



RICCARDO GULLI

STRUTTURA E COSTRUZIONE
STRUCTURE AND CONSTRUCTION



MANUALI
SCIENZE TECNOLOGICHE

- 4 -

RICCARDO GULLI

Struttura e Costruzione
Structure and Construction

Firenze University Press
2007

Struttura e Costruzione : Structure and Construction
/ Riccardo Gulli. – Firenze : Firenze university press,
2007.
(Manuali; Scienze tecnologiche; 4)

<http://digital.casalini.it/9788884536211>

ISBN 978-88-8453-621-1 (online)

ISBN 978-88-8453-622-8 (print)

721 (ed. 20)

Architettura - Tecnica



Pubblicazione finanziata con contributo Centro Studi LabTeco DAPT – Università di Bologna su
convenzione con ACMAR Ravenna

Traduzione di Leanne Young

© 2007 Firenze University Press
Università degli Studi di Firenze
Firenze University Press
Borgo Albizi, 28
50122 Firenze, Italy
<http://epress.unifi.it/>

Printed in Italy

Indice / Index

Prefazione	1
Capitolo 1. Continuità strutturale	3
Capitolo 2. Arco e trave curva	7
Capitolo 3. Cupole e gusci sottili	9
Capitolo 4. Stabilità, resistenza, rigidezza	13
Capitolo 5. Strutture inflesse	17
Capitolo 6. Struttura e costruzione	21
Capitolo 7. Strutture miste	25
Capitolo 8. Ottimizzazione strutturale	29
Capitolo 9. Miglioramento strutturale	33
Capitolo 10. Struttura, involucro	39
ILLUSTRAZIONI / PICTURES	43
<i>Preface</i>	143
<i>Chapter 1. Structural continuity</i>	145
<i>Chapter 2. The arch and the curved beam</i>	147
<i>Chapter 3. Domes and thin-shell structures</i>	149
<i>Chapter 4. Stability, strenght, rigidity</i>	153
<i>Chapter 5. Inflexed structures</i>	157
<i>Chapter 6. Structure and construction</i>	161
<i>Chapter 7. Mixed structures</i>	165
<i>Chapter 8. Structural optimization</i>	169
<i>Chapter 9. Structural improvement</i>	173
<i>Chapter 10. Structure, envelope</i>	179
Riferimenti bibliografici essenziali/ <i>Essential bibliographical reference</i>	183

Prefazione

Il presente contributo si propone come ausilio didattico per l'insegnamento dell'Architettura Tecnica nei corsi di Ingegneria Civile ed Edile della Facoltà di Ingegneria di Bologna, collocati ai primi due anni delle corrispondenti lauree triennali. Una finalità che prende le mosse da alcuni presupposti fondativi, sia di carattere metodologico sia in ordine ai contenuti formativi. L'organizzazione didattica in moduli – prevista dal nuovo ordinamento degli studi universitari – ha indotto ad operare una revisione dei programmi articolandoli secondo una selezione mirata di argomenti, nell'impossibilità accertata di affrontare in forma esaustiva tutte le problematiche che attengono al campo della *teoria e della pratica della costruzione* all'interno di un unico corso. Tale aspetto si correla anche all'esigenza, propria degli insegnamenti di base, di assegnare specifica attenzione alla definizione dei criteri e dei principi teorici quali strumenti propedeutici su cui fondare la successiva trattazione delle soluzioni tecniche di intervento progettuale.

Secondo questa impostazione, il tema *Struttura e Costruzione*, rappresenta la matrice e il filo conduttore delle argomentazioni trattate nelle lezioni del corso; inteso come lettura complementare ed integrativa, tale contributo indaga alcuni aspetti del variegato rapporto che lega i principi di funzionamento di una struttura alla sua traduzione in forma costruita, tra le leggi che ne governano la ragione strutturale e le soluzioni tecniche che ne decretano la fattibilità costruttiva.

Un tema che si ritiene essenziale per il percorso formativo degli allievi ingegneri, oggi fortemente condizionato da approccio didattico teso a sezionare il sapere sulla costruzione all'interno di circostanziati e indipendenti confini disciplinari.

