportamento strutturale fosse pressoché identico. Il modello arco-telaio singolo è stato così oggetto di un'analisi più snella, gestibile ma non meno attendibile rispetto al modello più grande.

Per determinare i valori di calcolo delle sollecitazioni (involuppo), si è poi seguito un procedimento che applica i "coefficienti di combinazione di carico" non ai carichi agenti ma bensì alle singole sollecitazioni calcolate: i valori "a favore di sicurezza" se causati dalle azioni variabili (vento, neve, folla) vengono debitamente trascurati (coeff.  $g_G$  da 1,5 a 0) e vengono opportunamente ridotti se causati dalle azioni permanenti (coeff.  $g_G$  da 1,4 a 1).

Per quanto riguarda il progetto delle sezioni sono state calcolate le capacità portanti secondo la teoria agli stati limiti ultimi, "ponderando", in particolare per la flessione e la forza assiale, i parametri della configurazione deformata della sezione per ottenere quantità di armatura il più possibile confrontabili con quelle predisposte da Musmeci.

Con nostra viva sorpresa tali valori sono compatibili, e questo nonostante le differenze riguardanti le ipotesi fatte nella determinazione delle sollecitazioni: Musmeci considerò lo schema statico della struttura semplificandolo, nel piano, e adottò il metodo delle tensioni ammissibili per la verifica delle sezioni; la nostra analisi considera l'arco-telaio nello spazio, non trascurando la possibilità dell'insorgere delle sei "caratteristiche di sollecitazione", e la successiva verifica delle sezioni è stata condotta agli stati limite ultimi.

Ai fini della ricerca è giunta propizia l'opportunità di partecipare alla Giornata di studio Sergio Musmeci forma e struttura, tenutasi il 9 novembre 1998 a Firenze, presso l'Accademia delle Arti del Disegno, nella quale si voleva sottolineare il particolarissimo ruolo scientifico-tecnico avuto da Musmeci, con le sue intuizioni nello studio strutturale unite alla sua sensibilità per la forma. In quell'occasione è stato possibile conoscere la vedova dell'ing. Musmeci, l'architetto Zenaide Zanini, collaboratrice del marito.

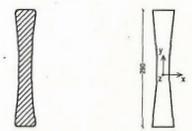
Questa tesi, verificando la proposta strutturale in questione attraverso le attuali metodologie di calcolo, ne ha comportato una riprogettazione, offrendoci così la possibilità di accostarci a quella integrazione e osmosi tra architettura e ingegneria di cui si parlava all'inizio.

A proposito del lento affermarsi di nuove forme strutturali più consone al cemento armato e non mutate da altri materiali da costruzione scriveva Musmeci in una sua relazione per un seminario: "Forse non è azzardato affermare che, in questo senso, il cemento armato ha solo cominciato a cercare la sua espressione genuina, in una parola, la sua architettura".

Fig. 5 - Individuazione delle caratteristiche degli elementi finiti nelle diverse sezioni dell'arco-telaio.

CARATTERISTICHE degli ELEMENTI FINITI

SEZIONE alle RENI



A = 1.181	[m <sup>2</sup> ]
J <sub>x</sub> = 0.858	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>y</sub> = 1.787E-2	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>z</sub> = 2.951E-2	[m <sup>4</sup> ]
h = 2.90	[m]
b = 0.54	[m]

SEZIONE INTERMEDIA



A = 0.636	[m <sup>2</sup> ]
J <sub>x</sub> = 0.218	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>y</sub> = 8.412E-2	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>z</sub> = 2.851E-2	[m <sup>4</sup> ]
h = 1.90	[m]
b = 0.43	[m]

SEZIONE in CHIAVE



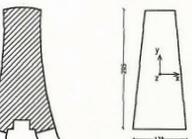
A = 0.422	[m <sup>2</sup> ]
J <sub>x</sub> = 7.908E-2	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>y</sub> = 3.488E-2	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>z</sub> = 0.752E-2	[m <sup>4</sup> ]
h = 1.40	[m]
b = 0.40	[m]

SEZIONE del RITTO



A = 0.465	[m <sup>2</sup> ]
J <sub>x</sub> = 0.117	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>y</sub> = 4.888E-2	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>z</sub> = 0.044E-1	[m <sup>4</sup> ]
h = 1.70	[m]
b = 0.45	[m]

SEZIONE del PILASTRO



A = 3.080	[m <sup>2</sup> ]
J <sub>x</sub> = 2.201	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>y</sub> = 0.305	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>z</sub> = 0.303	[m <sup>4</sup> ]
h = 2.85	[m]
b = 1.35	[m]

SEZIONE del RITTO



A = 1.540	[m <sup>2</sup> ]
J <sub>x</sub> = 4.091E-2	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>y</sub> = 4.091E-2	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>z</sub> = 0.422E-1	[m <sup>4</sup> ]
h = 2.85	[m]
b = 0.975	[m]

SEZIONE del RITTO



A = 0.894	[m <sup>2</sup> ]
J <sub>x</sub> = 0.105	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>y</sub> = 0.042	[m <sup>4</sup> ]
J <sub>z</sub> = 0.101	[m <sup>4</sup> ]
h = 1.18	[m]
b = 0.75	[m]

SEZIONE k/k del SOSTEGNO