In particolare, la fede riposta nella formulazione matematica come prioritario strumento capace di fornire – nell'oggettività del metodo scientifico – l'interpretazione meccanica di una struttura, costituisce una delle primarie ragioni della progressiva separazione dei punti di contatto che hanno storicamente contrassegnato la relazione tra *Scienza e Tecnica* nel campo dell'Ingegneria delle Costruzioni, in nome di un approccio sempre più teso ad isolare la componente analitica del calcolo dal dato fisico dell'opera, lo schema statico dalla matrice costruttiva.

Un processo che per contro ha inciso sulla graduale trasformazione del profilo professionale dell'ingegnere contemporaneo, dalla originaria figura di progettista delle soluzioni tecniche a quella di specialista-verificatore delle prestazioni strutturali, talvolta sprovvisto dei necessari strumenti critici propri di un sapere che non si esaurisce e non si risolve solo all'interno di modelli di spiegazione scientifica, ma che richiede necessariamente di essere compreso entro una dimensione culturale più ampia dove vivono, alimentandosi a vicenda, forme diverse di conoscenza, dalla *Storia*, alla *Scienza*, alla *Tecnica* fino alle ragioni ultime dell'*Architettura*.

Illuminanti e premonitrici appaiono in tal senso le parole coniate da Pierluigi Nervi già negli anni Cinquanta ed indirizzate a evidenziare l'importanza accreditata nell'insegnamento univer-

sitario, ad un approccio intuitivo al problema strutturale, in preminenza a quello essenzialmente numerico:

[...] La padronanza del fatto statico-costruttivo non può essere il risultato delle sole teorie matematiche che costituiscono l'attuale Scienza delle costruzioni, ma il prodotto di una comprensione fisica del complesso comportamento di una opera edilizia, e nel conseguente superamento e completamento intuitivo dei risultati della teoria.

(Pierluigi Nervi, *Costruire correttamente: caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*, Hoepli, 1955)

Su questa linea, anche se contrassegnata da esigenze di sintesi e da un diverso contesto disciplinare, si muove l'approccio seguito nel presente lavoro, il cui proposito è inteso a consolidare un orientamento didattico condiviso con gli altri corsi appartenenti al settore dell'Architettura Tecnica della Facoltà di Ingegneria di Bologna.

Capitolo 1

Continuità strutturale

Il disegno che raffigura lo scheletro strutturale della Maison Dom-ino di Le Corbusier (Fig. 1.1) può essere assunto come l'icona di un passaggio epocale nella storia che accompagna lo sviluppo della *Tecnica* nel settore dell'ingegneria delle costruzioni.

Non certo in termini di espressione formale, ma sul piano delle possibilità che tale sistema costruttivo poteva garantire allo sviluppo di nuovi linguaggi architettonici. La piena trasposizione in espressione architettonica si compirà infatti solo più tardi, quando prenderà forma la peculiare stagione delle avanguardie europee degli anni Venti e Trenta del Novecento, a cui si associa il termine di *Movimento Moderno*.

La Ville Savoye a Poissy (1929-31) (Figg. 1.2/1.3/1.4) progettata da Le Corbusier, viene considerata come il manifesto paradigmatico degli assunti teorici su cui si fonda in nuovo indirizzo architettonico: piano pilotis, facciata libera, pianta libera, finestra in lunghezza, tetto giardino. Sotto il profilo tecnico, le soluzioni progettuali adottate, sono essenzialmente riconducibili ad un unico aspetto: la separazione fra *struttura ed involucro*, fra scheletro strutturale e parti di completamento. Le pareti possono essere intagliate senza incorrere nei vincoli posti dalla muratura portante; allo stesso modo la divisione fisica degli spazi non segue l'ordine geometrico segnato dallo scheletro strutturale (Figg 1.5/1.6).

Una separazione che per contro promuove una sempre più marcata specializzazione disciplinare: una figura che si occupa delle ragioni statiche dell'edificio, distinta da quella che ne disegna la forma complessiva. Su questo doppio binario si instradano infatti i successivi sviluppi delle competenze dell'ingegnere, complementari a quelle dell'architetto e progressivamente indirizzate verso la gestione degli aspetti della sicurezza strutturale.

L'avvento della tecnica del calcestruzzo cementizio armato, nell'Europa di fine Ottocento, fornisce un contributo decisivo a tale processo. Lo scatto in avanti, il passaggio decisivo tra la fase pionieristica degli studi sulla possibile combinazione di due materiali diversi, ferro e calcestruzzo, avviene con il brevetto di François Hennebique, nel 1892. Fino ad allora, escludendo il prototipo di barca realizzato nel 1855 da Lambot (Fig. 1.7), gli unici contributi degni di nota sono rintracciabili nella soletta di Joseph Monier (Fig. 1.8), con cui vennero realizzati un serbatoio di acqua (1872) e un ponte pedonale (1875), nelle sperimentazioni condotte negli Stati Uniti da Taddeus Hyatt (1878) (Fig. 1.9) su travi in cemento armato sotto l'azione di sollecitazioni flettenti ed infine da Ernest L. Ransome con il brevetto del 1884 (Figg. 1.10/1.11/1.12/1.13).

Hennebique intuisce le possibilità offerte dal nuovo materiale composito ferro-calcestruzzo e le trasferisce all'interno di un sistema costruttivo innovativo, *capace cioè di eliminare la soluzione di continuità tra struttura in elevazione ed orizzontamento*. In altri termini, uno degli obiettivi perseguiti dai costruttori fino dall'antichità, sintetizzabile nel concetto di *monoliticità struttura-*

le, viene realizzato compiutamente con la continuità del nodo trave-pilastro, dando vita al *telaio iperstatico* (Figg. 1.14/1.15).

Il concetto di iperstaticità è rappresentato dal rapporto fra gradi di libertà di un'asta e quelli vincolari; quando le incognite – le reazioni vincolari – superano in numero le equazioni di equilibrio, la soluzione risulta indeterminata, poiché le reazioni vincolari superano i gradi di libertà. La soluzione del problema chiama in causa un altro fattore, la *determinazione dei valori di deformazione*, caratteristica propria del materiale di cui la struttura è costituita (Figg. 1.16/1.17).

Tutto ciò era già noto agli inizi del XIX secolo, quando viene formulata la *teoria dell'elasticità* come metodo analitico capace di relazionare sforzi e deformazioni nello studio del comportamento dei solidi sotto l'azione dei carichi esterni. Ma il passaggio fondamentale, per il settore dell'ingegneria delle costruzioni, avviene con Hennebique, figura essenziale nel trasporre gli esiti della riflessione scientifica sulla resistenza dei materiali nella realtà fisica della costruzione, dando vita, come detto, ad un procedimento costruttivo innovativo che trasforma radicalmente la tradizionale prassi fondata sull'applicazione del sistema architravato e della costruzione a gravità.

Il sistema Hennebique trova applicazione in Italia nel 1906 (Fig. 1.18), quando l'impresa Porcheddu realizza il primo edificio residenziale in telai in cemento armato. Il carattere innovativo e l'importanza storica accreditata a questo sistema costruttivo, può essere facilmente compresa mediante una semplice osservazione: l'immagine di questo edificio restituisce una realtà che sotto il profilo tecnico appare sostanzialmente immutata al giorno d'oggi.

Gli scheletri strutturali in cemento armato degli edifici in costruzione che connotano gli scenari urbani contemporanei, riferiscono infatti di una sostanziale equivalenza dei modi di costruire e del livello tecnologico oggi in uso (Fig. 1.19). Nessuna particolare trasformazione ha attraversato il mondo della costruzione edile a seguito dell'avvento del sistema intelaiato, mentre questo scarto, sostanziale e radicale, avviene proprio agli inizi del Novecento quando una cultura ed una pratica secolare impostata sullo schema della costruzione muraria portante viene progressivamente sostituita dalle nuove possibilità di continuità strutturale offerte dalla tecnica del cemento armato. Una ricerca, quella di ottenere forme continue e modellabili secondo i principi dell'ottimizzazione strutturale, che la modalità a getto in cemento armato ha permesso concretamente di attuare.

Curioso ed emblematico in questo senso il disegno del brevetto di Carlo Poma del 1893 che nella tavola N° 2 raffigura l'invenzione di strutture sottili in cemento armato correlandole all'immagine di un albero, quale metafora di un organismo naturale che coniuga i concetti di leggerezza a quelli di fluidità-continuità strutturale (Fig. 1.21).

Lo studio delle forme organiche come matrice originaria e al contempo obiettivo del disegno strutturale, si consoliderà qualche decennio dopo i propositi di Poma, tra gli anni Quaranta e Sessanta del Novecento, quando prenderanno avvio le ricerche progettuali di Pierluigi Nervi, Riccardo Moranti, Edoardo Torroja, Felix Candela (Fig. 1.20).

Prima di allora un esempio significativo del rapporto fra disegno strutturale e forma architettonica è rappresentato dal progetto di Auguste Perret per la Chiesa di Notre-Dame de Consolation di Le Raincy, del 1922 (Figg. 1.23/1.24).

Auguste Perret aveva già in precedenza sperimentato l'impiego del c.a. in alcuni suoi progetti, a partire dal più noto edificio su Rue Franklin 5 a Parigi del 1904 (Fig. 1.22), il cui rivestimento in maiolica nasconde la vera matrice costruttiva. Ma il progetto del 1922 costituisce un importante tassello nella *Storia delle costruzioni*, forse più che in quella dell'architettura. Non è infatti tanto l'esito architettonico che distingue l'opera, ma soprattutto la figurazione dell'impianto strutturale che restituisce un'organizzazione spaziale interna del tutto inedita.

Il modello architettonico di riferimento di tale organizzazione è la costruzione gotica (Fig. 1.25): smaterializzazione dell'involucro; luce e colore delle vetrate policrome; sviluppo in altezza; rigore ed essenzialità della matrice statico-costruttiva. Il dato innovativo è invece rappresentato dai rapporti dimensionali fra le proporzioni delle sezioni strutturali e quelli dell'estensione del-

le campate e dello sviluppo in altezza dei pilastri. Un rapporto dimensionale che poteva essere ottenuto solo attraverso un procedimento tecnico che garantisse una continuità strutturale fra piedritto ed architrave (nell'accezione della struttura trilitica), ovvero mediante l'adozione di un nuovo schema, quello del telaio che assicura l'indefornabilità (teorica) del nodo pilastro-trave. Lo storico problema dell'eliminazione della spinta delle costruzioni voltate a conci, viene così risolto, trasformando l'arco in una *trave curva*.

Capitolo 2

Arco e trave curva

La nota formulazione di Leonardo del concetto di arco, “una fortezza causata da due debolezze” (R. Marcolongo, *Studi Vinciani*, VII, p. 237, Napoli, 1937), indica, nella sua essenzialità, il principio teorico che governa il funzionamento strutturale di un arco.

Con arco intendiamo una forma costruttiva a sviluppo curvilineo, governata da diversi rapporti fra freccia e luce e costituita da parti – conci – che si sostengono per mutuo contrasto sotto l’azione del proprio peso e degli eventuali carichi supplementari che insistono sulla curva estradossale (Fig. 2.1). Dunque, secondo questa accezione, la forma primaria di un arco a profilo regolare è rappresentata da due solidi curvilinei aventi il medesimo raggio di curvatura e di uguale sviluppo che si sostengono per mutuo contrasto. Nell’ipotesi di assenza di attrito fra le facce dei due solidi in corrispondenza della superficie di contatto e di una perfetta complanarità tra le stesse, il mutuo contrasto fra le parti può essere schematizzato come una forza che agisce perpendicolarmente alle facce stesse e dunque in direzione orizzontale (Fig. 2.2).

Immaginando di eliminare una delle due parti, per garantire l’equilibrio del solido alla traslazione orizzontale, è necessario che si espliciti una reazione almeno equivalente a quella instabilizzante, comunemente definita con il termine “spinta”. Tale impostazione, nella quale non entra in gioco la natura del materiale ma solo la geometria, la determinazione dei valori delle reazioni alle imposte dell’arco e, conseguentemente, la valutazione delle condizioni di stabilità sono indipendenti dalla forma delle parti componenti, in quanto le stesse condizioni valgono anche nel caso di segmenti rettilinei disposti a contrasto con facce piane tra loro ortogonali, come nel caso di coperture spingenti a falde inclinate (Figg. 2.3/2.4).

Dunque, nel caso puramente teorico di assenza di attrito, il sistema non è equilibrato in quanto costituito da due carrelli ed una asta, con un grado di libertà e un centro di rotazione; per ottenere una struttura staticamente determinata è indispensabile la trasformazione di almeno un vincolo da semplice appoggio a cerniera.

A partire da qui prende corpo la distinzione fra arco a conci e trave curva, nella divisione fra una struttura capace di sopportare solo azioni di semplice compressione e quella invece capace di “assorbire” gli eventuali stati tensionali a trazione.

Lo studio del comportamento degli archi a conci al fine di definirne un corretto dimensionamento strutturale viene indagato compiutamente a partire dal XVII secolo. I testi di Philippe de La Hire, *Traité de la coupe des pierres* (Trattato della costruzione in pietra) del 1687 e il *Traité de mécanique* (Trattato di meccanica) del 1695, forniscono una prima rappresentazione dei meccanismi di collasso degli archi e delle volte a conci e dei relativi criteri di dimensionamento (Fig. 2.5).

Le considerazioni di de La Hire si fondano primariamente sull’osservazione dei fenomeni, *degli effetti*, poiché gli strumenti matematici del tempo non consentivano ancora di giungere ad una spiegazione analitica del funzionamento strutturale e alla relativa determinazione degli stati di sforzo.

Un apporto importante nel processo di avanzamento delle conoscenze in questo settore avviene in occasione degli studi condotti dal fisico-matematico Giovanni Poleni, coadiuvato dall'architetto Luigi Vanvitelli, per il restauro della cupola romana di San Pietro (Figg. 2.6/2.7/2.8). La novità introdotta dal Poleni nel fornire una spiegazione dell'insorgenza delle lesioni sulla cupola e dei metodi da adottare per il restauro, è rappresentato dall'impiego della *catenaria*, figura che riproduce in negativo il funzionamento di un arco a conci (Fig. 2.9).

Il ragionamento è semplice e si fonda su un criterio analogico: l'arco è una struttura che si sostiene per mutuo contrasto dei conci che sono dunque soggetti a soli sforzi di compressione; la catenaria è invece la forma che una fune costituita da anelli (o sfere) assume naturalmente sotto l'azione del peso proprio. Supponendo l'assenza di attrito fra le parti componenti (anelli o sfere), tale curva è la rappresentazione ideale di una struttura soggetta solo a trazione. Dunque per analogia inversa, se si stabilisce una corrispondenza in numero ed una proporzione in peso, fra i conci dell'arco e i relativi anelli o sfere della catenaria, data la luce, lo sviluppo dell'arco e le condizioni al contorno (i vincoli), è teoricamente possibile stabilire quale sia la curva ideale di un arco soggetto a sola compressione attraverso una semplice operazione di sovrapposizione grafica fra l'arco e la catenaria ribaltata (Fig. 2.10).

La catenaria, capovolta, diventa il luogo geometrico dei centri di pressione (linea di pressione) ovvero la linea che congiunge i punti in cui agiscono gli sforzi di compressione fra i conci. L'equilibrio è quindi garantito solo a condizione che la linea delle pressioni sia interna alla sezione strutturale dell'arco (ottimale se compresa nel terzo medio della sezione); se invece tale curva fuoriesce da tale dominio, la struttura risulta soggetta a sforzi di trazione che possono inficiare la stabilità complessiva e l'insorgenza di fessurazioni per distacco (denominate cerniere). La condizione critica limite di un arco a conci prima che si inneschi un cinematismo di collasso (così come raffigurato da de La Hire) è quello della formazione di tre cerniere, ovvero dei tre punti in cui sono presenti stati tensionali a trazione (Figg. 2.11/2.13/2.14/2.15/2.16).

La determinazione della curva delle pressioni è ottenibile attraverso metodi analitici o statico-grafici (il più noto è quello pubblicato da E. Méry della prima metà dell'Ottocento) che riportano la soluzione del problema entro un dominio nel quale le condizioni di stabilità sono in primis determinate da ragioni di ordine geometrico, relegando a margine le considerazioni sulle caratteristiche del materiale se non per la elementare condizione che resista a sforzi di compressione.

Tale impostazione è la base dell'attuale indirizzo seguito nei criteri di verifica degli archi murari che, dopo una lunga stagione in cui si è privilegiato un approccio basato sull'applicazione della *teoria dell'elasticità*, ha ritrovato nella formulazione di Jacques Heyman del calcolo a "rottura", fondato sull'*analisi limite*, un definitiva affermazione.

Diverso è invece il caso di elementi strutturali curvi monolitici, ovvero costituiti da un unico pezzo, a cui associamo il termine di *trave curva* (Figg. 2.17/2.18/2.19). La limitazione imposta per l'arco a conci di sopportare azioni di sola compressione non deve necessariamente essere rispettata, poiché la sezione strutturale e le caratteristiche fisico-meccaniche del materiale possono garantire stati tensionali a trazione.

Dalla ricerca delle sole condizioni di equilibrio nella verifica di stabilità di un arco a conci si passa alla determinazione dei valori di deformazione in rapporto all'entità degli sforzi che sollecitano la struttura. Tale relazione, *sforzo-deformazione*, è il presupposto fondativo su cui prende forma la meccanica dei solidi a partire dall'essenziale contributo fornito da Louis Navier con la prima formulazione matematica della *teoria dell'elasticità* (1821).

La soluzione progettuale impiegata da Perret nel progetto della Chiesa di Notre-Dame de Consolation di Le Raincy, con la conformazione delle travi a sezione variabile a profilo curvilineo, è coerente a tale formulazione e segue l'andamento degli stati tensionali indotti dalla sollecitazione flessionale. La snellezza delle sezioni strutturali è ottenuta sfruttando la mutua collaborazione fra acciaio-calcestruzzo – un materiale composito con capacità di resistenza a trazione e compressione – senza sottostare alle condizioni geometriche imposte dalla linea delle pressioni.

Capitolo 3

Cupole e gusci sottili

Un analogo intendimento – quello della *continuità strutturale* – è rintracciabile anche prima dell'avvento della tecnologia del conglomerato cementizio armato e delle formulazioni scientifiche che ne consentivano il calcolo.

Un caso esemplare è rappresentato dalla cupola del Mausoleo di Teodorico a Ravenna (VI sec.) (Figg. 3.1/3.2). Opera eccelsa per rigore e nettezza nell'applicazione dei principi della costruzione in pietra che consentono di ottenere un'architettura essenziale, ma al contempo di notevole significato espressivo.

La cupola è costituita da un grande monolite in pietra delle dimensioni in pianta di circa 10 metri, dello spessore di 1 metro e del peso di circa 300 tonnellate; il profilo della cupola è alquanto ribassato ma la muratura d'ambito sottostante non presenta contrafforti o ispessimenti per contenere le eventuali azioni spingenti. La ricerca formale basata sull'*ottimizzazione strutturale* ritrova nell'impiego di una cupola monolitica la risposta cercata: la pietra, anche se con prestazioni ridotte, consente di ottenere *continuità strutturale* e di contenere gli stati tensionali a cui è soggetta, in misura sufficiente per ridurre le azioni spingenti lungo l'anello murario. Inoltre la cupola presenta dodici pinnacoli – ovvero delle masse localizzate estradossali – che hanno il compito di incrementare la forza peso e di ridurre conseguentemente l'incidenza della componente orizzontale della spinta, diminuendo l'angolo di inclinazione della risultante rispetto alla verticale. Tale soluzione è quella ampiamente impiegata nella costruzione gotica in combinazione con l'impiego di archi di scarico che in successione gerarchica, dall'alto verso il basso, guidano il percorso seguito dai flussi delle isostatiche di compressione. Il profilo ogivale degli archi del modello gotico segue l'ordine geometrico stabilito dal principio della catenaria – figura che si discosta parzialmente da quella della parabola – per contenere gli effetti spingenti e dunque per ottenere una smaterializzazione dello spazio con una riduzione delle sezioni strutturali dei piedritti (Figg. 3.3/3.4/3.5/3.6/3.7).

L'intendimento perseguito dai costruttori gotici nella realizzazione delle cattedrali – *verticalità, ottimizzazione strutturale, smaterializzazione dello spazio* – ed ottenuta con l'impiego di tre elementi – l'arco ogivale, l'arco rampante e i pinnacoli – risulta essere l'espressione somma di un principio costruttivo basato sul contenimento delle masse strutturali, introducendo una forte discontinuità rispetto a quanto rappresentato dall'architettura muraria dei secoli precedenti, a partire da quella romana (Figg. 3.8/3.9/3.10).

Il contenimento delle azioni spingenti dell'arco romano viene infatti generalmente risolto aumentando la massa del piedritto – che diventa contrafforte – al fine di garantire l'equilibrio del solido al ribaltamento sotto l'azione della spinta (Figg. 311/3.12). La riduzione degli effetti spingenti dell'arco viene perseguito anche con l'impiego di una tecnica a getto in conglomerato cementizio (*caementum romano*) che consente di avvicinarsi ad un comportamento teorico di tipo monoliti-

co e quindi di assorbire – nella misura compatibile con la resistenza del materiale a trazione – gli eventuali stati tensionali generati dalle sollecitazioni flettenti.

Il Pantheon (Figg. 3.13/3.14), la cui cupola è generata da una sfera di 43 metri di diametro, è uno degli esempi più significativi della capacità di organizzare strutture di grandi dimensioni attraverso un corretto bilanciamento delle masse in gioco. La cupola è schematizzabile come una successione di anelli che si sviluppano lungo i paralleli con un decremento crescente dei pesi al fine di ridurre il carico totale sulle strutture sottostanti, dello spessore medio di circa 7.00 metri e costituite da archi di scarico, contrafforti e diaframmi murari pensati per fornire una migliore risposta agli effetti instabilizzanti prodotti dalla spinta e allo stesso tempo per ridurre le sollecitazioni a terra.

Lo spazio ipogeo della cupola ogivale della tomba a *tholos* di Atreo a Micene (Figg. 3.15/3.16) è ottenuto invece con la tecnica di sovrapporre filari di conci disposti sull'orizzontale e a sbalzo (di una quantità inferiore a 1/3 dello spessore del concio) sul corso sottostante. Una tipologia costruttiva, denominata *falsa volta*, che permette di scavalcare il problema della determinazione delle azioni spingenti e del relativo dimensionamento dei piedritti, in quanto le azioni sono – sotto il profilo teorico – solo di peso, dunque verticali (Figg. 3.19/3.20/3.21/3.22/3.23). Nelle aree della Mesopotomia e della zona del Nilo è attiva invece una tecnica ad *archi inclinati* che ugualmente elimina il problema della spinta con la disposizione dei corsi su un piano inclinato a partire da una struttura di appoggio, generalmente costituita da un timpano murario (Figg. 3.17/3.18).

Ma la più raffinata e sorprendente tra le tecniche murarie storiche nella realizzazione delle strutture voltate e cupolate, si crede essere la *tecnica tabicada*, sviluppatasi nel corso dell'ottocento in Catalogna ma di origini risalenti al XV secolo. Le primarie specificità sono rintracciabili in questi aspetti: sezioni strutturali di esiguo spessore (mediamente di 10 cm) costituite da almeno tre strati di piastrelle disposte di piatto e murate con cemento rapido o gesso per il primo strato e cemento per i restanti; possibilità di essere realizzate senza impiego di centine sfruttando la rapidità di presa del legante del primo strato; velocità di esecuzione; leggerezza. A tali caratteristiche si aggiunge poi una ulteriore specificità di ordine strutturale in quanto i profili delle volte o delle cupole così realizzate, in ragione dell'esiguo spessore, difficilmente possono seguire l'andamento della curva delle pressioni e pertanto risultano capaci di assorbire stati tensionali a trazione di entità non trascurabile.

Emblematico il caso della cupola della cattedrale di St. John the Divine di New York, realizzata in soli tre mesi da Rafael Guastavino Jr. nel 1908, che copre uno spazio di 40 metri di diametro con uno spessore strutturale variabile dai tre corsi (12 cm circa) in sommità fino a sei corsi alle imposte (20 cm circa), con un rapporto spessore-ampiezza è circa 1/200 (Figg. 3.24/3.25/3.26/3.27).

Ciò porta a considerare tale tipologia inscrivibile nella categoria delle strutture a *guscio sottile a doppia curvatura*, che presentano un comportamento di tipo membranale, caratterizzato da stati tensionali di compressione, di trazione e di taglio. L'organizzazione costruttiva a strati può effettivamente fornire un contributo significativo, probabilmente non esclusivo, per ridurre gli sforzi di trazione che si sviluppano nella fascia inferiore della cupola. Un breve annotazione sulle caratteristiche salienti che descrivono il funzionamento dei gusci sottili servirà a comprendere meglio il senso di tale affermazione.

La cupola è geometricamente definibile come una superficie sinclastica non sviluppabile, ovvero con curvatura, che può variare per raggio, sempre concava; una superficie curva è invece sviluppabile se può essere trasferita su un piano senza variazioni di forma o soluzioni di continuità (Fig. 3.28).

Ciò costituisce già una sostanziale differenza di comportamento strutturale con una volta cilindrica, assoggettabile invece a quella di un arco traslato lungo le generatrici. Se dunque si considera una superficie emisferica come costituita da una griglia uniforme di meridiani e paralleli, soggetta ad un carico assialsimmetrico, saranno questi ultimi ad assolvere al ruolo cerchiante, opponendosi ad una possibile deformazione in senso radiale della struttura, in termini di assorbimento delle sollecitazioni di trazione che tenderebbero ad "aprire" la cupola stessa.

L'inversione dello stato di compressione a quello di trazione è individuato dal piano che seziona la cupola con un angolo di circa 52° rispetto alla verticale (codificato già a partire da metà dell'Ottocento dallo studio di W.J.M. Rankine, del 1858) per cui sono i paralleli disposti sulla fascia inferiore ad essere interessati dagli sforzi di trazione.

Se si ipotizza una distribuzione delle tensioni costante lungo lo spessore della struttura, condizione prevista per assenza di azioni flettenti – ad esclusione delle condizioni di vincolo che possono generare, come nel caso di incastro alla base, stati tensionali aggiuntivi indotti dal contenimento delle possibili deformazioni – appare plausibile ritenere che la presenza di più strati disposti sul piano della sollecitazione possano esercitare una azione benefica all'assorbimento di tali tensioni in quanto, oltre alla resistenza a trazione dei giunti di testa, di entità ridotta, si associa quella tangenziale prodotta dall'adesione legante-laterizio su tutta la superficie del laterizio stesso.

Un contributo non del tutto trascurabile, come evidenziato dai test svolti da Guastavino che riportano un valore di circa 20 kg/cmq. Anche in merito alle azioni taglianti, la disposizione a strati con i giunti sfalsati, consente di sfruttare le tensioni tangenziali che si sviluppano nell'interfaccia legante-laterizio e che riducono i possibili scorrimenti relativi sul piano della struttura.

La metafora di tale concetto è rappresentata dalla pagine di un libro che possono liberamente scorrere le une sulle altre per mancanza di aderenza sul piano del foglio; inserendo una grappa trasversale o incollandole reciprocamente, la resistenza a taglio per flessione viene conseguentemente aumentata (Fig. 3.29). Tale considerazione, espressione di una valutazione qualitativa del fenomeno, non è ovviamente sufficiente a sostenere la tesi che tali tipologie sono staticamente sicure per effetto della *coesività*, ma al contempo utile ad evidenziare come l'apparecchio a strati costituisca, per determinate forme costruttive, una specificità che influisce anche sul comportamento di tali strutture.

La *forma* e le *caratteristiche meccaniche del materiale* sono i due fattori essenziali che assicurano le doti di resistenza e rigidità proprie dei gusci sottili; entrambi non sono facilmente applicabili nel caso delle cupole murarie tradizionali, mediamente di elevato spessore rispetto alla luce, con scarsa resistenza a trazione e per forma (Figg. 3.30/3.31/3.32/3.33/3.34). L'unica eccezione nel panorama delle strutture murarie in cui invece appare corretta l'applicazione della teoria membranale è pertanto rappresentata dalla *cupola tabicada*. Non vi sono infatti altri esempi nella storia delle costruzioni voltate realizzate a conci che possano essere comparate alla cupola di New York, in termini di rapporti dimensionali fra lo spessore della sezione strutturale e la luce coperta.

Solo con l'avvento della tecnica a getto in c.a., a partire dalla cupola della Jarhunderhalle di Max Berg del 1913 (Fig. 3.35), di 65 metri di ampiezza, prenderà avvio la sperimentazione delle superfici laminari curve a cui si legano le mirabili strutture progettate nel corso degli anni Cinquanta e Sessanta del Novecento da Pierluigi Nervi, Edoardo Torija, Felix Candela (Figg. 3.36/3.38/3.39/3.40/3.41/3.42/3.43). Ma come detto, il dominio di appartenenza è quello della *meccanica del continuo*, di diversa natura e concezione.

